

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Sistema De Pago Por Uso (*Road Pricing / Road Charging*) En Infraestructuras Viarias, Contexto Europeo y Aplicación Al Mercado Español, Estudio Económico y Financiero y Análisis Integral Del Ciclo De Gestión De La Red De Carreteras En España

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

MÁSTER EN INGENIERÍA DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS

Ali Saleh

Dirigido por

Don. José Luis López Oliete

Madrid, 2026

Trabajo Fin de Máster

Autor del Trabajo: Ali Saleh

Trabajo Fin de Máster

Autor del Trabajo: Ali Saleh

Agradecimientos

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, mi padre Akram Saleh, mi madre Mona Ghanem, mis hermanas Rana, Roula, Zainab y Rabab Saleh y mi primo Wafi Saleh por su apoyo incondicional, por creer en mí en todo momento y por darme siempre la oportunidad, el respaldo y los recursos necesarios para crecer, tanto a nivel personal como profesional. Sin su confianza, su sacrificio y su acompañamiento constante, este trabajo y el camino recorrido hasta aquí no habrían sido posibles.

Mi agradecimiento también al equipo de Business & Investor Advisory (BIA) de Arup en Madrid, por el entorno de excelencia profesional, la generosidad en la transferencia de conocimiento y el compromiso real con mi desarrollo. Gracias por no escatimar nunca en mi formación, exigencia constructiva y oportunidades.

Quiero agradecer de manera muy especial a mi tutor José Luis López Oliete, por su cuádruple y enriquecedor rol como profesor, tutor, amigo y compañero de trabajo. Por formarme con criterio y cariño, acompañarme con confianza y exigencia, y por darme oportunidades reales para crecer, aprender y asumir responsabilidades.

También darles las gracias a todos los profesores que desde que comencé mi formación me han aportado una visión sobre la importancia de creerse en uno mismo y los valores que debemos tener nuestra generación. Siempre habéis estado conmigo y nos habéis contado lo que os ocurría día a día en vuestros trabajos. Creo que no hay mejor formación que esa.

Por último, extiendo mi agradecimiento a todas aquellas personas que, de forma directa o indirecta, han contribuido a la realización de este proyecto y a mi crecimiento durante esta etapa, tanto en el ámbito profesional como en el personal. Gracias a quienes han estado presentes en los momentos más exigentes, ofreciendo apoyo, comprensión y ánimo cuando el esfuerzo y la dedicación requerían sacrificios adicionales. En especial, agradezco la paciencia y el acompañamiento de quienes supieron entender mis circunstancias y ausencias prolongadas, compartir la carga en los momentos difíciles y sostenerme cuando el camino resultó más intenso, haciendo posible llegar hasta el final de esta etapa con aprendizaje, madurez y visión de futuro.

Trabajo Fin de Máster

Autor del Trabajo: Ali Saleh

Resumen

La financiación y gestión de las infraestructuras viarias constituye uno de los grandes retos a los que se enfrentan actualmente los sistemas de transporte europeos. La combinación entre el crecimiento continuo de la movilidad, las necesidades de conservación de redes cada vez más extensas y los objetivos de sostenibilidad ambiental está poniendo en cuestión los modelos tradicionales de financiación basados exclusivamente en recursos públicos.

En este contexto, el presente Trabajo Fin de Máster surge de una pregunta aparentemente sencilla, pero con profundas implicaciones técnicas, económicas y políticas: ¿por qué España no ha implantado un sistema de pago por uso mientras otros países europeos lo han hecho con éxito?

Para responder a esta cuestión, el trabajo desarrolla un análisis comparado de las principales experiencias europeas de *Road User Charging* (RUC), prestando especial atención a Alemania, Suiza, Austria y Portugal. A partir de una revisión estructurada y crítica de la literatura académica, la normativa europea y la documentación institucional, se analizan las dimensiones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ambientales y legales que condicionan la implantación de estos sistemas, la normativa europea y la experiencia internacional, se estudian las dimensiones políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ambientales y regulatorias que condicionan la implantación de estos sistemas.

Los resultados muestran que la ausencia de un sistema de pago por uso en España no se explica por falta de tecnología ni por inviabilidad económica. Por el contrario, la comparación europea evidencia que los principales obstáculos son de naturaleza institucional y social: ausencia de una estrategia estable, falta de una narrativa pública coherente, resistencia asociada a la percepción de doble imposición y carencia de una estructura operativa equivalente a organismos especializados como Toll Collect en Alemania.

Como contribución aplicada, el trabajo propone una metodología para evaluar la viabilidad de un piloto basado en tecnología GNSS en el corredor A-2. Mediante la construcción de un modelo de demanda, estimaciones de costes de implantación (CapEx), costes de operación (OpEx), proyecciones de ingresos y análisis coste-beneficio, se obtiene una primera aproximación cuantitativa a la viabilidad económica del sistema en el contexto español.

Los resultados indican que el modelo presenta condiciones favorables de sostenibilidad económica y tecnológica, así como una elevada alineación con los principios europeos de financiación de infraestructuras y con diversos Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente aquellos relacionados con infraestructura resiliente, movilidad sostenible, acción climática y fortalecimiento institucional. No obstante, la sostenibilidad social e institucional continúa representando el principal desafío para una eventual implantación a gran escala.

La principal contribución del trabajo consiste en cubrir un vacío existente en la literatura: la ausencia de estudios aplicados que analicen cómo podría implantarse un sistema de pago por uso en España desde una perspectiva integrada, combinando análisis económico, institucional, tecnológico y social. El estudio concluye que la implantación de un sistema de pago por uso en España es técnicamente posible,

potencialmente sostenible y coherente con los objetivos europeos de movilidad, aunque exige una estrategia gradual, una arquitectura institucional específica y una política de comunicación capaz de construir legitimidad y aceptación a largo plazo.

Trabajo Fin de Máster

Autor del Trabajo: Ali Saleh

Abstract

The financing and management of road infrastructure has become one of the major challenges facing European transport systems. Increasing mobility demand, growing maintenance requirements and ambitious sustainability targets are placing significant pressure on traditional funding models based solely on public budgets.

This Master's Thesis originates from a seemingly simple yet highly relevant question: why has Spain not implemented a road user charging system while several European countries have successfully done so?

To address this issue, the study develops a comparative analysis of the main European Road User Charging (RUC) experiences, focusing particularly on Germany, Switzerland, Austria and Portugal. Through a systematic review of academic literature, European regulations and international case studies, the research examines the political, economic, social, technological, environmental and regulatory dimensions that influence the implementation of road pricing systems.

The findings suggest that the absence of a nationwide road user charging scheme in Spain cannot be explained by technological limitations or economic infeasibility. Instead, the comparative analysis shows that the key barriers are institutional and social in nature: lack of a stable national strategy, weak public legitimacy, strong perceptions of double taxation, and the absence of a dedicated operational structure comparable to organizations such as Germany's Toll Collect.

As an applied contribution, the thesis proposes a methodology to evaluate a GNSS-based pilot project on the A-2 corridor. By combining traffic demand modelling, CapEx and OpEx estimation, revenue projections and cost-benefit analysis, the study provides a first quantitative assessment of the potential viability of such a system in the Spanish context.

The base scenario achieves a Net Present Value (NPV) of approximately €22.5 million, an Internal Rate of Return (IRR) close to 16%, and a Benefit-Cost Ratio (BCR) of 1.44.

The results indicate that the proposed model achieves favourable levels of economic and technological sustainability while showing strong alignment with European infrastructure funding principles and several United Nations Sustainable Development Goals (SDGs), particularly those related to resilient infrastructure, sustainable mobility, climate action and institutional governance. However, institutional capacity and social acceptance remain the most significant challenges for large-scale implementation.

The main contribution of the thesis lies in addressing a significant gap in the existing literature: the lack of applied studies examining how a road charging system could realistically be implemented in Spain through an integrated framework that combines economic, institutional, technological and social dimensions. The study concludes that introducing road user charging in Spain is technically feasible, potentially sustainable and broadly consistent with European sustainability objectives. Nevertheless, its long-term success depends on the development of a stable governance structure, public legitimacy and a gradual implementation strategy.

Trabajo Fin de Máster

Autor del Trabajo: Ali Saleh

Índice

1. Introducción 1
1.1 Motivación de la investigación 1
1.2 Antecedentes y evolución del marco normativo europeo 6
1.3 Documentos normativos nacionales y de la Unión Europea 12
1.4 Experiencias europeas y nacional en sistemas de pago por uso 17
1.4.1 Suiza 18
1.4.2 Austria 18
1.4.3 Alemania 18
1.4.4 República Checa 19
1.4.5 Eslovaquia 20
1.4.6 Polonia 20
1.4.7 Eslovenia 20
1.4.8 España 21
1.4.9 Portugal 27
1.4.10 Francia 28
1.5 Tecnologías empleadas en los sistemas de cobro electrónico de peajes 30
2. Objetivos del Trabajo 38
2.1 Planteamiento general de los objetivos 38
2.2 Objetivo general 38
2.3 Objetivos específicos 38
3. Estado del arte 40
3.1 Introducción 40
3.2 Dimensión político institucional y regulatoria 44
3.3 Dimensión económica y económico-financiera 59
3.4 Dimensión tecnológica y operativa 74
3.5 Dimensión Social y territorial 82
3.6 Dimensión ambiental 93
3.7 Limitación en la literatura y preguntas de investigación 96

3.8 Análisis DAFO del modelo de pago por uso basado en GNSS en España 98

4. Metodología de investigación 101

4.1 Diseño general de la investigación: fases y articulación 102

4.2 Implementación del marco analítico PESTEL como instrumento de comparación internacional 103

4.3 Evaluación multicriterio de tecnologías de cobro electrónico 104

4.3.1 Definición de criterios de evaluación 105

4.3.2 Ponderación de criterios y procedimiento de evaluación 106

4.3.3 Resultados de la evaluación y justificación de la referencia tecnológica 106

4.4 Metodología para el análisis de viabilidad técnica y económico-financiera del piloto en el corredor A-2 108

4.4.1 Metodología de caracterización de la demanda 108

4.4.2 Estructura de costes del sistema: CAPEX y OPEX 109

4.4.3 Escenarios tarifarios y estimación de ingresos 111

4.4.4 Análisis coste-beneficio y evaluación económico-financiera 111

4.4.5 Análisis de sensibilidad 112

4.4.6 Análisis de riesgos estructurales 113

4.5 Fuentes de información y protocolo de tratamiento de datos 113

4.6 Alcance del análisis y limitaciones metodológicas 114

5. Caso de estudio: estimación del coste de implantación de un piloto GNSS en el corredor A-2 116

5.2 Criterios de selección del corredor A-2 116

5.2.1 Delimitación precisa del corredor de análisis para la propuesta piloto 117

5.2.2 Alcance del piloto: primera fase centrada en vehículos pesados 118

5.2.3 Estructura del análisis 119

5.3 Arquitectura del sistema GNSS propuesto para el piloto 119

5.3.1 Principios de diseño y modelo operativo de referencia 119

5.3.2 Bloque 1: Equipo a bordo (OBU) 120

5.3.3 Bloque 2: Sistema central de gestión (*back office*) 121

5.3.4 Bloque 3: Infraestructura de *enforcement* 123

5.3.5 Bloque 4: Integración con registros administrativos y con el marco EETS 124
5.4 Caracterización de la demanda del corredor 125
5.4.1 Fuentes de datos y procedimiento de obtención 125
5.4.2 Segmentación del corredor y datos de IMD por tramo 126
5.4.3 Cálculo de la demanda base: vehículos-kilómetro anuales 128
5.4.4 Proyección de la demanda a lo largo del horizonte de análisis ...129
5.4.5 Estimación del efecto de la señal precio sobre la demanda: elasticidades.....130
5.4.6 Análisis del riesgo de desvío de tráfico hacia la R-2 132
5.5 Estimación de costes de implantación: CAPEX 134
5.5.1 Estructura del modelo de costes de inversión 134
5.5.2 Componente 1: sistema central de gestión (back office) 134
5.5.3 Componente 2: equipos a bordo (OBU) 135
5.5.4 Componente 3: infraestructura de *enforcement* (pórticos de control) 137
5.5.5 Componente 4: integración con registros administrativos y sistemas existentes 137
5.5.6 Componente 5: puesta en marcha, pruebas, formación y contingencias.....138
5.5.7 CAPEX total: síntesis por componente y escenario 139
5.5.8 Reinversiones tecnológicas dentro del horizonte de análisis 140
5.6 Estimación de costes operativos: OPEX 141
5.6.1 5.5.1 Naturaleza y estructura del modelo de costes operativos .141
5.6.2 Componente 1: operación del sistema central de gestión 141
5.6.3 Componente 2: comunicaciones y conectividad 142
5.6.4 Componente 3: atención al usuario 143
5.6.5 Componente 4: *enforcement* y coordinación institucional 143
5.6.6 Componente 5: gestión del fraude y del impago 144
5.6.7 OPEX total: síntesis por componente, escenario y período de análisis 145
5.6.8 Ratio coste de recaudación sobre ingresos brutos 146
5.7 Estimación de ingresos potenciales: escenarios tarifarios y proyecciones.....147

5.7.1 Estructura tarifaria de referencia 147
5.7.2 El modelo econométrico como base de la proyección de ingresos 149
5.7.3 Definición de los cuatro escenarios de ingresos 149
5.7.4 Proyección de ingresos por escenario: resultados 151
5.7.5 Ingresos netos: deducción del coste de recaudación 152
5.7.6 Análisis de la R-2 como alternativa de itinerario y su efecto sobre los ingresos 152
5.7.7 Comparación ingresos versus costes: señal preliminar de viabilidad 153
5.8 Análisis coste-beneficio: VAN, TIR y ratio B/C 155
5.8.1 Clasificación y cuantificación de los beneficios 155
5.8.2 Clasificación y cuantificación de los costes 156
5.8.3 Resultados del análisis coste-beneficio por escenario 158
5.8.4 Robustez de los resultados ante variaciones en la tasa de descuento 159
5.8.5 Período de recuperación de la inversión 160
5.8.6 Interpretación de los resultados 160
5.9 Análisis de sensibilidad 161
5.9.1 Sensibilidad a la tasa de descuento 162
5.9.2 Sensibilidad individual a las variables clave del modelo 163
5.9.3 Análisis de las hipótesis de redistribución de tráfico hacia la R-2 165
6. Sostenibilidad 168
6.1 Introducción y objetivos 168
6.2 Necesidad de un modelo sostenible de financiación viaria 169
6.3 Principios aplicables al pago por uso 169
6.3.1 Principio usuario-pagador 169
6.3.2 Principio de quien contamina paga 169
6.3.3 Principio de equidad 169
6.3.4 Principio de transparencia 170
6.4 Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) 170
6.4.1 ODS 9: Industria, innovación e infraestructura 171
6.4.2 ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles 172

6.4.3 ODS 12: Producción y consumo responsables 172
6.4.4 ODS 13: Acción por el clima 173
6.4.5 ODS 16: Paz, justicia e instituciones sólidas 173
7. Conclusiones 175
Referencias 182
Anexo I Análisis del Corredor y Cálculo de Crecimiento de Tráfico 186
1. Necesidad Del Estudio – Análisis De Tráfico 187
2. Propuesta de un sistema de pago por uso en España 193
3. Ejemplo de un Modelo Tarifario Propuesto 194
4. Matriz de Riesgos 197
5. Corredor Propuesto 200
6. Configuración Local Relacionada con el Tráfico 206
6.1 Ámbito Geográfico y Entorno Local - Actividades Industriales y Logísticas en el Área 206
7.2 Planes nacionales de transporte - Nuevos planes de infraestructura 208
6.2.1 Puerto seco de Marchamalo en Guadalajara 208
6.2.2 Autopista ferroviaria Azuqueca-Valladolid-Burgos-Júndiz 210
6.2.3 Terminal ferroviaria de Madrid-Abroñigal 211
6.3 Rendimiento del transporte de mercancías en España 213
6.3.1 Transporte nacional e internacional de mercancías 213
6.4 Carreteras principales en el entorno del corredor A-2 215
6.4.1 Radial R-2 (Madrid-Guadalajara) 216
6.5 Tendencias del mercado de combustibles alternativos y transición energética 219
6.6 Perfil de Tráfico – División del Tramo de la A-2 221
6.7 Perfil de Tráfico – Histórico de la IMD 227
6.8 Perfil de Tráfico – Histórico de Veh-km 230
7. Desarrollo de la metodología 233
7.1 Análisis socioeconómico 233
7.2 Factores que impulsan el crecimiento de tráfico de los vehículos pesados 236
7.2.1 Producto Interior Bruto (PIB) de España 236
7.2.2 Población y evolución demográfica de España 238

7.3 Criterios de selección de variables explicativas del tráfico de pesados en el modelo econométrico 239
7.3.1 Modelo 1: PIB Real + Dummy 239
7.3.2 Modelo 2: Población + Dummy 240
7.3.3 Modelo 3: PIB + Población + Dummy 241
7.3.4 Clasificación de vehículos pesados 243
7.3.5 Propuesta de estructura tarifaria 245
7.4 Caso Base 246
7.5 Caso Pesimista 250

Índice de Tablas

Tabla 1. Resumen de las experiencias nacionales en el ámbito de pago por uso. 29
TablA-2 Comparación político-institucional: Europa vs España. 58
Tabla 3 Comparación económico-financiera: Europa vs España. 72
Tabla 4 Comparación tecnológica-operativa: Europa vs España. 81
Tabla 5 Comparación social y territorial: Europa vs España. 92
Tabla 6 Comparación ambiental: Europa vs España. 95
Tabla 7. Resumen del análisis DAFO. 100
Tabla 8: Estructura del diseño de la investigación. 102
Tabla 9: Matriz de evaluación multicriterio de tecnologías de cobro electrónico para el caso español. 106
Tabla 10: Síntesis de los componentes del sistema GNSS propuesto para el piloto en el corredor A-2. 125
Tabla 11: Datos de intensidad media diaria (IMD) por subtramo y categoría de vehículo. Corredor A-2, M-50 a Ledanca. 127
Tabla 12: Vehículos-kilómetro anuales por subtramo y categoría de vehículo. Demanda base (año 0 del análisis). 128
Tabla 13: Proyección de la demanda de vehículos pesados al año 20 del horizonte de análisis, por escenario de crecimiento. 130
Tabla 14: Escenarios de demanda de vehículos pesados con señal precio, sobre el valor de demanda base del año 0. 131
Tabla 15: Estimación del CAPEX del piloto GNSS en el corredor A-2, por componente y escenario (millones de euros, precios constantes). 139
Tabla 16: Estimación del OPEX anual del piloto GNSS en el corredor A-2, por componente, escenario y fase de operación (millones de euros, precios constantes). 145
Tabla 17: Ratio coste de recaudación sobre ingresos brutos, por escenario y fase de operación. 147
Tabla 18: Proyección de ingresos anuales del piloto GNSS en el corredor A-2 por escenario (millones de euros, precios constantes). 151
Tabla 19: Flujos de caja netos del piloto GNSS en el corredor A-2: escenario base (millones de euros, precios constantes, tasa de descuento 5%). 157
TablA-20: Indicadores de viabilidad del piloto GNSS en el corredor A-2 por escenario 158
TablA-21: Sensibilidad del VAN del escenario base a la tasa de descuento 159
TablA-22: Análisis de sensibilidad univariante del VAN del piloto GNSS en el corredor A-2 163
TablA-23: Análisis de tornado - impacto sobre el VAN del escenario base (+22,5 M€) por variable. 164
TablA-24: Impacto de las hipótesis de redistribución de vehículos ligeros hacia la R-2 sobre los ingresos y el VAN de la segunda fase. 166

TablA-25 Relación de los ODS con el sistema de pago por uso. 174
TablA-26 Modelo tarifario inicial propuesto. 194
TablA-27 Componentes de coste y valores estimados de internalidades y externalidades. 194
TablA-28 Tarifas aplicables según clase EURO de emisión y tonelaje. 196
TablA-29 Matriz de riesgos inicial del proyecto. 197
Tabla 30 División y conexiones del tramo propuesto de la A-2. 202
Tabla 31 Tarifas en la R-2 durante el año 2025. 218
Tabla 32 Variación interanual expresado en porcentaje de HGV de la R-2. 219
Tabla 33 Variación interanual expresado en porcentaje de LV de la R-2. 219
Tabla 34 Datos de la división del tramo de la A-2. 223
Tabla 35 Serie Histórica de Vehículos Pesados en la A-2. 227
Tabla 36 Serie Histórica de Vehículos Ligeros en la A-2. 227
Tabla 37 Variación interanual expresado en porcentaje de HGV de la A-2. 228
Tabla 38 Variación interanual expresado en porcentaje de LV de la A-2. 228
Tabla 39 Tasa de Crecimiento Anual Compuesta de HGV de la A-2. 229
Tabla 40 Tasa de Crecimiento Anual Compuesta de LV de la A-2. 229
Tabla 41 Tarifas aplicables en el corredor propuesto según MMA. 246
Tabla 42 Resultados del Caso Base. 249
Tabla 43 Resultados del Caso Pesimista. 252

Índice de Figuras

Figura 1. Régimen general de pago en autopistas europeas para vehículos ligeros. 17
FigurA-2. Sistema de detección de posición OBU+GNSS. 19
Figura 3. Arquitectura funcional del sistema GNSS propuesto para el piloto en el corredor A-2. 120
Figura 4: Evolución de los ingresos anuales del piloto GNSS en el corredor A-2 por escenario (M€, precios constantes). Fuente: Elaboración propia a partir del modelo econométrico de tráfico calibrado con datos MITMA (2023), INE y EIU.) 152
Figura 5: Ingresos anuales versus OPEX anual del piloto por escenario (M€, precios constantes). 154
Figura 6 Objetivos de Desarrollo Sostenible. 171
Figura 7 Vías de alta capacidad en España. 188
Figura 8 Necesidades de inversión en conservación de carreteras españolas 2019-2020. 189
Figura 9 Programa de gastos en carreteras españolas (en millones de euros). 190
Figura 10 Tramo propuesto de la A-2. 200
Figura 11 Perfil de tráfico en el tramo propuesto. 202
Figura 12 Perfil de tráfico en el tramo 1 del corredor. 203
Figura 13 Perfil de tráfico en el tramo 2 del corredor. 204
Figura 14 Perfil de tráfico en el tramo 3 del corredor. 205
Figura 15 Actividad logística en el corredor. 207
Figura 16 Ubicación de los puertos secos con acceso directo a la A-2. 209
Figura 17 Autopista ferroviaria Azuqueca-Valladolid-Burgos-Júndiz. 211
Figura 18 Terminal ferroviaria de Madrid-Abroñigal. 213
Figura 19 Evolución del transporte de mercancías por ámbito (nacional, internacional y total) medido en millones de toneladas para la serie 2007-2022. 214
FigurA-20 Evolución del transporte terrestre de mercancías en el ámbito nacional (millones de toneladas-kilómetro) para la serie 2007-2022. 214
FigurA-21 Carreteras principales en el entorno del corredor. 216
FigurA-22 Perfil de tráfico en la R-2 218
FigurA-23 Registros de camiones durante el año 2025 en la EU. 220
FigurA-24 División del tramo propuesto. 221
FigurA-25 Perfil de Veh-km (Sección 1-5) en el año 2023. 224
FigurA-26 Perfil de Veh-km (Sección 6-10) en el año 2023. 225
FigurA-27 Perfil de Veh-km (Sección 11-15) en el año 2023. 225
FigurA-28 Perfil de Veh-km (Sección 16-19) en el año 2023. 226
FigurA-29 Evolución de IMD y Veh-km en Ligeros y Pesados de la A-2. 231
Figura 30 Evolución de kilometraje de pesados y el PIB de España. 237

Figura 31 Evolución de kilometraje de pesados y la evolución demográfica de España. 238
Figura 32 Resultados del escenario 1 PIB + Dummy. 240
Figura 33 Resultados del escenario 2 Población + Dummy. 241
Figura 34 Figura 38 Resultados del escenario 3 PIB + Población + Dummy. 242
Figura 35 Ejemplo de los vehículos pesados. 245
Figura 36 Resultados del Caso Base. 247
Figura 37 Resultados del Benchmarking. 250
Figura 38 Resultados del Caso Pesimista. 251

Trabajo Fin de Máster

Autor del Trabajo: Ali Saleh

Lista de abreviaturas y acrónimos

Acrónimo	Denominación completa	Traducción / significado
AADT	Annual Average Daily Traffic	Tráfico Medio Diario Anual (TMDA)
ACB	Análisis Coste-Beneficio	Metodología de evaluación socioeconómica
AIReF	Autoridad Independiente de Responsabilidad Fiscal	Organismo fiscal independiente español
ANPR	Automatic Number Plate Recognition	Reconocimiento Automático de Matrículas
APP	Asociación Público-Privada	Public-Private Partnership (PPP)
ASFINAG	Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft	Empresa pública austríaca de autopistas
CAPEX	Capital Expenditure	Inversión inicial del proyecto
CBA	Cost-Benefit Analysis	Análisis coste-beneficio
CNMC	Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia	Organismo regulador español
CMP	Coste Marginal Privado	Coste percibido directamente por el usuario
CMS	Coste Marginal Social	Coste total incluyendo externalidades
CO_2	Dióxido de carbono	Principal gas de efecto invernadero
DSRC	Dedicated Short-Range Communications	Tecnología de comunicación de corto alcance
EETS	European Electronic Toll Service	Servicio Europeo de Telepeaje
ETC	Electronic Toll Collection	Cobro Electrónico de Peajes
EU	European Union	Unión Europea
EURO VI	European Emission Standard VI	Norma europea de emisiones para vehículos pesados

Acrónimo	Denominación completa	Traducción / significado
GNSS	Global Navigation Satellite System	Sistema Global de Navegación por Satélite
GPS	Global Positioning System	Sistema de Posicionamiento Global
IMD	Intensidad Media Diaria	Tráfico promedio diario
IRR	Internal Rate of Return	Tasa Interna de Retorno (TIR)
ITS	Intelligent Transport Systems	Sistemas Inteligentes de Transporte
LEZ	Low Emission Zone	Zona de Bajas Emisiones
LKW-Maut	Sistema alemán de peaje para vehículos pesados	Tarificación por distancia en Alemania
LSVA	Leistungsabhängige Schwerverkehrsabgabe	Tasa suiza sobre tráfico pesado
MCA	Multi-Criteria Analysis	Análisis Multicriterio
MITMA	Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible	Administración estatal española
NPV	Net Present Value	Valor Actual Neto (VAN)
OBU	On-Board Unit	Dispositivo embarcado
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development	OCDE
OPEX	Operating Expenditure	Costes operativos y de explotación
PESTEL	Political, Economic, Social, Technological, Environmental and Legal	Modelo de análisis estratégico
PPP	Public-Private Partnership	Asociación Público-Privada
RUC	Road User Charging	Sistema de Pago por Uso
SET	Servicio Europeo de Telepeaje	Equivalente español de EETS
SEOPAN	Asociación de Empresas Constructoras y Concesionarias de Infraestructuras	Patronal del sector infraestructuras

Acrónimo	Denominación completa	Traducción / significado
TIR	Tasa Interna de Retorno	Indicador de rentabilidad financiera
TMDA	Tráfico Medio Diario Anual	Equivalente español de AADT
Toll Collect	Operador alemán de tarificación	Gestor del sistema LKW-Maut
UE	Unión Europea	European Union
VAN	Valor Actual Neto	Net Present Value
VGC	Vía de Gran Capacidad	Autopistas y autovías
Via Verde	Sistema portugués de telepeaje	Principal operador electrónico portugués
vkm	Vehículo-kilómetro	Unidad de medida de uso de infraestructura
WTP	Willingness To Pay	Disposición a pagar
ZBE	Zona de Bajas Emisiones	Low Emission Zone

Trabajo Fin de Máster

Autor del Trabajo: Ali Saleh

1. Introducción

1.1 Motivación de la investigación

La financiación y gestión de las infraestructuras viarias se ha convertido en uno de los principales retos de la política de transportes en Europa. La combinación de una demanda creciente de movilidad, la necesidad de conservar redes cada vez más extensas y complejas, y la exigencia de avanzar hacia un sistema de transporte ambientalmente más sostenible ha puesto en cuestión la suficiencia de los mecanismos tradicionales de financiación basados en la imposición general. En este contexto, los instrumentos de tarificación del uso de la red vial han adquirido una relevancia creciente como herramientas para garantizar la sostenibilidad financiera de las infraestructuras, mejorar la eficiencia en su utilización e incorporar, al menos parcialmente, los costes sociales, ambientales y externalidades derivados del transporte por carretera (European Commission, 2011, 2019; ITF, 2019).

Dentro de estos instrumentos, el concepto más conocido y arraigado históricamente es el de peaje. En sentido estricto, el peaje puede definirse como el pago exigido al usuario por acceder a una infraestructura viaria determinada o por circular a través de un tramo concreto de la red, normalmente mediante una lógica de cobro asociada a un punto físico o a un segmento delimitado. Esta fórmula ha sido utilizada de forma recurrente para financiar infraestructuras de alta capacidad, especialmente en regímenes concesionales, en los que el operador recupera total o parcialmente la inversión a través del abono directo efectuado por los usuarios (Gómez Ibáñez & Meyer, 1993).

En su aplicación contemporánea, el peaje puede adoptar distintas modalidades. La forma más clásica es el peaje convencional con barrera, basado en estaciones físicas de cobro, aunque también existen variantes de peaje electrónico y sistemas de free flow o flujo libre, en los que el pago se efectúa sin necesidad de detención mediante pórticos y tecnologías de lectura automática. A ello se suman mecanismos contractuales como el peaje en sombra, donde el usuario no paga directamente, sino que la administración remunera al concesionario en función del tráfico o de parámetros de disponibilidad y servicio. Aunque este último modelo forma parte del debate sobre financiación viaria, no genera una señal económica directa para el usuario y, por ello, no puede equipararse plenamente al pago por uso en sentido estricto (Small & Verhoef, 2007; ITF, 2019).

Frente a esta concepción más clásica, en las últimas décadas se ha consolidado un marco conceptual más amplio, conocido como pago por uso o *Road User Charging* (RUC). El RUC hace referencia a cualquier esquema mediante el cual se establece un cobro por la utilización de infraestructuras viarias. Abarca tanto los peajes tradicionales como los sistemas de tarificación basados en distancia recorrida, tiempo de uso, congestión, o impacto ambiental. El objetivo principal de este modelo es internalizar los costes derivados del uso de las infraestructuras, incluyendo mantenimiento, operación y externalidades, y favorecer una asignación más eficiente de los recursos del transporte. El RUC puede ser:

- Por distancia recorrida (km)
- Por tiempo de uso (vignette)
- Por características del vehículo (peso, emisiones)
- Por congestión (áreas urbanas)

El RUC puede definirse como un sistema de tarificación en el que la contribución económica del usuario se determina en función del uso efectivo, medible y diferenciable de la infraestructura viaria, incorporando variables como la distancia recorrida, la localización geográfica, el momento temporal del desplazamiento, la categoría del vehículo, su masa o su nivel de emisiones (European Commission, 2019; ITF, 2019). Desde esta perspectiva, el pago por uso no constituye un modelo único, sino un conjunto de mecanismos de tarificación basados en el uso real de la infraestructura. Entre sus principales manifestaciones se encuentran los sistemas de cobro por distancia recorrida, los sistemas basados en tiempo de uso, como las viñetas, los modelos de tarificación por área o cordón en entornos urbanos, la tarificación por congestión, y las formas más avanzadas de pago por uso basadas en tecnologías de geolocalización, especialmente GNSS (*Global Navigation Satellite System*) (ITF, 2019; Small & Verhoef, 2007).

Esta distinción es central para el presente trabajo. Aunque con frecuencia ambos términos se utilizan de manera indistinta en el debate público, peaje y pago por uso no son equivalentes. El peaje debe entenderse como una modalidad concreta y puntual de pago por uso, pero no agota el concepto. El RUC es más amplio porque engloba sistemas muy diversos, algunos de los cuales permiten una medición continua y más precisa del uso real de la infraestructura. En consecuencia, mientras que el peaje representa un instrumento históricamente relevante y todavía vigente, no puede presentarse como la solución general al problema contemporáneo de la financiación y gestión de la red viaria.

El debate actual no se centra simplemente en mantener o eliminar peajes, sino en analizar qué formas de tarificación basadas en el uso y en la internalización de los costes derivados del uso de la infraestructura resultan más adecuadas para cumplir objetivos simultáneos de financiación, eficiencia, sostenibilidad y equidad (European Commission, 2011, 2019; ITF, 2019).

La diferencia entre el peaje y el pago por uso resulta especialmente evidente cuando se analiza el nivel de internalización de costes. En la economía del transporte, la utilización de la infraestructura viaria genera no solo costes directos de construcción, explotación y mantenimiento, sino también costes externos o externalidades, como la congestión, la contaminación atmosférica, las emisiones de gases de efecto invernadero, el ruido, la siniestralidad o el deterioro adicional del firme.

La teoría económica ha señalado que una tarificación eficiente debería aproximarse al coste marginal social del desplazamiento, es decir, al coste adicional que cada usuario impone al sistema y a terceros con su utilización de la red (Vickrey, 1969; Small & Verhoef, 2007). Desde esta perspectiva, el peaje tradicional suele recuperar, sobre todo, costes medios de inversión y operación, y solo de forma limitada internaliza externalidades. Por el contrario, los sistemas avanzados de pago por uso permiten, al menos teóricamente, captar con mayor precisión estos costes porque vinculan el pago a variables como la distancia, el momento del desplazamiento o la categoría ambiental del vehículo (European Commission, 2019; ITF, 2019).

También difieren ambos modelos en el tipo de señal económica que transmiten al usuario. El peaje clásico genera una señal de precio generalmente discreta y estática: el usuario paga por entrar, salir o atravesar un tramo, pero el precio no siempre refleja la intensidad real del uso ni las condiciones de la red en cada momento. En cambio, el pago por uso introduce una señal económica potencialmente más precisa y

continua, capaz de influir sobre la elección de ruta, el momento del viaje, la intensidad de uso o incluso el tipo de vehículo utilizado. Esta mayor precisión convierte al RUC en un instrumento no solo recaudatorio, sino también regulatorio, ya que puede modificar comportamientos y contribuir a una asignación más eficiente de los recursos del sistema (Vickrey, 1969; Small & Verhoef, 2007).

La tercera diferencia fundamental se refiere al grado de flexibilidad y eficiencia operativa. Los peajes tradicionales, especialmente los asociados a barreras físicas presentan limitaciones importantes en términos de escalabilidad, interoperabilidad y adaptación a esquemas tarifarios complejos. Aunque la digitalización ha permitido mejorar la eficiencia mediante sistemas electrónicos y *free flow*, el diseño del peaje sigue estando generalmente vinculado a puntos concretos de cobro. Los sistemas de pago por uso basados en tecnologías de posicionamiento y telemática, por el contrario, ofrecen una mayor flexibilidad al permitir tarifas diferenciadas por corredor, por franja horaria, por tipo de vehículo o por impacto ambiental, sin necesidad de barreras físicas. Esta flexibilidad ha favorecido su progresiva consideración como herramienta idónea para integrar objetivos económicos, ambientales y de política de transporte (European Commission, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

A pesar de que la distinción entre peaje y pago por uso ha sido desarrollada conceptualmente en los apartados anteriores, resulta necesario reforzar explícitamente el posicionamiento del *Road User Charging* (RUC) como eje central del presente trabajo. En este sentido, aunque el peaje constituye un instrumento históricamente relevante dentro de la financiación de infraestructuras viarias, debe entenderse como una aproximación o un modelo concreto del concepto de pago por uso, en la medida en que su configuración tradicional no permite alcanzar los niveles de eficiencia económica, flexibilidad operativa y capacidad de internalización de costes asociados a los sistemas RUC más avanzados.

Desde esta perspectiva, el objeto de estudio del presente Trabajo Fin de Máster no se centra en el análisis del peaje en sí mismo, sino en el modelo de pago por uso como marco conceptual amplio, dentro del cual el peaje representa únicamente una de sus posibles manifestaciones. Esta aclaración resulta fundamental para evitar interpretaciones parciales del problema y para situar correctamente el análisis en el contexto del debate contemporáneo sobre la tarificación viaria, caracterizado por la transición desde modelos discretos de cobro hacia sistemas basados en el uso efectivo de la infraestructura.

En línea con esta evolución, el pago por uso puede considerarse como un cambio de paradigma en la concepción de la financiación y gestión de la red viaria. Mientras que los modelos tradicionales se han orientado principalmente a la recuperación de costes de inversión mediante tarifas asociadas a puntos concretos de la red, los sistemas RUC proponen una vinculación estructural entre uso, impacto y contribución económica del usuario. Este cambio implica que la tarificación deja de ser un instrumento exclusivamente financiero para convertirse en una herramienta de política pública con capacidad para influir en la demanda, mejorar la eficiencia del sistema y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

Este enfoque adquiere especial relevancia en el contexto europeo, donde la evolución normativa ha mostrado una trayectoria claramente orientada hacia la progresiva implantación de sistemas de tarificación basados en el uso real. No obstante, más allá de la mera descripción cronológica de las directivas, es necesario interpretar dicha

evolución como un proceso estructurado en varias fases. En primer lugar, una fase inicial, correspondiente a la década de 1990, centrada en la armonización fiscal y en la eliminación de distorsiones competitivas entre Estados miembros. En segundo lugar, una fase intermedia, desarrollada principalmente entre los años 2000 y 2015, caracterizada por la incorporación progresiva de criterios de eficiencia económica e internalización de externalidades, especialmente en relación con el impacto ambiental del transporte. Finalmente, una fase más reciente, consolidada con la Directiva (UE) 2022/362, orientada hacia la tarificación basada en la distancia recorrida, la diferenciación ambiental y la digitalización de los sistemas de cobro, lo que refleja una transición hacia modelos más avanzados de pago por uso apoyados en tecnologías como el GNSS.

Sin embargo, la existencia de este marco regulatorio europeo no garantiza por sí misma la implantación efectiva de sistemas de pago por uso en todos los Estados miembros. La evidencia muestra que la adopción de estos modelos ha sido desigual, lo que sugiere que intervienen factores adicionales de carácter político, institucional, social y económico. En este sentido, la divergencia entre países que han implementado sistemas avanzados de tarificación por distancia y aquellos que mantienen modelos más tradicionales constituye un elemento clave que requiere ser analizado en profundidad.

En este contexto, el caso de España presenta una particularidad relevante. A pesar de disponer de una red de alta capacidad extensa y de haber participado en el desarrollo del marco normativo europeo, el país no ha desarrollado un sistema generalizado de pago por uso en la red estatal. Esta situación pone de manifiesto la existencia de un gap entre el marco normativo europeo, la evidencia internacional y la práctica nacional, cuya explicación no puede atribuirse únicamente a factores tecnológicos, sino que requiere un análisis multidimensional que integre variables políticas, económicas, sociales, medioambientales y legales.

Este gap constituye el punto de partida del presente trabajo y justifica la necesidad de adoptar un enfoque analítico de carácter inferencial y comparado, que permita identificar patrones, relaciones causales y factores explicativos a partir del estudio de experiencias europeas. En este sentido, la introducción no solo delimita los conceptos fundamentales, sino que prepara el terreno para el desarrollo del estado del arte, en el que se analizarán de manera sistemática los sistemas de pago por uso implantados en distintos países, con el objetivo de comprender las condiciones que favorecen o dificultan su adopción.

La consolidación del pago por uso como instrumento de política pública no puede entenderse al margen del marco normativo europeo. Desde la década de 1990, la Unión Europea ha impulsado la progresiva armonización de los sistemas de tarificación viaria, particularmente para los vehículos pesados, bajo los principios de “usuario pagador” y “quien contamina paga”. Un hito fundamental fue la Directiva 1999/62/CE, relativa a la aplicación de gravámenes a los vehículos pesados de transporte de mercancías por la utilización de determinadas infraestructuras, que sentó las bases del régimen comunitario en materia de peajes y viñetas. Este marco fue revisado en diversas ocasiones y actualizado de manera sustancial mediante la Directiva (UE) 2022/362, que refuerza la orientación hacia la tarificación por distancia y por emisiones, impulsa la eliminación progresiva de las viñetas para vehículos pesados en determinados supuestos y promueve una mayor vinculación entre

tarificación, sostenibilidad y eficiencia del transporte (Directiva 1999/62/CE; Directiva (UE) 2022/362; European Commission, 2011).

En la práctica, sin embargo, la aplicación del pago por uso en Europa ha seguido trayectorias heterogéneas. Algunos países, como Alemania, Austria o Suiza, han desarrollado modelos avanzados de tarificación para vehículos pesados, basados en distancia y apoyados en tecnologías de detección y geolocalización, integrando de forma creciente componentes ambientales y de eficiencia logística. Otros países, como República Checa, Eslovaquia o Polonia, han evolucionado desde modelos más convencionales hacia sistemas híbridos o más digitalizados. Por su parte, Francia, Portugal y España presentan configuraciones más fragmentadas, marcadas por el peso histórico de las concesiones, por decisiones políticas sobre liberalización de peajes o por procesos de transición incompletos hacia esquemas de pago por uso más sofisticados (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

Dentro de este espacio comparado, el caso español resulta especialmente relevante. España dispone de una de las redes de alta capacidad más extensas de Europa y mantiene una fuerte dependencia del transporte por carretera tanto en el movimiento de viajeros como de mercancías. Sin embargo, a diferencia de otros países que han consolidado modelos de pago por uso para la red principal o para los vehículos pesados, España ha vivido en los últimos años un proceso de liberalización de peajes estatales que ha reducido el peso del cobro directo en la Red de Carreteras del Estado. Esta evolución ha acentuado el debate sobre la sostenibilidad financiera de la red, particularmente en un contexto de necesidades crecientes de conservación y mantenimiento y de presión para alinear la política viaria con los objetivos climáticos y de eficiencia económica (European Commission, 2011; ITF, 2019).

Además, el análisis del caso español no puede limitarse al ámbito estatal. La estructura territorial y competencial del país obliga a considerar también la dimensión autonómica y foral. En este sentido, la experiencia de Gipuzkoa, con sistemas de tarificación aplicados a vehículos pesados en corredores como la N 1 y la A 15, demuestra que en España ya existen experiencias parciales de cobro vinculadas al uso, aunque no se haya desarrollado un sistema generalizado de pago por uso a escala nacional. La existencia simultánea de la red estatal, de redes autonómicas y de soluciones territoriales diferenciadas sugiere que la ausencia de un modelo nacional de RUC no puede atribuirse únicamente a una limitación técnica, sino que responde a una combinación de factores políticos, institucionales, económicos y sociales que requieren un análisis comparado e inferencial.

Por ello, esta investigación parte de la premisa de que el debate sobre el pago por uso en España no debe reducirse a la dicotomía entre “peajes sí” o “peajes no”, ni tampoco a una cuestión exclusivamente tecnológica. Lo que está en juego es la posibilidad de transitar desde un modelo de financiación fragmentado y crecientemente tensionado hacia esquemas de tarificación capaces de reflejar mejor el uso real de la red y los costes asociados al transporte. En este marco, el estudio del *Road User Charging* y, en particular, de las soluciones basadas en GNSS, adquiere una relevancia especial como objeto de análisis académico y como posible referencia para futuras aplicaciones piloto en el contexto español.

1.2 Antecedentes y evolución del marco normativo europeo

La aparición del peaje como fórmula de financiación viaria no es un fenómeno reciente. A lo largo de la historia, el cobro por el tránsito de personas y mercancías ha sido utilizado en diferentes contextos como mecanismo de recaudación o de control del paso por infraestructuras estratégicas. Sin embargo, su concepción moderna se consolida especialmente a partir del siglo XIX, cuando las limitaciones de la financiación pública y la expansión económica derivada de la industrialización favorecen el desarrollo de modelos concesionales y de inversión privada en infraestructuras de transporte (Gómez Ibáñez & Meyer, 1993).

En el siglo XX, y especialmente en Europa occidental, el peaje se institucionalizó como instrumento de financiación de autopistas de alta capacidad, muy particularmente en corredores con intensidades de tráfico suficientes para sostener su rentabilidad. No obstante, el progreso tecnológico y la evolución de la economía del transporte han ido desplazando el foco desde la mera recuperación de costes de infraestructura hacia la tarificación del uso como mecanismo para gestionar la demanda y corregir externalidades. En este proceso, la discusión sobre la tarificación viaria ha pasado de estar asociada casi exclusivamente al peaje convencional a incluir sistemas más sofisticados de cobro por uso, con una base técnica y económica más amplia (Vickrey, 1969; Small & Verhoef, 2007).

En el caso español, el desarrollo de autopistas de peaje durante la segunda mitad del siglo XX respondió a una lógica claramente concesional, vinculada a la necesidad de expandir la red con recursos privados. Sin embargo, la reversión de concesiones y la supresión de peajes en varios itinerarios estatales a partir de 2018 ha alterado sustancialmente esa lógica histórica. Esta transformación no ha sido acompañada por la implantación de un sistema alternativo de pago por uso sobre la red de autovías estatales, lo que contrasta con las orientaciones del debate europeo y con la experiencia comparada de otros países (ITF, 2019; Directiva (UE) 2022/362).

Más allá de su desarrollo cronológico, la evolución del marco normativo europeo en materia de tarificación viaria puede interpretarse como un proceso estructurado en tres fases, que reflejan un cambio progresivo en la concepción del pago por uso y su papel en la política de transportes.

En una primera fase, correspondiente fundamentalmente a la década de 1990, el objetivo principal se centró en la armonización fiscal y en la eliminación de distorsiones competitivas entre los Estados miembros. Instrumentos como la Directiva 93/89/CEE y, posteriormente, la Directiva 1999/62/CE (Euroviñeta) buscaban establecer reglas comunes para la aplicación de impuestos, peajes y tasas de uso sobre vehículos pesados, con el fin de garantizar condiciones de competencia equitativas en el mercado interior del transporte por carretera. En esta fase, la tarificación se entendía predominantemente como una herramienta de coordinación fiscal y de regulación del mercado, más que como un instrumento de eficiencia económica o de sostenibilidad.

En una segunda fase, desarrollada principalmente entre los años 2000 y 2015, el enfoque normativo evolucionó hacia la incorporación progresiva de criterios de eficiencia económica y de internalización de externalidades. Las sucesivas modificaciones de la Directiva Euroviñeta, en particular mediante las Directivas 2006/38/CE y 2011/76/UE, introdujeron la posibilidad de diferenciar los peajes en función de variables como la categoría ambiental de los vehículos y los costes

asociados a la contaminación atmosférica y el ruido. Esta etapa supuso un avance significativo al integrar en la política de tarificación los principios de "usuario-pagador" y "quien contamina paga", si bien la aplicación práctica de estos principios se mantuvo en gran medida limitada por restricciones normativas y por la prevalencia de modelos basados en tasas temporales de uso.

Finalmente, en una tercera fase, que se consolida a partir de mediados de la década de 2010 y culmina con la aprobación de la Directiva (UE) 2022/362, se observa una transición hacia modelos de tarificación basados en el uso real de la infraestructura, apoyados en la digitalización y en tecnologías avanzadas de medición como el GNSS. Esta fase se caracteriza por un impulso claro hacia sistemas basados en distancia recorrida, una mayor capacidad de diferenciación tarifaria en función de las emisiones de CO_2 y otros impactos ambientales, y la promoción de la interoperabilidad a escala europea a través del marco del EETS. En este sentido, la Directiva-2022/362 no solo actualiza el régimen previo, sino que consolida un cambio de enfoque, orientando la política europea hacia esquemas de pago por uso más precisos, flexibles y alineados con los objetivos de sostenibilidad y eficiencia del sistema de transporte.

En conjunto, esta evolución normativa refleja una transición desde un modelo centrado en la armonización fiscal hacia un paradigma en el que la tarificación viaria se configura como un instrumento clave de política pública, capaz de integrar objetivos económicos, ambientales y tecnológicos. Sin embargo, la implantación efectiva de estos principios ha sido desigual entre los Estados miembros, lo que pone de manifiesto la importancia de analizar no solo el marco normativo, sino también los factores nacionales que condicionan su aplicación práctica.

La evolución de este debate no puede entenderse sin atender al marco normativo europeo, que ha sido determinante en la configuración de los sistemas de tarificación viaria aplicados en los Estados miembros. Los orígenes normativos de este proceso se sitúan en la década de 1990, en el contexto de la consolidación del mercado interior y de la preocupación por las distorsiones competitivas derivadas de la heterogeneidad en la fiscalidad y en los sistemas de cobro aplicados al transporte por carretera. La primera norma europea específica en esta materia fue la Directiva 93/89/CEE, relativa a la aplicación, por parte de los Estados miembros, de impuestos sobre determinados vehículos utilizados para el transporte de mercancías por carretera, así como de peajes y tasas por el uso de determinadas infraestructuras.

Esta directiva representó el primer intento de armonizar a escala comunitaria el tratamiento fiscal y tarifario de los vehículos pesados, aunque fue posteriormente anulada por motivos procedimentales por el Tribunal de Justicia de la Unión Europea. No obstante, su importancia histórica radica en haber establecido el punto de partida del marco europeo de tarificación viaria (Directiva 93/89/CEE).

En paralelo, la Comisión Europea desarrolló en los años noventa una base doctrinal y programática que contribuyó decisivamente a la evolución posterior de la normativa. El Libro Verde "Hacia una tarificación equitativa y eficiente del transporte" (*Towards fair and efficient pricing in transport*), publicado en 1995, planteó la necesidad de que los precios del transporte reflejaran mejor los costes reales del sistema, incluyendo infraestructuras y externalidades (European Commission, 1995). Esta línea de reflexión se reforzó con el Libro Blanco de 1998 sobre el pago equitativo por el uso de infraestructuras, en el que se avanzó hacia una estrategia comunitaria orientada a vincular progresivamente las tarifas de transporte con el principio de "usuario-pagador"

y con la internalización de costes externos (European Commission, 1998). Estos documentos no tenían carácter vinculante, pero fueron fundamentales para dotar de coherencia económica y política a la normativa que se desarrollaría posteriormente.

Tras la anulación de la Directiva 93/89/CEE, el marco jurídico se consolidó con la adopción de la Directiva 1999/62/CE, conocida como la primera Directiva Euroviñeta, relativa a la aplicación de gravámenes a los vehículos pesados de transporte de mercancías por la utilización de determinadas infraestructuras. Esta norma constituye el verdadero pilar originario del régimen europeo moderno de tarificación viaria. Su finalidad principal era evitar discriminaciones entre transportistas de diferentes Estados miembros y establecer reglas comunes para la aplicación de peajes y tasas de uso a los vehículos pesados. La directiva distinguía entre peajes (*tolls*), entendidos como cantidades abonadas por recorrer una distancia determinada de infraestructura, y tasas por uso *(user charges*), asociadas a un período de tiempo concreto y representadas, en la práctica, por modelos de viñeta temporal. El texto de 1999 asentó así una distinción normativa que sigue siendo central en el debate europeo: la diferencia entre cobros basados en distancia y cobros basados en tiempo (Directiva 1999/62/CE).

En los años siguientes, la normativa evolucionó para incorporar progresivamente consideraciones ambientales, de eficiencia y de interoperabilidad tecnológica. Un paso especialmente importante se dio con la DirectivA-2004/52/CE, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje en la Comunidad. Esta norma no modificó el régimen económico de la Euroviñeta, pero sí introdujo un segundo pilar regulatorio esencial: la necesidad de que los sistemas electrónicos de cobro fueran interoperables a escala europea. La directiva sentó las bases del futuro Servicio Europeo de Telepeaje Electrónico (EETS), con el objetivo de reducir barreras técnicas, costes de transacción y fragmentación del mercado, facilitando que un mismo dispositivo o proveedor pudiera operar en distintos Estados miembros (DirectivA-2004/52/CE).

La siguiente gran reforma llegó con la DirectivA-2006/38/CE, que modificó la Directiva 1999/62/CE y amplió las posibilidades de modulación tarifaria. Esta reforma permitió un mayor grado de diferenciación de los peajes en función de factores como la categoría medioambiental del vehículo y las características de la infraestructura, e introdujo una lógica más claramente conectada con la gestión de la demanda y con la eficiencia económica. Aunque el alcance de la internalización de externalidades seguía siendo limitado, la reforma de 2006 supuso un paso relevante al reconocer que la tarificación viaria no debía responder únicamente a la recuperación de costes financieros, sino también a objetivos más amplios de política de transporte (DirectivA-2006/38/CE).

Esa orientación se reforzó con la DirectivA-2011/76/UE, que volvió a modificar la Directiva 1999/62/CE y profundizó en la incorporación de las externalidades al diseño tarifario. Esta reforma autorizó a los Estados miembros a incluir recargos por contaminación atmosférica y ruido en determinados supuestos, aumentando la conexión entre la normativa de tarificación y el principio de “quien contamina paga”. La reforma de 2011 se enmarcó, además, en un cambio más amplio de la política europea de transportes, reflejado en el Libro Blanco de 2011, que apostaba por un sistema de transporte competitivo y eficiente en recursos, en el que la tarificación

desempeñara un papel clave para mejorar la sostenibilidad y eficiencia del sector (European Commission, 2011; DirectivA-2011/76/UE).

La dimensión tecnológica e institucional del marco normativo europeo avanzó de nuevo con la Directiva (UE) 2019/520, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje y al intercambio transfronterizo de información sobre el impago de peajes. Esta norma derogó la DirectivA-2004/52/CE y la Decisión 2009/750/CE, consolidando el régimen del EETS y reforzando tanto la interoperabilidad técnica como la capacidad de ejecución y cobro en un contexto transfronterizo. Su importancia para los sistemas basados en GNSS resulta especialmente elevada, ya que facilita un marco tecnológico y jurídico más favorable para modelos de tarificación avanzados y multinacionales (Directiva (UE) 2019/520).

El desarrollo normativo culmina, por el momento, con la Directiva (UE) 2022/362, que modifica la Directiva 1999/62/CE, la Directiva 1999/37/CE y la Directiva (UE) 2019/520. Esta reforma representa el cambio más profundo del marco europeo desde la aprobación de la Euroviñeta y refleja una clara transición desde modelos basados en tiempo hacia sistemas más alineados con el uso real y con el impacto ambiental del transporte. La DirectivA-2022/362 refuerza la preferencia por los esquemas basados en distancia recorrida frente a las viñetas temporales, especialmente para los vehículos pesados en la red transeuropea de transporte. Asimismo, amplía la capacidad de diferenciación tarifaria en función de las emisiones de CO_2 y de otros impactos ambientales, permite con mayor claridad la aplicación de recargos por congestión y externalidades, y extiende el marco regulatorio a un espectro más amplio de vehículos y situaciones, manteniendo el principio de no discriminación entre usuarios nacionales y extranjeros (Directiva (UE) 2022/362).

Desde un punto de vista sustantivo, la DirectivA-2022/362 consolida tres grandes líneas de evolución. En primer lugar, profundiza en la internalización de costes externos, desplazando el marco europeo desde una lógica básicamente recaudatoria hacia una lógica de eficiencia y sostenibilidad. En segundo lugar, impulsa la sustitución progresiva de las tasas temporales de uso por sistemas de tarificación más directamente vinculados al uso efectivo, especialmente en el transporte pesado. En tercer lugar, se apoya en la evolución del EETS y de la normativa de interoperabilidad para crear un entorno más favorable a la implantación de sistemas tecnológicamente avanzados, incluyendo aquellos basados en GNSS. En conjunto, la evolución regulatoria europea muestra una transición clara desde un enfoque centrado en armonizar gravámenes y evitar discriminaciones hacia un modelo más ambicioso, orientado a que los sistemas tarifarios reflejen mejor el uso de la infraestructura y sus impactos.

Esta trayectoria normativa resulta particularmente relevante para el caso español. España ha seguido la evolución del marco europeo y se ha visto afectada por sus orientaciones, pero no ha desarrollado hasta la fecha un sistema generalizado de pago por uso en la red de autovías estatales. Esta divergencia entre el impulso regulatorio europeo y la realidad española sugiere que la adopción de modelos avanzados de RUC no depende solo del marco jurídico comunitario, sino también de factores políticos, institucionales, territoriales y sociales que condicionan su traslación efectiva al plano nacional. Precisamente por ello, la introducción del marco normativo europeo no debe entenderse como un simple apartado formal, sino como un elemento esencial para comprender por qué algunos países han avanzado hacia la tarificación por

distancia y otros, como España, mantienen configuraciones más fragmentadas y políticamente controvertidas.

En este contexto, el pago por uso debe entenderse no únicamente como una alternativa técnica al peaje tradicional, sino como un cambio de paradigma en la forma de concebir la financiación y gestión de las infraestructuras viarias. Mientras que los modelos convencionales se han centrado en la recuperación de costes de inversión mediante mecanismos discretos de cobro, el enfoque del RUC propone una vinculación estructural entre uso, impacto y contribución económica. Este cambio implica que la tarificación deja de ser un instrumento exclusivamente financiero para convertirse en una herramienta de política pública capaz de influir en la demanda, orientar la transición hacia sistemas de transporte más sostenibles y mejorar la eficiencia global del sistema (ITF, 2019; European Commission, 2019).

Desde esta perspectiva, los sistemas basados en tecnología GNSS representan la evolución más avanzada del pago por uso, al permitir una medición continua y precisa del uso de la infraestructura, así como la integración de variables espaciales, temporales y ambientales en la estructura tarifaria. No obstante, su implantación no depende únicamente de su viabilidad técnica, sino de factores políticos, sociales e institucionales que condicionan su aceptación y desarrollo, lo que explica las diferencias observadas entre países europeos.

A pesar de que la distinción entre peaje y pago por uso ha sido desarrollada conceptualmente en los apartados anteriores, resulta necesario reforzar explícitamente el posicionamiento del RUC como eje central del presente trabajo. En este sentido, aunque el peaje constituye un instrumento históricamente relevante dentro de la financiación de infraestructuras viarias, debe entenderse como una aproximación parcial al concepto de pago por uso, en la medida en que su configuración tradicional no permite alcanzar los niveles de eficiencia económica, flexibilidad operativa y capacidad de internalización de costes asociados a los sistemas RUC más avanzados.

Desde esta perspectiva, el objeto de estudio del presente Trabajo Fin de Máster no se centra en el análisis del peaje en sí mismo, sino en el modelo de pago por uso como marco conceptual amplio, dentro del cual el peaje representa únicamente una de sus posibles manifestaciones. Esta aclaración resulta fundamental para evitar interpretaciones reduccionistas del problema y para situar correctamente el análisis en el contexto del debate contemporáneo sobre la tarificación viaria, caracterizado por la transición desde modelos discretos de cobro hacia sistemas basados en el uso efectivo de la infraestructura.

En línea con esta evolución, el pago por uso puede considerarse como un cambio de paradigma en la concepción de la financiación y gestión de la red viaria. Mientras que los modelos tradicionales se han orientado principalmente a la recuperación de costes de inversión mediante tarifas asociadas a puntos concretos de la red, los sistemas RUC proponen una vinculación estructural entre uso, impacto y contribución económica del usuario. Este cambio implica que la tarificación deja de ser un instrumento exclusivamente financiero para convertirse en una herramienta de política pública con capacidad para influir en la demanda, mejorar la eficiencia del sistema y contribuir a la sostenibilidad ambiental.

Este enfoque adquiere especial relevancia en el contexto europeo, donde la evolución normativa ha mostrado una trayectoria claramente orientada hacia la progresiva implantación de sistemas de tarificación basados en el uso real. No obstante, más allá de la mera descripción cronológica de las directivas, es necesario interpretar dicha evolución como un proceso estructurado en varias fases. En primer lugar, una fase inicial, correspondiente a la década de 1990, centrada en la armonización fiscal y en la eliminación de distorsiones competitivas entre Estados miembros. En segundo lugar, una fase intermedia, desarrollada principalmente entre los años 2000 y 2015, caracterizada por la incorporación progresiva de criterios de eficiencia económica e internalización de externalidades, especialmente en relación con el impacto ambiental del transporte.

Finalmente, una fase más reciente, consolidada con la Directiva (UE) 2022/362, orientada hacia la tarificación basada en la distancia recorrida, la diferenciación ambiental y la digitalización de los sistemas de cobro, lo que refleja una transición hacia modelos más avanzados de pago por uso apoyados en tecnologías como el GNSS.

Sin embargo, la existencia de este marco regulatorio europeo no garantiza por sí misma la implantación efectiva de sistemas de pago por uso en todos los Estados miembros. La evidencia muestra que la adopción de estos modelos ha sido desigual, lo que sugiere que intervienen factores adicionales de carácter político, institucional, social y económico. En este sentido, la divergencia entre países que han implementado sistemas avanzados de tarificación por distancia y aquellos que mantienen modelos más tradicionales constituye un elemento clave que requiere ser analizado en profundidad.

En este contexto, el caso de España presenta una particularidad relevante. A pesar de disponer de una red de alta capacidad extensa y de haber participado en el desarrollo del marco normativo europeo, el país no ha desarrollado un sistema generalizado de pago por uso en la red estatal. Esta situación pone de manifiesto la existencia de un gap entre el marco normativo europeo, la evidencia internacional y la práctica nacional, cuya explicación no puede atribuirse únicamente a factores tecnológicos, sino que requiere un análisis multidimensional que integre variables políticas, económicas, sociales, medioambientales y legales.

Este gap constituye el punto de partida del presente trabajo y justifica la necesidad de adoptar un enfoque analítico de carácter inferencial y comparado, que permita identificar patrones, relaciones causales y factores explicativos a partir del estudio de experiencias europeas. En este sentido, la introducción no solo delimita los conceptos fundamentales, sino que prepara el terreno para el desarrollo del estado del arte, en el que se analizarán de manera sistemática los sistemas de pago por uso implantados en distintos países, con el objetivo de comprender las condiciones que favorecen o dificultan su adopción.

Asimismo, este enfoque resulta imprescindible para fundamentar el desarrollo posterior de la metodología del trabajo. En particular, la eventual selección de un sistema basado en tecnología GNSS como objeto de análisis aplicado no se plantea como una hipótesis previa, sino como una consecuencia del análisis comparado y de la evaluación de las distintas alternativas tecnológicas disponibles. De este modo, la introducción establece el marco conceptual y analítico necesario para conectar de

forma coherente los objetivos del trabajo, el estado del arte y el desarrollo metodológico.

En definitiva, el presente estudio se sitúa en la intersección entre el análisis conceptual del pago por uso, la evolución normativa europea y la evaluación del caso español, con el objetivo de contribuir a la comprensión de un problema que, pese a su relevancia creciente, sigue presentando importantes lagunas tanto en la literatura como en la práctica de política pública.

1.3 Documentos normativos nacionales y de la Unión Europea

Uno de los objetivos fundamentales de la Unión Europea es la creación y consolidación de un mercado interior plenamente integrado, en el que se garantice la libre circulación de mercancías, personas, servicios y capitales. Este principio, recogido en los Tratados fundacionales y desarrollado a lo largo de décadas de integración europea, constituye el marco de referencia para la política común de transportes y, en particular, para la regulación de los sistemas de cobro de cánones por el uso de infraestructuras viarias.

En el ámbito del transporte por carretera, la fragmentación histórica de los sistemas nacionales de peaje ha supuesto un obstáculo relevante para el funcionamiento eficiente del mercado interior, especialmente en el transporte internacional de mercancías. La coexistencia de múltiples tecnologías, normas técnicas y modelos tarifarios, desarrollados de forma independiente por los Estados miembros, ha generado problemas de interoperabilidad, incrementos de costes para los usuarios y barreras administrativas incompatibles con los principios básicos de la Unión Europea.

Política comunitaria de transportes y fundamentos jurídicos del telepeaje

Tal y como establece el artículo 26.1 del Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea (TFUE), la Unión adoptará las medidas necesarias para establecer y garantizar el funcionamiento del mercado interior. Asimismo, la política común de transportes, recogida originalmente en los Tratados de Roma de 1957, persigue la apertura de los mercados de transporte, la eliminación de obstáculos técnicos y administrativos y la creación de condiciones de competencia equitativas, especialmente en los desplazamientos transfronterizos.

En este contexto, la interoperabilidad de los sistemas de cobro electrónico de peajes se configura como un requisito esencial para garantizar la libre circulación y evitar distorsiones en el mercado interior. La necesidad de un marco común se justifica no solo por razones técnicas, sino también por principios jurídicos fundamentales de la Unión, como la no discriminación entre ciudadanos de distintos Estados miembros y la proporcionalidad de los costes asociados al uso de infraestructuras.

Un hito clave en la definición de la política europea de transportes es el Libro Blanco “Hoja de ruta hacia un espacio europeo de transporte único” (Comisión Europea, 2011), que establece una estrategia integral para el desarrollo de un sistema de transporte competitivo y sostenible. Este documento identifica explícitamente la necesidad de avanzar hacia sistemas de tarificación inteligentes que permitan internalizar costes externos, simplificar procedimientos administrativos y optimizar la gestión del tráfico mediante el uso intensivo de tecnologías de la información y la comunicación.

La DirectivA-2004/52/CE y el Servicio Europeo de Telepeaje (SET)

El primer instrumento normativo específico de la Unión Europea en materia de interoperabilidad del telepeaje es la DirectivA-2004/52/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de las carreteras de la Comunidad. El objetivo fundamental de esta Directiva es garantizar que los usuarios puedan circular por la red de carreteras sujeta a peaje utilizando un único contrato y equipo a bordo, con independencia del Estado miembro en el que se encuentren.

La Directiva reconoce explícitamente que los sistemas de peaje electrónico implantados por los Estados miembros no eran plenamente compatibles entre sí, lo que dificultaba el funcionamiento del mercado interior. Para superar estas barreras, establece que los nuevos sistemas de telepeaje deberán basarse, para la realización de las transacciones, en al menos una de las siguientes tecnologías: localización por satélite (GNSS), comunicaciones móviles mediante redes GSM/GPRS y microondas a 5,8 GHz (DSRC).

Asimismo, la Directiva introduce el concepto del Servicio Europeo de Telepeaje (SET) como un servicio complementario a los sistemas nacionales, diseñado para garantizar la interoperabilidad técnica y contractual. El SET se concibe como un marco común que permite a los operadores ofrecer el servicio de telepeaje en toda la Unión, con independencia de las decisiones nacionales sobre niveles tarifarios, categorías de vehículos o finalidades del peaje.

El desarrollo del SET se concreta posteriormente en la Decisión 2009/750/CE de la Comisión, que define los derechos y obligaciones de los proveedores del servicio, los perceptores de peaje y los usuarios, así como los requisitos técnicos y contractuales necesarios para garantizar un servicio continuo y fiable. Esta Decisión subraya que el SET no sustituye a los sistemas nacionales, sino que actúa como elemento integrador, facilitando la interoperabilidad sin imponer un modelo único de tarificación.

Evolución normativa: la Directiva (UE) 2019/520

Con el objetivo de reforzar y actualizar el marco normativo existente, en 2019 se adopta la Directiva (UE) 2019/520 del Parlamento Europeo y del Consejo, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de carretera y al intercambio transfronterizo de información sobre el impago de cánones de carretera. Esta Directiva, incluida en el paquete legislativo “Europa en Movimiento”, sustituye y deroga la DirectivA-2004/52/CE.

La DirectivA-2019/520 persigue un doble objetivo. Por un lado, facilitar el uso de sistemas electrónicos de cobro de peajes plenamente interoperables en toda la Unión, reforzando la competencia y la calidad de los proveedores del SET. Por otro lado, establece un sistema de intercambio transfronterizo de información que permite identificar a los usuarios no residentes que incumplen la obligación de pago de los cánones, abordando uno de los principales problemas operativos de los sistemas de tarificación.

Para este segundo objetivo, la Directiva se apoya en plataformas existentes como EUCARIS, ya utilizadas para el intercambio de información en materia de infracciones de tráfico. No obstante, el alcance del intercambio se limita a la identificación del titular

del vehículo y no contempla mecanismos de reconocimiento automático de sanciones, respetando las competencias nacionales en materia sancionadora.

Otros documentos normativos y técnicos relevantes

Además de las directivas específicas sobre telepeaje, existen otros instrumentos normativos y estratégicos de la Unión Europea que influyen de manera indirecta pero significativa en el desarrollo de los sistemas de pago por uso. Entre ellos destacan la DirectivA-2007/2/CE (INSPIRE), que establece una infraestructura de información espacial para facilitar el intercambio de datos geográficos; la DirectivA-2010/40/UE, que define el marco para la implantación de sistemas de transporte inteligentes (ITS) en el transporte por carretera; y la Estrategia europea sobre ITS cooperativos, orientada a la movilidad conectada, automatizada y cooperativa.

Asimismo, la Comisión Europea ha promovido numerosos documentos técnicos elaborados por grupos de expertos que analizan aspectos tecnológicos, económicos y contractuales del telepeaje, contribuyendo a clarificar conceptos, establecer estándares de calidad y reducir la incertidumbre regulatoria.

La revisión de la normativa europea pone de manifiesto que la Unión Europea ha desarrollado un marco regulatorio sólido y progresivamente más ambicioso para garantizar la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje y facilitar la implantación de mecanismos de pago por uso. No obstante, este marco se centra fundamentalmente en cómo deben funcionar los sistemas una vez implantados, dejando a los Estados miembros un amplio margen de decisión respecto a si implantar o no sistemas de tarificación y sobre el alcance de los mismos.

Esta característica resulta especialmente relevante para el caso español, ya que explica por qué, a pesar de contar con un entorno normativo europeo favorable y tecnológicamente habilitante, no se ha producido una implantación generalizada del pago por uso en la red viaria estatal. Esta observación constituye un elemento clave para la detección del gap de investigación que se desarrolla en los apartados posteriores.

Marco normativo nacional en materia de telepeaje y pago por uso en España

Junto al marco regulatorio europeo, el desarrollo y la implantación de sistemas de cobro electrónico de peajes en España se encuentran condicionados por un conjunto de normas nacionales de carácter sectorial, contractual y administrativo, que definen tanto las competencias de las administraciones públicas como los instrumentos disponibles para la gestión y financiación de las infraestructuras viarias.

Desde una perspectiva histórica, la regulación española del peaje ha estado tradicionalmente vinculada al modelo concesional, más que a la implantación de sistemas de tarificación generalizada por uso. Esta circunstancia explica la fragmentación normativa existente y la ausencia, hasta fechas recientes, de un marco específico orientado al pago por uso como política pública de alcance nacional.

La Ley 37/2015, de Carreteras

La Ley 37/2015, de 29 de septiembre, de Carreteras, constituye la norma básica que regula el régimen jurídico de la Red de Carreteras del Estado. Esta ley reconoce expresamente la posibilidad de explotación directa o indirecta de las carreteras,

incluyendo la financiación mediante peajes, cánones u otras fórmulas de pago por uso, especialmente en el marco de concesiones administrativas.

No obstante, la Ley de Carreteras no establece un sistema generalizado de tarificación por uso ni define instrumentos específicos para la implantación de sistemas electrónicos de pago en autovías gratuitas. En la práctica, el pago por uso queda circunscrito a los supuestos de gestión concesional, lo que refuerza la asociación histórica entre peaje y concesión privada en el caso español (Bel & Fageda, 2010).

Normativa de contratación pública y concesiones

El marco jurídico del pago por uso se ve asimismo condicionado por la Ley 9/2017, de Contratos del Sector Público, que regula los contratos de concesión de obras y servicios. Esta norma define los principios de riesgo operacional, equilibrio económico-financiero y duración de las concesiones, elementos clave en la implantación de infraestructuras financiadas mediante peaje.

Desde el punto de vista del telepeaje, esta legislación resulta relevante porque condiciona:

- la posibilidad de introducir sistemas de tarificación electrónica,
- la asignación de riesgos tecnológicos y de demanda,
- y la viabilidad de modelos híbridos en los que el pago por uso no esté necesariamente ligado a una concesión clásica.

Sin embargo, la legislación contractual no impone ni promueve activamente la implantación de sistemas de pago por uso fuera del marco concesional, manteniendo una posición esencialmente habilitante, pero no prescriptiva.

Sistemas de telepeaje existentes y regulación operativa (Vía-T)

En el ámbito operativo, España cuenta desde hace décadas con un sistema de telepeaje interoperable a nivel nacional, conocido como Vía-T, basado en tecnología DSRC a 5,8 GHz. Este sistema permite el pago electrónico en autopistas de peaje mediante un dispositivo a bordo y acuerdos entre concesionarias.

No obstante, Vía-T se ha desarrollado como un sistema de ámbito concesional, sin extenderse a la red de autovías gratuitas ni configurarse como un instrumento de tarificación por uso de alcance general. Desde el punto de vista regulatorio, su funcionamiento se apoya en acuerdos privados y en normativa sectorial dispersa, sin un desarrollo normativo específico equivalente al Servicio Europeo de Telepeaje.

El Real Decreto 205/2025, de marzo

Un avance relevante en el marco normativo nacional lo constituye el Real Decreto 205/2025, de marzo, por el que se establecen disposiciones en materia de sistemas inteligentes de transporte y digitalización de la gestión viaria, incorporando de forma explícita referencias al uso de tecnologías de cobro electrónico y a la interoperabilidad con sistemas europeos.

Este Real Decreto se enmarca en el proceso de adaptación del ordenamiento jurídico español a:

- la Directiva (UE) 2019/520 sobre interoperabilidad del telepeaje,
- la Directiva (UE) 2022/362 (Euroviñeta),

- y la estrategia nacional de movilidad sostenible.

Entre sus aportaciones más relevantes se encuentra el reconocimiento explícito del cobro electrónico como herramienta de gestión y financiación, así como la habilitación para que las administraciones competentes desarrollen sistemas de tarificación compatibles con los estándares europeos, incluidos los basados en GNSS y arquitecturas híbridas.

No obstante, el Real Decreto no impone la implantación obligatoria de un sistema de pago por uso, ni define un calendario de aplicación, limitándose a establecer un marco habilitante y de coordinación tecnológica. Desde el punto de vista del presente TFM, este enfoque resulta especialmente relevante, ya que refuerza la idea de que el principal obstáculo al pago por uso en España no es normativo ni tecnológico, sino de carácter político, institucional y social.

El análisis del marco normativo español pone de manifiesto que no existe una prohibición legal para implantar sistemas de pago por uso ni de telepeaje avanzado en la red viaria estatal. Por el contrario, la normativa vigente, especialmente tras el Real Decreto 205/2025, ofrece un entorno jurídicamente habilitante y alineado con el marco europeo.

Sin embargo, la ausencia de un mandato explícito, de una estrategia nacional vinculante y de instrumentos regulatorios específicos explica que España no haya avanzado hacia un sistema generalizado de pago por uso, a diferencia de otros países europeos. Esta constatación refuerza el gap identificado en el estado del arte y justifica la orientación del presente Trabajo Fin de Máster hacia el análisis de las barreras estructurales y la estimación de los costes de implantación.

1.4 Experiencias europeas y nacional en sistemas de pago por uso

En las últimas décadas, numerosos países han implantado sistemas de tarificación viaria basados en el principio de pago por uso, especialmente en Europa, como respuesta a problemas estructurales de financiación, congestión y deterioro de las infraestructuras. Aunque el principio económico subyacente es común, los modelos de implementación difieren significativamente en función del contexto institucional, el papel del transporte internacional, la estructura de la red viaria y la aceptación social del peaje.

Desde el punto de vista tecnológico, las soluciones adoptadas incluyen sistemas basados en DSRC, GNSS, tacógrafo, RFID y reconocimiento automático de matrículas (ANPR), generalmente combinados con arquitecturas híbridas de control (*enforcement*). Esta diversidad justifica la necesidad de analizar las experiencias nacionales de forma individualizada, con el objetivo de identificar patrones comunes y elementos diferenciales relevantes para el caso español.

La Figura 1 muestra la distribución geográfica de los países europeos que aplican sistemas de pago por uso en toda o parte de su red de alta capacidad, destacando una clara concentración en el centro de Europa, frente a una implantación más limitada en países periféricos.

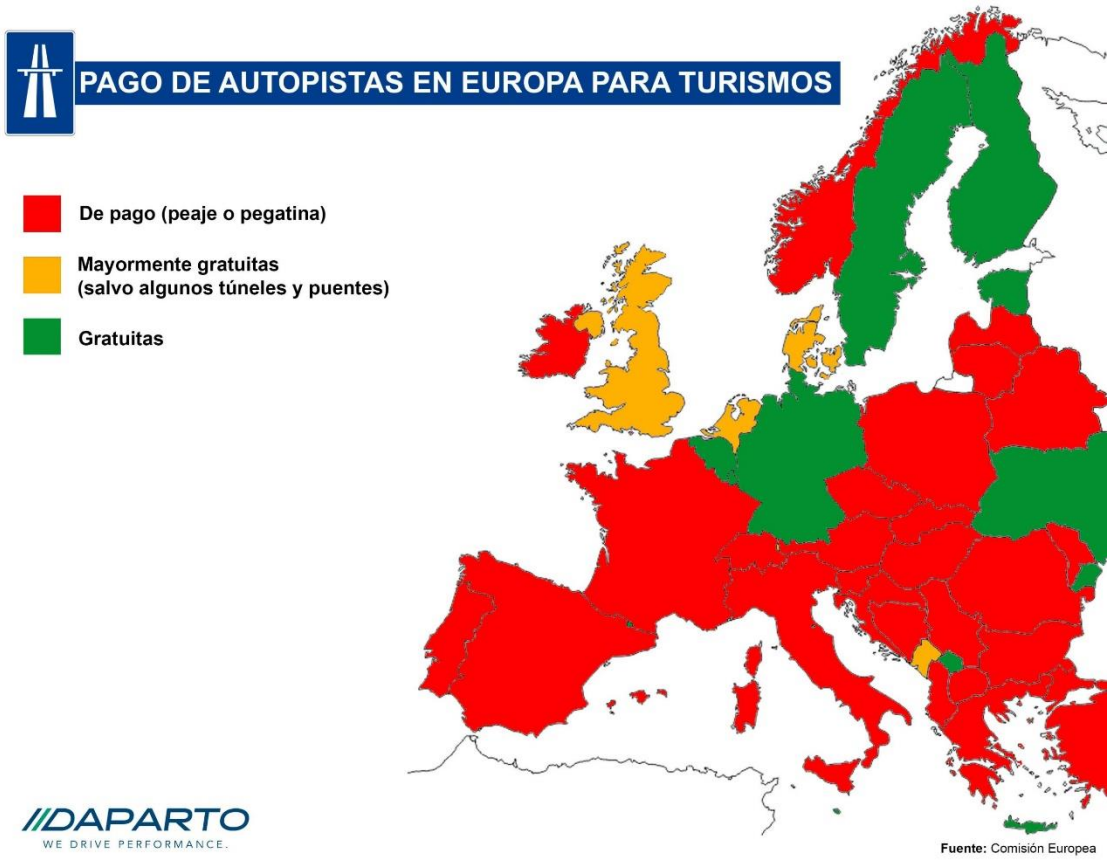


Figura 1. Régimen general de pago en autopistas europeas para vehículos ligeros.

Fuente: Comisión Europea

1.4.1 Suiza

Suiza constituye uno de los casos más avanzados y tempranos de implantación del pago por uso. El sistema de tarificación por distancia para vehículos pesados (LSVA) se introdujo en 2001 con objetivos explícitos de protección ambiental, transferencia modal al ferrocarril y financiación de infraestructuras. El modelo suizo aplica una tarifa modular basada en la distancia recorrida, el peso máximo autorizado y la categoría de emisiones, y se extiende a la totalidad de la red viaria del país, aproximadamente 71.000 km (Rapp & Balmer, 2004).

Desde el punto de vista tecnológico, el sistema se apoya en una unidad a bordo conectada a tacógrafo, complementada con GPS, DSRC y pórticos de control fronterizo. La elevada fiabilidad del sistema, con tasas de evasión inferiores al 1 %, se explica por el fuerte componente de vigilancia y por el papel activo del conductor en la transmisión de datos (Balmer, 2006). Este modelo es especialmente relevante por demostrar la viabilidad de un sistema nacional de pago por uso desvinculado del modelo concesional.

1.4.2 Austria

Austria introdujo en 2004 un sistema de pago por uso para vehículos pesados basado en DSRC, gestionado por la empresa pública ASFINAG. El sistema diferencia entre vehículos ligeros (viñeta temporal) y pesados (tarificación por distancia), aplicándose a una red de aproximadamente 2.200 km de autopistas y vías rápidas (Engdahl & Sieber, 2004).

El elevado número de pórticos DSRC y el uso intensivo de controles automáticos y móviles permiten garantizar altos niveles de cumplimiento. Austria representa un modelo intermedio entre concesión y gestión pública, en el que el pago por uso se concibe como fuente estructural de financiación, especialmente relevante en un país con fuerte tránsito internacional.

1.4.3 Alemania

El sistema de peaje para camiones en Alemania ofrece básicamente dos opciones de inicio de sesión: inicio de sesión automático a través de la unidad de a bordo (OBU) de un proveedor del EETS o del proveedor principal del servicio, Toll Collect GmbH, que es una una empresa pública perteneciente al Estado Federal de Alemania.

El módulo GNSS integrado recopila los datos de ubicación de la carretera por la que circula el vehículo y los envía al sistema central del proveedor de servicios correspondiente. Una vez determinada y facturada la distancia recorrida, los datos se utilizan para facturar al usuario y también se envían al sistema de peaje BALM (Oficina federal de logística y movilidad).

Cuando un camión se acerca a un vehículo de control de tráfico (RSE) o a un vehículo de seguridad, el módulo DSRC transmite la información almacenada en la OBU, como la matrícula, el peso, el número de ejes y la clase de emisiones. También indica si la OBU está preparada para el cobro de peajes o, por ejemplo, bloqueada por el proveedor. Con esta información, se puede evaluar si el peaje se está pagando correctamente.

La aplicación de la normativa se divide entre Toll Collect y BALM. Toll Collect se encarga de la aplicación automatizada mediante pórticos y columnas de peaje. Esta responsabilidad incluye, en ciertos casos, el cobro posterior de los peajes en caso de pago incorrecto o impago. Esta función soberana ha sido delegada a Toll Collect por el Gobierno Federal. Todos los demás controles (por ejemplo, inspecciones in situ en empresas, aplicación de la normativa con vehículos en la red de autopistas de peaje) son realizados por BALM. El legislador decide qué vehículos y carreteras están sujetos a peajes, las tarifas de los peajes y las clases de emisiones ambientales. Como operador de un sistema de gestión de activos para la red vial federal, BASt monitorea continuamente cualquier cambio. BASt, BALM y Toll Collect colaboran para identificar cambios relevantes en la tabla de peajes. (Toll Collect GmbH, 2023).

Alemania introdujo en 2005 el sistema LKW-Maut, uno de los primeros sistemas nacionales basados en GNSS combinado con comunicaciones móviles. Aplicable inicialmente a vehículos pesados, el sistema cubre aproximadamente 12.500 km de autopistas federales y constituye una referencia internacional por su escala y sofisticación tecnológica.

El sistema calcula automáticamente el peaje en función de la distancia recorrida, el número de ejes y la categoría de emisiones, transmitiendo los datos a la central de Toll Collect. El control se realiza mediante pórticos fijos, controles móviles y verificaciones administrativas (Händel et al., 2014). Alemania ejemplifica el modelo de pago por uso como instrumento de política pública nacional, alineado con objetivos ambientales y de financiación.

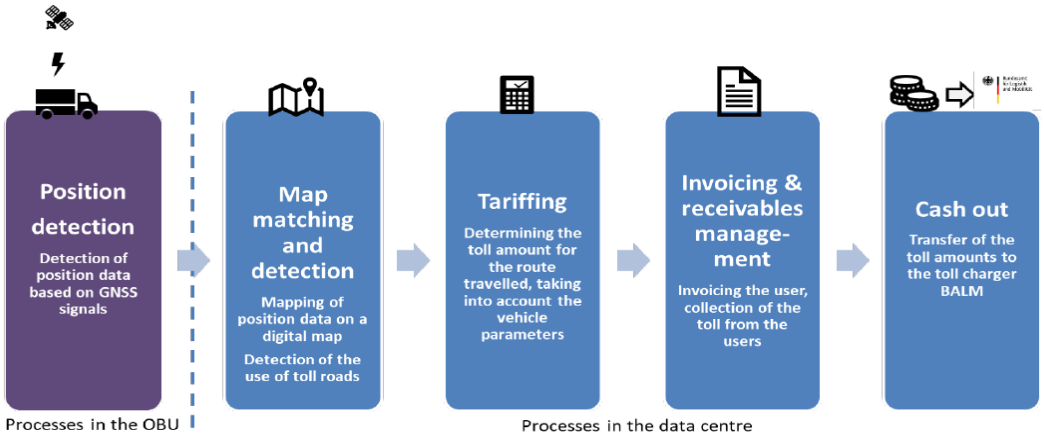


Figura 2. Sistema de detección de posición OBU+GNSS.

Fuente: Toll Collect

1.4.4 República Checa

La República Checa introdujo un sistema de pago por uso en 2004, inicialmente mediante un sistema de viñeta aplicable a vehículos ligeros, que fue sustituido en 2008 por un sistema de tarificación modular por distancia para vehículos pesados. En la actualidad, coexisten dos modelos: viñeta temporal para vehículos ligeros y tarificación por uso para vehículos de transporte de mercancías y autobuses.

La tarificación se determina en función de la distancia recorrida, el número de ejes, la categoría de emisiones EURO y el tipo de vía, aplicándose sobre una red de

aproximadamente 1.500 km, que incluye autopistas, vías rápidas y carreteras de primera clase (Rudw, 2012). El sistema se basa en tecnología DSRC, con dispositivos OBU instalados en los vehículos, complementados con estaciones de control fijas y móviles para labores de enforcement (Kapsch, 2013).

Desde el punto de vista del estado del arte, el caso checo es relevante por representar una transición progresiva desde modelos simples de tarificación temporal hacia sistemas avanzados de pago por uso alineados con la Directiva Eurovíneta.

1.4.5 Eslovaquia

Eslovaquia introdujo en 2010 un sistema de pago por uso para vehículos pesados, manteniendo un sistema de viñeta para vehículos ligeros. El modelo es plenamente coherente con el aplicado en Alemania, dado que ambos países soportan elevados flujos de tráfico internacional.

La tarificación se basa en criterios de tipo de vehículo, peso máximo autorizado, número de ejes, distancia recorrida, categoría de emisiones EURO y tipo de vía. La red tarificada comprende aproximadamente 634 km de autopistas y autovías, así como 1.390 km de carreteras de primera clase (Zabicki, 2011).

Desde el punto de vista tecnológico, el sistema es GNSS-GSM, con dispositivos OBU que registran la posición del vehículo mediante GPS y transmiten la información a través de redes móviles. El control del cumplimiento se realiza mediante pórticos fijos y controles móviles, alcanzándose tasas de recaudación superiores al 98 %, lo que evidencia la madurez del sistema (CETMO, 2012).

1.4.6 Polonia

Polonia implantó su sistema de pago por uso en 2011 con el objetivo explícito de financiar la expansión acelerada de su red viaria, especialmente tras su integración en el mercado europeo. El sistema se aplica a vehículos de mercancías y autobuses con un peso superior a 3,5 toneladas.

La tarifa depende del peso máximo admisible, la distancia recorrida, la categoría de emisiones EURO y el tipo de vía, aplicándose sobre una red que ha crecido significativamente desde su implantación, pasando de 1.565 km en 2011 a más de 7.100 km en 2018, incluyendo autopistas, vías rápidas y carreteras principales (Główny Urząd Statystyczny, 2017).

El sistema polaco se basa en tecnología DSRC en modalidad free-flow, con elevados niveles de precisión y tasas de detección superiores al 99 %. No obstante, una limitación destacada en la literatura es su falta de interoperabilidad inicial con sistemas similares de países vecinos, como Austria o la República Checa (Nowacki et al., 2011).

1.4.7 Eslovenia

Eslovenia presenta un modelo de pago por uso que se remonta a los años setenta, coincidiendo con la apertura de las primeras autopistas del país. Tras su adhesión a la Unión Europea en 2004, el sistema fue adaptado a los principios de la Directiva Eurovíneta, aplicándose tanto a vehículos ligeros como pesados.

La red tarificada comprende aproximadamente 465 km de autopistas, y la tarificación se establece en función del tipo de vehículo y la distancia recorrida (Rapp, 2012). El sistema emplea tecnología DSRC, con dispositivos OBU asociados a cuentas bancarias, permitiendo el pago previo o posterior al viaje. Las labores de control se realizan mediante pórticos equipados con cámaras de reconocimiento de matrículas y puntos de control con barreras físicas, logrando tasas de evasión inferiores al 1 %, lo que sitúa al sistema esloveno entre los más eficaces de la región.

1.4.8 España

El modelo de autopistas de peaje en España se inicia formalmente con la Ley 8/1972, de autopistas en régimen de concesión, aunque las primeras concesiones se otorgan ya a finales de la década de 1960. El contexto económico de la época, caracterizado por una fuerte necesidad de modernización de las infraestructuras y una limitada capacidad financiera del Estado, favoreció la adopción de esquemas concesionales como mecanismo para movilizar inversión privada (Vassallo & Sánchez-Solino, 2007).

Bajo este modelo, el concesionario asumía la financiación, construcción, explotación y mantenimiento de la autopista, recuperando la inversión mediante el cobro de peajes directos a los usuarios durante un periodo concesional prolongado. Desde el punto de vista teórico, este esquema se alineaba con el principio de “quien usa, paga”, al vincular directamente el uso de la infraestructura con su financiación.

Durante las décadas de 1970 y 1980, el sistema permitió el desarrollo de corredores estratégicos, especialmente en el arco mediterráneo y en los accesos a grandes áreas metropolitanas. No obstante, desde sus primeras fases, la literatura ha señalado la aparición de asimetrías territoriales, dado que corredores con características funcionales similares eran financiados mediante modelos distintos, generando desigualdades en el coste soportado por los usuarios (Bel, 2011).

A partir de la década de 1990, el modelo concesional experimenta una nueva fase de expansión, coincidiendo con la integración plena de España en la Unión Europea y con el impulso a las políticas de colaboración público-privada. En este periodo, el sistema se diversifica mediante la introducción de variantes concesionales, entre las que destaca el peaje sombra, especialmente utilizado por comunidades autónomas.

El peaje sombra mantiene el vínculo entre tráfico y remuneración del concesionario, pero traslada el pago a la Administración pública, eliminando el peaje directo al usuario. Desde el punto de vista del pago por uso, este sistema conserva el principio económico, pero pierde la señal de precio para el usuario final y mantiene la carga financiera sobre el presupuesto público (Gómez-Ibáñez & Meyer, 1993).

Durante esta etapa, se produce también una expansión significativa de nuevas autopistas de peaje directo, muchas de ellas basadas en previsiones de demanda optimistas, lo que más adelante tendría consecuencias relevantes para la sostenibilidad del sistema.

La crisis financiera y económica iniciada en 2008 marca un punto de inflexión en el sistema concesional español. La caída abrupta del tráfico, junto con sobrecostes asociados a expropiaciones y a la financiación de proyectos, provoca graves dificultades económicas en varias concesiones, especialmente en las autopistas radiales de Madrid y otros corredores de nueva construcción (Vassallo, Ortega & Baeza, 2012).

Este periodo pone de manifiesto debilidades estructurales del modelo concesional, en particular:

- una transferencia incompleta del riesgo de demanda,
- una elevada dependencia de escenarios macroeconómicos favorables,
- y un diseño contractual que, en la práctica, acabó trasladando parte del riesgo al sector público.

Desde el punto de vista del estado del arte, esta etapa resulta crítica porque consolida una asociación negativa entre peaje, concesión y rescate público, que tendrá un impacto duradero en la aceptación social del pago por uso en España (Bel & Fageda, 2010).

A partir de 2018 comienza un proceso progresivo de finalización y reversión de concesiones históricas, dando lugar a la liberalización de numerosos tramos de autopistas de peaje, que pasan a ser gestionados directamente por la Administración General del Estado a través del Ministerio de Transportes.

Entre los tramos revertidos se incluyen algunas de las principales autopistas del país, como partes relevantes de la AP-1, AP-4 y AP-7. Como consecuencia, España pasa a tener una red de alta capacidad mayoritariamente gratuita para el usuario, con la excepción de determinados corredores aún concesionados y de algunas autopistas autonómicas (MITMA, 2023).

Desde una perspectiva financiera, esta reversión supone la desaparición de ingresos finalistas vinculados al uso de estas infraestructuras, trasladando íntegramente los costes de operación y mantenimiento al presupuesto público. La literatura técnica ha señalado que este proceso no ha ido acompañado de una reforma estructural del modelo de financiación viaria, lo que ha contribuido a agravar el déficit de conservación existente (Asociación Española de la Carretera, 2012; SEOPAN, 2023).

En la actualidad, el sistema concesional español se caracteriza por una presencia residual del peaje directo en la red estatal, concentrada en determinados tramos aún concesionados, así como en autopistas de titularidad autonómica. No existe un sistema nacional homogéneo de pago por uso, y el cobro al usuario se limita a corredores concretos con una fuerte carga histórica.

Este escenario contrasta con el marco europeo, donde la tendencia dominante es la implantación de sistemas de tarificación por distancia, especialmente para vehículos pesados, gestionados directamente por el Estado y desvinculados del modelo concesional clásico (European Commission, 2022).

El estado del arte internacional muestra una clara divergencia respecto al caso español. Países como Alemania han desarrollado sistemas nacionales de pago por uso basados en GNSS, aplicados inicialmente al transporte pesado y gestionados directamente por el sector público, con ingresos finalistas destinados a la financiación de infraestructuras (Odeck & Bråthen, 2012).

En estos modelos, el pago por uso se concibe como un instrumento de política pública, no como una consecuencia de la gestión privada de la infraestructura. Esta diferencia conceptual resulta clave para comprender por qué el pago por uso ha avanzado en otros países europeos y no en España.

La revisión del sistema concesional español permite concluir que el pago por uso no es un concepto ajeno al país, pero sí históricamente mal integrado en una estrategia nacional de financiación viaria. La identificación del peaje con la concesión privada, los problemas derivados de la crisis concesional y la liberalización de autopistas sin mecanismos alternativos de financiación han generado un rechazo estructural al modelo.

España dispone en la actualidad de una de las redes viarias de alta capacidad más extensas de Europa, con un total aproximado de 17.163 km de autopistas y autovías (Ministerio de Fomento, 2018). La introducción de concesiones de autopistas de peaje comenzó a finales de la década de 1960, en un contexto caracterizado por la escasez de recursos presupuestarios públicos y la necesidad de impulsar grandes proyectos viarios de forma acelerada (Matas et al., 2012). Como resultado de este proceso, la red de alta capacidad sujeta a peaje directo alcanza en la actualidad 3.039 km, lo que representa aproximadamente el 17,7 % del total de la red de alta capacidad.

Una de las principales características del sistema español de autopistas de peaje es su carácter pionero en el establecimiento de un acuerdo nacional de interoperabilidad entre las empresas concesionarias, que permitió la creación de un sistema de peaje electrónico común, conocido como Vía-T. Este sistema, basado en tecnología DSRC, ha generado importantes economías de escala y ha contribuido a una mejora significativa en la operación de las redes de autopistas. Asimismo, el sistema Vía-T permite la interoperabilidad técnica total con el sistema de cobro electrónico de Portugal y con determinadas vías de conexión transfronteriza con Francia, especialmente a través del País Vasco.

Desde el punto de vista tipológico, la red de peaje española comprende fundamentalmente dos tipos de infraestructuras. Por un lado, se incluyen túneles y obras singulares, en los que se aplica un peaje fijo por cruce, como es el caso de los túneles de Artxanda. Por otro lado, la mayor parte de la red corresponde a tramos interurbanos de autopistas, que representan aproximadamente el 99,6 % de los kilómetros totales, donde se aplican tarifas unitarias por kilómetro recorrido, generalmente más reducidas.

Las tarifas de peaje presentan una estructura relativamente homogénea a nivel nacional, si bien cada autopista dispone de su propio esquema tarifario. En general, los precios son más elevados durante los meses de verano, y la tarifa varía en función del tipo de vehículo. Según el Informe del sector de autopistas de peaje en España, la tarifa media para vehículos ligeros se sitúa en torno a 0,11 €/km, mientras que para vehículos pesados oscila entre 0,16 y 0,21 €/km (Ministerio de Fomento, 2019). A diferencia de otros países, las tarifas apenas varían a lo largo del día, salvo en algunos tramos del área metropolitana de Madrid donde se aplican esquemas específicos en horas punta.

En términos de competencia modal, muchas autopistas de peaje españolas presentan volúmenes de tráfico moderados, ya que compiten directamente con carreteras de alta capacidad gratuitas dentro de los mismos corredores. En este contexto, el peaje actúa como un mecanismo de gestión de la congestión, de modo que la autopista de pago se convierte en una alternativa más atractiva cuando la vía gratuita se encuentra saturada.

Tras la resolución de varios contratos de concesión por declaración de concurso, el Consejo de Ministros aprobó en 2019 una revisión de tarifas para las autopistas gestionadas por la Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre (SEITT). Estas tarifas, aplicables desde el 15 de enero de 2019 en autopistas como la R-3, R-5, R-2, R-4, M-12 y determinados tramos de la AP-7, AP-36 y AP-41, supusieron una rebaja media generalizada cercana al 30 %, junto con descuentos adicionales para usuarios frecuentes y la gratuidad en determinados periodos nocturnos (Ministerio de Fomento, 2019).

Desde el punto de vista jurídico, la legislación española define el peaje como un pago por el paso por una carretera, un túnel o un puente, que puede realizarse en efectivo, mediante tarjeta de crédito o a través de dispositivos electrónicos de telepeaje. En este ámbito, España se sitúa entre los países más avanzados en la implantación de sistemas de peaje electrónico. La introducción del sistema Vía-T en 2003 supuso un hito relevante, al permitir la interoperabilidad entre todos los concesionarios nacionales, cuyos sistemas anteriores no eran compatibles entre sí. Posteriormente, España logró la interoperabilidad técnica con Francia y Portugal, posibilitando el uso de dispositivos OBU españoles en redes extranjeras y viceversa.

No obstante, en contraste con otros países europeos, España no ha aplicado la Directiva Euroviñeta a su red de alta capacidad no tarificada, financiando la construcción y conservación de estas infraestructuras mediante los Presupuestos Generales del Estado. Existen, sin embargo, algunos tramos gestionados mediante peaje sombra, en los que no se produce un pago directo por parte del usuario. En estos casos, el abono del peaje se realiza generalmente de forma anual o fraccionada a nivel estatal, a partir de un cálculo previo basado en la intensidad media diaria de tráfico (IMD), siendo el pago transferido directamente desde la autoridad pública a la empresa concesionaria.

La Red de Carreteras del Estado está compuesta por 26.478 km de los que 12.091 km son vías de alta capacidad, es decir, autopistas, autovías y carreteras multicarril. De estos 12.091 km, una vez eliminados los peajes de la AP-1, AP-2, AP-4 y AP-7 (La Junquera-Alicante) quedan 1.435 km que son autopistas de peaje directo al usuario.

Los principales ejes donde se localizan estas autopistas son la AP-7 Autopista del Mediterráneo entre Málaga y Guadiaro, la AP-68, entre Bilbao-Zaragoza, la AP-9 Autopista del Atlántico, en Galicia, la AP-66 y la AP-71, en León, y las Radiales de Acceso a Madrid (R-2, R-3, R-4, R-5, AP-41, M-12 y AP-36) así como la AP-6, AP-51 y AP-61 entre las provincias de Madrid, Segovia y Ávila.

Actualmente las vías de gran capacidad de la Red de Carreteras del Estado tienen un total de unos 12.091 km, las cuales, considerando la eliminación del peaje debida a la reversión de concesiones en los últimos años, se distribuye de la siguiente forma:

- 1.435 km de autopistas de peaje directo al usuario (700 km de ellos los gestiona la Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre, SEITT, como consecuencia de la resolución de los contratos de concesión por liquidación de las empresas concesionarias).
- 10.656 km son autovías y carreteras multicarril (de ellas unos 1000 km, las llamadas Autovias de 1ª Generación, se gestionan de forma indirecta mediante contratos de concesión por el método de peaje en sombra, que abona directamente la administración).
- A estos 12.091 km se le suman 5.200 km de vías de gran capacidad de titularidad autonómica, 500 km de ellos de peaje.

Por otra parte, el caso de Gipuzkoa constituye una de las experiencias más relevantes para el análisis del pago por uso en España, en la medida en que representa un ejemplo de implantación real, aunque parcial, de mecanismos de tarificación viaria basados en el uso, especialmente dirigidos al transporte pesado. Desde una perspectiva inferencial, su principal valor no radica únicamente en la existencia del sistema, sino en lo que permite evidenciar: España no carece de capacidad técnica ni

jurídica para implantar pago por uso, pero sí presenta limitaciones estructurales para su escalado a nivel nacional.

El modelo implantado en Gipuzkoa se articula en torno a un sistema de cobro dirigido a vehículos pesados (N1 y A-15 principalmente) en determinados tramos de la red foral, incluyendo vías estratégicas como la N-1 o la A-15. Este sistema se basa en tecnología de captación de matrículas mediante pórticos (*free-flow*), complementado con dispositivos embarcados en el caso de usuarios recurrentes, lo que permite calcular el cobro en función del tramo recorrido (Diputación Foral de Gipuzkoa, 2018).

Desde un punto de vista técnico-operativo, el sistema presenta características similares a modelos implantados en otros países europeos en fases iniciales:

- eliminación de barreras físicas (*free-flow*)
- tarificación basada en uso efectivo de la infraestructura
- integración con sistemas de control y sanción
- aplicación inicial limitada a transporte profesional

Estas características sitúan el caso de Gipuzkoa en línea con estrategias observadas en países como Alemania o Austria, donde el despliegue comenzó en el transporte pesado.

Gipuzkoa presenta una estructura institucional concentrada y con competencias claras sobre su red viaria, lo que facilita la toma de decisiones y la implementación del sistema.

En contraste, la implantación a nivel estatal en España se enfrenta a:

- fragmentación competencial
- coordinación entre niveles administrativos
- mayor complejidad política

Al igual que en Alemania con el LKW-Maut, Gipuzkoa comenzó aplicando el sistema exclusivamente al transporte pesado, lo que:

- reduce el impacto político
- aumenta la legitimidad del cobro
- facilita la aceptación inicial

Desde una perspectiva comparada, el modelo de Gipuzkoa presenta similitudes con los sistemas europeos en su fase inicial de implantación. Al igual que el LKW-Maut alemán, el sistema se centra exclusivamente en el transporte pesado, lo que permite reducir el impacto social directo y aumentar la legitimidad del cobro bajo el principio de usuario-pagador. Esta estrategia responde a una lógica ampliamente documentada en la literatura: los sistemas de pago por uso tienden a introducirse de forma gradual, comenzando por los segmentos con mayor capacidad contributiva y menor sensibilidad política (ITF, 2019; Santos, 2017). En este sentido, Gipuzkoa reproduce un patrón europeo de implantación progresiva que no se ha trasladado al conjunto del territorio español.

No obstante, el análisis inferencial del caso revela también sus limitaciones estructurales. En primer lugar, la escala de implementación es significativamente menor que en los sistemas nacionales europeos. Mientras que países como Alemania o Austria operan sobre redes extensas y con marcos institucionales centralizados, Gipuzkoa actúa en un contexto administrativo más reducido y con competencias claramente definidas sobre su red viaria. Esta diferencia es determinante, ya que permite aislar una de las principales barreras del caso español: la complejidad institucional y la fragmentación competencial dificultan la replicación a escala estatal de modelos que son viables en entornos más acotados (AIReF, 2022).

En segundo lugar, el sistema de Gipuzkoa pone de manifiesto la relevancia de los factores sociales en la implantación del pago por uso. A pesar de su racionalidad económica y de su coherencia con los principios europeos, la implementación del sistema ha generado controversia política y oposición por parte del sector del transporte de mercancías, incluyendo recursos judiciales y debates sobre equidad territorial y proporcionalidad del cobro (CNMC, 2021). Este hecho resulta especialmente relevante, ya que evidencia que la aceptación social no es automática, incluso cuando el sistema se limita a segmentos específicos de usuarios y se justifica sobre bases técnicas sólidas.

Desde una perspectiva más amplia, el caso de Gipuzkoa ilustra un fenómeno clave identificado en las dimensiones anteriores del estado del arte: la existencia de una brecha entre viabilidad técnica y viabilidad política y social. Mientras que la tecnología permite medir y cobrar por el uso de la infraestructura sin dificultades significativas, la aceptación del sistema y su legitimación institucional dependen de factores mucho más complejos, como la percepción de equidad, la transparencia en el uso de los ingresos y la coherencia de la política pública (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019).

Asimismo, la experiencia guipuzcoana evidencia las limitaciones de los modelos de implantación no coordinada. La ausencia de un sistema equivalente en territorios colindantes genera problemas potenciales de desvío de tráfico y falta de coherencia en el sistema de transporte, lo que reduce la eficiencia global del modelo y refuerza las resistencias a su ampliación. Este aspecto conecta directamente con uno de los principales retos identificados en la literatura: la necesidad de sistemas integrados a escala suficiente para evitar efectos adversos derivados de la fragmentación territorial (European Commission, 2019).

En el contexto español, el concepto de pago por uso aplicado a infraestructuras viarias ha estado históricamente vinculado casi de forma exclusiva al modelo concesional de autopistas de peaje. A diferencia de otros países europeos que han evolucionado hacia sistemas nacionales de tarificación por distancia gestionados directamente por el Estado, España ha asociado el cobro al usuario principalmente a la explotación privada de infraestructuras mediante contratos de concesión administrativa (Bel & Fageda, 2009).

Esta particularidad ha condicionado profundamente la percepción social, política e institucional del pago por uso, hasta el punto de que, el peaje se identifica más con un modelo de gestión privada que con un instrumento de política pública orientado a la financiación y gestión eficiente de la red viaria. Por ello, cualquier análisis riguroso del pago por uso en España debe partir necesariamente de una revisión exhaustiva del sistema concesional, su evolución histórica, su situación actual y sus implicaciones.

1.4.9 Portugal

Portugal presenta una serie de particularidades que hacen de su experiencia en materia de pago por uso un caso singular dentro del contexto europeo. En primer lugar, se trata de un país periférico y no centroeuropeo, lo que implica que no se ha visto especialmente afectado por flujos masivos de tráfico internacional de paso, a diferencia de otros países donde el pago por uso ha permitido trasladar parte de los costes de conservación a vehículos extranjeros. En segundo lugar, la introducción de sistemas de telepeaje en Portugal estuvo motivada principalmente por la necesidad de aumentar la recaudación del Estado y afrontar los problemas económicos del país, más que por objetivos explícitos de gestión de la congestión o de mejora de la red viaria.

Asimismo, el sistema portugués presenta la particularidad de convivir simultáneamente con dos modelos de cobro: el sistema tradicional de peaje con barreras y pago manual, y un sistema de telepeaje exclusivamente electrónico, sin posibilidad de pago en efectivo, implantado de forma progresiva en una parte sustancial de la red de autopistas (*Sistema de Identificação Electrónica de Veículos*, 2010).

En la actualidad, Portugal dispone de una red de carreteras de peaje de aproximadamente 2.500 km, correspondientes fundamentalmente a autopistas de la Red Nacional Fundamental, siendo más de la mitad de esta red de cobro exclusivamente electrónico (Amorim et al., 2014). El sistema de cobro electrónico se basa en tecnología DSRC, con dispositivos instalados en los vehículos y controlados mediante pórticos electrónicos distribuidos a lo largo de la red. Como tecnología complementaria, el sistema portugués incorpora reconocimiento automático de matrículas (ANPR) para la identificación de vehículos y el control del cumplimiento del pago.

El precio del peaje se determina en función de la clase del vehículo y la distancia recorrida, aunque existen modalidades de pago alternativas en forma de tarifas planas o productos específicos dirigidos a usuarios frecuentes. Esta flexibilidad en los mecanismos de pago ha sido una de las estrategias adoptadas para mitigar el impacto social del sistema, especialmente tras la conversión de antiguas autopistas gratuitas (SCUT) en vías de pago.

Según Infraestruturas de Portugal (2019), la empresa pública responsable de la gestión de la red ferroviaria y viaria del país, existen diversas modalidades de abono del peaje electrónico, adaptadas a distintos perfiles de usuario. Entre ellas destacan los sistemas de asociación automática de la matrícula del vehículo a una tarjeta bancaria (EasyToll), los títulos de prepago válidos durante un periodo determinado o para un número limitado de viajes (TollService), así como tarjetas prepago-recargables activadas mediante SMS (TollCard). A estas soluciones se suma el uso de dispositivos Vía-T, interoperables con el sistema español, que permiten el pago tanto en autopistas tradicionales como en aquellas con cobro exclusivamente electrónico.

Adicionalmente, Portugal ha desarrollado dispositivos temporales vinculados al sistema Via Verde, mediante los cuales los peajes se cargan automáticamente en la cuenta bancaria del usuario en función de la distancia recorrida. Estos dispositivos son válidos tanto en la red nacional de autopistas como en los carriles específicos Via

Verde de los peajes tradicionales, reforzando la interoperabilidad y reduciendo las barreras de acceso al sistema.

El control del cumplimiento de la obligación de pago se realiza a través de sistemas de videovigilancia y mediante patrullas de la Guarda Nacional Republicana, el cuerpo encargado de la vigilancia del tráfico interurbano en Portugal, equivalente funcional de la Guardia Civil española. Esta combinación de control tecnológico y presencia física ha permitido mantener niveles aceptables de cumplimiento, aunque no exentos de controversia social, especialmente en los primeros años de implantación del sistema.

Desde la perspectiva del estado del arte, el caso portugués resulta especialmente relevante para el análisis del modelo español, ya que demuestra la viabilidad técnica de implantar sistemas de pago por uso de forma generalizada en un país periférico. Al mismo tiempo, pone de manifiesto la importancia de los factores económicos, sociales y políticos en la aceptación del sistema, más allá de la disponibilidad tecnológica.

1.4.10 Francia

El desarrollo de la red de autopistas en Francia (*autoroutes*) se inicia a comienzos de la década de 1970, coincidiendo con una etapa de fuerte crecimiento económico y de expansión de las infraestructuras de transporte. El primer tramo de autopista de peaje fue inaugurado en 1970 entre Lille y París (Lyon-Marsella), marcando el inicio de un modelo que posteriormente se consolidaría como uno de los más extensos de Europa occidental. En la actualidad, la red francesa de carreteras de alta capacidad alcanza aproximadamente 15.500 km, de los cuales alrededor de 9.158 km están sujetos a peaje directo, lo que representa más del 60 % del total (Union Routière de France, 2018).

Este elevado grado de tarificación sitúa a Francia como uno de los países europeos con mayor tradición y extensión del peaje directo. El sistema francés se articula fundamentalmente a través de un modelo concesional, en el que la explotación de las autopistas recae en grandes empresas concesionarias privadas, bajo la supervisión del Estado. Desde el punto de vista operativo, el sistema de pago electrónico de peajes francés se conoce como Liber-T, y se encuentra plenamente implantado en la red de autopistas de peaje.

El sistema Liber-T se basa en tecnología DSRC, utilizada en estaciones de peaje con barrera, donde convive con el pago manual en efectivo o con tarjeta bancaria. Esta coexistencia de sistemas permite atender tanto a usuarios habituales como ocasionales, aunque introduce limitaciones en términos de fluidez del tráfico frente a modelos de cobro totalmente *free-flow*. No obstante, Francia ha alcanzado un elevado nivel de interoperabilidad técnica y comercial a escala nacional, así como interoperabilidad transfronteriza con países vecinos, entre ellos España, especialmente en las autopistas que conectan ambos países a través del País Vasco.

A pesar de su posición geográfica central en Europa y del intenso tránsito internacional que atraviesa su territorio, Francia constituye uno de los pocos países centroeuropeos que no ha implantado la Directiva Euroviñeta en su red viaria. El intento más relevante de introducir un sistema de tarificación para vehículos pesados fue la denominada "*écotaxe poids lourds*", un impuesto al transporte de mercancías por carretera que pretendía internalizar los costes ambientales y de mantenimiento asociados al tráfico pesado.

Sin embargo, tras varios aplazamientos entre 2013 y 2014, la ecotasa fue finalmente suspendida de forma definitiva en 2015, como consecuencia de las fuertes movilizaciones sociales protagonizadas por transportistas y agricultores, especialmente en regiones como Bretaña. Este episodio puso de manifiesto las dificultades de aceptación social asociadas a la introducción de nuevos gravámenes sobre el transporte por carretera, incluso en un país con una larga tradición de peaje y con una red mayoritariamente tarificada.

Desde la perspectiva del estado del arte, el caso francés resulta especialmente relevante por mostrar que la existencia de una amplia red de autopistas de peaje y de sistemas electrónicos maduros no garantiza por sí sola la viabilidad política de un pago por uso de carácter general, especialmente cuando se percibe como un nuevo impuesto. En este sentido, Francia ilustra de manera clara la importancia de los factores sociales y políticos en el diseño e implantación de sistemas de tarificación viaria, más allá de la disponibilidad tecnológica o del marco normativo europeo.

Tabla 1. Resumen de las experiencias nacionales en el ámbito de pago por uso.

Fuente: Elaboración propia

País	Vehículo tarificado	Parámetros de la tarifa	Red tarificada	Tecnología de cobro
Suiza	Todos	Distancia recorrida Peso máximo autorizado Categoría EURO	71.000 km (totalidad de la red viaria nacional)	Tacógrafo + GNSS (control)
Austria (2004)	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo Categoría EURO	2.180 km (autopistas y vías rápidas)	DSRC
Alemania (2005)	> 12 t	Distancia recorrida Tipo de vehículo Categoría EURO	~12.500 km (principalmente autopistas federales)	GNSS + comunicaciones móviles
República Checa (2007)	Todos	Distancia recorrida Número de ejes Categoría EURO Tipo de vía	1.442 km (autopistas, vías rápidas y carreteras principales)	DSRC
Eslovenia (2008)	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo	465 km(autopistas)	DSRC
Eslovaquia (2010)	Todos	Distancia recorrida Peso y número de ejes Categoría EURO Tipo de vía	2.024 km (autopistas y carreteras principales)	GNSS + comunicaciones móviles
Polonia (2010)	> 3,5 t	Distancia recorrida Peso máximo autorizado Categoría EURO Tipo de vía	2.653 km (autopistas, vías rápidas y carreteras principales)	DSRC
Portugal (2012)	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo (existencia de tarifas planas y productos prepago)	~2.512 km (autopistas; >50 % exclusivamente electrónicas)	DSRC + ANPR
España	Todos	Distancia recorrida Tipo de vehículo	~2.500 km 12% de las vías de alta capacidad (autopistas y autovías)	Shadow Toll DSRC (Vía-T) Sistemas free-flow en casos puntuales (Gipuzkoa)
Francia	Todos	Según infraestructura	~9.137 km (autopistas de peaje)	DSRC (Liber-T)

1.5 Tecnologías empleadas en los sistemas de cobro electrónico de peajes

La historia de los sistemas de peaje se remonta a la antigüedad, cuando civilizaciones como la romana ya exigían pagos por el uso de determinadas calzadas o puentes. A lo largo de los siglos, el cobro por el uso de infraestructuras ha evolucionado desde barreras físicas operadas manualmente hasta complejos sistemas electrónicos con cobertura nacional. Durante la Edad Media, los peajes eran una fuente importante de ingresos para los señores feudales y los municipios, y posteriormente fueron adoptados por los Estados como un mecanismo de financiación de obras públicas.

Con la revolución industrial y la expansión del ferrocarril y la carretera, la necesidad de mantener y ampliar la red viaria llevó a muchos países a institucionalizar el cobro de peajes. En el siglo XX, los peajes comenzaron a utilizarse también como instrumentos de política económica y territorial, gestionados por entes públicos o Concesionarios privados bajo regímenes normativos diversos. La aparición de tecnologías como la comunicación por microondas (DSRC), el posicionamiento por satélite (GNSS) y el reconocimiento de matrículas (ANPR) ha permitido modernizar el sistema en las últimas décadas.

El primer gran paso en esta dirección lo dio Singapur en 1975. cuando introdujo el *Area Licensing Scheme* (ALS). un sistema pionero que cobraba por acceder al centro de la ciudad en hora punta. Años después. con los avances tecnológicos. el país evolucionó hacia un sistema electrónico (ERP) que ajustaba las tarifas en tiempo real según la demanda. Inspirados en su éxito. otros lugares como Londres (2003). Estocolmo (2006) y Milán (2008) han implementado sus propias versiones de tarificación vial con resultados positivos en la reducción del tráfico y la contaminación.

Actualmente, los sistemas de peaje cumplen múltiples funciones: financian la construcción y el mantenimiento de infraestructuras, regulan la demanda en contextos de congestión, promueven la equidad modal e incluso incentivan la transición ecológica mediante tarifas diferenciadas por nivel de emisiones. Esta evolución refleja la creciente complejidad del transporte moderno y la necesidad de soluciones adaptativas, interoperables y sostenibles, particularmente en entornos urbanos de alta densidad.

El tráfico en las grandes ciudades siempre ha sido un desafío. A medida que las poblaciones crecen y la movilidad se intensifica. las carreteras se congestionan. el tiempo de viaje se dispara y la contaminación se convierte en un problema cada vez más grave. Las ciudades han buscado a lo largo de la historia soluciones para hacer frente a estos desafíos y una de las más debatidas en las últimas décadas ha sido el *Road Pricing*, o la tarificación por el uso de infraestructuras viarias.

En el contexto de la transición hacia una movilidad sostenible y eficiente, los sistemas de peaje o *Road Pricing* se han consolidado como una herramienta clave para la gestión de la demanda, la financiación de infraestructuras viarias y la reducción de externalidades negativas del transporte. Santos, G. (2004).

La tarificación por uso, en sus diversas formas, permite internalizar parte de los costes reales del desplazamiento por carretera, promoviendo al mismo tiempo decisiones de movilidad más racionales y sostenibles.

La idea de cobrar por circular por determinadas carreteras no es nueva. Desde hace siglos, los peajes han surgido como una forma de financiar la construcción y el

mantenimiento de infraestructuras. Sin embargo. los sistemas modernos de pago por uso van más allá de un simple peaje: buscan influir en el comportamiento de los conductores. reducir la congestión y fomentar el uso de alternativas más sostenibles.

En España, el debate sobre la tarificación del uso de carreteras ha estado sobre la mesa durante años, no obstante, ha cobrado especial relevancia recientemente. Factores como el envejecimiento de las infraestructuras, la necesidad de nuevas fuentes de financiación y los compromisos medioambientales han hecho que Madrid. una de las regiones con mayor tráfico de España. se plantee nuevas estrategias para gestionar su movilidad. (Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre SEITT, 2024)

El modelo de pago por uso *(pay per use / usage based pricing)* se basa en el principio de que los usuarios de un bien o servicio contribuyen a su financiación en función de la intensidad y el grado real de utilización, y no mediante un pago fijo o desvinculado del consumo efectivo. Este enfoque contrasta con modelos tradicionales de financiación presupuestaria o de tarifas planas, en los que el coste se distribuye entre el conjunto de los contribuyentes o usuarios con independencia del uso individual.

Desde una perspectiva económica, el pago por uso se apoya en el principio de eficiencia asignativa, al vincular el precio afrontado por el usuario con el coste marginal del servicio. Asimismo, permite aplicar el principio de “quien usa, paga”, y, en determinados contextos, el de “quien contamina, paga”, facilitando la internalización de costes externos asociados al consumo del bien o servicio, como el deterioro de activos, la congestión o los impactos ambientales.

Aunque el modelo de pago por uso se aplica en múltiples sectores, como la energía, los servicios digitales o los modelos de negocio industriales, su aplicación en el ámbito de las infraestructuras de transporte, y en particular en las carreteras, ha adquirido una relevancia creciente debido a los elevados costes de inversión y mantenimiento asociados a estas infraestructuras y a las limitaciones de la financiación pública tradicional.

En el ámbito de las infraestructuras viarias, el pago por uso se materializa mediante distintos sistemas de peaje o tarificación viaria, que permiten recaudar ingresos directamente de los usuarios en función del uso que realizan de la carretera. Estos sistemas tienen una doble finalidad: por un lado, financiar la construcción, operación y conservación de la infraestructura; por otro, gestionar la demanda de tráfico e incentivar comportamientos más eficientes desde el punto de vista económico y ambiental.

Las carreteras presentan características que hacen especialmente relevante el uso de modelos de pago por uso. No se trata de bienes públicos puros: su capacidad es limitada, su uso genera congestión y su deterioro está directamente relacionado con la intensidad y el tipo de tráfico, especialmente el tráfico pesado. Cuando la financiación se realiza exclusivamente mediante impuestos generales, estos costes no se reflejan en las decisiones individuales de los usuarios, lo que puede conducir a un uso excesivo de la infraestructura y a déficits crónicos de mantenimiento.

En este contexto, el pago por uso se ha consolidado en varios países como un instrumento para vincular el uso efectivo de la carretera con su financiación, reducir la dependencia de los presupuestos públicos y mejorar la sostenibilidad a largo plazo del sistema viario.

El desarrollo de los sistemas de cobro electrónico de peajes ha estado estrechamente vinculado a la evolución de las tecnologías de identificación, comunicación y posicionamiento de vehículos. En el ámbito europeo, estas tecnologías han ido apareciendo de forma progresiva y responden tanto a avances técnicos como a necesidades operativas relacionadas con la eficiencia del cobro, la reducción de la congestión y la mejora de la interoperabilidad entre sistemas nacionales. La literatura especializada identifica varias tecnologías principales que han sido utilizadas, en distintos momentos y contextos, para la implantación de sistemas de telepeaje.

Tacógrafo

Desde un punto de vista histórico, una de las primeras soluciones empleadas fue el uso del tacógrafo, que permite registrar la distancia recorrida por un vehículo mediante un dispositivo a bordo conectado al odómetro. Esta tecnología fue adoptada, entre otros, por Suiza, el primer país en implantar un sistema de peaje totalmente electrónico a nivel nacional para vehículos pesados a partir de 2001. En este sistema, los vehículos están equipados con una unidad a bordo (*On-Board Unit,* OBU) acoplada al tacógrafo, que registra de forma continua la distancia recorrida. El sistema se basa en la autodeclaración de los datos de kilometraje, que son transmitidos periódicamente al sistema central de la administración responsable del peaje. Para garantizar la fiabilidad del sistema y limitar la evasión, estas soluciones se complementan con tecnologías de control como GPS, DSRC y reconocimiento automático de matrículas (Felix et al., 2000). La evidencia empírica muestra que, pese a la posibilidad teórica de manipulación, las tasas de evasión han sido muy reducidas, situándose por debajo del 1 % (Balmer, 2006).

Reconocimiento automático de matrículas (ANPR)

Otra tecnología ampliamente utilizada es el reconocimiento automático de matrículas (*Automatic Number Plate Recognition*, ANPR), basado en el uso de cámaras y algoritmos de reconocimiento óptico de caracteres para identificar los vehículos que circulan por una infraestructura de peaje. El ANPR constituye una tecnología madura y altamente automatizada, especialmente extendida en el ámbito de los peajes urbanos, como los implantados en Londres, Estocolmo o Milán. No obstante, también existen aplicaciones en carreteras interurbanas, como la autopista de peaje ETR-407 en Toronto. Desde 2013, algunos países como Australia o Chile han considerado el ANPR como una alternativa o complemento a tecnologías tradicionales como DSRC (Kapsch, 2013). Su principal ventaja radica en que no requiere la instalación de un dispositivo a bordo por parte del usuario, aunque suele exigir el registro previo del vehículo o la habilitación de mecanismos de pago pre-pago o post-pago, lo que introduce desafíos adicionales en términos de *enforcement* y gestión administrativa.

Dedicated short-range communication (DSRC)

La tecnología DSRC (*Dedicated Short-Range Communications*) ha sido, desde finales de la década de 1980, el enfoque más común para la implantación del cobro electrónico de peajes en autopistas de peaje a nivel mundial. Este sistema se basa en la comunicación bidireccional mediante microondas entre un dispositivo a bordo del vehículo (OBU) y la infraestructura de carretera (*Road-Side Equipment*, RSE), generalmente instalada en pórticos situados sobre la calzada (Sørensen & Taylor, 2005). El OBU se asocia a la cuenta de un usuario registrado y permite la identificación del vehículo y la aplicación automática del cobro cuando este pasa bajo el pórtico. La

infraestructura DSRC suele complementarse con sensores de clasificación de vehículos y cámaras ANPR para verificar la coherencia de la información y detectar posibles evasiones (Jordán et al., 2003).

El DSRC puede emplearse tanto en estaciones de peaje tradicionales con barrera como en configuraciones de flujo libre multicarril (Multi-Lane Free-Flow, MLFF). Mientras que los sistemas con barrera obligan a reducir la velocidad y pueden afectar a la capacidad de la vía, los esquemas de flujo libre permiten que los vehículos circulen sin detenerse, mejorando significativamente la fluidez del tráfico y reduciendo la congestión en corredores con elevados volúmenes de circulación (Lee et al., 2008; Sheehan, 2008). Por este motivo, las soluciones MLFF basadas en DSRC se han convertido en una referencia en numerosos sistemas interurbanos de peaje.

Identificación por radiofrecuencia (RFID)

La identificación por radiofrecuencia (RFID) constituye otra tecnología relacionada con el DSRC, basada igualmente en la transmisión de datos mediante ondas de radio entre un transpondedor instalado en el vehículo y una antena situada en la infraestructura de peaje. Los sistemas RFID pueden emplear etiquetas activas o pasivas, con diferentes rangos de lectura y costes asociados. Las etiquetas pasivas, que no requieren alimentación interna y se colocan habitualmente en el parabrisas del vehículo, presentan un coste reducido, aunque ofrecen un rango de lectura más limitado (Kamalurazil, 2010; CETMO, 2012). En la práctica, los sistemas RFID presentan características operativas muy similares a las soluciones DSRC y han sido utilizados principalmente en Estados Unidos y China, con una implantación más limitada en Europa (Feng et al., 2010).

Comunicación por satélite (GNSS)

En los sistemas más avanzados, la tarificación se basa en comunicaciones por satélite, a través de tecnologías de posicionamiento global (GNSS). En este enfoque, el peaje se calcula en función de la posición del vehículo y de la distancia recorrida dentro de las secciones de carretera sujetas a tarificación. Los sistemas GNSS se utilizan actualmente en los sistemas nacionales de peaje para vehículos pesados en países como Alemania y Eslovaquia. Desde el punto de vista técnico, estos sistemas se componen de una unidad a bordo GNSS, un sistema de comunicaciones móviles, generalmente a través de redes GSM, y una oficina central que recibe, procesa y factura los datos de uso (Händel et al., 2014). Para reducir el riesgo de evasión, los sistemas GNSS se complementan habitualmente con tecnologías de control como ANPR y DSRC (Jordán et al., 2003).

Una característica clave de los sistemas GNSS es la necesidad de disponer de un mapa digital actualizado de las secciones de carretera tarificadas, que permite asociar con precisión las coordenadas del vehículo a tramos concretos de la red. El cobro se genera cuando el vehículo atraviesa puntos virtuales definidos en dicho mapa, sin necesidad de instalar pórticos físicos, lo que reduce significativamente los costes de infraestructura en redes extensas. Además del cobro del peaje, estos sistemas permiten ofrecer servicios de valor añadido, como funciones de navegación o servicios de emergencia.

Comunicaciones móviles

Finalmente, el desarrollo de las comunicaciones móviles ha abierto nuevas posibilidades para los sistemas de cobro electrónico de peajes. Las aplicaciones móviles y las tecnologías de telefonía permiten realizar el pago del peaje, gestionar la cuenta del usuario, modificar métodos de pago o seleccionar modalidades tarifarias sin necesidad de infraestructuras físicas intensivas. En la actualidad, los dispositivos móviles se utilizan tanto como medio de pago, sustituyendo o complementando a la tarjeta bancaria mediante tecnologías como NFC, como soporte para la transmisión de datos en sistemas GNSS y otras arquitecturas híbridas. Esta evolución proporciona una mayor flexibilidad al gestor de la infraestructura y reduce las barreras de entrada para los usuarios.

En conjunto, la evolución de estas tecnologías ha permitido la transición desde modelos de cobro manual hacia sistemas de tarificación electrónica cada vez más flexibles, escalables e interoperables, sentando las bases para el desarrollo de sistemas de pago por uso de alcance nacional y supranacional.

Una vez analizado el marco normativo y las principales experiencias nacionales en materia de telepeaje, la revisión de la literatura científica permite ampliar significativamente el alcance del análisis, incorporando aspectos que trascienden la dimensión puramente regulatoria o institucional. En particular, la literatura introduce cuestiones relacionadas con la obsolescencia tecnológica, la protección de la privacidad, el impacto de las tecnologías emergentes y la evolución de los sistemas de cobro electrónico en el contexto de la digitalización del transporte. No obstante, resulta relevante señalar que no existen trabajos científicos que integren de forma sistemática todas las tecnologías de cobro electrónico de peajes ni que ofrezcan soluciones completas para la interoperabilidad a escala europea, lo que refuerza la fragmentación del conocimiento existente.

De manera general, la literatura aborda los sistemas de telepeaje desde tres grandes enfoques. En primer lugar, numerosos estudios se enmarcan en el ámbito de los Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), analizando el telepeaje como un subsistema integrado dentro de arquitecturas más amplias. En segundo lugar, existe una línea de investigación centrada en la electrónica y las telecomunicaciones, que examina el funcionamiento técnico de los dispositivos de a bordo, los protocolos de comunicación y la fiabilidad de los sistemas. Finalmente, en años recientes ha cobrado relevancia una aproximación más amplia vinculada al paradigma de la *Mobility as a Service* (MaaS), en la que el telepeaje se concibe como un componente adicional de servicios de movilidad integrados. Estas aproximaciones no son excluyentes y resultan complementarias para los objetivos del presente trabajo.

En relación con las tecnologías concretas, Prud'homme y Bocarejo (2005) analizaron de forma temprana el uso del reconocimiento automático de matrículas (ANPR), ampliamente implantado en sistemas urbanos como los de Londres, Estocolmo y Milán, así como en infraestructuras interurbanas en América del Norte, como la autopista ETR-407 en Toronto. En Europa, el ANPR se emplea fundamentalmente como tecnología complementaria, orientada a labores de vigilancia y control del pago en puntos concretos de la red, basándose en la captura y posterior reconocimiento de las matrículas de los vehículos.

Por su parte, Lee et al. (2008) describen el funcionamiento de la tecnología DSRC, basada en la transmisión de datos mediante microondas entre un dispositivo a bordo del vehículo y el equipamiento instalado en la infraestructura. Este sistema, ampliamente utilizado en Europa y en gran parte del mundo, puede operar tanto en configuraciones exclusivas de flujo libre (*multi-lane free-flow*) como en combinación con estaciones de peaje tradicionales con barrera. La literatura coincide en señalar que el DSRC resulta especialmente adecuado para redes con altas intensidades de tráfico y un número limitado de accesos, debido a su elevada fiabilidad y precisión (Yang et al., 2012).

Otros trabajos han analizado la identificación por radiofrecuencia (RFID) como tecnología de telepeaje. Autores como Du y Chen (2011), Feng et al. (2010) o Ren y Gao (2009) señalan que el RFID engloba un conjunto amplio de tecnologías basadas en ondas de radio, ampliamente utilizadas en Estados Unidos y China. A diferencia del DSRC, los dispositivos RFID pueden ser activos o pasivos y, en general, presentan menores niveles de precisión, lo que limita su uso en determinados contextos.

Las tecnologías basadas en posicionamiento por satélite (GNSS) han sido objeto de un creciente interés en la literatura. Lu et al. (2010) destacan que estos sistemas permiten conocer de forma continua la posición del vehículo, facilitando la delimitación precisa de los tramos recorridos y el cálculo del peaje correspondiente. Su implantación en países europeos ha contado con el respaldo de las instituciones comunitarias, vinculando su desarrollo al programa Galileo (Jordán et al., 2003). Aunque la precisión inicial de estos sistemas era inferior a la del DSRC (Numrich, Rujá & Voß, 2013), el desarrollo progresivo de Galileo ha permitido mejorar sustancialmente su fiabilidad (European GNSS Agency, 2018).

Un caso singular dentro de la literatura es el uso del tacógrafo como instrumento de cobro electrónico. Balmer (2006) analiza su aplicación en Suiza, donde toda la red viaria está sujeta a tarificación, permitiendo calcular el peaje en función de la distancia recorrida.

La literatura también pone de relieve el papel creciente de las comunicaciones móviles en los sistemas de telepeaje. Händel et al. (2014) señalan que las aplicaciones móviles permiten avanzar hacia sistemas más interoperables y flexibles, reduciendo costes de operación y facilitando el pago electrónico. No obstante, autores como Burden y Nijhuis (2012) advierten de limitaciones relevantes, como la duración de las baterías, la responsabilidad del usuario de mantener el dispositivo operativo y los riesgos asociados a la privacidad de los datos.

En este contexto, la tecnología 5G adquiere una relevancia creciente. La reducción de latencias y el aumento de la capacidad de transmisión permitirán integrar nuevos servicios de telepeaje y mejorar su precisión. Iniciativas como el 5G PPP o la 5G *Automotive Association* (5GAA) analizan las implicaciones técnicas y económicas de estos desarrollos. Asimismo, la Comisión Europea impulsa el proyecto C-Roads, orientado al despliegue de sistemas ITS cooperativos (C-ITS), que permiten la comunicación infraestructura-vehículo (I2V) y vehículo-vehículo (V2V), mejorando la seguridad, la eficiencia del tráfico y la calidad del servicio.

Öörni y Korhonen (2014) destacan la importancia de integrar el telepeaje con otros sistemas ITS, como el eCall, con el fin de aprovechar economías de escala en los dispositivos a bordo. Asimismo, se han producido avances en los procedimientos de

transmisión de datos, como el uso de balizas en infraestructuras viarias basadas en comunicaciones a 5,9 GHz (Malvy, 2012), también incorporadas en el marco de C-Roads.

La revisión muestra que ciertas tecnologías han adquirido mayor protagonismo en la literatura científica, como el DSRC en Europa (Ansari et al., 2013) o el RFID en Estados Unidos (General Assembly of the State of Virginia, 2008). Hayward (2015) concluye que los sistemas de peaje electrónico responden a dos grandes objetivos: mejorar la eficiencia operativa de las autopistas de peaje y servir como instrumento de política pública para vincular el uso de la carretera con los costes asociados a la distancia recorrida y las emisiones. Estas tecnologías se han extendido también a contextos asiáticos y americanos, como Taiwán, Japón y diversos países de América Latina (Mizutani & Urushima, 2008).

La literatura también dedica una atención significativa a las labores de vigilancia y control del pago. Hsu y Shih (2015) advierten que el impago del peaje puede reducir notablemente los ingresos del operador, y que este problema no puede resolverse únicamente mediante barreras físicas, sino que requiere sistemas avanzados de videovigilancia y coordinación con las fuerzas de seguridad.

En paralelo al análisis tecnológico, una parte relevante de la literatura se centra en el comportamiento de los usuarios y en los factores que influyen en la adopción del telepeaje. Hsu et al. (2013) señalan que gobiernos, operadores y usuarios han incorporado progresivamente soluciones tecnológicas para mejorar la seguridad y la fluidez del tráfico. Los dispositivos a bordo (*On-Board Units*, OBU), comúnmente denominados tags, desempeñan un papel central en este proceso al permitir el pago electrónico sin necesidad de detener el vehículo.

Jou et al. (2013) identifican múltiples beneficios asociados al uso de tags, tanto para los usuarios como para los operadores, incluyendo la reducción de tiempos de viaje, menores emisiones contaminantes y menores costes operativos. Sin embargo, la literatura también destaca barreras relevantes para la adopción a gran escala, como el coste del dispositivo, el desconocimiento de los servicios disponibles y, especialmente, la falta de interoperabilidad transnacional entre sistemas europeos.

La privacidad constituye uno de los factores más analizados en la literatura. Estudios como Balasch et al. (2010), Riley (2008), Ogden (2001) o Hensher (1991) examinan los riesgos asociados al tratamiento de datos personales y la necesidad de armonizar los criterios de las autoridades públicas y los operadores. La preocupación por la privacidad puede disuadir a los usuarios de adoptar el telepeaje, incluso cuando sus ventajas operativas son evidentes.

A pesar del creciente volumen de estudios sobre percepción ciudadana, persisten lagunas significativas en el análisis de los factores que determinan la adopción del telepeaje. La mayoría de los trabajos se centran en corredores específicos (Huang & Burris, 2015) o en evaluaciones parciales del rendimiento tecnológico (Canscini, 2007; Abuzwidah & Abdel-Aty, 2015), siendo menos frecuentes los análisis a escala nacional.

La literatura también destaca que, cuando existen alternativas de pago en efectivo, la adopción del telepeaje tiende a ser menor. Para superar esta barrera, la Unión Europea ha promovido el Servicio Europeo de Peaje Electrónico (SET), aunque con avances limitados (Heras-Molina et al., 2016). En paralelo, diversos países han

implantado autopistas con cobro exclusivamente electrónico, como el Puente Golden Gate en California, las carreteras SCUT en Portugal o las autopistas urbanas de Santiago de Chile (de Grange et al., 2015).

Memarian et al. (2012) señalan que el uso generalizado de tags proporciona información valiosa sobre patrones de viaje y comportamiento del cliente, aunque su penetración sigue siendo limitada por factores como la preocupación por la privacidad y la percepción del coste del dispositivo (Jou et al., 2013).

Finalmente, estudios como Jou y Huang (2014) ponen de manifiesto que la investigación sobre la disposición a utilizar el telepeaje es aún incipiente. Otros trabajos analizan aspectos como la aceptación social del cobro sin barrera (Odeck & Kjerkreit, 2010), la percepción de esquemas de tarificación para reducir la congestión urbana (Schade & Baum, 2007; Kottenhoff & Brundell-Freij, 2009) o la privacidad electrónica en el contexto del seguimiento de vehículos (Jardé-Cédel et al., 2015).

En síntesis, la literatura científica existente ofrece una base sólida para comprender los aspectos tecnológicos y de aceptación social del telepeaje, pero no aborda de forma integrada la implantación de sistemas de pago por uso a escala nacional, especialmente en países como España. Esta constatación refuerza la necesidad del presente Trabajo Fin de Máster y justifica el desarrollo de la metodología propuesta en los capítulos siguientes.

2. Objetivos del Trabajo

2.1 Planteamiento general de los objetivos

El presente Trabajo Fin de Máster se enmarca en el ámbito del análisis económico y regulatorio de las infraestructuras viarias, con especial atención al modelo de pago por uso y a su aplicación mediante sistemas de tarificación basados en tecnología GNSS. A partir de la revisión del estado del arte y del análisis del contexto español, se ha identificado un vacío relevante tanto en la literatura académica como en la práctica de política pública, derivado de la ausencia de un sistema generalizado de pago por uso en la red de autovías estatales, a diferencia de lo observado en otros países europeos.

En este contexto, los objetivos del trabajo se orientan a proporcionar una explicación estructurada y académicamente fundamentada de las causas que han impedido la implantación de un sistema GNSS en España, así como a evaluar de forma preliminar la viabilidad técnica y económica de su aplicación mediante un piloto en un corredor concreto de la Red de Carreteras del Estado.

2.2 Objetivo general

El objetivo general de este Trabajo Fin de Máster es analizar las razones económicas, políticas, sociales, tecnológicas, ambientales y legales que explican la no implantación de un sistema de pago por uso basado en tecnología GNSS en la red de autovías españolas, y evaluar la viabilidad preliminar de la implantación de un piloto GNSS en un corredor específico de la Red de Carreteras del Estado.

Este objetivo general integra dos dimensiones complementarias. Por un lado, una dimensión explicativa, centrada en comprender los factores estructurales que han condicionado las decisiones de política pública en España. Por otro lado, una dimensión aplicada, orientada a explorar la viabilidad técnica y económica de un sistema GNSS a escala de corredor, como paso previo a posibles desarrollos futuros.

2.3 Objetivos específicos

Con el fin de alcanzar el objetivo general, el trabajo se articula en torno a los siguientes objetivos específicos, que estructuran el desarrollo del TFM y orientan la metodología de investigación.

Objetivo específico 1: Definición conceptual y delimitación del modelo de pago por uso.

Analizar y definir con precisión el concepto de pago por uso en infraestructuras viarias, diferenciándolo de otros modelos de financiación y gestión como la financiación presupuestaria, el peaje convencional, el peaje sombra o los modelos concesionales clásicos. Este objetivo incluye la revisión de los fundamentos económicos del pago por uso desde la perspectiva de la economía del transporte y la identificación de las principales modalidades de tarificación existentes en el ámbito europeo.

Objetivo específico 2: Revisión del estado del arte internacional y europeo.

Realizar una revisión crítica de la literatura académica y técnica sobre la implantación de sistemas de pago por uso y, en particular, de sistemas GNSS de tarificación viaria en Europa. Este objetivo persigue identificar las principales tendencias, resultados

empíricos, ventajas y limitaciones señaladas en la literatura, así como las lecciones aprendidas de experiencias consolidadas como el caso alemán.

Objetivo específico 3: Análisis del marco normativo y regulatorio aplicable.

Examinar el marco normativo europeo y nacional relevante para la implantación de sistemas de pago por uso, con especial atención a la Directiva Euroviñeta y a su evolución reciente mediante la Directiva (UE) 2022/362. Este objetivo incluye analizar el grado de alineación formal de España con dicho marco y las implicaciones regulatorias derivadas de su transposición o aplicación práctica.

Objetivo específico 4: Análisis del contexto español y detección del gap de investigación.

Analizar la evolución histórica del sistema viario español, su modelo de financiación y las decisiones de política pública adoptadas en relación con los peajes y la tarificación viaria. Este objetivo persigue identificar y caracterizar el gap existente entre la evidencia académica y la práctica en España, destacando la ausencia de un sistema GNSS generalizado y la escasez de estudios académicos aplicados al caso español.

Objetivo específico 5: Identificación de factores explicativos mediante un análisis PESTEL y DAFO.

Identificar y analizar de forma sistemática los factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales que han condicionado la no implantación del pago por uso en España, utilizando el marco analítico PESTEL. Este objetivo permite integrar de manera estructurada los distintos elementos identificados en el estado del arte y en el análisis del contexto nacional, superando explicaciones unidimensionales basadas únicamente en criterios técnicos o económicos.

Objetivo específico 6: Diseño de una metodología de evaluación aplicada a un piloto GNSS.

Proponer una metodología de investigación aplicada, adecuada al alcance de un Trabajo Fin de Máster, para evaluar la viabilidad técnica y económica de un sistema GNSS de pago por uso en un corredor concreto de la red viaria española. Este objetivo incluye la definición de supuestos, variables de análisis, fuentes de datos y criterios de evaluación, basándose en la literatura revisada y en experiencias internacionales.

Objetivo específico 7: Aplicación preliminar de la metodología a un corredor específico.

Aplicar de forma exploratoria la metodología propuesta a un corredor representativo de la Red de Carreteras del Estado, A modo de ejemplo, la A-2, con el fin de estimar de manera preliminar los costes asociados a la implantación de un piloto GNSS. Este objetivo no persigue obtener resultados definitivos, sino ilustrar la aplicabilidad del enfoque metodológico y sus potenciales implicaciones.

3. Estado del arte

3.1 Introducción

La literatura sobre tarificación viaria en Europa ha experimentado una evolución significativa en las últimas décadas, desplazándose desde enfoques centrados en la financiación de infraestructuras hacia marcos más amplios orientados a la eficiencia económica, la sostenibilidad ambiental y la gestión de la demanda. Sin embargo, esta evolución no ha sido homogénea ni en el plano académico ni en la práctica institucional. Aunque existe un amplio cuerpo de literatura sobre *road pricing*, peajes, viñetas y sistemas de cobro electrónico, la evidencia disponible presenta una fragmentación importante en función del país analizado, del tipo de vehículo considerado, de la tecnología utilizada y del problema de política pública al que responde cada sistema (ITF, 2019; Small & Verhoef, 2007; Santos, 2017).

En este contexto, el presente estado del arte adopta un enfoque inferencial y no meramente descriptivo. Esto implica que el objetivo no consiste en enumerar sistemas nacionales de tarificación o describir sus características técnicas de forma aislada, sino en identificar patrones, relaciones y factores explicativos que permitan comprender por qué determinados países europeos han avanzado hacia modelos de pago por uso más sofisticados, a modo de ejemplo, sistemas basados en distancia y tecnologías GNSS, mientras que otros han mantenido configuraciones más tradicionales o fragmentadas. En otras palabras, el estado del arte se orienta a responder no solo al “qué existe”, sino sobre todo al “por qué existe así” y al “por qué no existe de otra manera”.

Este planteamiento resulta especialmente pertinente en un ámbito como el del RUC, donde las diferencias observadas entre países no pueden atribuirse únicamente a cuestiones tecnológicas. La literatura muestra de forma consistente que la implantación de sistemas de pago por uso depende de una interacción compleja entre factores políticos, económicos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales, lo que justifica la adopción de un enfoque integrado de carácter PESTEL (ITF, 2019; European Commission, 2019).

Así, por ejemplo, la misma tecnología puede tener trayectorias radicalmente distintas según el grado de centralización institucional, la aceptación social del pago directo, la estructura del mercado de transporte de mercancías o la existencia de una hoja de ruta regulatoria clara.

Desde esta perspectiva, el estado del arte no se estructura como una respuesta secuencial a cincuenta preguntas independientes, sino como un análisis articulado por dimensiones, en el que dichas preguntas quedan integradas dentro de una lógica comparada. Este diseño responde a una exigencia metodológica clara: el valor del análisis no reside en contestar cada cuestión de manera aislada, sino en mostrar cómo unas variables condicionan a otras y cómo esa interacción explica la diferente evolución de los sistemas de tarificación en países como Suiza, Austria, Alemania, República Checa, Eslovaquia, Polonia, Portugal, Francia y España.

El criterio de selección de estos países responde precisamente a esa diversidad. En un extremo se sitúan países como Suiza y Alemania, que han desarrollado sistemas avanzados de tarificación para vehículos pesados basados en distancia y con elevada integración tecnológica; en una posición intermedia aparecen casos como Austria,

Polonia, República Checa y Eslovaquia, donde la evolución tecnológica ha sido significativa pero articulada a través de modelos híbridos o escalonados; y, en otro plano, países como Portugal, Francia y España muestran configuraciones más condicionadas por trayectorias concesionales históricas, por decisiones políticas sobre peajes o por procesos incompletos de transición hacia modelos más avanzados de pago por uso (ITF, 2019; European Commission, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

La revisión de la literatura permite anticipar una primera conclusión relevante: la difusión del pago por uso en Europa no responde a una lógica lineal de progreso tecnológico, sino a procesos de adopción condicionados por el entorno institucional y por la función que cada país asigna a la tarificación viaria. En algunos casos, el objetivo predominante ha sido asegurar ingresos estables para la financiación de infraestructuras; en otros, corregir externalidades asociadas al transporte pesado; y en otros, gestionar la congestión o introducir señales ambientales. Esta diversidad de finalidades explica por qué sistemas aparentemente similares pueden tener diseños, niveles de aceptación y resultados muy distintos.

En este punto, la literatura especializada resulta especialmente útil para distinguir entre los factores habilitadores y los factores restrictivos del despliegue de sistemas RUC. Entre los primeros destacan la existencia de una estrategia estatal coherente, la capacidad administrativa y tecnológica, la interoperabilidad, la legitimidad del destino de los ingresos y la posibilidad de presentar la tarificación como parte de una política más amplia de movilidad o sostenibilidad. Entre los segundos aparecen la resistencia social al pago directo, los ciclos electorales, la percepción de doble imposición, la fragmentación competencial y las incertidumbres regulatorias o tecnológicas (Santos, 2017; Small & Verhoef, 2007; ITF, 2019).

Esta tensión entre factores habilitadores y restrictivos resulta particularmente visible en el caso de España, donde el debate sobre el pago por uso se ha mantenido durante años en un plano marcadamente politizado y discontinuo. A diferencia de otros países europeos que han construido gradualmente un marco normativo, tecnológico e institucional favorable al despliegue de sistemas de tarificación por distancia, España presenta una trayectoria caracterizada por la coexistencia de autopistas concesionales históricas, peajes en sombra, liberalización de peajes estatales y experiencias autonómicas parciales, como las desarrolladas en Gipuzkoa para vehículos pesados.

Esta configuración sugiere que el problema español no puede interpretarse como una simple carencia tecnológica, sino como el resultado de un equilibrio inestable entre restricciones políticas, sensibilidad social, fragmentación territorial y ausencia de una hoja de ruta estatal consistente.

En consecuencia, el estado del arte que se desarrolla a continuación persigue tres objetivos analíticos complementarios. En primer lugar, identificar los patrones de adopción del pago por uso en Europa, poniendo el foco en las condiciones que explican la expansión de modelos basados en distancia y, en particular, en tecnología GNSS. En segundo lugar, examinar comparativamente las distintas dimensiones del problema, política, económica, social, tecnológica, ambiental y legal, para determinar qué factores resultan más explicativos en cada contexto nacional.

En tercer lugar, diagnosticar el caso español como una anomalía relativa dentro del espacio europeo, con el fin de justificar el posterior desarrollo metodológico del trabajo

y la pertinencia de explorar, de forma aplicada, la viabilidad de un piloto GNSS en un corredor concreto de la Red de Carreteras del Estado.

En este sentido, el estado del arte no constituye un fin en sí mismo, sino la base analítica a partir de la cual se definirá la metodología del trabajo. Si la literatura muestra, por ejemplo, que el éxito de los sistemas GNSS depende de variables de gobernanza, aceptación social y diseño tarifario además de la madurez tecnológica, entonces la metodología posterior deberá ser capaz de incorporar esas variables.

Del mismo modo, si la evidencia comparada pone de manifiesto que existen estudios aplicados en otros países sobre costes de implantación, arquitectura operativa o evaluación de corredores, tales experiencias podrán servir de referencia para diseñar un enfoque metodológico replicable en el contexto español. En consecuencia, el valor del estado del arte reside tanto en lo que explica como en lo que deja sin resolver, pues precisamente en esos vacíos se apoya la justificación del gap de investigación y de la metodología posterior.

La literatura comparada sobre tarificación viaria en Europa permite identificar, con carácter preliminar, tres patrones estructurales de adopción del pago por uso. El primero corresponde a países que han consolidado modelos de tarificación por distancia altamente desarrollados, generalmente aplicados en primer término al transporte pesado, con una arquitectura institucional clara, integración tecnológica avanzada y objetivos explícitos de financiación e internalización de costes. En este grupo destacan especialmente Suiza y Alemania, cuya experiencia suele presentarse en la literatura como referencia para el diseño de sistemas de tarificación modernos y tecnológicamente sofisticados (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

El segundo patrón agrupa a países que han avanzado hacia esquemas de pago por uso mediante una lógica gradual o híbrida, combinando tecnologías distintas, cobertura parcial de red o transiciones desde sistemas previos basados en tiempo o en pórticos. En esta categoría pueden situarse Austria, Polonia, República Checa y Eslovaquia, donde la adopción del pago por uso responde menos a un “salto tecnológico” y más a procesos acumulativos de adaptación institucional y operativa. La literatura sugiere que en estos países la flexibilidad del diseño y la posibilidad de transición escalonada han reducido parte de las resistencias existentes, aunque también han generado sistemas menos homogéneos y, en ocasiones, más complejos de gestionar.

El tercer patrón corresponde a países donde la tarificación viaria sigue estando fuertemente condicionada por trayectorias concesionales históricas, decisiones políticas discontinuas o una estructura institucional fragmentada, lo que ha dificultado la consolidación de un sistema integrado de pago por uso. En este grupo destacan Francia, Portugal y España, aunque por motivos distintos.

Francia combina la persistencia de autopistas concesionales con intentos fallidos o incompletos de avanzar hacia otros modelos para transporte pesado; Portugal ha desarrollado mecanismos de cobro electrónico altamente relevantes desde el punto de vista tecnológico y operativo, pero en un contexto fuertemente ligado a la red de autopistas concesionadas; y España muestra la mayor discontinuidad, al haber pasado de un sistema históricamente dual entre autopistas de peaje y autovías gratuitas a una fase reciente de liberalización sin sustitución por un esquema generalizado de RUC.

Lo relevante desde una perspectiva inferencial es que estos patrones no parecen explicarse únicamente por diferencias de renta, tamaño de red o disponibilidad tecnológica. Más bien, la evidencia sugiere que el factor decisivo reside en cómo cada país ha construido la legitimidad política y social del cobro por uso, y en qué medida ha conseguido vincularlo a objetivos percibidos como legítimos: mantenimiento de infraestructuras, financiación del sistema, corrección de externalidades o mejora de la competitividad logística.

Allí donde el pago por uso se ha introducido como parte de una estrategia más amplia y con una arquitectura institucional estable, la implantación ha sido más robusta. Allí donde se ha percibido como una medida aislada, fiscalista o electoralmente costosa, su desarrollo ha tendido a bloquearse o a fragmentarse.

Esta observación resulta especialmente importante para el caso español y anticipa una hipótesis central del trabajo: la diferencia entre España y países como Alemania no radica exclusivamente en la existencia o no de tecnología disponible, sino en la presencia, o ausencia, de un entorno político institucional capaz de sostener una política de tarificación coherente en el tiempo. En este sentido, la comparación europea no solo permite identificar modelos, sino también establecer una primera línea explicativa de las divergencias que posteriormente deberá profundizarse mediante el análisis PESTEL.

Por tanto, el estado del arte se concibe aquí como un dispositivo analítico preparatorio: describe la evidencia existente, la ordena de forma comparada, infiere relaciones causales y, a partir de esas relaciones, delimita el espacio en el que la metodología posterior debe intervenir. Esta función resulta especialmente importante en un trabajo como el presente, donde la elección de un eventual piloto GNSS no puede basarse en una preferencia tecnológica previa, sino en una evaluación razonada de sus ventajas, inconvenientes y condiciones de aplicabilidad en el contexto español.

3.2 Dimensión político institucional y regulatoria

La implantación de sistemas de pago por uso en Europa no puede explicarse exclusivamente por la disponibilidad tecnológica ni por la necesidad de obtener ingresos para financiar infraestructuras. La literatura comparada muestra que los factores político-institucionales y regulatorios constituyen una condición de posibilidad para el despliegue, estabilización y legitimación de estos sistemas. En consecuencia, el análisis del RUC debe comenzar por examinar no solo qué tecnologías se utilizan o qué modelos tarifarios se aplican, sino qué tipo de Estado, qué arquitectura administrativa y qué marco regulatorio hacen viable, o inviable, su implementación (Santos, 2017; ITF, 2019).

Desde esta perspectiva, la evidencia europea sugiere que la consolidación de sistemas de pago por uso tiende a producirse allí donde concurren cuatro condiciones político-institucionales básicas. La primera es la existencia de una estrategia pública clara y sostenida en el tiempo, capaz de vincular la tarificación con objetivos más amplios de política de transporte.

La segunda es la presencia de una estructura gestora especializada, con capacidad técnica y administrativa suficiente para operar el sistema y garantizar su continuidad. La tercera es la articulación de un marco regulatorio estable y predecible, alineado con la evolución normativa europea. Y la cuarta es la construcción de una legitimidad política y social suficiente, particularmente en relación con la finalidad del sistema, la asignación de los ingresos y la percepción de equidad (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

En este sentido, los casos de Suiza, Alemania y Austria constituyen los referentes más consistentes en la literatura europea, no tanto porque compartan un único diseño técnico, sino porque muestran una mayor madurez político institucional en la implantación del pago por uso. En Suiza, la introducción de la LSVA (tarificación a vehículos pesados vinculada a prestaciones) se enmarcó en una estrategia de política pública que trascendía con mucho la lógica recaudatoria. La literatura destaca que el sistema fue legitimado como instrumento para ordenar el tránsito de mercancías, proteger el espacio alpino y financiar parcialmente una política más amplia de transferencia modal hacia el ferrocarril.

De este modo, la aceptación del pago por uso no derivó únicamente del principio de “usuario pagador”, sino de su inserción en una narrativa pública coherente y territorialmente inteligible (Santos, 2017; ITF, 2019). El caso suizo resulta especialmente relevante porque demuestra que la tarificación viaria se estabiliza con mayor probabilidad cuando se integra en una política de movilidad de largo recorrido y no se presenta como una medida aislada de recaudación.

En Alemania, el despliegue del sistema LKW Maut ha sido frecuentemente interpretado como un ejemplo de cómo la arquitectura institucional puede ser tan importante como la tecnología. A diferencia de otros países donde el debate sobre el pago por uso ha permanecido en el plano político o se ha visto erosionado por conflictos de aceptación social, Alemania logró articular un sistema de cobro por distancia para vehículos pesados sobre la red federal con una base institucional sólida y una gestión operativa especializada.

Un elemento central de esta arquitectura ha sido el papel de Toll Collect, la sociedad encargada de operar y recaudar el peaje de camiones por cuenta del Estado federal. Desde una perspectiva analítica, el interés del caso alemán no reside únicamente en que el sistema funcione, sino en que separó claramente la decisión pública sobre la política tarifaria de la gestión técnica y recaudatoria del sistema, confiando esta última a una entidad especializada capaz de asumir funciones de operación, supervisión y cobro.

La relevancia de Toll Collect dentro del modelo alemán es especialmente importante porque muestra que la implantación de un sistema avanzado de tarificación no depende solo de la elección tecnológica, por ejemplo, GNSS frente a DSRC, sino de la existencia de una estructura organizativa intermedia entre la administración y la operación del sistema. La literatura comparada ha señalado que esta estructura permite reducir fricciones administrativas, profesionalizar la gestión, generar continuidad operativa y mejorar la trazabilidad entre recaudación, control y ejecución del sistema (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

En el caso alemán, además, la evolución de Toll Collect resulta ilustrativa desde el punto de vista institucional, ya que el sistema ha transitado desde una lógica inicialmente más cercana a la colaboración público-privada hacia un esquema de mayor control público federal, sin perder la especialización técnica de la operación. Ello sugiere que uno de los factores diferenciales de Alemania frente a España no es solo la anticipación regulatoria o tecnológica, sino la existencia de un instrumento institucional específico para recaudar y gestionar el pago por uso, con una misión pública clara y una capacidad operativa estable.

La experiencia alemana sugiere que la implantación de un sistema GNSS no depende únicamente de la tecnología, sino también de la existencia de una entidad gestora especializada que reduzca la complejidad operativa y garantice continuidad institucional. La ausencia de una estructura equivalente en España constituye una diferencia relevante en términos de capacidad de implementación.

Alemania no implantó un sistema GNSS únicamente porque la tecnología estuviera disponible, sino porque concurrían de forma simultánea una serie de condiciones habilitadoras: una red federal con gran intensidad de tráfico pesado, una finalidad clara de financiación y gestión de la red, una arquitectura institucional especializada para la recaudación y operación del sistema, una hoja de ruta regulatoria coherente, una mayor continuidad político-administrativa y una capacidad de vincular el sistema a una lógica de eficiencia y competitividad del transporte. En España, por el contrario, estas condiciones no aparecen con la misma intensidad ni de forma articulada, lo que ayuda a explicar la ausencia de un despliegue equivalente.

La comparación entre Alemania y España pone de manifiesto que la estabilidad regulatoria y la continuidad política son variables explicativas de primer orden. Mientras que en Alemania la tarificación por uso se integró en una estrategia sostenida, en España el debate ha permanecido sujeto a ciclos políticos, reversibilidad regulatoria y ausencia de una hoja de ruta estable.

Alemania no solo tiene tecnología GNSS; tiene una estructura de gestión especializada, con una separación relativamente clara entre la política pública y la operación técnica del sistema. El ejemplo de Toll Collect es clave porque permite sostener la recaudación, el control, la trazabilidad operativa y la continuidad del

modelo. España, en cambio, no ha configurado una entidad estatal equivalente, claramente orientada a gestionar un sistema nacional de pago por uso basado en distancia. Esto no significa que no existan administraciones capaces, sino que falta una infraestructura institucional específicamente diseñada para ese fin.

Desde una lectura comparada, esta cuestión tiene enorme relevancia. En países como Alemania, la tarificación viaria fue concebida como una política pública estructurada, apoyada en un operador especializado y en una administración capaz de sostener el sistema en el tiempo.

En España, por el contrario, aunque existen entidades públicas y concesionarias con experiencia en gestión viaria, no se ha configurado un organismo o empresa de características comparables orientado específicamente a la gestión nacional de un sistema de pago por uso basado en distancia. Esta diferencia institucional es particularmente significativa, ya que sugiere que el debate español no se limita a decidir si se implanta o no un sistema de pago por uso, sino también a determinar qué arquitectura gestora sería necesaria para hacerlo viable.

Austria muestra una lógica convergente, aunque en un entorno de menor escala. El país ha consolidado un sistema robusto de tarificación sobre la red de alta capacidad, apoyado en una entidad gestora claramente definida y en una regulación relativamente estable. La literatura destaca que el caso austríaco comparte con Alemania dos elementos esenciales: por un lado, una institucionalización temprana del cobro por uso como herramienta funcional para la financiación y gestión de la red; y, por otro, una capacidad administrativa suficiente para integrar operación, control y adaptación normativa sin convertir la tarificación en un conflicto político permanente (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

La comparación entre Alemania y Austria refuerza así una primera hipótesis inferencial: los sistemas avanzados de pago por uso se consolidan con mayor facilidad cuando cuentan con instituciones específicas, continuidad regulatoria y una función pública claramente definida para la recaudación y gestión.

Un segundo grupo lo integran República Checa, Eslovaquia y Polonia, donde la implantación de sistemas de tarificación ha seguido trayectorias más graduales o híbridas. En estos países, el pago por uso se ha vinculado de manera particularmente intensa a la necesidad de financiar infraestructuras en corredores de tránsito y al proceso de adaptación al mercado único europeo. La evidencia disponible sugiere que, en estos casos, el impulso comunitario y las exigencias logísticas del transporte internacional han actuado como motores relevantes del proceso, pero ello no ha eliminado la importancia de las variables nacionales.

La estabilidad de los sistemas, su escalabilidad y su madurez operativa continúan dependiendo de factores como la capacidad administrativa, la claridad de la regulación y la capacidad de integrar tecnologías interoperables en un marco institucional funcional (European Commission, 2011; ITF, 2019). Estos casos son particularmente valiosos para el presente estudio porque muestran que la transición hacia modelos avanzados no tiene por qué adoptar la forma de un “salto” institucional completo; puede también producirse a través de configuraciones progresivas, combinando adaptación tecnológica, presión regulatoria europea y aprendizaje operativo.

Portugal ofrece un caso distinto, de gran interés para el análisis comparado. Su experiencia demuestra que es posible desarrollar soluciones de cobro avanzadas y

altamente operativas en contextos donde la lógica predominante no es tanto la del RUC como política integral, sino la evolución del modelo concesional y la necesidad de gestionar de manera eficiente autopistas electrónicas o de flujo libre. Desde el punto de vista político institucional, ello significa que la sofisticación del sistema no necesariamente implica una transformación completa del paradigma de financiación viaria.

La literatura técnica suele valorar positivamente la experiencia portuguesa por su capacidad operativa, por la reducción de barreras físicas y por las lecciones que aporta en términos de *free flow* y cobro electrónico. Sin embargo, su extrapolación exige cautela, ya que el modelo portugués descansa en una configuración contractual, territorial y regulatoria específica, no automáticamente trasladable a otros países (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022). Para el caso español, Portugal resulta relevante no tanto como modelo político completo, sino como evidencia de que ciertas soluciones operativas y de transición sí podrían ser observadas o parcialmente replicadas.

El caso de Francia es, por el contrario, especialmente revelador de los límites de una implantación que, aun siendo técnicamente viable y normativamente justificable, fracasa por razones de legitimidad política y social. La retirada de la *écotaxe poids lourds* se ha convertido en uno de los ejemplos más citados en la literatura sobre aceptabilidad del pago por uso.

En este caso, la resistencia territorial, la contestación de sectores económicos afectados, la percepción de agravio y la incapacidad de consolidar una narrativa pública convincente neutralizaron un proyecto que, desde el punto de vista regulatorio y técnico, estaba relativamente avanzado (Crozet & Mercier, 2016). La lección que se desprende del caso francés es especialmente relevante para España: la tarificación viaria no fracasa necesariamente por problemas de diseño técnico o por carencias normativas, sino porque puede carecer de una coalición político social capaz de sostenerla.

Este mismo tipo de tensión aparece, con rasgos propios, en España. El caso español presenta una particularidad que lo diferencia de la mayoría de los países comparados: la evolución de la política de tarificación ha sido muy discontinua y, en los últimos años, además, contradictoria. La liberalización de peajes en varias autopistas estatales entre 2018 y 2021 reforzó una lógica de financiación presupuestaria y consolidó parcialmente la expectativa de gratuidad en la red de alta capacidad estatal (CNMC, 2021; AIReF, 2022). En términos político-institucionales, esto ha generado un problema de legitimación especialmente complejo, ya que cualquier intento de introducir mecanismos generalizados de pago por uso se enfrenta a la percepción de reversión de derechos adquiridos o de doble imposición.

A ello se suma la fragmentación competencial del sistema español. La coexistencia entre la Red de Carreteras del Estado, las redes autonómicas y los regímenes forales introduce una complejidad institucional que no puede ignorarse. La experiencia de Gipuzkoa, con tarificación específica para vehículos pesados en corredores concretos, demuestra que sí existen capacidades operativas y bases jurídicas para implantar sistemas de cobro vinculados al uso en determinadas escalas territoriales. Sin embargo, la literatura y los informes institucionales coinciden en que España carece de una hoja de ruta estatal consistente, y de una arquitectura de gobernanza capaz de integrar estas experiencias en un modelo nacional coherente (AIReF, 2022; CNMC, 2021).

Desde el plano regulatorio europeo, la comparación entre países también ofrece resultados significativos. La evolución de la normativa comunitaria, desde la primera Euroviñeta hasta la Directiva (UE) 2022/362 y la Directiva (UE) 2019/520 sobre interoperabilidad y cobro transfronterizo, ha creado un marco crecientemente favorable a la tarificación por distancia, a la diferenciación ambiental y a la interoperabilidad tecnológica. Sin embargo, la literatura muestra que la relación con la Comisión Europea no produce efectos uniformes.

En países como Alemania o Polonia, el marco europeo ha reforzado orientaciones nacionales ya existentes. En cambio, en Francia o España, la normativa comunitaria ha actuado más como presión externa o referencia discursiva que como motor suficiente de implantación (European Commission, 2011; Directiva (UE) 2022/362; ITF, 2019). Esta disparidad sugiere que la normativa europea opera como condición habilitadora, pero su impacto depende críticamente de la capacidad de cada Estado para traducirla en una política pública integrada.

En el plano legal, la literatura destaca además tres cuestiones que resultan particularmente relevantes para la comparación y para la justificación metodológica del presente trabajo. La primera es la regulación del impago y los mecanismos sancionadores, esenciales para garantizar la credibilidad del sistema y especialmente importantes en contextos de movilidad transfronteriza.

La segunda es la cuestión de la protección de datos, especialmente sensible en los sistemas basados en GNSS, donde la trazabilidad de los desplazamientos obliga a equilibrar eficiencia y privacidad. La tercera es el riesgo de desvío de tráfico hacia vías alternativas no tarificadas, con posibles efectos adversos sobre la seguridad vial, la congestión local y la equidad territorial, problemas que han sido abordados de forma desigual en los marcos nacionales (Directiva (UE) 2019/520; European Commission, 2019; Odeck & Bråthen, 2022). En todos estos casos, la comparación europea confirma que la robustez legal del sistema no es un complemento accesorio, sino una condición imprescindible de su viabilidad política y operativa.

En conjunto, el análisis comparado permite concluir que la dimensión político institucional y regulatoria actúa como variable explicativa estructural en la implantación del pago por uso. Allí donde existen continuidad política, legitimidad pública, instituciones gestoras especializadas y una adecuada traslación del marco europeo al contexto nacional, los sistemas tienden a consolidarse. Allí donde predominan la discontinuidad, la fragmentación competencial, la politización electoral y la ausencia de un operador o estructura específica de gestión, la implantación resulta mucho más difícil o queda limitada a experiencias parciales.

Esta conclusión resulta particularmente importante para el caso español y tiene implicaciones metodológicas directas: cualquier evaluación futura de la viabilidad de un sistema GNSS en España no podrá limitarse al análisis de costes o de prestaciones tecnológicas, sino que deberá incorporar de forma explícita las condiciones de gobernanza y el diseño institucional del operador o entidad gestora. En este sentido, el caso alemán y el papel de Toll Collect aportan una referencia comparada de especial valor, precisamente porque muestran que la operación del sistema no se improvisa, sino que requiere una infraestructura institucional específica.

Desde el punto de vista del gap de investigación, este bloque permite detectar un primer vacío claro. Aunque la literatura europea ha analizado con cierta profundidad

la relación entre aceptación política, diseño institucional y despliegue de sistemas de pago por uso, sigue siendo limitada la evidencia aplicada al caso español sobre qué tipo de arquitectura institucional sería necesaria para gestionar un sistema GNSS, cómo podría articularse en un contexto descentralizado y qué lecciones concretas podrían extraerse de experiencias como Alemania o Portugal. Este vacío justifica que la metodología posterior no se limite a una evaluación técnica o económico financiera, sino que incorpore también la dimensión organizativa e institucional como componente esencial del análisis.

En el caso de España, uno de los elementos político-institucionales más relevantes para explicar la ausencia de un sistema generalizado de pago por uso es el papel desempeñado por los ciclos electorales y las campañas políticas. A diferencia de otros países europeos donde la tarificación viaria se ha integrado en marcos regulatorios relativamente estables, el debate sobre el pago por uso en España ha estado fuertemente condicionado por su coste electoral percibido, lo que ha limitado la capacidad de las administraciones para avanzar hacia modelos más sofisticados, como los basados en GNSS.

La literatura sobre economía política del transporte señala que las políticas que implican pagos directos por parte del usuario presentan un alto potencial de rechazo social inmediato, aunque puedan generar beneficios agregados a medio y largo plazo (Santos, 2017; ITF, 2019). En este contexto, los gobiernos tienden a evitar su implantación en periodos cercanos a procesos electorales, especialmente en países donde la sensibilidad al cobro directo es elevada. España constituye un caso claro de este fenómeno, ya que el pago por uso ha sido recurrentemente abordado en el debate político, pero rara vez incorporado como medida efectiva en programas de gobierno ejecutados.

Desde una perspectiva empírica, la evidencia institucional muestra que las propuestas relativas al pago por uso han tendido a aparecer en momentos de presión financiera, por ejemplo, en el marco del Plan de Recuperación tras la pandemia o en debates sobre sostenibilidad de la red, pero han sido posteriormente pospuestas, suavizadas o descartadas en contextos preelectorales o de alta sensibilidad política (AIReF, 2022; CNMC, 2021). Este patrón sugiere que el principal condicionante no es la falta de diagnóstico técnico, sino la dificultad de asumir el coste político de introducir un nuevo instrumento de tarificación directa.

Este comportamiento contrasta con el observado en países como Alemania, donde el despliegue del sistema LKW Maut se realizó dentro de un marco político que permitió separar parcialmente la decisión estratégica del ciclo electoral inmediato. Aunque el sistema alemán también ha estado sujeto a debate político, su implantación no se ha revertido ni paralizado de forma sistemática en función de los ciclos electorales, lo que indica una mayor institucionalización de la política de tarificación.

En España, por el contrario, el pago por uso ha sido recurrentemente tratado como una medida de alto riesgo electoral, lo que ha favorecido estrategias políticas orientadas a evitar su implementación directa. Un ejemplo significativo es la liberalización de autopistas de peaje entre 2018 y 2021, que, desde una perspectiva económica, redujo los ingresos asociados al uso de la red, pero desde una perspectiva política reforzó la percepción de que la red de alta capacidad debía ser gratuita. Esta decisión puede interpretarse como una respuesta racional desde el punto de vista

electoral, pero como un factor que complica estructuralmente la introducción posterior de cualquier sistema de pago por uso.

En este sentido, puede afirmarse que España no solo no ha implantado sistemas GNSS por cuestiones técnicas o económicas, sino porque el sistema político ha tenido incentivos para evitar decisiones que implican un coste directo para el votante en el corto plazo. Mientras que países como Alemania han conseguido integrar el pago por uso dentro de una lógica de política pública a largo plazo, España ha mantenido el debate en un plano más coyuntural y condicionado por el ciclo electoral. Esta diferencia permite formular una conclusión de carácter inferencial relevante para el presente trabajo:

la ausencia de un sistema de pago por uso en España no responde únicamente a limitaciones institucionales o tecnológicas, sino a la incapacidad, hasta el momento, de desacoplar este tipo de decisiones de la lógica de competencia electoral de corto plazo. Esta característica constituye una de las principales barreras políticas para la implantación de sistemas GNSS, y debe ser considerada explícitamente en cualquier evaluación de viabilidad futura.

La literatura comparada sobre pago por uso en Europa muestra que los factores político-institucionales y regulatorios no actúan como un simple contexto externo, sino como una condición explicativa central del despliegue de sistemas de tarificación viaria. En este sentido, una de las cuestiones más relevantes no es únicamente determinar qué países han implantado sistemas basados en distancia o apoyados en GNSS, sino por qué algunos Estados han sido capaces de construir las condiciones políticas, administrativas y normativas necesarias para sostener dichos sistemas, mientras que otros, como España, no han logrado hacerlo (ITF, 2019; Santos, 2017). Desde esta perspectiva, la experiencia europea sugiere que la implantación del pago por uso depende de la combinación de continuidad regulatoria, gobernanza especializada, legitimación pública y capacidad para integrar la tarificación en una política de movilidad más amplia.

Uno de los factores más relevantes en esta dimensión es el papel de los ciclos electorales y de las campañas políticas. En la literatura sobre economía política del transporte, existe amplio consenso en que las medidas que implican un pago visible y directo por parte del usuario generan un coste político inmediato, incluso cuando puedan justificarse por razones de eficiencia o sostenibilidad a medio plazo (Crozet & Mercier, 2016; Santos, 2017). Esta observación es especialmente pertinente para el caso español. Aunque el debate sobre el pago por uso ha reaparecido periódicamente, en particular en momentos de presión financiera o de diálogo con la Comisión Europea, su traducción en decisiones efectivas ha sido sistemáticamente limitada por la percepción de que introducir nuevos cobros sobre la red de alta capacidad supone un elevado riesgo electoral.

En consecuencia, España ha tendido a gestionar el problema de la financiación viaria mediante decisiones menos costosas en términos electorales a corto plazo, como la continuidad de la financiación presupuestaria o, más recientemente, la liberalización de peajes estatales, en lugar de consolidar una hoja de ruta hacia un sistema generalizado de *road pricing* (AIReF, 2022; CNMC, 2021).

Esta lógica contrasta con la observada en países como Alemania o Austria, donde la tarificación viaria ha sido tratada con mayor continuidad como una política pública

estructural y no únicamente como una cuestión coyuntural sujeta al calendario electoral. En Alemania, por ejemplo, la implantación del LKW Maut no puede entenderse solo como una decisión técnica, sino como el resultado de una mayor capacidad para desacoplar la política de tarificación del corto plazo electoral, apoyándola en una estructura institucional profesionalizada y en un operador especializado como Toll Collect, encargado de la gestión y recaudación del sistema.

Esta entidad, aunque con una evolución institucional compleja, ha funcionado como un mecanismo de estabilización operativa y recaudatoria, algo que España no ha desarrollado de forma equivalente a escala nacional (ITF, 2019; Finger et al., 2019). En términos comparados, ello sugiere que una de las diferencias fundamentales entre ambos países no radica en la disponibilidad de tecnología, sino en la existencia de una infraestructura institucional específica capaz de sostener una política de tarificación en el tiempo.

Otro elemento todavía insuficientemente explicitado en el análisis comparado es la presión de los grupos de interés. La literatura europea muestra que la implantación o bloqueo del pago por uso depende en buena medida de la capacidad de actores organizados, transportistas, concesionarias, asociaciones empresariales, gobiernos subnacionales y usuarios, para influir sobre el diseño o sobre la viabilidad política del sistema (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019).

En Francia, por ejemplo, el fracaso de la *écotaxe poids lourds* no puede separarse de la fuerte presión territorial y sectorial ejercida por actores que percibían el sistema como desigual o perjudicial para la competitividad de determinadas regiones. En España, aunque la configuración es distinta, la influencia del sector del transporte por carretera y la sensibilidad política asociada a cualquier nuevo cobro directo han contribuido a desincentivar decisiones de implantación. Esta diferencia es importante porque pone de relieve que España no solo enfrenta barreras abstractas de aceptación social, sino una estructura de intereses organizada capaz de trasladar el coste político de la medida al debate institucional de forma muy efectiva.

La opinión pública constituye un factor conectado, pero no idéntico, a la presión de grupos de interés. Los estudios sobre aceptabilidad del pago por uso muestran que la opinión pública tiende a reaccionar negativamente cuando percibe el sistema como una nueva carga fiscal, como una forma de doble imposición o como una medida cuya finalidad no está claramente vinculada a mejoras visibles en la red o en la movilidad (Crozet & Mercier, 2016; Santos, 2017).

En países como Suiza, la aceptación del sistema se apoyó en una narrativa funcional y territorial que vinculaba la tarificación con la protección alpina y la transferencia modal. En Alemania, la legitimidad se construyó en mayor medida sobre la base de la financiación y gestión de la red federal. En España, por el contrario, no se ha consolidado una narrativa pública equivalente.

A ello ha contribuido la reciente eliminación de peajes en varias autopistas estatales, que ha reforzado en parte la expectativa de gratuidad en la red de alta capacidad y ha dificultado aún más cualquier intento posterior de introducir un sistema de pago por uso con legitimidad social suficiente (CNMC, 2021; AIReF, 2022). Desde una lógica inferencial, esto sugiere que el problema español no es solo la oposición a pagar, sino la ausencia de una justificación pública creíble y estable del cobro por uso.

En el caso español, esta dificultad se ve agravada por la descentralización competencial. La coexistencia entre la Red de Carreteras del Estado, las redes autonómicas y los regímenes forales introduce una complejidad institucional significativamente mayor que la observada en algunos de los países comparados. La experiencia de Gipuzkoa demuestra que sí existen capacidades técnicas y jurídicas para implantar sistemas de cobro vinculados al uso, especialmente para vehículos pesados, pero también pone de manifiesto que estas experiencias permanecen fragmentadas y no se han traducido en una arquitectura nacional coherente (AIReF, 2022). En este punto, la comparación con Alemania vuelve a ser útil: aunque el sistema alemán opera en un contexto federal, la política de tarificación para pesados se articula sobre una base federal y con un operador específico.

España, por el contrario, no dispone de una estructura equivalente ni de una gobernanza integrada que permita transitar desde experiencias parciales a un sistema nacional. Lo que otros países tienen y España no tiene, en este caso, no es solo una decisión política inicial, sino una capacidad de coordinación y una infraestructura de gestión capaces de escalar el sistema.

La relación con la Comisión Europea y con el marco normativo comunitario también requiere una lectura más precisa. La evolución de la Directiva Euroviñeta y de la normativa sobre interoperabilidad ha generado incentivos crecientes hacia la tarificación por distancia, la diferenciación ambiental y la mejora del *enforcement* transfronterizo (Directiva (UE) 2022/362; Directiva (UE) 2019/520). Sin embargo, la experiencia comparada muestra que la presión europea no produce efectos homogéneos.

En países como Alemania, Austria o Polonia, la normativa comunitaria ha reforzado trayectorias nacionales compatibles con la implantación de sistemas avanzados. En España, por el contrario, la relación con la Comisión Europea ha funcionado más como elemento de presión externa y como catalizador de debate que como motor suficiente de implementación. Esto sugiere que el marco europeo actúa como condición habilitadora, pero no sustituye la necesidad de una hoja de ruta nacional estable y políticamente viable (European Commission, 2011; ITF, 2019).

Desde la dimensión legal, hay tres bloques que deben reforzarse de forma expresa. El primero es el desvío de tráfico. La literatura muestra que uno de los riesgos asociados a la implantación de peajes o sistemas de pago por uso es el trasvase de vehículos hacia vías secundarias no tarificadas, con impactos potenciales sobre la congestión local, la equidad territorial y la seguridad vial (European Commission, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

Este factor ha sido utilizado frecuentemente en el debate español como argumento político contra nuevos cobros, especialmente en corredores donde la red secundaria discurre paralela a la red de alta capacidad. La cuestión no es menor, porque condiciona no solo la aceptabilidad del sistema, sino también su diseño regulatorio y territorial. En países con sistemas más consolidados, la gestión del desvío se aborda mediante cobertura suficiente de la red, diferenciación tarifaria o controles específicos.

En España, la ausencia de una hoja de ruta detallada ha impedido analizar este problema de forma integrada, lo que constituye una limitación importante de la literatura aplicada nacional.

El segundo bloque es la seguridad vial, estrechamente vinculado al desvío de tráfico. Si el cobro sobre vías de alta capacidad induce el uso de carreteras alternativas menos seguras, el balance social del sistema puede deteriorarse. La literatura internacional ha advertido de este riesgo, aunque la magnitud del efecto depende fuertemente del diseño del sistema y del contexto territorial (European Commission, 2019).

En España, esta cuestión resulta especialmente relevante porque el argumento de la seguridad vial tiene fuerte capacidad movilizadora en el debate político, pero no ha sido suficientemente desarrollado desde una perspectiva aplicada al *road pricing,* lo que refuerza la necesidad de metodologías que integren este factor en cualquier evaluación futura del sistema.

El tercer bloque es el relativo a la protección de datos y la sanción por impago. Los sistemas basados en GNSS implican la gestión de información sensible sobre desplazamientos, lo que introduce exigencias legales y reputacionales relevantes en materia de privacidad. La normativa europea ofrece un marco general, pero la forma en que cada país ha resuelto este reto varía en función de su capacidad administrativa, de su estructura institucional y de la confianza pública en el tratamiento de datos (Directiva (UE) 2019/520; European Commission, 2019).

Asimismo, la credibilidad operativa del sistema depende de la existencia de mecanismos robustos de control del fraude e imposición de sanciones, especialmente en entornos con tráfico internacional. Alemania, Austria y Portugal han avanzado más en esta materia que España, al disponer de sistemas efectivos de cobranza y control. España, en cambio, no ha desarrollado todavía una arquitectura nacional que permita responder de forma integrada a estas exigencias, lo que constituye otra de las diferencias que ayudan a explicar por qué otros países sí han avanzado y España no.

En conjunto, la evidencia revisada permite concluir que la dimensión político institucional y regulatoria explica una parte sustancial de la divergencia española. España no ha podido avanzar hacia un sistema generalizado de pago por uso comparable al de Alemania, Austria o incluso a algunos mecanismos operativos de Portugal no porque carezca de tecnología, sino porque no ha reunido de forma simultánea una serie de condiciones que sí aparecen en otros países: continuidad regulatoria, despolitización parcial del debate, operador especializado, articulación territorial más clara, mecanismos de *enforcement* creíbles y una narrativa pública estable sobre el uso de los ingresos y la función del sistema.

La literatura europea ofrece pistas robustas sobre estos factores, pero todavía es limitada en su aplicación integrada al caso español, lo que refuerza la necesidad de un análisis metodológico posterior específicamente adaptado a España.

El análisis comparado de la implantación del pago por uso en Europa exige incorporar con mayor precisión el papel de los grupos de interés, la opinión pública y la robustez del marco de *enforcement*, ya que estos factores ayudan a explicar por qué determinados países han consolidado sistemas avanzados de tarificación mientras que otros, como España, no han logrado superar una fase de debate recurrente pero políticamente bloqueado. En este sentido, la literatura muestra que la viabilidad política del *Road User Charging* no depende únicamente de la capacidad regulatoria del Estado, sino también de su habilidad para gestionar coaliciones de apoyo y oposición en torno al sistema (Crozet & Mercier, 2016; Santos, 2017).

En primer lugar, la presión de los grupos de interés ha desempeñado un papel decisivo en la trayectoria de varios países europeos. En Francia, el fracaso de la *écotaxe poids lourds* evidenció que la oposición organizada de transportistas, actores territoriales y sectores productivos afectados puede neutralizar incluso sistemas técnicamente avanzados y alineados con el marco regulatorio europeo (Crozet & Mercier, 2016).

En España, aunque el contexto no es idéntico, la literatura y los informes institucionales sugieren que la capacidad de influencia del sector del transporte por carretera, unida a la sensibilidad territorial del debate y a la percepción de que el pago por uso supondría una nueva carga sobre actividades estratégicas, ha contribuido a desincentivar decisiones de implantación a escala estatal (AIReF, 2022; CNMC, 2021).

La comparación con Alemania resulta especialmente ilustrativa: allí, el despliegue del LKW Maut se produjo en un entorno donde la oposición sectorial no desapareció, pero fue contrapesada por una arquitectura institucional más estable, por una finalidad más clara del sistema y por una mayor capacidad del Estado para mantener la medida como política estructural.

En segundo lugar, la opinión pública y la aceptación social del cobro directo condicionan de forma decisiva la estabilidad política del pago por uso. La evidencia comparada indica que los sistemas de tarificación son más aceptables cuando se presentan como instrumentos funcionales para mejorar la red, reducir externalidades o financiar infraestructuras concretas, y menos aceptables cuando se perciben como una forma adicional de imposición sin retorno visible para el usuario (Santos, 2017; ITF, 2019). En Suiza, la legitimidad de la LSVA se apoyó en una narrativa territorial y ambiental coherente; en Alemania, la lógica de financiación y gestión de la red ayudó a dar estabilidad al sistema.

En España, por el contrario, no se ha consolidado una narrativa equivalente. La liberalización reciente de peajes estatales ha reforzado la expectativa de gratuidad en la red de alta capacidad, de modo que cualquier intento posterior de introducir un sistema generalizado de pago por uso se enfrenta no solo a resistencias sectoriales, sino también a una opinión pública predispuesta a interpretar el nuevo cobro como una forma de “doble imposición” (CNMC, 2021; AIReF, 2022). Desde una perspectiva comparada, lo que otros países han tenido y España no ha tenido con la misma claridad es una construcción discursiva y política estable sobre la finalidad del sistema.

En tercer lugar, conviene precisar mejor la relación entre los Estados y la Comisión Europea. La evolución de la Directiva Eurovíñeta y de la normativa sobre interoperabilidad ha creado un marco progresivamente favorable al pago por uso basado en distancia, con mayor diferenciación ambiental y mejores mecanismos de *enforcement* transfronterizo (Directiva (UE) 2022/362; Directiva (UE) 2019/520). Sin embargo, el análisis comparado muestra que la Unión Europea actúa más como factor habilitador y de presión externa que como garante directo de implantación. Alemania, Austria y Polonia han utilizado ese marco como refuerzo de estrategias nacionales ya relativamente consolidadas.

España, en cambio, ha tendido a relacionarse con estas orientaciones en un plano más reactivo que transformador: la presión europea ha activado el debate, pero no ha sido suficiente para convertirlo en una política pública sostenida (European Commission, 2011; ITF, 2019). Esta diferencia es importante porque pone de manifiesto que la normativa europea no elimina la necesidad de capacidad política

interna, hoja de ruta regulatoria propia y diseño institucional adaptado al contexto nacional.

Otro aspecto esencial, y todavía insuficientemente tratado en el debate español, es el riesgo de desvío de tráfico hacia vías no tarificadas. La literatura internacional ha mostrado que este fenómeno puede afectar tanto a la eficiencia del sistema como a su aceptabilidad política, especialmente cuando las carreteras alternativas presentan menores estándares de capacidad y seguridad (European Commission, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

En el caso español, este argumento aparece con frecuencia en el debate público, especialmente por la extensa red convencional paralela a corredores de alta capacidad, pero rara vez se ha analizado de forma aplicada y sistemática. La comparación con otros países sugiere que el desvío no es un argumento suficiente para descartar el pago por uso, pero sí una variable de diseño crucial: allí donde el sistema cubre de forma coherente los principales corredores, donde existen mecanismos de control y donde la tarificación se diseña teniendo en cuenta la red alternativa, el riesgo de desvío puede gestionarse mejor. En España, la falta de estudios aplicados sobre este punto refuerza una limitación importante de la literatura y justifica la necesidad de incorporarlo a la metodología posterior.

Relacionado con ello, la seguridad vial constituye una dimensión legal y política de primer orden. Si la introducción de cobros induce un uso mayor de vías convencionales con mayor siniestralidad, el balance social del sistema puede verse comprometido, y el argumento político contra el pago por uso gana fuerza. La literatura europea reconoce esta posibilidad, aunque también subraya que el efecto depende del diseño del sistema y de la estructura territorial de la red (European Commission, 2019).

En España, este aspecto resulta especialmente sensible porque el argumento de la seguridad vial tiene elevada capacidad de movilización política y mediática, pero todavía no existe una base empírica suficientemente desarrollada que permita evaluar con precisión cómo afectaría un esquema de pago por uso a los desvíos efectivos y a la distribución del riesgo vial. Esta carencia refuerza de nuevo la necesidad de un análisis aplicado por corredor, más que de una extrapolación abstracta a toda la red.

Por otra parte, en los sistemas basados en GNSS adquiere especial relevancia la cuestión de la protección de datos. Aunque la normativa europea ofrece un marco general, la literatura muestra que la aceptación institucional y pública del tratamiento de datos de localización depende de factores como la confianza en las administraciones, la transparencia del sistema y la claridad sobre qué información se recoge, con qué finalidad y bajo qué salvaguardas (Directiva (UE) 2019/520; European Commission, 2019).

En este ámbito, España se enfrenta a un doble reto: por un lado, el carácter sensible del GNSS desde el punto de vista de la privacidad; por otro, la ausencia de una experiencia nacional generalizada que permita normalizar este tipo de tratamiento de datos en el ámbito del cobro por uso. Países como Alemania y Austria han avanzado más en este terreno no porque el problema jurídico no exista, sino porque han desarrollado marcos de gobernanza y operación suficientemente robustos para hacerlo compatible con la prestación del servicio. En España, esta cuestión sigue apareciendo más como barrera potencial que como problema resuelto, lo que indica una brecha regulatoria y de confianza institucional relevante.

Finalmente, la credibilidad operativa de cualquier sistema de pago por uso depende de la existencia de mecanismos eficaces de sanción por impago y control del fraude. La literatura y la normativa europea subrayan que el *enforcement* es especialmente importante en contextos con fuerte tránsito internacional, donde la capacidad de identificación y sanción transfronteriza resulta esencial para asegurar el cumplimiento del sistema (Directiva (UE) 2019/520; ITF, 2019).

En este punto, países con sistemas maduros como Alemania o Austria disponen de una capacidad administrativa y tecnológica más consolidada para integrar control, facturación y sanción. Portugal, a menor escala y en un marco distinto, ha desarrollado igualmente mecanismos operativos para la gestión del cobro electrónico y del incumplimiento. España, en cambio, no ha construido todavía una arquitectura nacional equivalente, lo que implica que la eventual implantación de un sistema GNSS o similar requeriría no solo una solución tarifaria y tecnológica, sino también un modelo claro de *enforcement* compatible con la movilidad nacional e internacional.

En conjunto, este refuerzo permite cerrar de manera más completa la dimensión político institucional y regulatoria. La comparación europea sugiere que los países que han implantado sistemas avanzados de pago por uso no solo tenían tecnología disponible, sino también capacidad para gestionar la presión de grupos de interés, construir legitimidad en la opinión pública, estabilizar la política frente al ciclo electoral, responder a exigencias de privacidad y articular un *enforcement* creíble.

España, por el contrario, presenta déficits relevantes en varias de estas condiciones, lo que ayuda a explicar por qué la implantación no ha avanzado al mismo ritmo y por qué la literatura aplicada al contexto español sigue siendo insuficiente.

En conjunto, la evidencia comparada permite concluir que la implantación de sistemas avanzados de pago por uso en Europa no se explica por la mera disponibilidad de tecnología, sino por la convergencia de una serie de condiciones político-institucionales y regulatorias que no aparecen con la misma intensidad en España.

Los países que han avanzado hacia modelos más desarrollados, como Alemania, Suiza o Austria, y en otro plano Portugal, han contado, con distintos matices, con mayor continuidad regulatoria, mejor integración del sistema en sus políticas de movilidad y financiación, una gestión más eficaz de la presión de grupos de interés, una narrativa pública más estable sobre la finalidad del cobro, y estructuras operativas y de *enforcement* más robustas, compatibles con las exigencias de interoperabilidad, protección de datos y sanción por impago (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019; Directiva (UE) 2019/520).

En el caso alemán, además, la existencia de una entidad especializada como Toll Collect refuerza la idea de que la implantación de un sistema GNSS no depende solo de una decisión política abstracta, sino de una infraestructura institucional específica capaz de sostener la recaudación, el control y la continuidad operativa del sistema.

España, por el contrario, ha combinado varios factores restrictivos: la fuerte exposición del tema al ciclo electoral, la liberalización reciente de peajes estatales, la ausencia de una hoja de ruta regulatoria sostenida, una estructura competencial más fragmentada, una mayor sensibilidad de la opinión pública al cobro directo, y la falta de un modelo claro para gestionar problemas como el desvío de tráfico, la seguridad vial, la privacidad o el *enforcement*.

La literatura existente sobre el pago por uso en España se ha desarrollado de manera significativa en los últimos años, especialmente a través de informes institucionales, documentos de análisis sectorial y estudios académicos centrados en la sostenibilidad financiera del sistema de infraestructuras viarias. Entre las contribuciones más relevantes destacan los trabajos de la AIReF (2022) sobre revisión del gasto en infraestructuras, los análisis sectoriales de la CNMC (2021), así como diversos informes de organismos internacionales, como la Comisión Europea o el *International Transport Forum* (ITF, 2019), que incluyen referencias al caso español en un contexto comparado.

Estos estudios coinciden en identificar la necesidad de revisar el modelo de financiación de la red viaria española y señalan el pago por uso como una posible alternativa. Asimismo, abordan cuestiones como la sostenibilidad del sistema, la estructura concesional, la comparación con otros países europeos o el alineamiento con políticas comunitarias. Sin embargo, desde una perspectiva inferencial, estos trabajos presentan una limitación común: analizan el problema desde un enfoque fundamentalmente descriptivo o económico-financiero, sin desarrollar un análisis completo de las condiciones político-institucionales necesarias para su implantación efectiva en España.

En particular, la literatura disponible no responde de forma suficiente a varias de las preguntas clave de esta dimensión. En primer lugar, aunque se mencionan las barreras políticas, estas se tratan de forma genérica, sin analizar en profundidad el impacto de los ciclos electorales, la lógica de costes políticos inmediatos o la ausencia de mecanismos de estabilización institucional comparables a los existentes en países como Alemania o Austria (Santos, 2017; ITF, 2019). En segundo lugar, la cuestión de la descentralización competencial, que constituye uno de los elementos más distintivos del caso español, no ha sido abordada de forma sistemática en relación con su impacto sobre la viabilidad de un sistema nacional de tarificación.

De igual modo, la literatura presenta carencias en el análisis del papel de los grupos de interés, particularmente del sector del transporte de mercancías, cuya capacidad de influencia ha sido determinante en la no implantación del sistema en España. Aunque algunos informes institucionales reconocen la oposición del sector, no existe una evaluación detallada de su capacidad de bloqueo, ni una comparación estructurada con el papel de estos actores en países donde el sistema sí ha sido implementado (Crozet & Mercier, 2016).

Otra limitación importante se observa en la forma en que se aborda la opinión pública y la aceptación social. Si bien los estudios reconocen la existencia de rechazo social, no desarrollan modelos explicativos que articulen esta variable con la narrativa pública, las decisiones políticas previas o la percepción de legitimidad del sistema. Este vacío es especialmente relevante, dado que la aceptación social ha sido identificada como una condición crítica para la implantación del pago por uso en Europa.

Asimismo, la literatura no profundiza de manera suficiente en la relación entre España y el marco europeo, más allá de la referencia a directrices generales. En este sentido, no se analiza adecuadamente por qué la presión de la Comisión Europea, a pesar de su existencia, no ha sido capaz de traducirse en una política pública efectiva en España, a diferencia de lo ocurrido en otros países donde el marco europeo ha actuado como catalizador del cambio (European Commission, 2011; ITF, 2019).

Finalmente, existe una carencia significativa en el análisis de la hoja de ruta regulatoria, entendida como la secuencia de decisiones necesarias para la implantación del sistema. La mayoría de los estudios identifican la necesidad de reformar el modelo, pero no definen cómo estructurar el proceso de transición, ni qué mecanismos institucionales serían necesarios para garantizar su continuidad y estabilidad.

En consecuencia, puede afirmarse que, aunque la literatura existente ha avanzado en la identificación del problema, no ha desarrollado un marco completo que explique por qué España no ha sido capaz de implantar sistemas de pago por uso mientras otros países sí lo han hecho, ni proporciona un modelo claro de cómo superar estas limitaciones.

Tabla 2 Comparación político-institucional: Europa vs España.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	**Países europeos (Alemania, Suiza, Austria, etc.)**	**España**	**Diferencia clave**
Hoja de ruta regulatoria	Clara, progresiva y estable	Inexistente o intermitente	Falta estrategia estructurada
Ciclos electorales	Impacto limitado en decisiones estructurales	Alta influencia en decisiones	Coste político bloquea el sistema
Grupos de interés	Integrados o compensados en el diseño	Alta capacidad de bloqueo (transporte)	Déficit de gestión institucional
Gobernanza	Modelos centralizados o coordinados	Fragmentación competencial	Falta coordinación territorial
Relación con UE	Marco europeo como refuerzo	Marco europeo como presión externa	Falta internalización del marco
Opinión pública	Construida progresivamente	Rechazo estructural	Falta legitimación política
Política de peajes	Continuidad en usuario-pagador	Liberalización reciente	Refuerzo de expectativa de gratuidad
Capacidad institucional	Alta especialización (ej. Toll Collect, EasyToll, Vía Verde)	Ausencia de operador equivalente	Falta estructura operativa estatal

El análisis realizado permite concluir que la principal limitación de la literatura sobre el caso español no reside en la falta de identificación del problema, sino en la ausencia de un marco explicativo capaz de integrar las variables político-institucionales que condicionan la implantación del pago por uso. Mientras que los estudios existentes aportan diagnósticos parciales, principalmente desde el ámbito económico o financiero, no abordan de forma completa las condiciones de gobernanza, estabilidad regulatoria y gestión de actores que han permitido a otros países avanzar en esta materia.

3.3 Dimensión económica y económico-financiera

La dimensión económica y económico financiera del pago por uso constituye uno de los ejes centrales para explicar por qué algunos países europeos han implantado sistemas avanzados de tarificación viaria y otros no. Aunque el debate público suele reducir esta cuestión a una oposición entre “recaudación” y “coste para el usuario”, la literatura comparada muestra que la evaluación económica del RUC exige un enfoque mucho más amplio, que integre al menos cinco cuestiones: la capacidad de generación de ingresos, el destino de dichos ingresos, la estructura de costes del sistema, el impacto sobre la competitividad del transporte y la respuesta de la demanda a la señal tarifaria (Santos, 2017; Small & Verhoef, 2007; ITF, 2019).

En este sentido, la comparación entre Suiza, Alemania, Austria, República Checa, Eslovaquia, Polonia, Portugal, Francia y España pone de manifiesto que los sistemas de pago por uso económicamente estables no son aquellos que simplemente cobran por circular, sino aquellos que logran articular una combinación funcional entre financiación, eficiencia y legitimidad del uso de los ingresos.

En unos países, la prioridad ha sido asegurar la financiación de corredores estratégicos; en otros, mejorar la asignación de costes al transporte pesado; y en otros, introducir señal económica compatible con objetivos ambientales y logísticos. Esta diversidad de funciones explica por qué dos sistemas formalmente similares pueden tener efectos económicos y niveles de aceptación muy distintos (ITF, 2019; European Commission, 2019).

En Suiza, la LSVA ha sido interpretada en la literatura no solo como un instrumento recaudatorio, sino como una pieza de una arquitectura económica más amplia, en la que el transporte pesado contribuye al sostenimiento del sistema y al reequilibrio modal. La importancia económica del modelo suizo no reside únicamente en cuánto recauda, sino en que la tarificación se integra en una estrategia de internalización de costes y financiación del sistema de transporte en sentido amplio. Desde esta perspectiva, la rentabilidad económica de un sistema de pago por uso no debe medirse solo por su saldo financiero directo, sino por su capacidad para redistribuir costes de forma más eficiente y coherente con los objetivos de política pública (ITF, 2019; European Commission, 2019).

En Alemania, el LKW Maut ha funcionado como un mecanismo de financiación estructural de la red federal, apoyado en una base de demanda muy favorable: gran intensidad de tráfico pesado, elevada densidad logística y fuerte tránsito internacional. Pero la estabilidad económica del modelo no se explica únicamente por el volumen potencial de recaudación. También depende de una estructura institucional capaz de operar el sistema con continuidad, soportar costes fijos relevantes y convertir la recaudación en una fuente estable vinculada a la red.

En este punto vuelve a adquirir relevancia el papel de Toll Collect, no solo como operador técnico, sino como elemento que reduce incertidumbre operativa y hace económicamente viable la gestión de un sistema complejo y escalable. La literatura comparada sugiere, por tanto, que la viabilidad económica, por ejemplo, de un sistema GNSS no depende solo de cuánto se cobre por kilómetro, sino de si existe una organización capaz de gestionar con eficiencia el volumen de datos, la facturación, el control y la ejecución del sistema (ITF, 2019; Finger et al., 2019).

Austria presenta un patrón similar, aunque sobre una red de menor escala. Su experiencia confirma que los sistemas de pago por uso pueden alcanzar estabilidad económica cuando existe una correspondencia razonable entre la red sujeta a tarificación, la intensidad de tráfico y el uso de los ingresos. La literatura suele señalar que la claridad sobre el destino de la recaudación, mantenimiento, explotación y mejora de la red contribuye a reforzar la lógica económica del sistema y su aceptabilidad (Odeck & Bråthen, 2022; ITF, 2019). Este aspecto resulta especialmente importante porque conecta directamente la eficiencia recaudatoria con la percepción de justicia distributiva.

En República Checa, Eslovaquia y Polonia, el componente económico del pago por uso se explica en gran medida por el peso del transporte internacional y de los corredores de tránsito. En estos países, la implantación del sistema ha respondido a una necesidad pragmática: asegurar financiación para redes estratégicas y cargar parte de los costes sobre flujos intensivos de mercancías que utilizan el territorio como corredor logístico europeo.

La literatura muestra que esta función es especialmente visible en Polonia, donde la posición geográfica y el volumen de tráfico pesado refuerzan la racionalidad económica del pago por uso (ITF, 2019; Finger et al., 2019). Desde una lógica comparada, ello indica que la rentabilidad económica del sistema está estrechamente ligada a la existencia de corredores con suficiente densidad logística, cuestión relevante para un eventual piloto en España.

Portugal constituye un caso particularmente útil para el análisis económico, aunque por una vía diferente. Su interés reside en la experiencia acumulada en telepeaje, cobro electrónico y sistemas *free flow,* que muestran cómo la digitalización puede mejorar la eficiencia operativa y reducir determinados costes de transacción ligados al peaje tradicional. Sin embargo, el caso portugués también demuestra que la sofisticación del sistema de cobro no equivale necesariamente a un modelo integral de *Road User Charging* basado en distancia.

Su valor para este trabajo es doble: por un lado, proporciona lecciones sobre operación y transición; por otro, advierte que la viabilidad económica de un sistema depende del marco concesional y contractual en el que se inserta, no solo de la tecnología utilizada (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

Portugal ofrece un caso particularmente relevante desde el punto de vista político institucional y regulatorio, porque muestra una vía de evolución que España no ha seguido. A diferencia del caso español, donde la política viaria reciente ha estado marcada por la liberalización de peajes estatales y por la ausencia de una hoja de ruta estable hacia el pago por uso, Portugal avanzó en la dirección contraria en varios corredores: transformó parte de sus antiguas autopistas SCUT, inicialmente sin pago directo al usuario y financiadas con fórmulas próximas al peaje en sombra, en autopistas con cobro electrónico por uso, apoyadas en un sistema de pórticos *free flow* y en un ecosistema operativo de pago y control relativamente consistente.

En este contexto, EasyToll debe entenderse como un mecanismo operativo de pago por uso para vehículos, especialmente extranjeros, dentro de ese sistema electrónico. Su relevancia comparada radica en que Portugal sí desarrolló una infraestructura institucional y operativa para cobrar el uso efectivo de determinadas autopistas sin

barreras físicas, mientras que España no ha construido un esquema equivalente a escala nacional para la red estatal.

Desde una perspectiva política y regulatoria, lo distintivo del caso portugués no es solo la tecnología empleada, sino la decisión de mantener y normalizar el principio de pago directo por uso en parte de la red de alta capacidad, incluso en un contexto de elevada sensibilidad social y contestación territorial.

La literatura comparada y los informes técnicos sugieren que Portugal logró traducir las necesidades de sostenibilidad financiera de las concesiones y de la red en un esquema de tarificación electrónica relativamente estable, aunque no exento de controversia. A diferencia de España, donde el debate sobre nuevas fórmulas de cobro ha tendido a quedar paralizado por el coste político y por la expectativa de gratuidad, Portugal avanzó en la creación de mecanismos de identificación, facturación y cobro para usuarios nacionales y extranjeros, incluyendo soluciones como Via Verde, TollCard, TollService y EasyToll, con apoyo normativo y operativo suficiente para sostener el sistema en el tiempo.

Esta diferencia resulta especialmente relevante porque muestra que la implantación del pago por uso no depende únicamente de la viabilidad tecnológica, sino de la capacidad del Estado para mantener coherencia regulatoria y continuidad institucional una vez tomada la decisión de cobrar.

La comparación con España permite formular un razonamiento inferencial de gran valor para este trabajo. Portugal hizo, al menos en parte, tres cosas que España no hizo. En primer lugar, mantuvo una lógica de continuidad en la tarificación de la red de alta capacidad, en lugar de avanzar hacia una liberalización generalizada de peajes estatales sin sistema alternativo de pago por uso.

En segundo lugar, desarrolló una arquitectura operativa y regulatoria de cobro electrónico en flujo libre, capaz de gestionar usuarios sin barreras físicas, incluidas matrículas extranjeras, algo que España no ha escalado a nivel estatal. En tercer lugar, normalizó políticamente la existencia de mecanismos de pago directo sobre corredores estratégicos, aunque con contestación, mientras que en España la reversión de concesiones y la eliminación de peajes reforzaron una lógica política de gratuidad difícilmente compatible, a corto plazo, con la implantación de un sistema generalizado de *road pricing*.

De este modo, el caso portugués sugiere que una de las diferencias clave con España no es de posibilidad técnica, sino de continuidad política, diseño regulatorio y capacidad operativa para sostener el cobro por uso.

En Francia, la experiencia de la *écotaxe poids lourds* evidencia que un sistema puede estar razonablemente justificado desde el punto de vista técnico y económico, por ejemplo, como instrumento de internalización de costes y fuente de ingresos para infraestructuras, y, sin embargo, fracasar si sus costes son percibidos como territorial o sectorialmente injustos. La literatura sobre aceptabilidad económica pone de manifiesto que la viabilidad financiera del pago por uso no depende únicamente del balance ingreso coste, sino de la forma en que los costes se distribuyen entre operadores, territorios y usuarios, y de si el sistema logra evitar la percepción de simple carga fiscal adicional (Crozet & Mercier, 2016).

El caso español presenta una dificultad particularmente significativa. La red estatal de alta capacidad es extensa, el transporte por carretera tiene un peso dominante y las necesidades de conservación y mantenimiento son elevadas, de modo que, desde una perspectiva agregada, existiría una base objetiva para plantear mecanismos de asignación de costes al usuario. Sin embargo, la liberalización reciente de peajes, la dependencia de la financiación presupuestaria y la fuerte sensibilidad del sector del transporte a nuevas cargas económicas han dificultado la construcción de una lógica económica estable del pago por uso (AIReF, 2022; CNMC, 2021).

Desde la perspectiva comparada, la cuestión clave ya no es solo si España necesita más recursos, sino por qué países como Alemania o Austria han conseguido estructurar una lógica económica del pago por uso que España aún no ha logrado consolidar.

En este punto, la comparación tecnológica entre GNSS y DSRC resulta esencial. La literatura coincide en que no existe una solución universalmente superior, sino tecnologías con estructuras de costes distintas y puntos de eficiencia diferentes según la escala de la red, la cobertura territorial deseada, el tipo de usuario y el grado de flexibilidad tarifaria buscado (Odeck & Bråthen, 2022; Finger et al., 2019).

Los sistemas DSRC presentan una lógica más intensiva en infraestructura física de carretera, pórticos, equipamiento de campo, puntos de control, lo que puede resultar eficiente en redes acotadas o de alta concentración de tráfico. En cambio, los sistemas GNSS concentran una mayor parte de sus costes en el desarrollo del sistema central, la conectividad, el software de back office y los dispositivos embarcados, pero ofrecen una ventaja decisiva cuando se pretende tarificar redes amplias y territorialmente dispersas, ya que permiten escalar la cobertura sin multiplicar proporcionalmente la infraestructura física.

Desde un punto de vista económico financiero, ello implica que la comparación entre GNSS y DSRC no puede plantearse en términos abstractos de “qué tecnología es mejor”, sino en términos de qué tecnología es más coherente con la escala, la estructura de la red y el modelo tarifario deseado. Precisamente aquí aparece una de las preguntas inferenciales más relevantes del TFM: si Alemania ha optado por un sistema basado en distancia con fuerte soporte institucional y España no lo ha hecho, ¿responde ello a una supuesta inferioridad técnica del contexto español o a la ausencia de las condiciones organizativas, económicas y de escalabilidad que hacen racional dicha elección tecnológica? La evidencia comparada apunta claramente a la segunda explicación.

En relación con los niveles tarifarios, el análisis económico del pago por uso debe distinguir con precisión entre tarifa al usuario y coste del sistema, dos conceptos que con frecuencia se confunden. En algunos manuales técnicos y referencias sectoriales europeas se utilizan como rangos orientativos de *road pricing* valores del orden de 0,03€ a 0,15€ por kilómetro para vehículos ligeros y de 0,14€ a 0,16€ por kilómetro para vehículos pesados, dependiendo del país, del tipo de vía y del diseño tarifario del sistema.

Estos rangos deben entenderse como *benchmark* tarifario del pago por uso, es decir, como señal económica trasladada al usuario, y no como *benchmark* de coste del sistema. Este matiz es metodológicamente fundamental. Las tarifas pueden incorporar objetivos fiscales, ambientales, de gestión de la demanda o de financiación, mientras

que los costes remiten a otra dimensión: inversión inicial, operación, mantenimiento, *enforcement* y gestión administrativa.

La literatura comparada muestra, sin embargo, que los *benchmarks* plenamente homogéneos de costes por kilómetro de red son mucho más escasos y menos comparables de lo que sugiere a veces el debate político. Las diferencias en el denominador utilizado, kilómetros de red total, kilómetros tarificados, kilómetros equivalentes, extensión controlada, tipo de vehículo cubierto, dificultan la utilización directa de un único valor de referencia en €/km de carretera (ITF, 2019; Finger et al., 2019).

Por ello, muchos estudios internacionales prefieren comparar la eficiencia del sistema mediante otros indicadores: coste relativo de recaudación como porcentaje de ingresos, coste por transacción o coste marginal de extensión de la red. Esta limitación de la literatura no es un problema menor: justifica directamente que la metodología posterior del TFM tenga que adaptar cuidadosamente cualquier *benchmark* internacional antes de utilizarlo en el piloto de la A-2.

Aun así, la evidencia disponible sí permite extraer algunas conclusiones robustas. En primer lugar, los sistemas maduros reducen progresivamente su coste relativo de recaudación, porque los costes fijos iniciales se amortizan sobre una base más amplia de tráfico y de tiempo. En segundo lugar, los costes operativos dependen mucho de la arquitectura institucional, del grado de externalización, del sistema de control del fraude y del número de usuarios obligados. En tercer lugar, los sistemas GNSS suelen presentar CAPEX elevado en la fase inicial, pero mejor comportamiento en escalabilidad y en flexibilidad tarifaria sobre redes extensas, mientras que los sistemas DSRC pueden implicar un mayor coste incremental en infraestructura de campo cuando se pretende ampliar la cobertura territorial (Odeck & Bråthen, 2022; ITF, 2019). En consecuencia, no basta con saber cuánto se cobra por kilómetro: hay que entender cuánto cuesta implantar, operar y escalar el sistema.

Desde la perspectiva de las empresas de transporte, la literatura muestra que el impacto económico del pago por uso depende del nivel tarifario, pero también de la posibilidad de repercutir costes a la cadena logística y de la existencia de alternativas de ruta o de reorganización operativa. En general, el transporte de mercancías por carretera presenta una elasticidad precio relativamente baja en el corto plazo, especialmente en corredores donde la sustitución modal es limitada y donde la red viaria sigue siendo imprescindible para la distribución capilar (Small & Verhoef, 2007; Santos, 2017). Esto implica que una parte relevante del coste del pago por uso puede trasladarse a cargadores o consumidores finales, aunque dicha traslación no es automática ni homogénea.

A medio plazo, sin embargo, los operadores pueden adaptar estrategias: renovación de flota, optimización de rutas, cambios en la planificación horaria o concentración de carga. Por ello, la elasticidad de la demanda debe entenderse como una variable dinámica y no como una simple constante.

Este aspecto se conecta directamente con la competitividad del transporte de mercancías, una de las dimensiones económicas más sensibles del debate. La literatura comparada sugiere que el impacto del pago por uso sobre la competitividad depende de tres factores adicionales al precio: la previsibilidad regulatoria, la claridad sobre el destino de los ingresos y la existencia de mecanismos de transición o

compensación. Allí donde los operadores perciben que la recaudación se reinvierte en infraestructuras, mejora operativa o modernización del sistema logístico, la resistencia económica al pago por uso tiende a moderarse. Allí donde el sistema se percibe como una simple extracción fiscal, la oposición sectorial se intensifica (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019). En el caso español, esta observación es particularmente relevante, ya que la percepción de doble imposición y la elevada sensibilidad del sector obligan a considerar el destino de los ingresos como una variable económica, no solo política.

Desde una perspectiva macroeconómica, la literatura no ofrece un consenso único sobre el efecto del pago por uso sobre el PIB del transporte o sobre la economía agregada, en buena medida porque el resultado depende del diseño del sistema, de la estructura productiva y del grado de internalización de costes ya existente. Lo que sí se observa de forma consistente es que estos sistemas pueden mejorar la eficiencia asignativa del transporte, al hacer más visible el coste del uso intensivo de la red y al introducir incentivos para decisiones logísticas más racionales (Small & Verhoef, 2007; European Commission, 2019).

En este sentido, la cuestión relevante no es simplemente si el sistema “encarece” el transporte, sino si corrige ineficiencias que ya existen bajo regímenes de gratuidad aparente: deterioro infrafinanciado, asignación presupuestaria opaca, congestión y ausencia de señales para la renovación de flota o la selección de rutas.

Para el presente TFM, estas conclusiones tienen una implicación metodológica directa en relación con la A-2 como corredor piloto. La literatura comparada sugiere que los pilotos más útiles no son los que intentan reproducir desde el inicio un sistema nacional completo, sino aquellos que se sitúan en corredores con suficiente intensidad logística, relevancia funcional y capacidad de observación de efectos económicos. Un corredor como la A-2 resulta especialmente interesante porque combina tráfico de mercancías, accesibilidad metropolitana y función interregional, permitiendo observar demanda potencial, generación de ingresos, sensibilidad del transporte pesado, riesgo de desvío y necesidades de control.

En este punto aparece otro razonamiento comparado clave: si Alemania pudo consolidar su sistema porque disponía de una red logística de alta intensidad y de una estructura institucional que permitía explotarla económicamente, España debería evaluar primero, a escala de corredor, dónde existen condiciones mínimas comparables antes de plantear cualquier escalado nacional. Esta es precisamente una de las razones por las que la metodología posterior del TFM debe orientarse hacia un piloto aplicado y no hacia una proyección abstracta sobre toda la red estatal.

En conjunto, la revisión comparada permite extraer varias conclusiones económicas de alto valor. La primera es que el pago por uso económicamente estable exige una combinación entre ingresos, escalabilidad y legitimidad del uso de la recaudación. La segunda es que la comparativa entre GNSS y DSRC debe formularse en términos de estructura de costes y cobertura, no de superioridad tecnológica abstracta. La tercera es que los *benchmarks* tarifarios europeos son útiles para definir escenarios de ingresos, pero no sustituyen el análisis específico de costes del sistema.

La cuarta, particularmente relevante para España, es que la literatura sigue siendo limitada en la traducción aplicada de estos elementos a corredores concretos de la red estatal. Precisamente ahí se localiza uno de los vacíos que justifican la metodología posterior: no basta con saber cuánto cobran otros países o qué tecnología utilizan; es

necesario estimar bajo qué condiciones económicas y operativas un piloto GNSS sería viable en un corredor español.

Desde el punto de vista económico y económico financiero, la literatura sobre pago por uso muestra que la viabilidad de estos sistemas no puede evaluarse únicamente por su capacidad recaudatoria. La comparación entre países europeos sugiere que los sistemas que se consolidan son aquellos que logran articular de forma funcional ingresos, estructura de costes, competitividad del transporte, escalabilidad tecnológica y legitimidad en el destino de la recaudación (ITF, 2019; Small & Verhoef, 2007). Por ello, el análisis económico del RUC debe ir más allá del cálculo de tarifas y examinar también el impacto fiscal neto, los costes para operadores y usuarios, la elasticidad de la demanda y la justificación económico-financiera del modelo escogido.

En países como Alemania, Suiza y Austria, la literatura muestra que la fortaleza económica del sistema no reside únicamente en la recaudación, sino en la capacidad de vincular el pago por uso con la financiación estructural de la red y con una asignación más directa de costes al transporte pesado. En Alemania, la consolidación del LKW Maut se ha apoyado en una combinación muy favorable de factores: gran densidad logística, fuerte tránsito nacional e internacional, cobertura relevante de la red y una estructura institucional capaz de gestionar volúmenes elevados de facturación y control (ITF, 2019; Finger et al., 2019).

En Suiza, la justificación económica se ha articulado además con objetivos de transferencia modal y ordenación del tránsito alpino, lo que refuerza la lógica sistémica del esquema. En Austria, la vinculación entre tarificación y sostenibilidad financiera de la red de alta capacidad ha sido igualmente clara (Odeck & Bråthen, 2022). En estos países, por tanto, la tarificación no se consolida solo porque genere ingresos, sino porque esos ingresos se integran en una lógica económica reconocible y políticamente defendible.

La comparación con España vuelve a ser especialmente reveladora. Aunque España dispone de una red extensa y fuertemente utilizada, y aunque el transporte por carretera tiene un peso dominante en el movimiento de mercancías y viajeros, no ha logrado convertir esa base de uso en una lógica económica estable de pago por uso. Una parte de la explicación reside en la liberalización reciente de peajes estatales, que debilitó la relación directa entre uso y financiación, trasladando más claramente la carga al presupuesto público (AIReF, 2022; CNMC, 2021).

Otra parte se relaciona con la percepción de doble imposición y con la fuerte sensibilidad del transporte de mercancías a incrementos visibles de costes. En consecuencia, mientras que Alemania, Austria o Suiza han logrado presentar el pago por uso como mecanismo funcional de financiación y gestión, España no ha consolidado todavía esa lógica económica de manera social y políticamente creíble.

En relación con el impacto fiscal, la literatura europea sugiere que el pago por uso puede constituir una fuente relevante de ingresos relativamente estable cuando se aplica sobre redes con suficiente densidad de tráfico y sobre categorías de vehículos con elevada intensidad de uso, especialmente el transporte pesado (ITF, 2019; European Commission, 2019). No obstante, esta capacidad recaudatoria depende de la cobertura efectiva del sistema, del nivel tarifario, de la tasa de cumplimiento y de los costes de operación. En España, la literatura aplicada sigue siendo limitada a la hora de estimar con precisión el impacto fiscal neto de un sistema generalizado,

especialmente cuando se trata de escenarios comparables a un despliegue por corredor o por red parcial.

La comparación entre GNSS y DSRC debe situarse precisamente en este punto. La literatura coincide en que la elección tecnológica no puede formularse como una simple cuestión de superioridad técnica abstracta, sino como una decisión dependiente de la escala de la red, de la cobertura deseada, de la flexibilidad tarifaria perseguida y de la estructura de costes del sistema (Odeck & Bråthen, 2022; Finger et al., 2019). Los sistemas DSRC requieren mayor inversión en infraestructura física de carretera, pórticos, equipamiento de campo y puntos de control, lo que puede resultar eficiente en redes acotadas y muy concentradas.

Los sistemas GNSS, por su parte, concentran más costes en software, conectividad, back office y equipos embarcados, pero permiten escalar la tarificación a redes más extensas sin multiplicar proporcionalmente la infraestructura física. La pregunta relevante para el caso español no es, por tanto, qué tecnología es “mejor” en términos absolutos, sino qué tecnología es más coherente con una red extensa, territorialmente dispersa y políticamente sensible al despliegue de nueva infraestructura física de cobro. En este sentido, la literatura sugiere que GNSS puede ser más defendible en términos de escalabilidad, pero solo si se acompaña de una arquitectura institucional y operativa adecuada.

La cuestión de los costes para las empresas de transporte y de la elasticidad de la demanda plantea otro eje explicativo importante. La literatura muestra que el transporte de mercancías por carretera presenta en general una elasticidad precio relativamente baja en el corto plazo, especialmente en corredores donde la sustitución modal es limitada y donde la carretera sigue siendo esencial para la distribución capilar (Small & Verhoef, 2007; Santos, 2017).

Esto significa que una parte significativa del coste del pago por uso puede ser repercutida aguas abajo en la cadena logística. Sin embargo, a medio plazo sí pueden aparecer respuestas adaptativas: reorganización de rutas, renovación de flota, concentraciones de carga o desplazamientos temporales. El efecto sobre la competitividad del transporte depende por tanto no solo del nivel tarifario, sino también de la previsibilidad regulatoria, del diseño del sistema y del uso que se haga de los ingresos. En este sentido, los países con sistemas más consolidados han tendido a mitigar la resistencia económica vinculando el pago a una mejora visible de la red o a una lógica clara de financiación, mientras que en España esa conexión todavía no está socialmente consolidada.

Este punto enlaza con la cuestión del uso de los ingresos, una de las variables que más consistentemente aparecen en la literatura sobre aceptación económica y política del pago por uso (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019). En Suiza, la recaudación se asocia a una política de transporte más amplia. En Alemania y Austria, los ingresos se vinculan de forma más clara a la financiación y mantenimiento de la red. En Portugal, aunque el marco es distinto y muy ligado al sistema concesional y al cobro electrónico sobre determinadas autopistas, el principio de usuario pagador se ha mantenido de forma más visible que en España. En este último caso, la falta de una narrativa estable sobre el destino de la recaudación constituye una de las principales debilidades económicas del debate.

Lo que otros países tienen y España no tiene, en este plano, no es solo la capacidad de cobrar, sino la capacidad de hacer creíble para usuarios y operadores que ese cobro se reinvertirá con una finalidad funcional claramente identificable.

Un aspecto especialmente importante para este TFM es la pregunta relativa al coste de un piloto GNSS, por ejemplo, en un corredor como la A-2. Aquí la literatura comparada es útil, pero también claramente insuficiente. Existen estudios internacionales que permiten identificar variables de referencia para evaluar pilotos o despliegues parciales, intensidad de tráfico, composición de flota, tasa de cumplimiento, escalabilidad de back office, necesidad de *enforcement*, estructura CapE/OpEx, y también existen algunas orientaciones sobre modelos de evaluación aplicados por corredor (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022). Sin embargo, la literatura no ofrece *benchmarks* totalmente homogéneos y directamente transferibles en €/km de red para GNSS, debido a que los estudios difieren en el alcance de la red, en el tipo de usuario cubierto y en la imputación de costes de operación y control (Finger et al., 2019). Esta limitación no invalida el análisis; al contrario, justifica la necesidad de una metodología específica para el caso español. En otras palabras, la literatura permite construir la metodología, pero no sustituye la evaluación aplicada.

En este punto, la comparación con Portugal aporta una enseñanza económica adicional. Aunque EasyToll no es en sí mismo un sistema nacional GNSS, sino un mecanismo operativo de pago dentro de un sistema de cobro electrónico por uso en autopistas concretas, su existencia muestra que Portugal sí desarrolló una arquitectura de usamos, cobro y *enforcement* en flujo libre que España no ha construido a escala estatal.

Además, en varios corredores portugueses las tarifas efectivas de vehículos ligeros y pesados muestran que el pago por uso puede sostenerse sin plazas de peaje tradicionales, aunque con una fuerte dependencia de la concesión y del tramo. Esto no significa que Portugal pueda copiarse directamente en España, pero sí que ofrece evidencia sobre cómo convertir una necesidad financiera en un sistema operativo de usuario pagador, algo que España no ha hecho tras la liberalización de peajes.

Desde una perspectiva macroeconómica, la literatura no ofrece resultados unívocos sobre el impacto del pago por uso en el PIB del transporte o en la economía agregada, precisamente porque dichos efectos dependen del diseño del sistema, del grado de sustitución modal, de la estructura productiva y del uso final de los ingresos (Small & Verhoef, 2007; European Commission, 2019).

Sin embargo, sí existe consenso en que el *road pricing* puede mejorar la eficiencia asignativa del sistema de transporte cuando la señal tarifaria se aproxima de forma razonable al coste de uso y permite reducir externalidades o infrafinanciación oculta. En este sentido, para España la cuestión no es solo si el sistema añade coste bruto, sino si corrige ineficiencias existentes bajo un modelo de gratuidad aparente: deterioro infrafinanciado, ausencia de señal económica, congestión y dependencia completa del presupuesto público.

Finalmente, la cuestión de los corredores logísticos refuerza aún más la lógica aplicada del presente trabajo. La literatura comparada sugiere que los pilotos más útiles no son aquellos que intentan simular desde el inicio un esquema nacional completo, sino los que se diseñan en corredores con suficiente intensidad de tráfico, relevancia funcional y diversidad de usuarios, de manera que permitan observar tanto

potencial recaudatorio como sensibilidad del transporte de mercancías, riesgo de desvíos y necesidades de control (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022). La A-2 presenta, en este sentido, características especialmente adecuadas como caso de estudio exploratorio. La comparación con países como Alemania sugiere que, si España no dispone todavía de las condiciones para un despliegue nacional, sí puede ser metodológicamente razonable evaluar preliminarmente la viabilidad en corredores con densidad logística suficiente, ajustando cuidadosamente benchmarking internacional, estructura de costes y comportamiento de la demanda.

Desde una perspectiva económico-financiera, el análisis comparado de los sistemas de pago por uso no puede limitarse a la observación de tarifas o ingresos brutos. Para cerrar adecuadamente esta dimensión resulta necesario profundizar en el impacto fiscal, en la estructura de los modelos tarifarios, en los costes para las empresas de transporte, en la elasticidad de la demanda y, especialmente, en la forma en que la literatura disponible prepara, pero no resuelve completamente, la evaluación de un posible piloto GNSS en España.

En primer lugar, la cuestión del impacto fiscal requiere una precisión adicional. La literatura europea muestra que los sistemas de pago por uso pueden generar ingresos relevantes para la financiación de la red, pero el significado de esos ingresos depende de cómo se integren dentro del sistema tributario y de financiación existente (ITF, 2019; European Commission, 2019).

En algunos contextos, el pago por uso actúa como complemento de otras figuras fiscales; en otros, se presenta como vía para reasignar la carga desde la imposición general hacia el usuario intensivo. Lo importante, desde una perspectiva comparada, es que países como Alemania, Austria o Suiza han logrado vincular políticamente la recaudación a la financiación y mejora de la red, mientras que en España esa relación aparece mucho menos consolidada.

De hecho, uno de los problemas del debate español es que la eventual introducción del pago por uso ha tendido a interpretarse como un “añadido” recaudatorio y no como una transformación del modelo de financiación. Esta diferencia ayuda a explicar por qué otros países han podido construir una lógica fiscalmente defendible del sistema y España no.

En segundo lugar, conviene reforzar la cuestión de los modelos tarifarios. El análisis europeo muestra que la tarificación del uso de la red puede adoptar formas muy distintas: cobro por distancia, viñetas temporales, tarifas por tramo, diferenciación por emisiones, recargos por congestión o combinaciones de estas variables (European Commission, 2019; ITF, 2019). A ello se suma la diversidad tecnológica: GNSS, DSRC, pórticos free flow o modelos híbridos.

Este punto es importante porque la discusión económica sobre España no debe reducirse a “implantar o no implantar pago por uso”, sino a qué tipo de modelo tarifario sería compatible con los objetivos, la estructura territorial y la sensibilidad política del país. En este marco, los rangos tarifarios orientativos frecuentemente citados en la literatura, del orden de 0,03 € a 0,15 €/km para vehículos ligeros y de 0,14 € a 0,16 €/km para vehículos pesados, dependiendo del país y del sistema, son útiles como *benchmark* de *road pricing*, es decir, como referencia de señal económica al usuario, pero no sustituyen una evaluación específica de costes, finalidades y elasticidades (European Commission, 2019; ITF, 2019).

La literatura sugiere, por tanto, que en España el problema no es solo de nivel tarifario, sino de diseño del sistema de precios y de su justificación funcional.

En tercer lugar, los costes para las empresas de transporte deben analizarse con mayor detalle. La evidencia disponible indica que el impacto del pago por uso no es homogéneo entre operadores, sino que varía según el tamaño de la flota, la intensidad de uso de la red, la capacidad de repercutir costes a los clientes y el grado de exposición al transporte internacional (Santos, 2017; Small & Verhoef, 2007). En general, las grandes flotas y los operadores internacionalizados pueden tener mayor capacidad para internalizar o trasladar costes que las pequeñas empresas más dependientes de corredores específicos y con menos poder negociador.

Este aspecto es particularmente relevante para España, donde el tejido del transporte por carretera presenta una combinación importante de pequeñas y medianas empresas, y donde la sensibilidad a nuevas cargas económicas resulta elevada. La comparación con Alemania y otros países sugiere que la sostenibilidad económica del sistema no depende únicamente del coste unitario del peaje o del pago por uso, sino de la estructura empresarial del sector y de la posibilidad de diseñar mecanismos de transición o adaptación.

En cuarto lugar, la elasticidad de la demanda requiere una formulación más matizada. Aunque la literatura coincide en que la elasticidad precio del transporte de mercancías por carretera suele ser baja en el corto plazo, especialmente en corredores donde la carretera es insustituible, también señala que la sensibilidad puede variar significativamente según el tipo de vehículo, la disponibilidad de rutas alternativas, el plazo temporal considerado y el nivel tarifario (Small & Verhoef, 2007; Santos, 2017). En este sentido, resulta metodológicamente inadecuado asumir una elasticidad única para toda la red o para todo tipo de usuario.

Para el caso español, esta cuestión es especialmente relevante porque la A-2, como posible corredor piloto, combina tráficos de mercancías, movilidad interregional y accesos metropolitanos, lo que obliga a considerar una respuesta potencialmente heterogénea de los usuarios. La literatura comparada ayuda a identificar esta necesidad, pero no la resuelve para el caso español, lo que refuerza la justificación de una metodología aplicada.

En quinto lugar, el impacto macroeconómico y sobre el sistema de transporte debe tratarse con cautela. La literatura internacional no ofrece una conclusión única sobre el efecto del pago por uso sobre el PIB del transporte o sobre el conjunto de la economía, precisamente porque los resultados dependen del diseño del sistema, del uso de los ingresos y del grado de internalización previa de costes (European Commission, 2019; Small & Verhoef, 2007). Lo que sí aparece de forma más consistente es que la tarificación puede mejorar la eficiencia asignativa del sistema cuando introduce señales económicas más próximas al coste de uso real, incentiva el uso más racional de la red y reduce formas de infrafinanciación encubierta. En este sentido, para España el problema no es meramente si el pago por uso “encarece” el transporte, sino si contribuye a corregir desequilibrios ya presentes: mantenimiento insuficiente, ausencia de señal económica, asignación presupuestaria opaca y costes externos no internalizados.

La cuestión del uso de los ingresos también requiere un cierre más explícito. La literatura comparada muestra que uno de los factores que más influye sobre la

aceptabilidad económica y política del sistema es la claridad con la que los ingresos se vinculan a fines visibles y legítimos: mantenimiento de la red, mejora de infraestructuras, modernización del transporte o financiación de políticas coherentes de movilidad (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019). En Suiza, esta lógica ha sido central. En Alemania y Austria, la conexión entre ingresos y red de alta capacidad también ha reforzado la legitimidad del sistema.

En Portugal, dentro de su marco concesional y operativo, el principio de usuario pagador se ha sostenido con mayor continuidad que en España. En este último caso, la debilidad del debate no es solo técnica, sino económica en sentido político: España no ha conseguido construir una narrativa fiscalmente creíble sobre el destino de la recaudación, lo que refuerza la oposición empresarial y social al cobro directo.

Desde el punto de vista económico y económico financiero, la comparación europea permite extraer una conclusión convergente con la anterior: los países que han consolidado sistemas de pago por uso no solo han dispuesto de una base tecnológica adecuada, sino que han sido capaces de alinear estructura tarifaria, potencial recaudatorio, uso de ingresos, costes operativos, competitividad del transporte y escalabilidad del sistema dentro de un modelo económicamente reconocible y políticamente defendible (ITF, 2019; Small & Verhoef, 2007).

En Alemania, Austria y Suiza, la tarificación del transporte pesado ha logrado legitimarse como mecanismo funcional de financiación de la red y asignación de costes al usuario intensivo; en Portugal, aunque el modelo responda a una lógica concesional distinta, se ha desarrollado una arquitectura de cobro electrónico por uso que mantiene de forma operativa el principio de usuario pagador.

En España, por el contrario, no se ha consolidado todavía una lógica económica equivalente: la liberalización de peajes debilitó la relación entre uso y financiación, la percepción de doble imposición sigue siendo elevada, el impacto potencial sobre los costes empresariales continúa siendo políticamente sensible, y la literatura aplicada no ha desarrollado de forma suficiente estimaciones específicas sobre CapEx, OpEx, elasticidad de la demanda, segmentación de operadores, uso de ingresos o viabilidad de despliegue en corredores concretos.

En este sentido, la comparación entre países vuelve a remitir a la misma pregunta inferencial: si otros han podido convertir una necesidad de financiación y gestión de la red en un sistema económicamente viable y España no lo ha hecho, la explicación no puede buscarse solo en la tarifa o en la tecnología, sino en la falta de alineación entre estructura de red, capacidad institucional, estrategia de ingresos y aceptabilidad sectorial. Precisamente por ello, el estado del arte permite justificar con claridad el siguiente paso metodológico del trabajo: la necesidad de desarrollar una evaluación aplicada, prudente y adaptada al contexto español, por ejemplo, sobre un corredor como la A-2, que traduzca la evidencia comparada europea a un marco realista de viabilidad técnico-económica para un posible piloto GNSS (Finger et al., 2019; AIReF, 2022; Santos, 2017).

La literatura económica sobre sistemas de pago por uso en Europa presenta un grado de desarrollo considerable, especialmente en lo relativo a la evaluación de impactos sobre la financiación de infraestructuras, la eficiencia del sistema de transporte y la internalización de externalidades (Small & Verhoef, 2007; ITF, 2019). En este contexto, múltiples estudios académicos y técnicos han analizado los efectos del road pricing

sobre la demanda, la competitividad del transporte de mercancías, la elasticidad precio o el uso de los ingresos generados, con especial atención a países como Alemania, Austria o Suiza, donde los sistemas se encuentran en funcionamiento.

En el caso español, la producción de conocimiento en esta dimensión ha estado liderada principalmente por instituciones como la AIReF (2022), la CNMC (2021) o diversos informes vinculados al debate sobre sostenibilidad financiera de las infraestructuras. Estos trabajos aportan diagnósticos relevantes sobre:

- la insuficiencia del modelo de financiación basado en presupuestos públicos,
- la necesidad de garantizar recursos estables para conservación de la red,
- y la posible contribución del pago por uso a estos objetivos.

Sin embargo, desde una perspectiva inferencial, estas contribuciones presentan limitaciones significativas, ya que no abordan de manera completa las condiciones económicas necesarias para la implantación del sistema en España, ni responden plenamente a las preguntas clave de la dimensión económica del estado del arte.

En primer lugar, aunque la literatura analiza el impacto fiscal potencial del pago por uso, este análisis se realiza habitualmente en términos agregados, sin desarrollar modelos aplicados al contexto español que permitan estimar de forma operativa:

- los ingresos esperados en corredores concretos,
- la distribución de cargas entre tipos de usuarios,
- o la sostenibilidad del sistema en escenarios reales.

En segundo lugar, la cuestión de la competitividad del transporte de mercancías es identificada como una preocupación central, pero no se analiza en profundidad mediante modelos empíricos aplicados a España. Mientras que en países como Alemania el sistema ha sido integrado en la estructura de costes del sector logístico, en España la literatura no proporciona evidencia suficiente sobre cómo afectaría realmente el pago por uso a distintos tipos de operadores, ni cómo podrían diseñarse mecanismos de transición para mitigar dichos impactos (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

Otra limitación relevante se observa en el análisis de los modelos tarifarios y su impacto distributivo. La literatura europea ofrece ejemplos de tarificación por distancia, diferenciación por emisiones o estructura por tipo de vehículo, pero no existe un desarrollo equivalente aplicado al caso español que permita responder a preguntas como:

- qué tipo de tarifa sería social y económicamente aceptable en España,
- cómo debería segmentarse por corredores,
- o qué efectos tendría sobre distintos perfiles de usuario.

En relación con los costes del sistema (CapEx/OpEx), la literatura presenta también limitaciones importantes. Aunque existen estudios técnicos sobre costes de implantación en diferentes países, estos no son directamente comparables debido a diferencias en:

- escala de red,
- estructura institucional,
- volumen de tráfico.

En consecuencia, no existen benchmarks homogéneos aplicables al caso español, lo que impide evaluar con precisión la relación coste-beneficio en el contexto nacional (Finger et al., 2019). Esta limitación es particularmente relevante para tecnologías como GNSS, cuyo comportamiento económico depende fuertemente de la escala y del diseño del sistema.

Asimismo, la literatura presenta carencias en el análisis de la elasticidad de la demanda en contextos como el español. Aunque los estudios internacionales indican elasticidades relativamente bajas en el transporte de mercancías, no existe evidencia específica que permita evaluar cómo responderían los usuarios españoles, particulares y profesionales, ante la introducción del pago por uso, especialmente en función de la estructura territorial y de la red.

Otro aspecto insuficientemente desarrollado es el uso de los ingresos. Si bien la literatura europea destaca la importancia de vincular los ingresos a la financiación de infraestructuras para mejorar la aceptación del sistema, en España no existe un análisis detallado de:

- cómo deberían asignarse estos recursos,
- qué impactos tendría su reinversión,
- cómo influiría en la percepción del sistema por parte de usuarios y operadores.

En consecuencia, puede concluirse que la literatura existente en el ámbito económico ofrece un conocimiento sólido sobre el funcionamiento general del pago por uso, pero no proporciona herramientas suficientes para evaluar su viabilidad aplicada en España, ni responde de forma completa a las preguntas relativas a costes, ingresos, impacto en operadores o diseño tarifario en el contexto nacional.

Tabla 3 Comparación económico-financiera: Europa vs España.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Países europeos (Alemania, Suiza, Austria, etc.)	España	Diferencia clave
Modelo de financiación	Usuario-pagador consolidado	Financiación presupuestaria predominante	Falta alineación uso-financiación
Impacto fiscal	Ingresos estables y estructurales	Ingresos no desarrollados	Falta sistema recaudatorio dedicado
Modelos tarifarios	Diversificados (distancia, emisiones, tipo de vehículo)	No definidos a nivel estatal	Falta diseño tarifario
Coste del sistema	Integrado en economías de escala	No evaluado empíricamente	Falta análisis CAPEX/OPEX

Variable	Países europeos (Alemania, Suiza, Austria, etc.)	España	Diferencia clave
Competitividad transporte	Sistema integrado en costes logísticos	Alta sensibilidad y elasticidad al coste	Falta transición sectorial
Elasticidad demanda	Estimada y gestionada	No analizada en contexto nacional	Falta evidencia empírica
Uso de ingresos	Vinculado a infraestructuras	No definido claramente	Falta legitimación económica
Escalabilidad económica	Sistemas consolidados a nivel nacional	Sin implementación nacional	Falta modelo económico operativo

El análisis realizado permite concluir que el principal vacío de la literatura en la dimensión económico-financiera no reside en la comprensión de los beneficios potenciales del pago por uso, sino en la ausencia de modelos aplicados que permitan evaluar su viabilidad real en contextos específicos como el español. Mientras que la evidencia europea proporciona referencias útiles sobre diseño tarifario, impacto fiscal y comportamiento de la demanda, no existe un desarrollo equivalente que permita trasladar estos conocimientos a un modelo operativo adaptado a las condiciones económicas, institucionales y territoriales de España.

En consecuencia, el gap identificado en esta dimensión no es la falta de justificación económica del pago por uso, sino la ausencia de análisis empírico aplicado que permita definir cómo debería diseñarse, implementarse y adaptarse el sistema al caso español.

3.4 Dimensión tecnológica y operativa

La dimensión tecnológica y operativa ocupa un lugar central en la literatura sobre RUC, pero precisamente por ello constituye también uno de los ámbitos donde con mayor frecuencia se producen interpretaciones reduccionistas. Una parte relevante del debate público tiende a presentar la implantación del pago por uso como un problema esencialmente técnico: si existe o no una tecnología capaz de medir el uso de la infraestructura, facturar al usuario y controlar el fraude.

Sin embargo, la evidencia comparada en Europa sugiere una conclusión distinta y especialmente relevante para el presente trabajo: el problema no es, en sentido estricto, tecnológico. Las tecnologías necesarias para desplegar sistemas avanzados de tarificación viaria existen desde hace años y han madurado significativamente; lo que distingue a los países que han implantado sistemas operativos estables de aquellos que no lo han hecho es, sobre todo, la capacidad para integrar esas tecnologías en una arquitectura institucional, regulatoria y operativa coherente (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022). Desde esta perspectiva, la pregunta no es simplemente qué tecnología utiliza cada país, sino por qué algunos países han podido convertir la tecnología disponible en un sistema funcional y España no ha dado todavía ese paso a escala estatal.

La literatura europea permite identificar tres patrones tecnológicos y operativos. El primero corresponde a países que han alcanzado una elevada madurez administrativa y operativa en la gestión del cobro por uso, como Alemania, Austria y Suiza. En estos casos, la tecnología no aparece como una capa superpuesta a la infraestructura existente, sino como parte de un sistema integrado que combina medición del uso, back office, control, interoperabilidad y enforcement.

El segundo patrón agrupa a países que han llegado a sistemas funcionales a través de trayectorias de transición o modelos híbridos, como Polonia, República Checa o Eslovaquia, donde el despliegue ha sido más incremental y ha requerido ajustes sucesivos entre arquitectura técnica y capacidad administrativa. El tercer patrón se observa en países donde existen soluciones tecnológicas operativas en ciertos segmentos o corredores, como Portugal, pero donde la evolución hacia un modelo nacional plenamente integrado de pago por uso no ha seguido la misma lógica que en los casos pioneros.

España se sitúa, desde esta perspectiva, en una posición singular: dispone de tecnología accesible, experiencia parcial en telepeaje y cobro electrónico, e incluso casos subnacionales relevantes, pero no ha consolidado una arquitectura nacional de operación y gestión comparable a la de los países que sí han avanzado hacia modelos más estables (ITF, 2019; Finger et al., 2019).

Una primera variable clave en esta dimensión es la madurez de las administraciones y de las estructuras gestoras. La literatura muestra que los sistemas de pago por uso no fracasan normalmente porque la tecnología no funcione, sino porque requieren capacidades administrativas específicas: contratación tecnológica compleja, gestión de bases de datos, supervisión de proveedores, integración con registros de vehículos, gestión de cobro y sanción, y coordinación con cuerpos de control y sistemas tributarios (Finger et al., 2019; Odeck & Bråthen, 2022). En Alemania, por ejemplo, la implantación del LKW Maut se apoyó no solo en tecnología GNSS, sino en una estructura organizativa profesionalizada y en la especialización operativa de Toll

Collect, que permitió estabilizar el sistema en el tiempo. Austria presenta un patrón similar, con una fuerte institucionalización de la operación del cobro. En España, por el contrario, aunque existen administraciones con experiencia en concesiones, telepeaje y gestión viaria, no se ha construido una entidad nacional equivalente específicamente orientada a integrar operación, recaudación, control y evolución tecnológica de un sistema de pago por uso basado en distancia. Esta diferencia resulta fundamental, porque sugiere que la brecha entre España y países como Alemania no reside en la ausencia de tecnología, sino en la ausencia de una madurez organizativa específicamente aplicada al RUC.

Directamente vinculada a esta cuestión se encuentra la interoperabilidad, particularmente en el marco del European Electronic Toll Service (EETS). La literatura y la normativa comunitaria coinciden en que la interoperabilidad no es solo una mejora técnica, sino una condición de eficiencia para sistemas que operan sobre mercados de transporte transfronterizos y redes complejas (Directiva (UE) 2019/520; ITF, 2019). Países como Alemania, Austria, República Checa o Polonia han avanzado en sistemas que, con distintos grados de madurez, se insertan en esta lógica de interoperabilidad europea.

Esto reduce costes de transacción, facilita la operación de flotas internacionales y mejora la trazabilidad del cobro. España, en cambio, no ha desplegado un sistema estatal generalizado que requiera ser articulado a gran escala con el EETS, lo que la sitúa en una posición distinta: no es que España no pueda ser interoperable, sino que todavía no ha construido el sistema cuya interoperabilidad habría de garantizarse. Desde una lógica comparada, esto vuelve a mostrar que el obstáculo principal no es la tecnología en sí, sino la falta de decisión y de arquitectura operativa suficiente para activar esa interoperabilidad en un contexto nacional.

El debate sobre GNSS frente a otras tecnologías debe formularse dentro de este mismo marco. La literatura comparada ha mostrado de forma consistente que no existe una tecnología universalmente óptima, sino soluciones con ventajas e inconvenientes distintos según la escala de la red, la granularidad tarifaria buscada y el modelo institucional de operación (Odeck & Bråthen, 2022; Finger et al., 2019). Los sistemas basados en DSRC y en pórticos o equipamiento de carretera pueden resultar eficaces en redes acotadas y físicas, así como en entornos concesionales con lógica de punto de cobro.

Los sistemas basados en GNSS, por su parte, adquieren mayor sentido cuando el objetivo es medir uso de forma continua, tarificar redes extensas y permitir diferenciación tarifaria por tramo, zona, tiempo o categoría de vehículo. Lo relevante para el caso español es que la literatura no identifica una barrera tecnológica estructural que impida el uso de GNSS en España, sino una falta de condiciones organizativas, regulatorias y operativas que permitan convertir esa tecnología en un sistema funcional. Dicho de otro modo, otros países no han implantado GNSS porque dispusieran de una tecnología que España no tiene; lo han hecho porque integraron esa tecnología en un sistema institucional y operativo que España todavía no ha construido.

Esta observación se refuerza al analizar el papel de las tecnologías emergentes y de la telemática de flotas. La difusión creciente de sistemas de posicionamiento, gestión de flotas, conectividad móvil e infraestructuras ITS ha reducido de forma progresiva varias de las barreras que, en décadas anteriores, encarecían o dificultaban la

implantación de esquemas avanzados de tarificación (Finger et al., 2019; ITF, 2019). En el transporte de mercancías, la extensión de la telemática sobre vehículos pesados ha permitido en muchos países reducir parte de la fricción de adopción de sistemas basados en localización y control digital. Desde una perspectiva comparada, esto debilita todavía más la hipótesis de que España no haya implantado un sistema GNSS por "falta de tecnología". Si la telemática de flotas, la conectividad móvil y los sistemas ITS forman ya parte del ecosistema operativo del transporte europeo, el problema español debe buscarse en otra parte: la dificultad para articular políticamente, regular jurídicamente y operar administrativamente un sistema nacional de cobro por uso apoyado en esas tecnologías.

La cobertura GNSS constituye otro buen ejemplo de cómo una cuestión aparentemente tecnológica remite en realidad a un problema de diseño institucional. En el ámbito europeo, la literatura no identifica la cobertura satelital como una barrera principal para la implantación del pago por uso basado en distancia; más bien, los problemas se sitúan en la fiabilidad del procesamiento, la integración con el sistema de cobro, el control de cumplimiento y la aceptación institucional de la arquitectura elegida (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

En este sentido, España comparte con los países comparables un contexto tecnológico suficientemente maduro como para no considerar la cobertura o la disponibilidad general del GNSS como un impedimento estructural. Por ello, cuando España no implanta GNSS mientras Alemania sí lo hace, la diferencia no puede buscarse razonablemente en la capacidad física de localización, sino en la capacidad de convertir esa cobertura en un sistema jurídicamente robusto, administrativamente gestionable y políticamente sostenible.

La experiencia de Portugal resulta especialmente ilustrativa para entender esta conclusión. Portugal no ha desarrollado un sistema nacional GNSS comparable al alemán, pero sí ha sido capaz de construir una arquitectura operativa de cobro electrónico por uso en determinados corredores de alta capacidad, basada en pórticos *free flow* y en mecanismos de identificación y pago para usuarios nacionales y extranjeros, entre ellos EasyToll como solución operativa para el abono del peaje electrónico.

Desde un punto de vista tecnológico, ello demuestra que un país vecino con una estructura territorial distinta, pero también con fuerte peso del transporte por carretera y sensibilidad turística, sí ha avanzado en la operativización del principio usuario pagador sin barreras físicas. La conclusión comparada es clara: España no ha quedado atrás porque no exista tecnología adecuada, sino porque no ha construido la arquitectura operativa y regulatoria que Portugal sí ha desarrollado en determinados segmentos para hacer técnicamente cobrable el uso de la red.

Otro elemento central de esta dimensión es la capacidad del sistema para reducir el fraude y gestionar el *enforcement* técnico. La literatura europea subraya que la eficacia operativa del pago por uso depende tanto de la medición del uso como de la posibilidad real de detectar incumplimientos, cruzar datos y ejecutar el cobro o la sanción (Directiva (UE) 2019/520; ITF, 2019). Alemania, Austria y otros países con sistemas maduros han desarrollado mecanismos relativamente robustos de control, apoyados en integración tecnológica, lectura de matrículas, dispositivos embarcados, back office avanzado y cooperación transfronteriza. Portugal, en su escala y con su lógica concesional, también ha construido una operativa de control y pago suficiente para

sostener el modelo electrónico. España, por el contrario, no ha definido todavía una arquitectura nacional que responda a la pregunta esencial de todo sistema de cobro: cómo medir, facturar, verificar y sancionar de forma consistente. En este punto, la literatura permite una inferencia clara: si otros países han podido desplegar sistemas de cobro operativo, ello se debe menos a una ventaja tecnológica inicial que a su capacidad para articular una cadena completa de operación y *enforcement*. España no carece de tecnología; carece aún de un diseño operativo nacional completo para usarla como sistema de cobro por uso.

La cuestión de la privacidad y protección de datos, aunque parcialmente jurídica, tiene también una dimensión claramente tecnológica y operativa. Los sistemas GNSS exigen gestionar información sensible de localización, lo que introduce riesgos reputacionales, exigencias de diseño y necesidades de gobernanza de datos. La literatura sugiere que este factor rara vez actúa como una barrera puramente técnica; su peso depende más bien del grado de confianza en las instituciones, del diseño de minimización de datos y de la capacidad del sistema para demostrar que la información recogida es la estrictamente necesaria para la facturación y el control (Directiva (UE) 2019/520; European Commission, 2019).

En Alemania y Austria, esta cuestión no desaparece, pero ha sido absorbida dentro de marcos operativos y organizativos más consolidados. En España, por el contrario, la privacidad aparece todavía con frecuencia como una objeción anticipada, en parte porque no existe experiencia estatal equivalente que permita normalizar y legitimar el sistema. De nuevo, la diferencia entre países no reside en la existencia abstracta del problema, sino en la capacidad de gestionarlo institucionalmente.

La literatura también permite extraer enseñanzas relevantes de las experiencias piloto y despliegues progresivos. En varios países europeos, la introducción de sistemas avanzados no ha sido instantánea ni plenamente nacional desde el primer momento; a menudo ha implicado fases de prueba, ampliaciones graduales de red, ajustes técnicos y aprendizaje operativo (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022).

Este patrón es importante para el TFM porque refuerza una idea metodológica central: la comparación europea no sugiere que España deba pasar directamente de un esquema fragmentado a un sistema nacional completo, sino que puede resultar más razonable evaluar pilotos o corredores de alta intensidad logística, donde sea posible testar arquitectura tecnológica, aceptación operativa y coste de despliegue. En este sentido, lo que otros países han tenido y España aún no tiene no es únicamente tecnología, sino también trayectorias de aprendizaje institucional y operativo que legitimaron el sistema antes de escalarlo.

Otro aspecto que merece ser explicitado es el coste de los sistemas ITS y del soporte tecnológico, tema que a menudo se utiliza en el debate político como argumento para aplazar la implantación. La literatura comparada sugiere que los costes tecnológicos son relevantes, pero no explican por sí solos la diferencia entre países.

En contextos maduros, el coste de la tecnología se amortiza dentro de una estructura de red suficiente, de una base de usuarios intensa y de una operación sostenida en el tiempo; además, la reducción progresiva del coste de conectividad, sensores, procesamiento y telemática ha alterado favorablemente los términos de despliegue respecto a décadas anteriores (Finger et al., 2019). Por ello, afirmar que España no ha implantado un sistema GNSS “porque es tecnológicamente costoso” resulta

insuficiente. La comparación con Alemania, Austria o incluso con la operativa portuguesa sugiere que el coste inicial puede ser elevado, pero que la verdadera diferencia radica en si existe o no una estrategia de despliegue y escalado que haga racional esa inversión. España, hasta la fecha, no ha formulado esa estrategia con claridad.

En conjunto, la dimensión tecnológica y operativa permite reforzar una conclusión central del estado del arte: el problema español no es tecnológico. España no ha quedado al margen del pago por uso por carecer de GNSS, de conectividad, de telemática o de interoperabilidad potencial; ha quedado al margen porque no ha alineado esos elementos dentro de un sistema nacional coherente de medición, cobro, control y legitimación institucional.

Los países que han avanzado, Alemania, Austria, Suiza, y con otra lógica Portugal, Polonia o República Checa, no lo han hecho porque posean tecnologías inaccesibles para España, sino porque han desarrollado madurez administrativa, arquitectura operativa, mecanismos de *enforcement*, integración con EETS y trayectorias de aprendizaje que España no ha consolidado a escala estatal. Esta conclusión tiene una consecuencia directa para el TFM: la eventual elección del GNSS como referencia para el caso español no puede justificarse como una mera preferencia técnica, sino como una hipótesis cuyo sentido depende de si puede construirse, y en qué condiciones, la arquitectura operativa que haga viable su aplicación en un corredor como la A-2.

Precisamente por ello, la literatura revisada no cierra el problema, pero sí prepara con claridad la metodología posterior: antes de discutir la implantación nacional, resulta necesario evaluar de forma aplicada qué requerimientos técnicos, organizativos y de control tendría un piloto GNSS en España, y en qué medida esos requerimientos son alcanzables en el contexto institucional español.

En conjunto, la evidencia revisada permite extraer una conclusión clara y fundamental para el presente trabajo: la divergencia entre los países europeos que han implantado sistemas avanzados de pago por uso y el caso español no se explica por la existencia o no de tecnología disponible, sino por la capacidad, o incapacidad, de integrar dicha tecnología en una arquitectura operativa, institucional y regulatoria completa.

Los elementos críticos de esta integración incluyen la madurez administrativa para gestionar sistemas complejos, la interoperabilidad en el marco del EETS, la disponibilidad de mecanismos efectivos de control y sanción del impago, la capacidad de reducir el fraude mediante tecnologías de verificación y trazabilidad, y el diseño de modelos compatibles con los estándares de protección de datos exigidos por el contexto europeo (Directiva (UE) 2019/520; ITF, 2019).

En los países analizados, estas condiciones han permitido cerrar el ciclo operativo completo, medición del uso, facturación, cobro, control y enforcement, mientras que en España dicho ciclo permanece incompleto a escala estatal. La cuestión de la privacidad, frecuentemente planteada como barrera en el debate nacional, no aparece en la literatura como un impedimento tecnológico real, sino como un problema de diseño institucional y de confianza en la gestión de datos, ya resuelto operativamente en sistemas consolidados en otros países (European Commission, 2019; Odeck & Bråthen, 2022). Del mismo modo, los costes de los sistemas ITS o de soluciones GNSS, aunque relevantes, no constituyen una limitación insalvable desde el punto de

vista comparado, ya que su viabilidad depende en gran medida de la escala de la red, de la intensidad de uso y de la existencia de una estrategia de despliegue progresivo, frecuentemente basada en experiencias piloto (Finger et al., 2019).

Asimismo, para completar el análisis tecnológico desde una perspectiva plenamente operativa, resulta necesario incorporar una dimensión que trasciende la propia elección tecnológica y que se sitúa en la capacidad efectiva del sector público para implementar, gestionar y operar de forma continuada un sistema de pago por uso.

En este sentido, la literatura comparada sugiere que la diferencia entre los países que han desplegado sistemas avanzados y aquellos que no lo han hecho no radica únicamente en la disponibilidad de soluciones técnicas, sino en la capacidad institucional para contratar, integrar y gestionar tecnologías complejas a gran escala (Finger et al., 2019; ITF, 2019).

La contratación pública en este ámbito exige procesos altamente especializados, capaces de estructurar relaciones con proveedores tecnológicos, definir arquitecturas de sistema, establecer mecanismos de control y garantizar continuidad operativa. Países como Alemania han demostrado esta capacidad a través de modelos en los que la función pública se apoya en operadores especializados, como Toll Collect, lo que permite separar la decisión política de la ejecución técnica. España, por el contrario, no ha desplegado un esquema equivalente a escala estatal, lo que limita su capacidad no solo de implantar, sino de sostener operativamente un sistema de estas características.

Esta diferencia se extiende al ámbito de la capacidad técnica y la gestión de datos, elementos esenciales en sistemas basados en GNSS. A diferencia de los modelos tradicionales de peaje, donde el control se realiza en puntos físicos, los sistemas de pago por uso requieren la gestión continua de grandes volúmenes de datos de localización, transacciones, perfiles de usuario y procesos de facturación. La literatura señala que la clave no reside únicamente en la tecnología de captación de datos, sino en la existencia de sistemas robustos de tratamiento, almacenamiento, integración y auditoría de la información (European Commission, 2019; Odeck & Bråthen, 2022). En los países que han avanzado en esta materia, estos elementos se han integrado dentro de arquitecturas operativas maduras, con protocolos definidos y responsabilidades claramente asignadas.

En España, en cambio, aunque existen capacidades parciales en ámbitos como la gestión de tráfico o las infraestructuras ITS, no se ha desarrollado una plataforma integrada de gestión de datos orientada al cobro por uso, lo que constituye otra diferencia relevante desde el punto de vista comparado.

Finalmente, la cuestión de la operación continua del sistema representa uno de los elementos menos visibles, pero más determinantes en la implantación del pago por uso. La literatura muestra que estos sistemas no son proyectos de implantación puntual, sino infraestructuras operativas permanentes que requieren mantenimiento, actualización tecnológica, adaptación regulatoria y supervisión constante (Finger et al., 2019).

En este ámbito, los países con sistemas consolidados han desarrollado modelos de gobernanza que permiten garantizar la continuidad del servicio, reducir incertidumbre operativa y mantener niveles elevados de cumplimiento. España, en contraste, no ha definido hasta la fecha un modelo institucional claro para la operación continua de un

sistema nacional de road pricing, lo que refuerza la conclusión ya señalada: la brecha entre España y los países que han implantado sistemas avanzados no es tecnológica, sino operativa e institucional. La ausencia de experiencia en operación continua a escala nacional implica que cualquier avance futuro requerirá no solo decisiones de diseño tecnológico, sino también la construcción de capacidades administrativas, contractuales y técnicas que permitan sostener el sistema en el tiempo.

En conjunto, este bloque final permite cerrar de manera completa la dimensión tecnológica y operativa del análisis, evidenciando que las diferencias observadas entre países no se explican por la existencia de una "frontera tecnológica", sino por la capacidad de transformar tecnología disponible en un sistema funcional, gobernable y sostenible en el tiempo.

Esta conclusión refuerza directamente el planteamiento metodológico del trabajo: antes de plantear un despliegue generalizado, resulta imprescindible analizar de forma aplicada, por ejemplo, a través de un piloto en un corredor como la A-2, si España dispone, o puede desarrollar, las capacidades necesarias para integrar tecnología, gestión de datos, contratación pública y operación continua dentro de un modelo de pago por uso viable.

En este contexto, la dimensión tecnológica confirma una de las conclusiones más relevantes del estado del arte: la no implantación del pago por uso en España no puede explicarse por la existencia de una brecha tecnológica respecto a otros países europeos. Las tecnologías necesarias, incluyendo GNSS, sistemas ITS, telemática de flotas e interoperabilidad EETS, están plenamente disponibles y han demostrado su viabilidad en múltiples contextos (ITF, 2019; Odeck & Bråthen, 2022). La diferencia se sitúa en un plano distinto: la capacidad de las administraciones para contratar sistemas complejos, integrar arquitectura tecnológica, gestionar grandes volúmenes de datos y garantizar una operación continua y sostenible en el tiempo (Finger et al., 2019).

La revisión de las tres dimensiones político institucional, económica y tecnológica, permite construir un marco explicativo integrado que articula de manera coherente las diferencias observadas entre países europeos. La evidencia comparada muestra que la implantación de sistemas de pago por uso no responde a un único factor, sino a la convergencia de varias condiciones necesarias. En primer lugar, los factores político-institucionales actúan como condición habilitadora fundamental, ya que determinan la existencia de una hoja de ruta, la capacidad de sostener la medida frente al ciclo electoral y la articulación de la gobernanza del sistema.

En segundo lugar, los factores económico-financieros condicionan la viabilidad práctica, en términos de ingresos, costes, competitividad y aceptación sectorial. Finalmente, los factores tecnológicos y operativos actúan como condiciones instrumentales, en la medida en que permiten implementar soluciones, pero no explican por sí mismos su adopción.

Desde esta perspectiva, la diferencia entre países como Alemania, Austria o Suiza y el caso español puede interpretarse como el resultado de una desalineación estructural entre estas dimensiones. Mientras que en los primeros se produce una integración progresiva entre política pública, modelo económico y capacidad operativa, en España estas dimensiones aparecen desconectadas o incompletas. La inexistencia de una estrategia estable, la ausencia de una arquitectura institucional específica y la falta de desarrollo operativo impiden transformar la disponibilidad

tecnológica en un sistema funcional. En consecuencia, la respuesta a la pregunta central del trabajo puede formularse de manera clara:

España no ha implantado sistemas de pago por uso no por falta de tecnología ni de viabilidad económica, sino por la ausencia simultánea de estabilidad política, capacidad institucional y estructura operativa para sostener el sistema en el tiempo.

Tabla 4 Comparación tecnológica -operativa: Europa vs España.

Fuente: Elaboración propia.

Variable	Países europeos (Alemania, Austria, etc.)	España	Diferencia clave
Sistema operativo	Integrado y funcional	Fragmentado o inexistente	Falta arquitectura completa
Interoperabilidad	Aplicada en sistemas reales	Preparada pero no operativa	Falta sistema base
Gestión de datos	Integrada y robusta	Parcial y no aplicada a RUC	Falta plataforma nacional
Costes (CAPEX/OPEX)	Estimados y probados	No evaluados empíricamente	Falta análisis aplicado
Control y fraude	Ciclo completo cerrado	No desarrollado	Falta *enforcement*
Pilotos	Implícitos en despliegue	Muy limitados (Gipuzkoa)	Falta aprendizaje escalado
Tecnología disponible	Totalmente operativa	Disponible pero no integrada	Falta implementación
Gobernanza técnica	Operadores especializados	No existe equivalente	Falta estructura operativa

El análisis realizado permite concluir que la literatura tecnológica sobre el pago por uso no presenta carencias en términos conceptuales o de desarrollo técnico, sino en su aplicación al caso español. Mientras que en otros países europeos la tecnología ha sido integrada en sistemas operativos completos, en España el conocimiento existe, pero permanece fragmentado y sin traducción en un modelo funcional.

En consecuencia, el gap identificado en esta dimensión no es tecnológico, sino operativo: la literatura no explica cómo transformar la capacidad tecnológica existente en España en un sistema real de pago por uso a nivel nacional.

3.5 Dimensión Social y territorial

La dimensión social y territorial constituye uno de los factores decisivos en la implantación de sistemas de pago por uso en Europa y, al mismo tiempo, uno de los menos abordados de forma sistemática en el debate español. La literatura comparada muestra que la viabilidad de estos sistemas no depende únicamente de su diseño técnico o económico, sino de la manera en que son percibidos por los usuarios, de su impacto sobre distintos grupos sociales y territorios, y de la capacidad de los gobiernos para construir narrativas de legitimación que mitiguen los costes políticos y sociales asociados al cobro directo (Santos, 2017; Crozet & Mercier, 2016).

En consecuencia, el análisis del RUC requiere evaluar no solo si el sistema es eficiente o viable, sino si es socialmente aceptable y territorialmente equitativo, dimensiones que explican en gran medida la divergencia entre países europeos y el caso español.

Desde una perspectiva comparada, uno de los elementos más relevantes es la disposición a pagar *(willingness to pay).* La literatura sugiere que esta disposición no depende únicamente del nivel de renta o del uso de la infraestructura, sino de factores como la percepción de justicia del sistema, la transparencia en el uso de los ingresos y la confianza en las instituciones (Santos, 2017; ITF, 2019).

En países como Suiza o Alemania, la aceptación del pago por uso se ha apoyado en la vinculación explícita entre el cobro y el mantenimiento o mejora de la red, así como en la percepción de que los usuarios más intensivos, especialmente el transporte pesado, deben contribuir proporcionalmente más.

En España, por el contrario, la disposición a pagar es significativamente más reducida, en parte debido a la percepción de que las infraestructuras ya están financiadas mediante impuestos generales y en parte por la ausencia de una narrativa consolidada que vincule el pago con beneficios visibles para el usuario. Este elemento explica por qué, incluso en ausencia de barreras tecnológicas o económicas, el sistema encuentra mayores resistencias sociales.

Relacionado con ello, la percepción social del sistema constituye una variable crítica. La literatura internacional ha demostrado que el pago por uso es percibido de forma más favorable cuando se enmarca como una herramienta de eficiencia o sostenibilidad, y menos favorable cuando se interpreta como una medida recaudatoria adicional (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019).

En Alemania, el LKW Maut ha sido percibido en gran medida como un instrumento funcional para la financiación de la red y la gestión del transporte pesado. En Suiza, la dimensión territorial y ambiental ha reforzado su legitimidad. En España, en cambio, el pago por uso tiende a asociarse de forma predominante a la idea de nuevo peaje o carga adicional, lo que condiciona negativamente su aceptación social. Esta diferencia no es trivial: muestra que la aceptación no depende del sistema en sí, sino de cómo se construye discursivamente.

Uno de los conceptos más influyentes en esta dimensión es el de doble imposición, que aparece de forma recurrente en el debate español. Muchos usuarios perciben que pagar por el uso de la red supone una duplicación de costes, dado que ya contribuyen a través de impuestos generales (carburantes, IVA, etc.). La literatura muestra que esta percepción es una de las principales barreras a la aceptación del RUC, especialmente en contextos donde no existe una vinculación clara entre el pago y el

destino de los ingresos (Santos, 2017). En países como Alemania o Austria, esta percepción se ha mitigado parcialmente mediante la asignación explícita de los ingresos al sistema de transporte. En España, en cambio, la falta de claridad en este aspecto y la desaparición reciente de peajes han reforzado la narrativa de la doble imposición, dificultando la legitimación de cualquier nuevo sistema.

La dimensión territorial introduce además un conjunto de cuestiones especialmente relevantes, entre ellas la equidad territorial y la movilidad rural. La literatura señala que los sistemas de pago por uso pueden generar efectos desiguales entre territorios si no se diseñan de forma adecuada, especialmente en regiones con menor densidad de red o con menor disponibilidad de alternativas de transporte (European Commission, 2019).

En países con sistemas consolidados, estas cuestiones se abordan mediante diferenciación tarifaria, cobertura adecuada de la red o medidas compensatorias. En España, la preocupación por el impacto sobre zonas rurales o menos conectadas ha sido utilizada como argumento político contra la implantación del sistema, en un contexto donde la red de alta capacidad cumple funciones esenciales de conectividad territorial. Esta preocupación no es infundada, pero la literatura muestra que puede gestionarse mediante un diseño adecuado del sistema, lo que sugiere que el problema no es intrínsecamente social, sino de diseño y comunicación.

Otro aspecto importante es la diferencia entre usuarios frecuentes y ocasionales, cuestión que influye directamente en la percepción de equidad. Los sistemas basados en distancia suelen ser percibidos como más equitativos, en la medida en que los usuarios pagan en función de su uso real, pero pueden generar mayor resistencia entre usuarios intensivos, como transportistas o *commuters*.

En el caso del turismo, país como Portugal han desarrollado mecanismos específicos, como EasyToll, para facilitar el pago a usuarios no residentes, reduciendo fricciones y mejorando la usabilidad del sistema. España, con un volumen turístico más elevado, no ha desarrollado todavía un modelo comparable a escala estatal, lo que introduce una incertidumbre adicional sobre la operatividad social del sistema y su aceptación por parte de usuarios ocasionales.

La dimensión urbana también resulta relevante. La literatura sobre tasas de congestión y peajes urbanos muestra que la aceptación del pago por uso suele ser mayor en contextos donde el sistema se asocia claramente con la gestión de la congestión y la mejora de la movilidad urbana (Small & Verhoef, 2007). Esto sugiere que la experiencia urbana puede actuar como laboratorio para la aceptación de modelos de pago por uso. En España, sin embargo, el desarrollo de este tipo de esquemas ha sido limitado, lo que reduce la familiaridad social con este tipo de instrumentos y dificulta su extensión a la red interurbana.

Por último, la literatura destaca el papel fundamental de las estrategias de comunicación en la implantación de estos sistemas. En países donde el pago por uso ha sido aceptado, la introducción del sistema ha estado acompañada de campañas de comunicación dirigidas a explicar su finalidad, su funcionamiento y el destino de los ingresos (Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019). Estas estrategias han permitido reducir la incertidumbre, mejorar la comprensión del sistema y mitigar la oposición inicial. En España, por el contrario, la comunicación pública sobre el pago por uso ha sido

intermitente, fragmentada y, en muchos casos, reactiva, lo que ha contribuido a reforzar percepciones negativas y a dificultar la construcción de una narrativa estable.

En conjunto, la comparación social y territorial refuerza las conclusiones extraídas en las dimensiones anteriores. Los países que han avanzado en la implantación del pago por uso no solo han resuelto problemas técnicos o económicos, sino que han sido capaces de construir aceptación social, gestionar impactos territoriales y desarrollar estrategias de comunicación coherentes, integrando el sistema dentro de una narrativa pública más amplia.

España, en cambio, presenta un déficit en estas dimensiones: baja disposición a pagar, fuerte percepción de doble imposición, elevada sensibilidad territorial y ausencia de una estrategia de comunicación consistente. En consecuencia, la no implantación del sistema no puede explicarse únicamente en términos políticos o técnicos, sino también por la falta de legitimación social y territorial, lo que vuelve a confirmar que el problema es multidimensional y que cualquier propuesta futura deberá abordar de forma integrada estas variables.

La revisión de la literatura europea sobre aceptación social y territorial del pago por uso permite extraer una conclusión clara: existen suficientes evidencias empíricas sobre los factores que facilitan la aceptación del sistema en países donde ya ha sido implantado, pero persisten limitaciones significativas en su aplicación a contextos como el español.

En particular, aunque los estudios disponibles identifican variables clave como la disposición a pagar, la percepción de equidad, el uso de ingresos o las estrategias de comunicación como determinantes del éxito del sistema (Santos, 2017; Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019), no explican de forma suficientemente integrada por qué estos factores no han podido articularse en España con la misma eficacia que en otros países europeos.

Desde una perspectiva comparada, la literatura es clara en cuanto a los resultados en contextos exitosos. Países como Suiza, Alemania o Austria han conseguido desarrollar niveles relativamente estables de aceptación social mediante la combinación de varios elementos:

- una narrativa pública coherente que vincula el pago al mantenimiento o mejora del sistema,
- una percepción de equidad basada en el principio de usuario pagador,
- transparencia en el destino de los ingresos, y
- estrategias de comunicación activas y sostenidas en el tiempo (ITF, 2019; Santos, 2017).

Sin embargo, en el caso español, estos mismos factores aparecen fragmentados o insuficientemente desarrollados. La literatura identifica la baja disposición a pagar, la fuerte percepción de doble imposición y la elevada sensibilidad territorial como variables clave, pero no ofrece explicaciones suficientemente robustas sobre cómo podrían transformarse estas percepciones en condiciones aceptables para la implantación del sistema.

En otras palabras, el conocimiento existente describe bien los obstáculos, pero no proporciona modelos aplicables para superarlos en contextos institucionales específicos como España.

Este vacío se refuerza al analizar la dimensión territorial. Aunque los estudios europeos abordan el impacto del pago por uso sobre la equidad territorial y la movilidad rural, existe una clara limitación en la forma en que estos análisis se trasladan a países con estructuras de red y organización territorial complejas (European Commission, 2019). En el caso español, caracterizado por una alta dependencia del transporte por carretera y una notable heterogeneidad territorial, la literatura no ofrece evidencia empírica suficiente sobre cómo diseñar sistemas que eviten efectos regresivos o desequilibrios territoriales, más allá de recomendaciones generales difícilmente aplicables sin un análisis específico.

Asimismo, la cuestión de la aceptación diferencial entre tipos de usuarios, frecuentes frente a ocasionales, nacionales frente a turistas, urbanos frente a rurales, constituye otro ámbito donde la literatura presenta limitaciones. Aunque se reconoce la heterogeneidad de la demanda y la necesidad de adaptar los sistemas a distintos perfiles (Small & Verhoef, 2007; ITF, 2019), no existen estudios suficientemente detallados que analicen cómo estas diferencias podrían gestionarse en el contexto español, especialmente en corredores con alta mezcla de usos como los accesos metropolitanos o los ejes logísticos principales.

De forma similar, el papel de las estrategias de comunicación ha sido ampliamente documentado como factor crítico en la aceptación del pago por uso, pero la evidencia disponible se centra fundamentalmente en países donde el sistema ya ha sido implantado. Existe una carencia evidente de estudios que analicen cómo diseñar e implementar estrategias de comunicación eficaces en contextos donde el pago por uso no ha sido previamente normalizado, como ocurre en España. Este aspecto es especialmente relevante, dado que la percepción pública del sistema constituye una de las principales barreras identificadas en el análisis político institucional.

En consecuencia, la literatura actual presenta un gap significativo que puede formularse en los siguientes términos:

Aunque existe abundante evidencia sobre los factores que explican la aceptación social del pago por uso en contextos donde el sistema ya está implantado, no existe un marco analítico aplicado que permita evaluar cómo dichos factores pueden ser articulados de forma integrada en países como España, caracterizados por alta sensibilidad política, fragmentación territorial y ausencia de experiencia previa generalizada en tarificación por uso.

Este vacío tiene implicaciones directas para el presente trabajo. En particular, sugiere que cualquier análisis de viabilidad del pago por uso en España no puede basarse únicamente en la extrapolación de resultados de otros países, sino que requiere una aproximación metodológica específica que permita evaluar:

- la disposición a pagar en contextos reales de uso,
- la percepción de equidad entre distintos tipos de usuarios,
- el impacto territorial del sistema,
- y la efectividad de distintas estrategias de comunicación y diseño tarifario.

En este sentido, la identificación del gap social refuerza la necesidad de desarrollar enfoques aplicados, como el análisis de corredores concretos, por ejemplo, la A-2, donde sea posible observar de forma empírica cómo interactúan estas variables en el contexto español. Así, la dimensión social no solo explica por qué España no ha avanzado en la implantación del pago por uso al mismo ritmo que otros países, sino que define también el espacio en el que el presente trabajo puede contribuir al conocimiento existente.

Aceptación social, legitimación institucional y dependencia de trayectoria: por qué otros países han avanzado y España no

La aceptación social del pago por uso no depende únicamente de factores económicos, ni puede explicarse exclusivamente a partir del nivel tarifario o del impacto monetario directo sobre el usuario. La literatura comparada muestra que la aceptación de estos sistemas es, sobre todo, el resultado de un proceso acumulativo de legitimación institucional, construcción narrativa y coherencia política, mediante el cual el pago por uso deja de percibirse como una carga aislada y pasa a entenderse como un instrumento funcional dentro de una política pública más amplia (Santos, 2017; Crozet & Mercier, 2016; ITF, 2019).

En este sentido, la diferencia entre países que han avanzado hacia sistemas consolidados de tarificación viaria y el caso español no reside únicamente en la disponibilidad tecnológica o en la racionalidad económica del sistema, sino en la capacidad, o incapacidad, de las instituciones para generar un marco de aceptación social estable en el tiempo.

Desde una perspectiva comparada, Alemania constituye un ejemplo especialmente relevante de cómo la aceptación social puede construirse a partir del diseño secuencial del sistema y de su delimitación inicial a los segmentos de usuarios con mayor legitimidad contributiva. La implantación del LKW Maut se apoyó en una decisión fundamental: concentrar el sistema, en su primera fase, en el transporte pesado, evitando trasladar el coste directamente al conjunto de los ciudadanos y limitando así la exposición social del sistema en su fase inicial (ITF, 2019; Santos, 2017). A ello se añadió una narrativa pública relativamente clara, basada en que los vehículos más intensivos y con mayor impacto sobre la red debían contribuir de forma proporcional a su uso, y en la vinculación de la recaudación con la red federal de transporte.

En otras palabras, Alemania no solo implantó un sistema técnicamente avanzado, sino que lo hizo de forma políticamente graduada y socialmente defendible, minimizando el conflicto con el usuario común y construyendo legitimidad desde el principio. Desde esta lógica, la aceptación del sistema no fue un punto de partida, sino el resultado de una secuencia institucional cuidadosamente diseñada.

El caso de Suiza responde a una lógica diferente, pero igualmente instructiva. Allí, la aceptación social del pago por uso no se apoyó únicamente en criterios de financiación, sino en su integración dentro de una narrativa territorial y ambiental de largo recorrido, vinculada a la protección del espacio alpino, a la gestión del tráfico pesado y a la transferencia modal hacia el ferrocarril (ITF, 2019; Santos, 2017). La LSVA no se presentó simplemente como una tarifa por circular, sino como un instrumento inserto en una estrategia nacional de movilidad y ordenación territorial.

Esta diferencia es crucial desde el punto de vista inferencial, porque demuestra que la aceptación no surge de la mera racionalidad económica del sistema, sino de su

capacidad para conectarse con objetivos percibidos como legítimos y compartidos. En Suiza, el pago por uso se integró en una visión de país y en una política pública reconocible; no se planteó como una medida aislada de recaudación. Ese proceso de legitimación institucional acumulativa es precisamente uno de los elementos que faltan en España.

Portugal, por su parte, ofrece una experiencia distinta pero también muy útil para el análisis comparado. Aunque no ha desarrollado un sistema GNSS nacional equivalente al alemán, sí ha sido capaz de mantener y normalizar el principio de usuario pagador en determinados corredores de alta capacidad mediante sistemas de cobro electrónico sin barreras, y de crear mecanismos operativos específicos para facilitar su uso, incluidos herramientas como EasyToll para usuarios ocasionales o extranjeros.

El elemento social relevante del caso portugués no es solo la tecnología empleada, sino el hecho de que el país no rompió completamente la continuidad entre uso de la red y pago por la red, incluso en contextos de controversia. Es decir, Portugal avanzó en la normalización operativa y social del cobro electrónico, haciendo que el usuario se familiarizara con la idea de que determinadas infraestructuras de alta capacidad pueden ser utilizadas bajo una lógica explícita de pago por uso. Este aspecto contrasta con el caso español, donde la evolución reciente ha ido en dirección contraria.

En España, el problema social del pago por uso debe entenderse a la luz de una dependencia de trayectoria particularmente desfavorable. La aceptación social actual no puede explicarse sin considerar las decisiones políticas adoptadas en los últimos años, especialmente la liberalización de peajes en varias autopistas estatales entre 2018 y 2021, que reforzó la expectativa de gratuidad en la red de alta capacidad y consolidó la percepción de que el acceso a dicha red debía financiarse prioritariamente mediante presupuestos públicos (CNMC, 2021; AIReF, 2022).

Esta secuencia histórica ha tenido un efecto acumulativo sobre la percepción social: cualquier propuesta posterior de pago por uso se enfrenta no solo a una evaluación económica directa, sino a la sensación de reversión de un derecho ya adquirido. En este sentido, el rechazo social español no es simplemente rechazo al precio, sino rechazo a una ruptura de expectativas generada por decisiones públicas recientes.

A esta dependencia de trayectoria se suma una segunda diferencia fundamental respecto a países como Alemania o Suiza: la falta de una narrativa pública coherente y sostenida sobre la finalidad del pago por uso. Mientras que en esos países el sistema fue vinculado a la financiación de infraestructuras, a la eficiencia del transporte o a objetivos territoriales y ambientales de largo alcance, en España el debate ha aparecido de forma más bien episódica, reactiva y fuertemente condicionado por el coste político del momento (AIReF, 2022; Crozet & Mercier, 2016).

Como consecuencia, el pago por uso ha tendido a presentarse, o a percibirse, como una medida puntual, coyuntural o fiscalista, y no como parte de una política integral de infraestructuras. Esta ausencia de relato estable impide la acumulación de legitimidad institucional que sí se observa en otros países.

El tercer elemento explicativo del caso español es el timing político. La literatura sobre aceptabilidad del RUC subraya que estos sistemas son especialmente sensibles al contexto político en el que se introducen: si aparecen en momentos de tensión presupuestaria, de negociación con instituciones europeas o en etapas próximas a

ciclos electorales, tienden a ser interpretados como medidas impuestas o coyunturales, y no como decisiones estratégicas de largo plazo (Santos, 2017; ITF, 2019). En España, el debate sobre el pago por uso ha estado fuertemente condicionado por este tipo de ventanas políticas, lo que ha impedido construir una aceptación gradual y acumulativa. A diferencia de Alemania, donde la implantación del sistema para pesados evitó el impacto directo inicial sobre el usuario medio, o de Suiza, donde el sistema se insertó en una política territorial estructural, en España el pago por uso ha emergido en el debate público sin una secuencia de introducción progresiva ni un proceso de normalización institucional.

Por tanto, la comparación europea permite formular una conclusión clara: la aceptación social del pago por uso se construye, no se presupone. Los países que han avanzado en esta materia no solo tenían mejores condiciones técnicas o económicas, sino que hicieron cosas concretas que España no ha hecho. Alemania introdujo inicialmente el sistema sobre el transporte pesado, limitando su coste político directo y vinculando la recaudación a la red federal; Suiza lo integró en una narrativa territorial y ambiental de largo alcance; Portugal mantuvo el principio de usuario pagador y desarrolló canales operativos que normalizaron el cobro electrónico.

España, por el contrario, ha combinado tres factores que dificultan estructuralmente esa aceptación: decisiones pasadas de liberalización que refuerzan expectativas de gratuidad, ausencia de una narrativa pública coherente sobre la finalidad del sistema y un uso políticamente reactivo del debate, condicionado por el timing electoral. En consecuencia, la no implantación del pago por uso en España no puede explicarse solo por rechazo económico, sino por la ausencia de un proceso acumulativo de legitimación institucional y social similar al que sí se ha producido, con distintos matices, en otros países europeos.

La evidencia comparada permite identificar que la aceptación social del pago por uso no es un punto de partida, sino el resultado de un proceso secuencial acumulativo que combina diseño institucional, estrategia política y adaptación social. Este proceso puede estructurarse en varias etapas interrelacionadas.

En primer lugar, los países que han logrado implantar sistemas de pago por uso han optado por una introducción gradual del sistema, normalmente limitada en sus fases iniciales a segmentos con mayor legitimidad contributiva, como el transporte pesado. Este diseño reduce el coste político inicial y evita una reacción social directa de los usuarios particulares, permitiendo construir aceptación progresiva sin generar rechazo inmediato (Santos, 2017; ITF, 2019).

En segundo lugar, el sistema se acompaña de una narrativa pública coherente, en la que el pago se vincula a objetivos claramente identificables, como el mantenimiento de la red, la mejora del sistema de transporte o la sostenibilidad ambiental. Esta narrativa permite transformar el pago en una contribución funcional, reduciendo la percepción de carga fiscal adicional.

En tercer lugar, la aceptación se refuerza mediante la visibilidad del destino de los ingresos, elemento que la literatura identifica como uno de los factores más determinantes en la percepción social del sistema (Crozet & Mercier, 2016). Cuando los usuarios perciben que los recursos se reinvierten en infraestructuras o servicios, la legitimidad del sistema aumenta de forma significativa. A continuación, la combinación de estos elementos permite una normalización progresiva del pago por

uso, en la que el sistema deja de percibirse como una medida excepcional y pasa a integrarse en el comportamiento habitual de los usuarios. Este proceso se ve reforzado por el uso continuado, la reducción de incertidumbre y la adaptación de los distintos perfiles de usuario.

Finalmente, este proceso se sostiene mediante una continuidad política y regulatoria, que evita cambios bruscos en la política de tarificación y consolida la percepción de estabilidad del sistema. La literatura muestra que la interrupción de este proceso, por ejemplo, mediante cambios de política o eliminación de peajes, puede revertir parcial o totalmente la aceptación acumulada, generando nuevas resistencias (ITF, 2019).

Desde esta perspectiva, la diferencia entre países como Alemania, Suiza o Portugal y el caso español no se explica por la disposición inicial de los ciudadanos a pagar, sino por la ausencia de este proceso acumulativo de construcción de aceptación. España no ha desarrollado una introducción gradual, carece de una narrativa estable, no ha consolidado la vinculación entre ingresos y beneficios visibles y ha seguido una trayectoria reciente que refuerza expectativas de gratuidad. En consecuencia, el rechazo social actual no es un fenómeno aislado, sino el resultado de la inexistencia de un proceso estructurado de legitimación.

En conjunto, la evidencia comparada permite concluir que la aceptación social del pago por uso no es una condición previa a su implantación, sino un resultado institucional que se construye de forma progresiva mediante la combinación de diseño gradual, coherencia política, narrativa pública y visibilidad de los beneficios asociados al sistema (Santos, 2017; ITF, 2019). Los países que han avanzado en esta materia no partían necesariamente de una mayor disposición a pagar, sino que lograron generarla a través de decisiones concretas: introducción inicial sobre el transporte pesado, vinculación explícita de los ingresos a la red de infraestructuras, estrategias de comunicación sostenidas y continuidad regulatoria.

España, por el contrario, no ha desarrollado este proceso acumulativo, sino que ha seguido una trayectoria inversa caracterizada por la liberalización de peajes, la ausencia de un relato público coherente y un tratamiento políticamente reactivo del pago por uso. Como resultado, la percepción social dominante se ha configurado en torno a la idea de doble imposición y pérdida de derechos adquiridos, dificultando cualquier avance en esta materia.

Esta diferencia pone de manifiesto que el problema de aceptación en España no es simplemente económico ni cultural, sino estructural: no se ha construido el proceso institucional necesario para que el pago por uso sea percibido como legítimo, funcional y equitativo, lo que refuerza la necesidad de enfoques aplicados, como el análisis por corredores, que permitan explorar vías realistas de transición hacia modelos de tarificación basados en el uso.

La evidencia comparada sugiere que la aceptación social del pago por uso no puede analizarse únicamente en términos agregados, sino que depende de una segmentación diferenciada de los usuarios, cuya percepción del sistema varía en función de su perfil económico, territorial y de uso de la infraestructura (Small & Verhoef, 2007; ITF, 2019). En los países donde el sistema ha sido implantado con éxito, esta diferenciación ha sido explícitamente considerada en el diseño del modelo.

En particular, resulta esencial distinguir entre transporte profesional y usuario particular. En contextos como Alemania, la introducción inicial del sistema sobre el

transporte pesado permitió concentrar el impacto en un segmento con mayor capacidad de internalización de costes y mayor legitimidad contributiva, evitando así un rechazo inmediato por parte de la ciudadanía. Este enfoque contrasta con el contexto español, donde el debate sobre el pago por uso se ha planteado frecuentemente en términos generalistas, sin una diferenciación clara entre tipos de usuario, lo que amplifica el rechazo social al percibirse como una medida indiscriminada.

Asimismo, la literatura subraya la importancia de la diferenciación entre movilidad urbana e interurbana. Los sistemas de pago por uso suelen encontrar mayor aceptación en contextos urbanos, donde se asocian a la gestión de la congestión y a mejoras directas en la movilidad, mientras que generan mayor resistencia en ámbitos interurbanos o rurales, donde el transporte por carretera es percibido como esencial y difícilmente sustituible (Santos, 2017).

En países con sistemas consolidados, esta diferencia se gestiona mediante diseños tarifarios adaptados y una introducción progresiva en los contextos menos conflictivos. En España, por el contrario, la elevada dependencia del transporte interurbano y la falta de diferenciación en el discurso político han reforzado la percepción del sistema como regresivo y territorialmente desequilibrado.

De igual modo, la distinción entre empresas y particulares, así como entre usuarios frecuentes y ocasionales, introduce dinámicas adicionales de aceptación. Los operadores profesionales, especialmente en contextos internacionales, tienden a aceptar el sistema como parte de la estructura de costes del sector, siempre que exista previsibilidad y claridad en su aplicación. Por el contrario, los usuarios particulares, especialmente aquellos que utilizan la red de forma ocasional, como turistas o desplazamientos esporádicos, muestran mayor sensibilidad a la introducción de tarifas directas si estas no están claramente justificadas o si el sistema no es fácilmente utilizable.

Países como Portugal han abordado este problema mediante soluciones operativas específicas, como sistemas de pago simplificado para turistas, que reducen la fricción y mejoran la aceptación. En España, esta diferenciación operativa no ha sido desarrollada a escala estatal, lo que introduce incertidumbre adicional sobre el diseño del sistema.

En conjunto, estas diferencias permiten reforzar una conclusión central del análisis social: la aceptación del pago por uso no depende únicamente de la valoración global del sistema, sino de cómo este afecta de manera diferenciada a distintos grupos de usuarios. Los países que han avanzado en su implantación han reconocido esta heterogeneidad y han adaptado tanto el diseño del sistema como su estrategia de implementación en consecuencia. España, por el contrario, no ha incorporado de forma sistemática esta diferenciación en el debate ni en el diseño de posibles modelos, lo que contribuye a una percepción más homogénea y, en general, más negativa del sistema.

Desde una perspectiva inferencial, esta evidencia refuerza una conclusión crítica para el presente trabajo: la implantación directa de un modelo de pago por uso en España, sin una transición progresiva y sin adaptación a los distintos perfiles de usuario, resultaría altamente problemática desde el punto de vista social. La literatura sugiere que los sistemas exitosos se han construido mediante procesos graduales de

introducción, segmentación de usuarios y construcción de legitimidad acumulativa, y no mediante implantaciones abruptas o generalizadas (ITF, 2019; Crozet & Mercier, 2016). En consecuencia, puede afirmarse que:

España no puede implantar directamente un modelo europeo de pago por uso sin un proceso previo de transición y legitimación social, ya que la evidencia indica que dicha implantación generaría elevados niveles de rechazo, especialmente en ausencia de diferenciación por tipo de usuario y de una narrativa pública coherente.

Finalmente, esta dimensión no puede entenderse de forma aislada. La falta de aceptación social observada en España es, en gran medida, consecuencia de los factores políticos y económicos previamente identificados: la ausencia de una hoja de ruta estable, la falta de claridad en el uso de los ingresos, la discontinuidad regulatoria y la percepción de costes adicionales sin beneficios visibles. Por tanto, la dimensión social debe interpretarse como el resultado de estas condiciones estructurales y no como un obstáculo independiente.

En este sentido, la evidencia confirma que el problema no radica en una predisposición intrínsecamente negativa de la sociedad española hacia el pago por uso, sino en la ausencia de un proceso institucional, económico y comunicativo que permita construir dicha aceptación.

En el contexto europeo, existe evidencia extensa basada en países donde el sistema ya está implantado, como Alemania, Suiza o Austria. Estos estudios analizan cómo la aceptación social se construye a lo largo del tiempo, mediante procesos de legitimación institucional, comunicación pública y adaptación progresiva de los usuarios al sistema. Asimismo, abordan cuestiones como:

- la equidad territorial,
- el impacto sobre distintos tipos de usuarios,
- la diferenciación entre transporte profesional y particular,
- y la percepción de justicia distributiva del sistema.

En el caso español, sin embargo, la literatura presenta un grado de desarrollo más limitado y con un enfoque diferente. Existen contribuciones relevantes en forma de informes institucionales (CNMC, AIReF) y algunos trabajos académicos que abordan aspectos como:

- la percepción pública del pago por uso,
- la resistencia social a nuevos pagos, La literatura describe el rechazo, pero no explica cómo transformarlo en aceptación.
- la preocupación por la equidad territorial.

Tabla 5 Comparación social y territorial: Europa vs España.

Fuente: elaboración propia.

Variable	Países europeos (Alemania, Suiza, etc.)	España	Diferencia clave
Aceptación social	Construida progresivamente	Rechazo estructural	Falta proceso de legitimación
Disposición a pagar	Endógena al sistema	Baja y estática	Falta modelo de adaptación
Equidad territorial	Diseñada e integrada	Percibida como problema	Falta diseño de compensación
Doble imposición	Mitigada mediante narrativa e ingresos	Elevada percepción	Falta legitimación económica
Segmentación de usuarios	Diferenciada (pesados, turistas, etc.)	No desarrollada	Falta diseño adaptado
Turismo	Integrado operativamente	No considerado	Falta diseño accesible
Comunicación	Estratégica y sostenida	Reactiva o inexistente	Falta narrativa pública
Movilidad urbana vs rural	Diferenciada	Tratamiento homogéneo	Falta análisis espacial

3.6 Dimensión ambiental

La dimensión ambiental del Road User Charging (RUC) se ha consolidado en el contexto europeo como uno de los principales marcos justificativos para el desarrollo de sistemas de tarificación viaria, en línea con las políticas de descarbonización del transporte y con el principio de internalización de externalidades (European Commission, 2019; ITF, 2019). Sin embargo, el análisis inferencial de la literatura revela que, aunque los beneficios ambientales del pago por uso están ampliamente documentados, su papel en la implantación efectiva de estos sistemas ha sido secundario y condicionado por la existencia de estructuras previas de carácter político, económico y operativo.

En este sentido, el caso español presenta una divergencia significativa respecto a los países europeos que han avanzado en esta materia. Mientras que en estos últimos la dimensión ambiental se ha integrado progresivamente como elemento de mejora y legitimación de sistemas ya operativos, en España permanece en un plano fundamentalmente declarativo, sin traducción en mecanismos efectivos de tarificación.

Emisiones de CO_2 y señal ambiental operativa

La literatura europea ha demostrado que el RUC permite introducir señales económicas que incentivan la reducción de emisiones de CO_2, especialmente mediante la diferenciación tarifaria en función del impacto ambiental del vehículo (European Commission, 2019). En países como Alemania, Austria y Suiza, estos mecanismos se han incorporado progresivamente a sistemas ya implantados, permitiendo influir en decisiones de renovación de flotas y eficiencia en el transporte de mercancías (Odeck & Bråthen, 2022).

No obstante, este patrón revela una limitación clave: la dimensión ambiental no ha actuado como motor de implantación, sino como evolución de sistemas previamente consolidados. En España, aunque el conocimiento normativo y técnico sobre estas herramientas es sólido, la ausencia de un sistema operativo impide su aplicación efectiva. En consecuencia, la literatura no ofrece modelos que permitan trasladar estos principios al contexto español desde una situación sin experiencia previa.

Uno de los resultados más relevantes observados en los sistemas europeos es la reducción de emisiones asociada al transporte por carretera, especialmente en el transporte de mercancías. En Alemania, el sistema LKW-Maut constituye un ejemplo relevante. Desde su implantación en 2005, el sistema ha evolucionado incorporando progresivamente criterios de emisiones en la estructura tarifaria, diferenciando los costes en función de la clase ambiental del vehículo y, más recientemente, integrando componentes específicos de CO_2 (German Federal Ministry of Transport, 2018; ITF, 2019). Esta decisión ha tenido efectos medibles en la renovación de flotas, acelerando la adopción de vehículos más eficientes y reduciendo la intensidad de emisiones del transporte pesado.

De forma análoga, en Austria y Suiza, los sistemas de tarificación han incorporado desde etapas relativamente tempranas componentes ambientales en el diseño tarifario. En el caso suizo, la LSVA combina variables de peso, distancia y emisiones, contribuyendo no solo a la reducción directa de emisiones, sino también a la reconfiguración del sistema logístico, favoreciendo el uso del ferrocarril en corredores con alta sensibilidad ambiental (European Commission, 2019).

Portugal, aunque con un modelo distinto, también ha conseguido avances indirectos en términos ambientales mediante la implantación de sistemas free-flow en determinadas autopistas, que eliminan puntos de parada y reducen las emisiones asociadas a la operación del peaje. Aunque el componente ambiental no es el eje central del sistema

portugués, el diseño operativo ha permitido mejoras en la eficiencia energética del tráfico.

En contraste, en España no se ha implementado ningún sistema que permita introducir señales económicas diferenciadas en función del impacto ambiental del vehículo. Aunque el marco normativo europeo aplicable es el mismo, la ausencia de un sistema operativo implica que los incentivos que sí existen en países como Alemania o Austria no se trasladan al comportamiento de los usuarios españoles.

Otro efecto ambiental relevante del RUC es la mejora de la eficiencia del sistema de transporte. En países como Alemania, República Checa o Polonia, la introducción de tarificación sobre el transporte pesado ha inducido cambios en la gestión logística:

- optimización de rutas,
- reducción de kilómetros en vacío,
- mejor planificación del transporte de mercancías (Odeck & Bråthen, 2022).

Estos cambios no solo tienen impacto económico, sino también ambiental, al reducir el consumo de combustible y las emisiones asociadas. Aunque la congestión no ha sido el objetivo principal de estos sistemas, sí se han producido mejoras indirectas en la eficiencia del tráfico.

Portugal ofrece un ejemplo adicional en este ámbito, ya que la transición hacia sistemas free-flow ha eliminado las congestiones en plazas de peaje, reduciendo emisiones localizadas y mejorando la fluidez del tráfico.

En España, estos efectos no se han producido, ya que el sistema de transporte carece de señales económicas que incentiven la reducción de uso innecesario de la red. La planificación logística se basa en decisiones privadas y no en incentivos derivados de la política pública.

La transición hacia el vehículo eléctrico constituye un elemento central en las políticas de transporte europeas. En este contexto, el RUC se ha posicionado como un instrumento clave para garantizar la sostenibilidad del sistema de financiación ante la disminución de ingresos procedentes de los carburantes (European Commission, 2019).

En Alemania, esta integración es explícita: el sistema de tarificación permite mantener el principio de usuario-pagador independientemente del tipo de propulsión del vehículo. Austria sigue una lógica similar, adaptando progresivamente el sistema a los cambios tecnológicos del parque móvil.

Portugal también ha comenzado a transitar en esta dirección, manteniendo la lógica de pago por uso independientemente del tipo de vehículo, lo que facilita la adaptación a la electrificación sin necesidad de rediseñar el sistema desde cero.

En España, sin embargo, la electrificación del parque móvil se está desarrollando sin una adaptación equivalente del modelo de financiación de infraestructuras. Esta desconexión refleja una limitación importante de la literatura: no explica cómo coordinar la transición energética con la implantación del RUC en contextos donde este aún no existe.

Desde el punto de vista tecnológico, los sistemas basados en GNSS han permitido en varios países europeos mejorar el rendimiento ambiental del RUC. Al eliminar barreras físicas y puntos de parada, estos sistemas reducen significativamente las emisiones asociadas a aceleración y deceleración en zonas de peaje (Odeck & Bråthen, 2022).

Alemania es nuevamente un caso representativo, donde el sistema GNSS aplicado al transporte pesado permite una tarificación continua sobre la red, evitando

concentraciones de tráfico. Portugal, mediante sistemas free-flow, ha conseguido efectos similares en sus autopistas.

En España, aunque la tecnología GNSS está disponible y el desarrollo de sistemas ITS es elevado, esta capacidad no se ha traducido en aplicaciones concretas. La literatura tecnológica existente no desarrolla cómo estos beneficios podrían ser utilizados como elemento de legitimación del sistema.

Tabla 6 Comparación ambiental: Europa vs España.

Fuente: elaboración propia.

Variable	Países europeos (Alemania, Suiza, Austria)	España	Diferencia clave
Reducción CO_2	Aplicación efectiva mediante tarificación	Principios normativos sin aplicación	Falta sistema operativo
Congestión	Integrada parcialmente en eficiencia	No considerada en RUC	Falta enfoque aplicado
Vehículo eléctrico	Integrado en financiación viaria	Desconectado del RUC	Falta coherencia
GNSS ambiental	Mejora operativa y ambiental	No utilizado en debate	Falta legitimación
Infraestructuras verdes	Vinculación parcial	No desarrollada	Falta integración
Externalidades	Variables de diseño	Barreras políticas	Falta análisis técnico

El análisis realizado permite concluir que la dimensión ambiental presenta una limitación estructural en la literatura sobre pago por uso. A pesar de constituir uno de los principales argumentos normativos para su desarrollo, no actúa como factor desencadenante de la implantación, sino como elemento de mejora en sistemas previamente establecidos.

En el caso español, esta limitación se traduce en una desconexión entre los objetivos ambientales y las herramientas disponibles para alcanzarlos. La literatura explica con claridad los beneficios potenciales del RUC en términos de sostenibilidad, pero no proporciona modelos que permitan incorporar esta dimensión en el diseño e implementación del sistema en contextos sin experiencia previa.

En consecuencia, el gap identificado en esta dimensión no es ambiental en sentido estricto, sino de aplicación: la literatura no explica cómo utilizar los objetivos ambientales como punto de partida para implantar el pago por uso en España.

3.7 Limitación en la literatura y preguntas de investigación

El análisis del estado del arte desarrollado en los apartados anteriores ha permitido identificar limitaciones relevantes en la literatura académica y técnica existente sobre los sistemas de pago por uso y, en particular, sobre la implantación de sistemas de tarificación viaria basados en tecnología GNSS. Si bien existe una amplia producción científica sobre tecnologías específicas de telepeaje, experiencias nacionales aisladas y aspectos parciales como la interoperabilidad o la aceptación social, no se ha abordado de forma integrada el caso español, ni se ha analizado en profundidad la ausencia de un sistema generalizado de pago por uso en su red de autovías.

Asimismo, la literatura revisada muestra una escasez de trabajos que combinen el análisis institucional, económico, tecnológico y social para explicar por qué determinados países europeos han implantado sistemas GNSS a escala nacional, mientras que otros, como España, han mantenido un modelo mayoritariamente financiado mediante presupuestos públicos. Del mismo modo, se detecta una falta de estudios aplicados orientados a estimar los costes reales de implantación de estos sistemas en corredores concretos de la red viaria española, así como un conocimiento limitado sobre la disposición a pagar de los usuarios por el uso de infraestructuras actualmente gratuitas.

A partir de estas carencias identificadas, el presente Trabajo Fin de Máster plantea las siguientes preguntas de investigación, que estructuran el análisis posterior y orientan el diseño metodológico.

Pregunta de investigación 1 (PI-1)

¿Cuáles son los factores económicos, institucionales, regulatorios, tecnológicos y sociales que explican que España no haya implantado un sistema de pago por uso basado en tecnología GNSS en su red de autovías, a diferencia de otros países europeos?

Esta pregunta tiene un carácter explicativo y pretende analizar el problema desde una perspectiva multidimensional, integrando los elementos identificados en el estado del arte y superando enfoques puramente tecnológicos o normativos.

Pregunta de investigación 2 (PI-2)

¿Cuál sería el coste aproximado de implantar un sistema de pago por uso basado en GNSS mediante un proyecto piloto en un corredor específico de la red de carreteras española?

Esta cuestión se orienta a la dimensión aplicada del trabajo y busca estimar órdenes de magnitud realistas de costes de implantación y operación, tomando como referencia experiencias internacionales y adaptándolas al contexto español.

Pregunta de investigación 3 (PI-3)

¿Cuál es la disposición a pagar de los usuarios españoles por el uso de autovías actualmente gratuitas, y cómo influye esta disposición en la viabilidad social de un sistema de pago por uso?

Esta pregunta aborda explícitamente la dimensión social del pago por uso, identificada en la literatura como uno de los principales factores críticos para la implantación de

sistemas de tarificación viaria. Su análisis permite evaluar la aceptabilidad potencial del sistema desde la perspectiva del usuario final.

Pregunta de investigación 4 (PI-4)

¿Qué grado de madurez tecnológica e institucional presentan las administraciones públicas españolas para operar un sistema de pago por uso basado en GNSS que sea interoperable a escala europea?

Esta pregunta se centra en la capacidad operativa del sector público, considerando aspectos como la gestión tecnológica, la interoperabilidad, el *enforcement* y la coordinación con los marcos normativos europeos.

3.8 Análisis DAFO del modelo de pago por uso basado en GNSS en España

Con el fin de sintetizar de manera estructurada los factores internos y externos que condicionan la implantación de un sistema de pago por uso basado en tecnología GNSS en la red de autovías españolas, se desarrolla en este apartado un análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades). Esta herramienta, ampliamente utilizada en estudios de política pública y planificación estratégica, permite integrar los resultados del estado del arte y del análisis PESTEL en un marco analítico único, facilitando la identificación de patrones estructurales y líneas de actuación.

A diferencia del análisis PESTEL, centrado en factores exógenos del entorno, el DAFO incorpora una dimensión interna del sistema analizado, permitiendo evaluar tanto las capacidades y limitaciones del modelo español como las oportunidades y riesgos derivados del contexto europeo y tecnológico actual.

Fortalezas

Una de las principales fortalezas para la implantación de un sistema GNSS de pago por uso en España reside en la existencia de una red viaria de alta capacidad extensa, continua y homogénea, especialmente en el ámbito estatal. Esta característica facilita la aplicación de sistemas de tarificación por distancia recorrida, al reducir la complejidad operativa asociada a redes fragmentadas o con múltiples estándares técnicos.

Asimismo, España cuenta con una experiencia técnica y empresarial consolidada en el ámbito de la gestión de infraestructuras y de los sistemas inteligentes de transporte. Empresas españolas han participado activamente en el diseño, implantación y operación de sistemas de peaje electrónico y soluciones ITS tanto a nivel nacional como internacional, lo que reduce los riesgos tecnológicos asociados a la implantación de un sistema GNSS a escala estatal.

Desde el punto de vista normativo, España se encuentra formalmente alineada con el marco regulatorio europeo, en particular con la Directiva Euroviñeta y su última revisión mediante la Directiva (UE) 2022/362. Este alineamiento proporciona una base jurídica suficiente para la implantación de sistemas de tarificación por uso, al menos para vehículos pesados, sin necesidad de modificaciones estructurales del marco comunitario.

Finalmente, la creciente evidencia empírica procedente de otros países europeos constituye una fortaleza indirecta, al permitir a España beneficiarse de experiencias consolidadas y lecciones aprendidas, especialmente en lo relativo a diseño tarifario, enforcement y gestión de la aceptación social (Santos, 2017; Odeck & Bråthen, 2012).

Debilidades

La principal debilidad del modelo español reside en la ausencia de una estrategia nacional clara y sostenida en el tiempo en materia de financiación viaria mediante pago por uso. A diferencia de otros países europeos, España no ha definido una hoja de ruta institucional vinculante que articule objetivos, fases de implantación y mecanismos de compensación, más allá de documentos técnicos sin carácter normativo, como la Hoja de Ruta elaborada por la Asociación Española de la Carretera en 2012.

Otra debilidad estructural es la fuerte resistencia social al pago directo por el uso de las carreteras, asociada a la percepción de doble imposición fiscal. Esta percepción se ve reforzada por la elevada fiscalidad existente sobre el transporte por carretera y por la liberalización reciente de peajes en corredores estratégicos, que ha consolidado una expectativa de gratuidad en el uso de las autovías.

Desde el punto de vista institucional, la fragmentación competencial entre el Estado, las comunidades autónomas y las diputaciones forales dificulta la implantación de un sistema homogéneo y coordinado. La falta de un ente gestor único para la tarificación viaria incrementa la complejidad administrativa y reduce la eficiencia potencial del sistema.

Finalmente, existe una debilidad relevante en términos de evidencia académica aplicada al caso español. La escasez de estudios empíricos específicos limita la capacidad de justificar decisiones de política pública basadas en análisis rigurosos, lo que refuerza la inercia del modelo actual.

Oportunidades

El contexto europeo actual ofrece oportunidades significativas para la implantación de sistemas de pago por uso basados en GNSS. La reforma de la Directiva Euroviñeta y su orientación hacia la tarificación por distancia y por emisiones de CO_2 refuerzan el papel del pago por uso como instrumento de política pública, no solo en términos de financiación, sino también de sostenibilidad ambiental (European Commission, 2022).

Asimismo, la transición hacia modelos de movilidad más sostenibles y la necesidad de financiar la conservación de infraestructuras en un contexto de restricciones presupuestarias crean una ventana de oportunidad para replantear el modelo español de financiación viaria. El pago por uso permite generar ingresos finalistas, reducir la dependencia de los presupuestos generales y mejorar la transparencia en la asignación de recursos.

Desde una perspectiva tecnológica, la madurez de los sistemas GNSS y su interoperabilidad a nivel europeo facilitan la implantación progresiva del sistema, comenzando por pilotos en corredores específicos y por segmentos de usuarios concretos, como el transporte pesado. Esta estrategia incremental puede reducir riesgos y mejorar la aceptación social.

Finalmente, la aplicación de un piloto GNSS en un corredor concreto, como la A-2, ofrece la oportunidad de generar evidencia empírica propia, adaptada al contexto español, que permita informar futuras decisiones de política pública y cerrar el gap identificado en la literatura.

Amenazas

Entre las principales amenazas destaca el riesgo de rechazo social y político, especialmente si la implantación del sistema se percibe como una medida meramente recaudatoria. La literatura muestra que la aceptación social del pago por uso depende en gran medida de la percepción de equidad y del uso finalista de los ingresos; la ausencia de una estrategia de comunicación adecuada podría comprometer la viabilidad del sistema (Schade & Schlag, 2003).

Otra amenaza relevante es la posible desviación de tráfico hacia redes secundarias, especialmente en escenarios de implantación parcial o mal coordinada. Este fenómeno puede generar impactos negativos en términos de seguridad vial, congestión y deterioro de infraestructuras no preparadas para absorber incrementos significativos de tráfico, tal y como ya advertía la Hoja de Ruta de la Asociación Española de la Carretera (2012).

Desde el punto de vista legal, la complejidad asociada a la protección de datos personales y a los mecanismos de *enforcement* constituye una amenaza potencial si no se aborda de forma adecuada. Un diseño deficiente en estos ámbitos podría generar conflictos jurídicos y erosionar la confianza de los usuarios.

Por último, la inestabilidad política y los cambios de ciclo electoral representan una amenaza estructural para la implantación de un sistema que requiere un horizonte temporal de medio y largo plazo. La falta de continuidad en las políticas públicas puede dar lugar a proyectos piloto inconclusos o a sistemas infrautilizados.

El análisis DAFO pone de manifiesto que la implantación de un sistema GNSS de pago por uso en España no está limitada por factores técnicos, sino condicionada principalmente por debilidades internas y amenazas externas de carácter político, social e institucional. Al mismo tiempo, existen fortalezas estructurales y oportunidades claras que justifican la exploración de enfoques incrementales y basados en evidencia empírica.

La Tabla 7 presenta un resumen del análisis DAFO permitiendo resumir los principales factores internos y externos que condicionan la implantación de un sistema de pago por uso basado en tecnología GNSS en la red de autovías españolas.

El análisis pone de manifiesto que las limitaciones para la implantación del sistema no son fundamentalmente de carácter técnico, sino que se concentran en debilidades internas y amenazas externas de naturaleza institucional, social y política. Al mismo tiempo, la existencia de fortalezas estructurales y oportunidades claras, especialmente en el ámbito europeo y tecnológico, justifica la adopción de enfoques incrementales basados en proyectos piloto y en la generación de evidencia empírica específica, lo que conecta directamente con la metodología aplicada desarrollada en los capítulos posteriores.

Tabla 7. Resumen del análisis DAFO.

Fuente: Elaboración propia

Fortalezas	Debilidades
• Existencia de una red estatal de alta capacidad extensa, continua y homogénea, que facilita la tarificación por distancia. • Experiencia técnica y empresarial consolidada en gestión de infraestructuras y sistemas inteligentes de transporte, con participación de empresas españolas en proyectos nacionales e internacionales. • Alineamiento formal del marco normativo español con la Directiva Euroviñeta y su revisión mediante la Directiva (UE) 2022/362. • Disponibilidad de evidencia empírica y experiencias consolidadas en otros países europeos que permiten extraer lecciones aprendidas en diseño tarifario, *enforcement* y aceptación social.	• Ausencia de una estrategia nacional clara, vinculante y sostenida en el tiempo para la financiación viaria mediante pago por uso. • Fuerte resistencia social al pago directo por el uso de las carreteras, asociada a la percepción de doble imposición fiscal. • Fragmentación competencial entre distintos niveles administrativos, que dificulta la implantación de un sistema homogéneo y coordinado. • Escasez de estudios académicos empíricos aplicados específicamente al caso español.
Oportunidades	**Amenazas**
• Impulso normativo europeo hacia la tarificación por distancia y por emisiones, reforzado por la reforma de la Directiva Euroviñeta. • Necesidad estructural de nuevas fuentes de financiación para la conservación de infraestructuras en un contexto de restricciones presupuestarias. • Madurez tecnológica de los sistemas GNSS y posibilidad de implantación progresiva mediante proyectos piloto. • Oportunidad de generar evidencia empírica propia mediante la aplicación de un piloto GNSS en un corredor concreto, cerrando el gap identificado en la literatura.	• Riesgo de rechazo social y político si el sistema se percibe como una medida meramente recaudatoria y no finalista. • Posible desviación de tráfico hacia redes secundarias en escenarios de implantación parcial o mal coordinada. • Complejidad jurídica asociada a la protección de datos personales y a los mecanismos de *enforcement*. • Inestabilidad política y cambios de ciclo electoral que dificultan la continuidad de políticas públicas a medio y largo plazo.

4. Metodología de investigación

Toda elección metodológica en investigación aplicada debe responder a las preguntas que el propio análisis ha ido perfilando, y no imponerse desde fuera como una formalidad de estructura. En el presente Trabajo Fin de Máster, el estado del arte no solo ha acumulado evidencia sobre sistemas de pago por uso en Europa, sino que ha producido un diagnóstico con implicaciones metodológicas directas y precisas. Es desde ese diagnóstico desde donde debe arrancar el diseño de la investigación.

El análisis comparado de las dimensiones política, económica, social, tecnológica, ambiental y legal ha puesto de manifiesto que la no implantación de un sistema generalizado de pago por uso en España no responde a una única causa, sino a la confluencia de factores heterogéneos que operan en planos distintos, pero mutuamente condicionados. Así, la debilidad regulatoria coexiste con la fragmentación competencial; la ausencia de un operador especializado refuerza la incapacidad para sostener la política frente a los ciclos electorales; y la percepción social de doble imposición se alimenta precisamente de la falta de una narrativa pública coherente sobre el destino de los ingresos (ITF, 2019; Santos, 2017; AIReF, 2022). Esta naturaleza estructuralmente compleja del problema determina, por sí misma, que ninguna aproximación metodológica de carácter unidimensional sea suficiente.

Un análisis puramente económico podría estimar con cierta precisión el potencial recaudatorio de un sistema de tarificación, pero no explicaría por qué países con necesidades similares han tomado decisiones radicalmente distintas. Un análisis exclusivamente político dejaría sin respuesta la pregunta sobre la viabilidad técnica y financiera del sistema. La evidencia comparada es inequívoca al respecto: los países que han consolidado sistemas avanzados de pago por uso no lo han logrado gracias a una única condición favorable, sino gracias a la alineación progresiva de varias condiciones en distintas dimensiones (Odeck y Bråthen, 2022; European Commission, 2019).

De lo anterior se deriva la elección de un enfoque metodológico mixto, secuencial e integrado, que combina tres componentes articulados entre sí. El primero es un análisis comparado de carácter inferencial, cuya base conceptual ha sido ya desarrollada en el estado del arte y que la metodología operacionaliza en términos de criterios, instrumentos y procedimientos de evaluación.

El segundo es una evaluación multicriterio de las tecnologías disponibles para el cobro electrónico de peajes, que permite justificar la selección del GNSS como referencia tecnológica para el piloto, no como una hipótesis previa, sino como una conclusión derivada del análisis. El tercero es un análisis de viabilidad técnica y económico-financiera aplicado al corredor A-2, que traduce el marco teórico y comparado en una evaluación concreta, preliminar y replicable.

Estos tres componentes no son etapas independientes, sino fases de un mismo proceso analítico. El análisis comparado proporciona los factores explicativos y los criterios de evaluación que alimentan la evaluación multicriterio tecnológica. Esta, a su vez, fundamenta la selección de la referencia tecnológica sobre la que se construye el análisis de viabilidad del corredor. Y los resultados de ese análisis permiten, en las conclusiones, retornar al marco comparado para valorar en qué medida el caso español presenta condiciones similares o distintas a las de los países que han

avanzado con éxito. Se trata, en suma, de una arquitectura metodológica circular y acumulativa, en la que cada fase produce insumos para la siguiente.

4.1 Diseño general de la investigación: fases y articulación

El diseño de la investigación se organiza en cuatro fases sucesivas, cuya articulación se sintetiza en la Tabla 8, que se propone al final de este apartado como esquema de referencia para el lector.

La **primera fase**, ya ejecutada, comprende la revisión sistemática de la literatura académica y técnica y la construcción del estado del arte. Su objetivo ha sido doble: por un lado, identificar el conocimiento disponible sobre sistemas de pago por uso en Europa, sus dimensiones explicativas y sus patrones de adopción; por otro, diagnosticar el gap de investigación que justifica el presente trabajo, esto es, la ausencia de estudios aplicados que traduzcan ese conocimiento comparado a un marco de viabilidad concreto para el caso español. El estado del arte no solo ha aportado contenido sustantivo, sino que ha establecido las preguntas que la metodología debe responder y los criterios que deben guiar la evaluación.

La **segunda fase** consiste en la evaluación multicriterio de las tecnologías de cobro electrónico disponibles. A partir de los criterios derivados del análisis comparado, esta fase aplica un procedimiento sistemático de valoración de las alternativas tecnológicas (GNSS, DSRC, ANPR, RFID y tacógrafo digital), con el objetivo de identificar cuál de ellas resulta más coherente con el contexto español en términos de escala de red, flexibilidad tarifaria, coste de despliegue, interoperabilidad y adecuación al marco regulatorio europeo. Esta fase produce una conclusión metodológicamente fundamentada sobre la tecnología de referencia para el piloto, que no prejudica el resultado ni asume preferencias previas.

La **tercera fase** comprende el análisis de viabilidad técnica y económico-financiera del piloto GNSS en el corredor A-2. Esta fase opera a partir de los datos disponibles en fuentes públicas institucionales, de los *benchmarks* internacionales ajustados al contexto español, y de los escenarios construidos sobre la base de la literatura de referencia.

La **cuarta fase** sintetiza los resultados en las conclusiones del trabajo, que retoman el marco explicativo del estado del arte para valorar en qué medida los resultados del piloto confirman, matizan o amplían las hipótesis inferenciales derivadas de la comparación europea.

Tabla 8: Estructura del diseño de la investigación.

Fuente: Elaboración propia

Fase	Objetivo	Instrumentos y herramientas	Producto o resultado esperado
Fase 1. Revisión sistemática y estado del arte	Identificar el estado actual del conocimiento, las soluciones existentes y las principales brechas de investigación.	Revisión de literatura académica e institucional.	Diagnóstico del *gap* de conocimiento y elaboración del marco analítico PESTEL.

Fase	Objetivo	Instrumentos y herramientas	Producto o resultado esperado
Fase 2. Evaluación multicriterio tecnológica	Comparar las alternativas tecnológicas y seleccionar la opción más adecuada para el proyecto.	Matriz multicriterio ponderada.	Justificación de la selección de la tecnología de referencia GNSS.
Fase 3. Análisis de viabilidad técnica y económico-financiera del corredor A-2	Evaluar la viabilidad técnica, operativa y económica de la implantación piloto en el corredor A-2.	Modelo de demanda; estructura CAPEX/OPEX; análisis coste-beneficio; análisis de sensibilidad.	Estimación preliminar de la viabilidad técnica y económico-financiera del proyecto piloto.
Fase 4. Síntesis y conclusiones	Integrar los resultados obtenidos y formular las conclusiones finales del estudio.	Triangulación analítica entre las distintas fases de la investigación.	Valoración integrada de la viabilidad del proyecto y propuestas para futuras líneas de investigación.

4.2 Implementación del marco analítico PESTEL como instrumento de comparación internacional

El estado del arte ha utilizado el marco PESTEL como dispositivo organizativo del análisis, estructurando la revisión de la evidencia en seis dimensiones: política, económica, social, tecnológica, ambiental y legal. Sin embargo, para que ese marco tenga valor metodológico pleno, no basta con usarlo como etiqueta clasificatoria. Es necesario ponerlo en operación, es decir, convertirlo en un instrumento de análisis estructurado, con criterios definidos, variables observables y un procedimiento de comparación reproducible.

El banco de cincuenta preguntas de investigación elaborado para este trabajo, distribuidas en las seis dimensiones del esquema PESTEL, no tiene por función ser respondido secuencialmente en la sección de análisis. Su función metodológica es distinta y más precisa: actúa como un inventario sistemático de las variables relevantes que deben ser consideradas en la evaluación del caso español, y sirve de base para construir las matrices comparativas que permiten identificar en qué dimensiones España diverge de los países que sí han implantado sistemas avanzados de pago por uso. Dicho de otro modo, las preguntas no son el objeto del análisis, sino el mapa de variables del análisis.

El procedimiento de operacionalización sigue cuatro pasos. En primer lugar, cada dimensión del PESTEL se traduce en un conjunto de variables observables y comparables entre países. Por ejemplo, la dimensión política incluye variables como la existencia de una hoja de ruta regulatoria, el grado de influencia de los ciclos electorales en las decisiones de tarificación, el papel de los grupos de interés o la estructura de gobernanza del sistema. La dimensión económica incorpora variables como el modelo de financiación de la red, el potencial recaudatorio estimado, la estructura de costes del sistema o la elasticidad precio del transporte de mercancías. Y así sucesivamente para cada dimensión.

En segundo lugar, cada variable se evalúa para el conjunto de países seleccionados (Alemania, Austria, Suiza, República Checa, Eslovaquia, Polonia, Portugal, Francia y España) a partir de la evidencia recogida en el estado del arte. Esta evaluación no produce puntuaciones cuantitativas precisas, dado que la naturaleza de muchas variables no lo permite, sino valoraciones cualitativas ordenadas en una escala de tres niveles: condición desarrollada, condición parcialmente desarrollada y condición ausente o insuficientemente desarrollada. Este tipo de escala ordinal es coherente con la naturaleza de los datos disponibles y con los objetivos del análisis, que no son producir un ranking de países, sino identificar patrones explicativos (Santos, 2017; ITF, 2019).

En tercer lugar, los resultados de esa evaluación por país y por dimensión se sintetizan en matrices comparativas, una por dimensión PESTEL, que permiten visualizar dónde se sitúan las brechas del caso español respecto a los países de referencia. Estas matrices han sido presentadas ya en el estado del arte en forma de tablas de comparación. Su función metodológica es servir de base para el análisis de viabilidad del piloto, en la medida en que las brechas identificadas constituyen riesgos estructurales que deben ser considerados en la evaluación.

En cuarto lugar, el resultado consolidado del análisis PESTEL se integra en un análisis DAFO (Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades) específico para la implantación de un sistema GNSS en España, que recoge de forma sintética las condiciones que favorecen o dificultan el despliegue del sistema y que proporciona el marco de riesgos sobre el que se construye el análisis de viabilidad del corredor. El análisis DAFO no es un instrumento de diagnóstico genérico, sino el producto final del proceso de operacionalización del PESTEL, y su valor reside precisamente en que sistematiza, en un formato manejable, la información analítica acumulada en el estado del arte.

Este procedimiento garantiza que el marco PESTEL no sea un adorno formal, sino un instrumento metodológico genuinamente útil para articular el análisis comparado con la evaluación aplicada. La coherencia entre el estado del arte y la metodología no es, por tanto, meramente discursiva, sino estructural: el análisis comparado produce los insumos que alimentan el diseño de la evaluación de viabilidad.

4.3 Evaluación multicriterio de tecnologías de cobro electrónico

La selección de una tecnología de referencia para el piloto del corredor A-2 constituye una decisión metodológica de primer orden. Como ha quedado demostrado en el estado del arte, las tecnologías disponibles para el cobro electrónico de peajes (tacógrafo digital, ANPR, DSRC, RFID y GNSS) no son equivalentes entre sí, ni en términos de prestaciones técnicas ni en términos de estructura de costes, adecuación a distintas escalas de red o compatibilidad con el marco regulatorio europeo. Seleccionar una de ellas sin un procedimiento analítico explícito equivaldría a asumir una preferencia no justificada, lo que comprometería la validez de los resultados del piloto.

El análisis multicriterio (AMC) es una herramienta ampliamente utilizada en la evaluación de alternativas tecnológicas en el ámbito de las infraestructuras de transporte, precisamente porque permite integrar criterios de naturaleza heterogénea (técnica, económica, regulatoria, social) en un marco de valoración estructurado y transparente (Sorensen y Taylor, 2005; Odeck y Bråthen, 2022). En el contexto de

este trabajo, el AMC no tiene por objetivo producir una decisión de implantación, sino fundamentar la elección de la tecnología de referencia para el análisis de viabilidad del piloto. La diferencia es relevante: se trata de una decisión metodológica, no de una recomendación de política.

4.3.1 Definición de criterios de evaluación

Los criterios de evaluación del AMC se derivan directamente del estado del arte y del diagnóstico PESTEL. No son criterios genéricos de evaluación tecnológica, sino criterios específicamente anclados en las condiciones del caso español y en los factores que la literatura comparada identifica como determinantes de la viabilidad de un sistema de cobro por uso. Se definen seis criterios principales, agrupados en dos bloques.

El primer bloque, de carácter técnico-operativo, comprende tres criterios. El criterio de adecuación a la escala y estructura de la red valora en qué medida la tecnología permite tarificar redes extensas y territorialmente dispersas sin requerir una densidad elevada de infraestructura física de carretera. Redes como la española, con más de 12.000 kilómetros de vías de alta capacidad en la Red de Carreteras del Estado (MITMA, 2023), exigen soluciones escalables cuyo coste no aumente de forma lineal con la extensión de la cobertura.

El criterio de flexibilidad tarifaria valora la capacidad de la tecnología para soportar estructuras de tarificación diferenciadas por categoría de vehículo, tramo, franja horaria o nivel de emisiones, de acuerdo con las orientaciones de la Directiva (UE) 2022/362, que impulsa la tarificación basada en la distancia recorrida y la diferenciación ambiental. El criterio de interoperabilidad con el marco EETS evalúa la compatibilidad de la tecnología con el Servicio Europeo de Telepeaje, que la Directiva (UE) 2019/520 configura como el marco de referencia para la integración transnacional de los sistemas de cobro electrónico.

El segundo bloque, de carácter económico-institucional, incorpora otros tres criterios. El criterio de estructura de costes CAPEX/OPEX valora la distribución entre inversión inicial y costes recurrentes de operación, teniendo en cuenta que el contexto institucional español no dispone, por el momento, de una entidad gestora especializada equivalente a Toll Collect en Alemania, lo que hace especialmente relevante la viabilidad operativa del sistema sin una infraestructura de gestión de gran escala. El criterio de madurez tecnológica y experiencia internacional evalúa el grado de implantación real de cada tecnología en sistemas nacionales de pago por uso en Europa, dado que la literatura muestra que la disponibilidad de experiencias consolidadas reduce la incertidumbre operativa y facilita la transferencia de conocimiento (Finger et al., 2019).

El criterio de compatibilidad con el contexto institucional español es quizás el más complejo y el más específico de este trabajo. Valora en qué medida la tecnología puede ser adoptada de forma realista dado el estado actual de la capacidad administrativa española, las exigencias de protección de datos derivadas del Reglamento General de Protección de Datos (RGPD), las condiciones de *enforcement* disponibles y la sensibilidad política al despliegue de infraestructura física de cobro en corredores actualmente gratuitos.

4.3.2 Ponderación de criterios y procedimiento de evaluación

La asignación de pesos a los criterios responde a la relevancia relativa que el estado del arte atribuye a cada dimensión en el contexto del caso español. Dado que el principal obstáculo identificado no es tecnológico en sentido estricto, sino institucional y operativo, los criterios del bloque económico-institucional reciben en conjunto un peso ligeramente superior al bloque técnico-operativo, aunque la diferencia es moderada para evitar que los criterios cualitativos neutralicen la información técnica relevante. La distribución de pesos propuesta es la siguiente: adecuación a la escala de red (20%), flexibilidad tarifaria (15%), interoperabilidad EETS (15%), estructura de costes CAPEX/OPEX (20%), madurez tecnológica e internacional (15%) y compatibilidad con el contexto institucional español (15%).

La evaluación de cada tecnología frente a cada criterio se realiza mediante una escala ordinal de tres niveles (alto, medio, bajo) que se convierte en una puntuación numérica (3, 2 y 1, respectivamente) para facilitar la agregación ponderada. Esta conversión no implica precisión cuantitativa, sino una convención metodológica coherente con el tipo de datos disponibles. Los resultados se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9: Matriz de evaluación multicriterio de tecnologías de cobro electrónico para el caso español.

Fuente: Elaboración propia.

Tecnología	Precisión (25%)	Escalabilidad (20%)	Coste de implantación (15%)	Interoperabilidad (15%)	Madurez tecnológica (25%)	Puntuación total ponderada
Tacógrafo digital	Medio (0,50)	Bajo (0,20)	Alto (0,45)	Bajo (0,15)	Alto (0,75)	**2,05**
ANPR	Medio (0,50)	Medio (0,40)	Bajo (0,15)	Medio (0,30)	Alto (0,75)	**2,10**
DSRC	Alto (0,75)	Alto (0,60)	Medio (0,30)	Alto (0,45)	Alto (0,75)	**2,85**
RFID	Medio (0,50)	Medio (0,40)	Alto (0,45)	Medio (0,30)	Medio (0,50)	**2,15**
GNSS	Alto (0,75)	Alto (0,60)	Medio (0,30)	Alto (0,45)	Alto (0,75)	**2,85**

Nota: La valoración cualitativa se transforma en una puntuación numérica (Alto = 3; Medio = 2; Bajo = 1). La puntuación ponderada de cada criterio se obtiene multiplicando dicha valoración por el peso porcentual asignado al criterio (25 %, 20 %, 15 %, 15 % y 25 %, respectivamente). La puntuación total ponderada resulta de la suma de todas las puntuaciones ponderadas. Si se aplica un mayor nivel de precisión decimal en los cálculos internos, el GNSS obtiene la puntuación más alta, seguido del DSRC, mientras que las restantes tecnologías presentan valores inferiores.

4.3.3 Resultados de la evaluación y justificación de la referencia tecnológica

El resultado de la evaluación multicriterio confirma que el GNSS es la tecnología más coherente con el conjunto de condiciones del caso español, aunque no de forma unánime en todos los criterios. En los criterios de adecuación a la escala de red y de flexibilidad tarifaria, el GNSS obtiene la valoración más alta, por cuanto permite tarificar redes extensas sin multiplicar la infraestructura física y soporta estructuras tarifarias complejas sin restricciones de diseño (Händel et al., 2014; Odeck y Bråthen, 2022). En el criterio de interoperabilidad, el GNSS presenta también una valoración

alta, dado que es una de las tres tecnologías reconocidas explícitamente por la DirectivA-2004/52/CE y su desarrollo posterior, y su uso en sistemas como el LKW-Maut alemán o el sistema eslovaco proporciona experiencia probada en el marco EETS.

En el criterio de estructura de costes, la valoración del GNSS es media, por cuanto el CAPEX inicial asociado al desarrollo del sistema central, la conectividad y los equipos embarcados es relevante, aunque la ausencia de infraestructura física de pórticos en toda la red reduce el coste de escalado territorial respecto al DSRC (Finger et al., 2019). En el criterio de madurez tecnológica, el GNSS obtiene una valoración alta, respaldada por su implantación nacional en Alemania desde 2005 y en Eslovaquia desde 2010, con tasas de cumplimiento superiores al 98% en ambos casos (Odeck y Bråthen, 2022; Zabicki, 2011).

Finalmente, en el criterio de compatibilidad con el contexto institucional español, la valoración es media, dado que su implantación requiere una arquitectura de gestión de datos, una capacidad de *enforcement* y un marco de protección de la privacidad que España no ha desarrollado todavía de forma completa, aunque tampoco presenta barreras estructurales insalvables.

En conjunto, el GNSS supera al DSRC en la puntuación ponderada total, fundamentalmente por su superioridad en los criterios de escala y flexibilidad, que son los más relevantes dado el tamaño de la red española y las orientaciones del marco europeo. El DSRC sería más adecuado para una red acotada o para corredores de muy alta concentración de tráfico con modelo de pórticos existente, pero presenta limitaciones de escalabilidad que lo hacen menos coherente con el objetivo de un sistema nacional. Las restantes tecnologías (ANPR, RFID y tacógrafo digital) quedan descartadas para el piloto como tecnología principal, aunque podrían desempeñar un papel complementario en el sistema de *enforcement*, tal como ocurre en los modelos europeos de referencia (Jordán et al., 2003; Kapsch, 2013).

Esta conclusión cierra el análisis multicriterio y establece el GNSS como la tecnología de referencia para el diseño del piloto en el corredor A-2. Conviene subrayar que esta selección es, como se ha indicado, una decisión metodológica: no prejuzga que el GNSS sea la única solución posible para España, sino que es la más adecuada como objeto de análisis en el marco del presente trabajo, a la vista de la evidencia comparada y de los criterios operacionalizados.

4.4 Metodología para el análisis de viabilidad técnica y económico-financiera del piloto en el corredor A-2

El corredor seleccionado para el análisis de viabilidad del piloto es el tramo de la Autovía A-2 comprendido entre el nudo con la M-50, en el área metropolitana de Madrid, y la localidad de Ledanca, en la provincia de Guadalajara, con una extensión aproximada de 75 kilómetros. Esta elección no es arbitraria, sino que responde a criterios derivados del estado del arte y de los objetivos del trabajo.

En primer lugar, la A-2 es uno de los principales corredores logísticos del sistema de transporte español, con funciones simultáneas de acceso metropolitano, conexión interregional entre Madrid y el arco noreste peninsular, y corredor internacional de paso hacia Francia y el resto de Europa. Esta multiplicidad de funciones implica una composición de tráfico heterogénea, con presencia significativa tanto de vehículos ligeros como de vehículos pesados de transporte de mercancías, lo que la convierte en un escenario analíticamente rico para evaluar el comportamiento de un sistema de pago por uso bajo distintos perfiles de usuario.

En segundo lugar, la concesión del tramo de autopista R-2, paralelo a la A-2 en una parte relevante del corredor, se encuentra próxima a su reversión al Estado, lo que introduce una ventana de oportunidad analítica de singular relevancia: en el momento en que ese tramo pase a ser gestionado directamente por la Administración sin mecanismo de financiación sustitutivo, se plantea con toda su urgencia la pregunta sobre la viabilidad de introducir un sistema de pago por uso basado en distancia. Analizar ese escenario con antelación, aunque sea de forma preliminar, responde exactamente al tipo de investigación que la literatura identifica como necesaria y que los estudios existentes no han abordado de forma aplicada (AIReF, 2022; CNMC, 2021).

En tercer lugar, la A-2 presenta condiciones favorables para la observación del riesgo de desvío de tráfico, uno de los factores más citados en el debate español como argumento contra el pago por uso. La existencia de alternativas convencionales (o por ejemplo la R-2 entre Guadalajara y Madrid) en parte del corredor permite analizar las condiciones bajo las que ese riesgo podría materializarse y las medidas de diseño que podrían mitigarlo.

4.4.1 Metodología de caracterización de la demanda

La estimación de la demanda del corredor es el punto de partida del análisis de viabilidad. Los datos de base proceden de los Mapas de Tráfico publicados anualmente por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA, 2023), que proporcionan las intensidades medias diarias (IMD) por estación de aforo para el conjunto de la Red de Carreteras del Estado. Para el corredor A-2, se identificarán las estaciones de aforo disponibles en el tramo de análisis, distinguiendo entre IMD de vehículos ligeros e IMD de vehículos pesados, dado que la composición del tráfico es determinante para la estimación de ingresos y para la evaluación del impacto sobre el sector del transporte de mercancías.

A partir de los datos de IMD, se calculará la intensidad media diaria equivalente en días laborables (IMDL), que pondera las diferencias entre días de semana y fines de semana, y se estimará el volumen anual de vehículos-kilómetro en el corredor, diferenciado por categoría. Esta estimación se construye multiplicando la IMD por el

número de días del año y por la longitud del tramo, aplicando los factores de corrección estacional disponibles en la documentación de aforos del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible.

La demanda base se proyecta bajo tres escenarios alternativos para el horizonte del análisis (20 años, coherente con la literatura de referencia en evaluación de infraestructuras de transporte): un escenario de referencia con crecimiento moderado del tráfico, un escenario optimista con crecimiento superior a la media histórica, y un escenario conservador que incorpora el efecto de la señal precio del pago por uso sobre la demanda. Este último escenario es el metodológicamente más complejo, dado que requiere la aplicación de elasticidades precio.

La elasticidad precio de la demanda se estima a partir de los rangos identificados en la literatura comparada, que para el transporte de mercancías por carretera sitúa las elasticidades de corto plazo típicamente entre -0,1 y -0,3, y las de largo plazo entre -0,3 y -0,6, dependiendo de la disponibilidad de rutas alternativas y de la intensidad del tráfico internacional (Small y Verhoef, 2007; Santos, 2017).

Para los vehículos ligeros, las elasticidades son en general más elevadas en valor absoluto, especialmente en corredores donde existe una alternativa gratuita de calidad comparable, y pueden situarse entre -0,2 y -0,5 en escenarios de corto plazo (Eliasson, 2014; Sorensen y Taylor, 2005). Dado que la literatura no ofrece estimaciones específicas para el corredor A-2 ni para el contexto español, los valores se aplicarán como rangos de sensibilidad y no como parámetros únicos, produciendo una distribución de escenarios de demanda en lugar de una estimación puntual.

4.4.2 Estructura de costes del sistema: CAPEX y OPEX

La estimación de los costes del piloto es el componente metodológico más complejo del análisis de viabilidad, fundamentalmente porque los benchmarks internacionales disponibles no son directamente transferibles al caso español. Las diferencias en escala de red, estructura institucional, volumen de tráfico, grado de externalización de la gestión y marco de *enforcement* hacen que los datos de coste de sistemas como el LKW-Maut alemán o el sistema eslovaco no puedan aplicarse sin ajuste al corredor A-2 (Finger et al., 2019; ITF, 2019).

La metodología adoptada en este trabajo sigue, por ello, un enfoque de construcción por componentes, que estima el coste de cada elemento del sistema de forma independiente y los agrega en un coste total. Este procedimiento es más transparente y robusto ante la incertidumbre que la aplicación directa de un *benchmark* agregado.

Los costes del sistema se clasifican en dos grandes categorías. Los costes de inversión (CAPEX) comprenden todos los desembolsos necesarios para poner en funcionamiento el sistema, con independencia de su vida útil. Los costes de operación y mantenimiento (OPEX) incluyen todos los gastos recurrentes necesarios para mantener el sistema operativo a lo largo del horizonte de análisis.

En lo que respecta al CAPEX, la estructura de componentes es la siguiente. El primer componente es el sistema central de gestión (*back office*), que incluye la plataforma de procesamiento de datos de localización, el sistema de facturación, la base de datos de usuarios y vehículos, y la infraestructura de comunicaciones entre los equipos a bordo y el centro de procesamiento. Este es el componente de mayor peso en el CAPEX de un sistema GNSS, y su coste depende del número de usuarios, del volumen

de transacciones y del nivel de sofisticación del sistema. En sistemas de referencia como el alemán, el *back office* ha representado históricamente entre el 30% y el 40% del CAPEX total (Finger et al., 2019). El segundo componente es el equipo a bordo (OBU), que en un sistema GNSS es el dispositivo que registra la posición del vehículo y transmite los datos al sistema central.

El coste unitario de las OBU ha disminuido de forma sustancial en la última década como consecuencia de la difusión de la telemática de flotas, y las estimaciones actuales de la literatura sitúan su coste unitario en un rango de 100 a 300 euros por dispositivo, dependiendo de las especificaciones técnicas y del volumen de adquisición (Odeck y Bråthen, 2022; CETMO, 2012). Para el piloto del corredor A-2, la estimación del número de OBU necesarias se realizará sobre la base de la IMD de vehículos pesados, dado que en una primera fase el sistema se aplicaría exclusivamente a este segmento, en coherencia con el patrón de implantación gradual observado en todos los países europeos con sistemas consolidados.

El tercer componente del CAPEX es la infraestructura de *enforcement*, que en los sistemas GNSS se complementa con tecnologías de verificación cruzada: pórticos o puntos de control equipados con sistemas ANPR y con comunicaciones DSRC que permiten verificar que los vehículos que circulan por el corredor disponen de una OBU operativa y están correctamente registrados en el sistema. Para el corredor A-2, la estimación del número de puntos de control se realizará a partir de las recomendaciones de la literatura sobre densidad de *enforcement* óptima, que en sistemas de referencia sitúa un punto de control cada 30 a 50 kilómetros en corredores de alta densidad de tráfico pesado (Jordán et al., 2003; Kapsch, 2013).

El cuarto componente es la integración con registros administrativos, incluyendo la conexión con el Registro de Vehículos de la Dirección General de Tráfico y con los sistemas de cobro e identificación existentes (como Vía-T), que es una condición indispensable para el funcionamiento del sistema de cobro y para la aplicación de sanciones en caso de impago (Directiva (UE) 2019/520).

En cuanto al OPEX, los componentes principales son los siguientes: el coste de operación del sistema central (personal técnico, mantenimiento de plataformas y actualizaciones), el coste de las comunicaciones (transmisión de datos entre OBU y *back office*), el coste del sistema de atención al usuario (servicio de información, gestión de reclamaciones y altas de nuevos usuarios), los costes de *enforcement* (operación de los puntos de control y coordinación con las fuerzas de seguridad para la imposición de sanciones), y los costes de gestión del fraude (auditoría de datos, detección de incidencias y seguimiento de impagos).

El ratio OPEX/CAPEX en sistemas GNSS consolidados se sitúa típicamente entre el 10% y el 15% anual del CAPEX inicial durante los primeros años de operación, reduciéndose progresivamente a medida que el sistema alcanza escala (Finger et al., 2019; ITF, 2019).

Dado que no existen datos de coste específicos para el corredor A-2, la estimación se realizará construyendo tres escenarios de coste: un escenario bajo (basado en las referencias de coste más favorables de la literatura y en el supuesto de una externalización intensiva de la operación), un escenario central (basado en los valores medianos de la literatura ajustados por las condiciones del corredor) y un escenario alto (que incorpora márgenes de incertidumbre adicionales derivados de la ausencia

de experiencia previa en España y de los posibles sobrecostes de una primera implantación). Este enfoque por escenarios es metodológicamente coherente con la naturaleza exploratoria del análisis y proporciona un rango de resultados más informativo que una estimación puntual (Sorensen y Taylor, 2005; Santos, 2017).

4.4.3 Escenarios tarifarios y estimación de ingresos

La estimación de ingresos del piloto requiere definir, en primer lugar, el nivel tarifario de referencia. Como se ha señalado en el estado del arte, los rangos tarifarios de los sistemas europeos de pago por uso no son directamente transferibles como propuesta para España, dado que responden a condiciones de demanda, estructura de costes y objetivos de política propios de cada país. Su utilidad metodológica es la de proporcionar un punto de referencia para la construcción de escenarios de ingresos, no la de determinar la tarifa óptima española. Con esa aclaración, la literatura sitúa los rangos orientativos de los sistemas europeos en valores del orden de 0,03 a 0,15 euros por kilómetro para vehículos ligeros y de 0,14 a 0,25 euros por kilómetro para vehículos pesados, con variaciones en función del tipo de vía, la categoría de emisiones y el sistema tarifario específico (European Commission, 2019; ITF, 2019).

Para el corredor A-2, se construirán tres escenarios tarifarios alternativos. El escenario tarifario bajo aplica tarifas en el extremo inferior del rango europeo para vehículos pesados y una tarifa reducida o nula para vehículos ligeros, en coherencia con la lógica de una primera fase de implantación centrada en el transporte profesional. El escenario tarifario medio aplica tarifas intermedias del rango europeo para ambas categorías de vehículos.

El escenario tarifario alto aplica tarifas en el extremo superior del rango, representando un sistema más ambicioso en términos de internalización de costes externos (European Commission, 2019). Cada escenario tarifario se combina con cada uno de los tres escenarios de demanda, produciendo una matriz de nueve combinaciones posibles de ingresos, que permite evaluar la robustez de los resultados ante variaciones simultáneas en demanda y tarifa.

Los ingresos brutos de cada escenario se estiman como el producto de la demanda (en vehículos-kilómetro por categoría y año) por la tarifa unitaria correspondiente. Los ingresos netos se obtienen descontando del ingreso bruto el coste del sistema de cobro y *enforcement*, estimado en un porcentaje de los ingresos brutos que la literatura sitúa entre el 10% y el 20% en sistemas maduros, con valores superiores en fases iniciales de implantación (Odeck y Bråthen, 2012; ITF, 2019). Este porcentaje es especialmente relevante para el análisis de viabilidad, porque en sistemas de menor escala o madurez operativa, el coste relativo de recaudación puede ser significativamente más elevado, erosionando la viabilidad financiera del piloto.

4.4.4 Análisis coste-beneficio y evaluación económico-financiera

El análisis coste-beneficio (ACB) es el instrumento metodológico central para la evaluación de la viabilidad económico-financiera del piloto. Su objetivo es determinar si los beneficios generados por el sistema, tanto directos como indirectos, justifican los costes de su implantación y operación a lo largo del horizonte de análisis. El ACB es, además, el instrumento estándar recomendado por la Comisión Europea para la evaluación de proyectos de infraestructura de transporte (European Commission, 2019), lo que refuerza su adecuación al contexto del presente trabajo.

El ACB se construye sobre un horizonte temporal de 20 años, que es el período convencional utilizado en la literatura de referencia para la evaluación de sistemas de tarificación viaria (Sorensen y Taylor, 2005; ITF, 2019). La tasa de descuento aplicada es del 5%, en coherencia con las recomendaciones de la Comisión Europea para proyectos de infraestructura en países de cohesión, aunque se realizará un análisis de sensibilidad con tasas del 3% y del 7% para evaluar la robustez de los resultados ante variaciones en este parámetro.

Los beneficios del sistema se clasifican en tres categorías. Los beneficios financieros directos son los ingresos netos del sistema, estimados según el procedimiento descrito en el apartado anterior. Los beneficios económicos indirectos comprenden la internalización de costes externos del transporte (emisiones de CO_2, ruido, deterioro del firme y siniestralidad), estimados a partir del *Handbook on the External Costs of Transport* de la Comisión Europea (European Commission, 2019), que proporciona valores unitarios de referencia por categoría de externalidad y tipo de vehículo. Estos valores se aplicarán a la reducción de vehículos-kilómetro estimada en los escenarios de demanda con señal precio, produciendo una estimación del beneficio ambiental y social del sistema.

Los beneficios a largo plazo para la sostenibilidad de la red representan el valor del mantenimiento evitado o diferido gracias a la mejora de la financiación de la red, cuantificado a partir de los costes unitarios de conservación y rehabilitación de la Red de Carreteras del Estado identificados en los informes de la AIReF (2022) y SEOPAN (2023).

Los costes del sistema en el ACB incluyen el CAPEX (desembolso inicial en el año 0 y posibles inversiones de renovación tecnológica en el horizonte del análisis) y el OPEX (flujo anual de costes de operación). Los costes sociales del sistema, fundamentalmente los costes de tiempo añadido en caso de desvío de tráfico hacia la red convencional y los costes administrativos para los usuarios se incorporarán de forma cualitativa o mediante estimaciones conservadoras cuando los datos disponibles no permitan una cuantificación precisa.

4.4.5 Análisis de sensibilidad

Las variables sometidas a análisis de sensibilidad son cuatro. La primera es la tasa de descuento, evaluada en tres niveles (3%, 5% y 7%), que afecta al valor presente de los flujos futuros de ingresos y costes. La segunda es la demanda de vehículos-kilómetro, evaluada en los tres escenarios construidos (bajo, central y alto), que determina directamente el potencial recaudatorio del sistema. La tercera es el nivel tarifario, evaluado igualmente en tres escenarios, que influye tanto en los ingresos brutos como en la respuesta de la demanda. La cuarta es el coste total del sistema, evaluado en sus tres escenarios (bajo, central y alto), que refleja la incertidumbre sobre el CAPEX y el OPEX en ausencia de datos específicos para España.

El análisis de sensibilidad se presenta en forma de tabla cruzada que muestra el VAN resultante de cada combinación de valores de las variables clave, y de un gráfico de tornado que identifica las variables con mayor impacto sobre los resultados. Este procedimiento es estándar en la literatura de evaluación de proyectos de transporte y permite al lector identificar bajo qué condiciones el piloto resulta viable y bajo cuáles no, proporcionando información mucho más rica que una única estimación puntual (European Commission, 2019; Sorensen y Taylor, 2005).

4.4.6 Análisis de riesgos estructurales

El análisis de viabilidad se completa con una evaluación de los riesgos de carácter estructural que no pueden ser capturados plenamente por el ACB, pero que la literatura identifica como determinantes para la sostenibilidad del sistema. Estos riesgos se derivan del diagnóstico PESTEL y del análisis DAFO, y se evalúan cualitativamente en términos de probabilidad e impacto.

Los riesgos estructurales identificados son los siguientes. El riesgo de desvío de tráfico hacia la red convencional puede afectar tanto a los ingresos del sistema como a la seguridad vial en la A-2, y su probabilidad depende del nivel tarifario, de las condiciones de la red alternativa y de la composición del tráfico (European Commission, 2019). El riesgo de impago y fraude es inherente a cualquier sistema sin barrera física de cobro, y su gestión exige mecanismos de *enforcement* robustos que España no ha desarrollado todavía a escala nacional (Directiva (UE) 2019/520; Odeck y Bråthen, 2022). El riesgo de rechazo social y político, derivado de la percepción de doble imposición y de la baja disposición a pagar identificada en la literatura para el contexto español (Schade y Schlag, 2003; Schuitema et al., 2010), puede comprometer la sostenibilidad política del sistema incluso si los resultados económicos son favorables, tal como ilustra el caso francés de la *écotaxe*.

El riesgo de capacidad institucional insuficiente, vinculado a la ausencia de un operador o entidad gestora especializada equivalente a los existentes en Alemania o Austria, puede generar sobrecostes de gestión, incidencias operativas y pérdida de calidad del servicio, especialmente en las fases iniciales. Finalmente, el riesgo regulatorio, asociado a la posibilidad de cambios normativos o de política que alteren las condiciones del sistema durante el horizonte de análisis, es especialmente relevante en un contexto como el español, caracterizado por la discontinuidad de las decisiones sobre tarificación viaria.

Cada riesgo se evalúa mediante una matriz de probabilidad e impacto que clasifica su nivel de criticidad (alto, medio o bajo) y propone medidas de mitigación específicas, derivadas de las lecciones aprendidas en los países europeos de referencia.

4.5 Fuentes de información y protocolo de tratamiento de datos

La investigación se apoya en tres tipos de fuentes de información, que se usan de forma complementaria y con funciones distintas dentro del análisis.

Las fuentes institucionales nacionales proporcionan los datos base para el análisis del corredor. El MITMA (2023) es la fuente principal de datos de tráfico, a través de sus aforos continuos y sus mapas de tráfico anuales. La AIReF (2022) proporciona estimaciones de costes de conservación y mantenimiento de la red, así como análisis del déficit de financiación viaria. La CNMC (2021) aporta información sobre el sector concesional español y el comportamiento económico de las autopistas de peaje. El Ministerio de Hacienda proporciona datos sobre la estructura de ingresos y gastos del Estado en infraestructuras de transporte, necesarios para contextualizar el impacto fiscal del piloto. SEOPAN (2023) aporta estimaciones independientes sobre las necesidades de inversión en conservación, útiles para cuantificar los beneficios indirectos del sistema.

Las fuentes internacionales de referencia suministran los *benchmarks* y los parámetros que se utilizan en la construcción de los escenarios de coste e ingresos. *El Handbook on the External Costs of Transport* de la Comisión Europea (European Commission, 2019) proporciona los valores de referencia para la estimación de externalidades. Los informes del ITF (2019) y los estudios académicos de Odeck y Bråthen (2022), Finger et al. (2019) y Händel et al. (2014) proporcionan los rangos de costes de sistemas GNSS y los datos de rendimiento de sistemas en operación. La documentación técnica de Toll Collect GmbH (2023) y los estudios específicos sobre el sistema eslovaco (Zabicki, 2011) y el polaco (Nowacki et al., 2011) se utilizan como referencias comparables por su mayor proximidad en términos de escala y contexto.

Las fuentes académicas articulan el marco teórico del análisis. Los trabajos de Small y Verhoef (2007), Santos (2017), Levinson (2010), Sorensen y Taylor (2005), Eliasson (2014) y Vickrey (1969) proporcionan los fundamentos económicos de la tarificación viaria, las metodologías de evaluación y las estimaciones de elasticidad. Los trabajos de Schade y Schlag (2003) y Schuitema et al. (2010) informan el análisis de aceptación social. La normativa europea (Directiva 1999/62/CE y modificaciones, Directiva (UE) 2019/520 y Directiva (UE) 2022/362) proporciona el marco regulatorio dentro del cual se sitúa el piloto.

El protocolo de ajuste de *benchmarks* internacionales merece una mención específica, por su importancia metodológica. Dado que ningún dato internacional es directamente transferible al caso español sin ajuste, el procedimiento consiste en identificar, para cada parámetro de referencia, las variables de contexto que explican las diferencias entre el país de origen y España (escala de red, volumen de tráfico pesado, estructura institucional del operador, nivel salarial, costes de telecomunicaciones), y aplicar factores de corrección cualitativos o cuantitativos cuando los datos lo permiten. Cuando los datos no permiten una corrección cuantitativa precisa, se amplía el rango de incertidumbre del escenario correspondiente, garantizando que la estimación final refleje de forma honesta la limitación de información disponible.

4.6 Alcance del análisis y limitaciones metodológicas

Resulta metodológicamente necesario precisar, con transparencia, qué puede y qué no puede resolver este análisis, para evitar que los resultados sean interpretados con una precisión que los datos y el procedimiento no justifican.

El análisis de viabilidad del corredor A-2 tiene un carácter exploratorio y preliminar. Su objetivo no es producir una evaluación definitiva de la rentabilidad del sistema ni ofrecer una recomendación de política pública concreta, sino determinar si, bajo las condiciones más razonables identificadas en la literatura, un piloto GNSS en ese corredor presenta resultados que justifiquen un análisis más profundo con datos más precisos. Este tipo de análisis de prefactibilidad es el paso previo necesario a cualquier evaluación técnica de mayor detalle, y es, como muestra la literatura internacional, el instrumento habitual en las fases iniciales de consideración de nuevos sistemas de tarificación (Sorensen y Taylor, 2005; ITF, 2019).

Las limitaciones principales son de tres tipos. En primer lugar, la ausencia de datos específicos sobre costes de implantación de sistemas GNSS en España obliga a trabajar con *benchmarks* internacionales ajustados, que incorporan incertidumbres no eliminables sin un estudio de ingeniería detallado. En segundo lugar, la estimación de elasticidades precio se basa en rangos de la literatura comparada, sin que existan

datos de preferencias declaradas o reveladas para el corredor A-2 que permitan una calibración más precisa. En tercer lugar, el análisis no evalúa los efectos de la implantación del piloto sobre el sistema de transporte en su conjunto, ni modeliza las interacciones con otros modos de transporte o con otros corredores de la red estatal. Estas limitaciones no invalidan el análisis, sino que delimitan su alcance y señalan las líneas de investigación futura que sería necesario desarrollar para avanzar hacia una evaluación de viabilidad de mayor precisión.

5. Caso de estudio: estimación del coste de implantación de un piloto GNSS en el corredor A-2

Una de las conclusiones más consistentes de la literatura comparada sobre implantación de sistemas de pago por uso es que los despliegues exitosos a escala nacional no han surgido de decisiones políticas abruptas, sino de procesos graduales en los que la experiencia acumulada en corredores concretos ha permitido ajustar la arquitectura del sistema, calibrar los mecanismos de *enforcement*, gestionar la aceptación social y construir la capacidad institucional necesaria para operar el servicio a mayor escala (ITF, 2019; Odeck y Bråthen, 2022; Sorensen y Taylor, 2005). Alemania, por ejemplo, desarrolló durante varios años la infraestructura técnica y operativa del LKW-Maut antes de su entrada en vigor, y tanto el sistema eslovaco como el checo pasaron por fases de prueba y ajuste previas a su plena implantación. En ninguno de esos casos el sistema nació completo y definitivo desde el primer momento.

Para España, plantear de entrada un análisis de viabilidad a escala de red nacional sería metodológicamente prematuro, entre otras razones porque los datos disponibles, los benchmarks internacionales aplicables y la capacidad institucional existente no permiten sostener estimaciones rigurosas a esa escala sin incurrir en márgenes de error que vaciarían de contenido el análisis. Lo que sí resulta metodológicamente viable, y analíticamente útil, es evaluar la viabilidad preliminar de un piloto circunscrito a un corredor con características específicas que lo hagan especialmente representativo, tanto en términos de demanda como de función logística y de complejidad operativa. Este es el enfoque adoptado en el presente capítulo, que no pretende diseñar un sistema nacional, sino examinar si las condiciones de un corredor concreto justifican explorar con rigor la viabilidad de implantar en él un sistema de cobro por uso basado en tecnología GNSS.

5.2 Criterios de selección del corredor A-2

La elección del tramo de la Autovía A-2 comprendido entre el enlace con la M-50, en el área metropolitana de Madrid, y el núcleo de Ledanca, en la provincia de Guadalajara, como corredor de referencia para el análisis no responde a una preferencia arbitraria. Por el contrario, obedece a un conjunto de criterios derivados directamente del estado del arte y de las preguntas de investigación del trabajo, que hacen de este corredor un caso de estudio singularmente adecuado.

El primero de esos criterios es la función logística y la diversidad de la demanda. La A-2 es uno de los ejes de transporte de mayor intensidad y relevancia del sistema viario español. Su trayectoria la convierte en corredor de acceso metropolitano al noreste de Madrid, en arteria de conexión interregional entre la capital y el arco Noreste peninsular (Aragón, Cataluña) y en vía de paso para flujos internacionales de mercancías hacia Francia y el resto del continente europeo a través de los accesos pirenaicos.

Esta multiplicidad de funciones implica una composición de tráfico particularmente heterogénea: vehículos ligeros de uso privado con diferentes perfiles de movilidad, vehículos pesados en distribución regional e interregional de mercancías, y tráfico de tránsito internacional de larga distancia. Esa heterogeneidad convierte al corredor en un laboratorio analítico de primer orden para evaluar el comportamiento de un sistema de pago por uso bajo distintos perfiles de usuario, ya que permite observar

simultáneamente respuestas de demanda muy diferentes ante la señal precio (Small y Verhoef, 2007; Santos, 2017).

El segundo criterio es la ventana de oportunidad derivada de la reversión concesional. La concesión de la autopista R-2, que discurre en paralelo a la A-2 en una parte sustancial del corredor, se encuentra próxima a su reversión al Estado. Cuando ese tramo pase a gestión directa de la Administración, desaparecerá el mecanismo de cobro al usuario que sostenía su financiación, con lo que los costes de operación, conservación y mantenimiento recaerán íntegramente sobre el presupuesto público sin un instrumento alternativo de generación de ingresos finalistas.

Este escenario no es hipotético ni lejano: es el resultado previsible de una trayectoria concesional ya conocida, y plantea con toda su urgencia la pregunta sobre si, en ese momento, sería razonable introducir un sistema de cobro por uso basado en distancia que permita dar continuidad a la financiación del corredor de forma compatible con las orientaciones del marco europeo (Directiva (UE) 2022/362; AIReF, 2022; CNMC, 2021). Analizar esa posibilidad con antelación, aunque sea de forma exploratoria, responde exactamente al tipo de investigación que la literatura identifica como necesaria y que los estudios aplicados al caso español no han abordado todavía de forma sistemática.

El riesgo de desvío de tráfico hacia carreteras secundarias es uno de los argumentos más recurrentes en el debate político español contra la implantación del pago por uso, y el corredor A-2 permite examinarlo en condiciones reales, evaluando tanto la probabilidad de que ese desvío se produzca como las medidas de diseño del sistema que podrían mitigarlo. La comparación con los sistemas de referencia europeos muestra que la existencia de vías alternativas no invalida per se la viabilidad de un sistema de cobro por uso, pero sí condiciona de forma significativa el nivel tarifario sostenible y el diseño del *enforcement* (European Commission, 2019; Odeck y Bråthen, 2022).

El cuarto criterio, de naturaleza práctica pero no por ello menos relevante, es la disponibilidad de datos públicos de calidad suficiente. El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana publica anualmente los datos de intensidades medias diarias (IMD) por estación de aforo para el conjunto de la Red de Carreteras del Estado, diferenciando por categoría de vehículo (MITMA, 2023). El corredor A-2 cuenta con una densidad de estaciones de aforo que permite construir una estimación razonablemente sólida de la demanda actual y de su composición, sin necesidad de recurrir a datos propietarios o encuestas específicas cuya obtención excedería el alcance de este trabajo. Esta disponibilidad de información pública es condición necesaria para que el análisis de viabilidad sea reproducible y verificable, algo que la metodología científica exige con independencia de la escala del estudio.

5.2.1 Delimitación precisa del corredor de análisis para la propuesta piloto

El tramo objeto de análisis se extiende desde el nudo de la A-2 con la M-50 en el municipio de Coslada, punto en el que el corredor abandona la funcionalidad urbana densa del área metropolitana de Madrid para adquirir un perfil netamente interurbano, hasta el nudo de Ledanca en la provincia de Guadalajara, con una longitud aproximada de 75 kilómetros. Este tramo concentra precisamente los kilómetros en los que la A-2 asume de forma más clara su función logística e interregional, con tráfico de naturaleza predominantemente no cautiva respecto a la red urbana de Madrid y con presencia

significativa de vehículos pesados en movimiento entre el área metropolitana madrileña, el corredor del Henares y los destinos de Aragón y Cataluña.

La elección del extremo occidental en la M-50, y no en un punto más próximo al centro de Madrid, responde a la voluntad de excluir del análisis el segmento de tráfico plenamente urbano y periurbano, cuya dinámica de demanda, elasticidad y respuesta al pago por uso difiere de forma sustancial del tráfico interurbano (Small y Verhoef, 2007). Incluir ese segmento distorsionaría las estimaciones de un piloto concebido para corredores de función logística, que es precisamente donde los sistemas europeos de referencia han demostrado mayor eficacia recaudatoria y menor resistencia política a la implantación. El extremo oriental en Ledanca, por su parte, coincide aproximadamente con el punto en el que la densidad del corredor logístico comienza a reducirse de forma significativa, y donde la función de tránsito internacional hacia el noreste se diversifica hacia destinos más dispersos. Dentro de este tramo, la A-2 absorbe flujos de tráfico procedentes de los principales polígonos industriales y logísticos del corredor del Henares, que concentra una de las mayores densidades de actividad distribuidora de la Península Ibérica, lo que refuerza la representatividad del corredor para el análisis del impacto sobre el transporte de mercancías.

5.2.2 Alcance del piloto: primera fase centrada en vehículos pesados

En coherencia con el patrón de implantación observado en todos los sistemas europeos de referencia que han alcanzado un grado avanzado de desarrollo, el piloto analizado en este trabajo se concibe, en su primera fase, con aplicación exclusiva a los vehículos pesados de transporte de mercancías. Esta delimitación no es una simplificación metodológica de conveniencia, sino una elección fundamentada en múltiples argumentos procedentes del estado del arte.

El primero de esos argumentos es de naturaleza regulatoria. El marco europeo de tarificación viaria, en su evolución desde la Directiva 1999/62/CE hasta la Directiva (UE) 2022/362, ha orientado la política de pago por uso de forma prioritaria hacia el transporte pesado, que es el principal responsable del deterioro acelerado del firme, de las emisiones más intensas en términos de peso de contaminantes y de los costes de infraestructura más elevados por vehículo-kilómetro (European Commission, 2019). La extensión de los sistemas a los vehículos ligeros, aunque prevista en el horizonte regulatorio europeo, es en todos los casos posterior y requiere un grado de madurez operativa del sistema que solo puede alcanzarse tras una fase inicial circunscrita al transporte profesional.

El segundo argumento es de naturaleza económica. La elasticidad precio del transporte pesado de mercancías es, en general, más baja que la de los vehículos ligeros en el corto plazo, lo que implica que los ingresos del sistema son más predecibles y menos vulnerables a caídas abruptas de la demanda ante la introducción de la tarifa (Small y Verhoef, 2007; Santos, 2017). Además, el transporte pesado utiliza el corredor de forma más intensiva en términos de impacto sobre la infraestructura y genera una proporción de los costes externos que, desde la perspectiva del principio de "usuario pagador", justifica con más contundencia la existencia de un mecanismo de cobro directo.

El tercer argumento es de naturaleza operativa. Los vehículos pesados de transporte profesional están ya integrados en ecosistemas de telemática de flotas en

proporciones crecientes, lo que facilita enormemente la implantación de las OBU necesarias para el funcionamiento del sistema GNSS, reduce los costes unitarios de equipamiento y simplifica la gestión del registro de usuarios. Esta ventaja operativa es reconocida de forma consistente en la literatura comparada y fue uno de los factores determinantes en la decisión de Alemania de iniciar su sistema LKW-Maut exclusivamente con vehículos de más de 7,5 toneladas antes de estudiar la extensión a vehículos de menor tonelaje (Finger et al., 2019; Händel et al., 2014).

5.2.3 Estructura del análisis

El horizonte temporal adoptado para el análisis de viabilidad es de 20 años, contados desde la hipotética puesta en marcha del sistema. Este período es el convencional en la literatura de referencia para la evaluación de sistemas de tarificación viaria y de infraestructuras de transporte en general, y es coherente con los ciclos de vida de los principales componentes tecnológicos del sistema (Sorensen y Taylor, 2005; ITF, 2019). Dentro de ese horizonte, se distingue una fase inicial de implantación y rodaje (años 1 a 3), en la que el sistema opera con menor cobertura de usuarios y mayores costes relativos de gestión, y una fase de madurez (años 4 A-20), en la que el sistema alcanza su régimen de crucero en términos de demanda, ingresos y costes operativos. Esta distinción entre fases no es una convención formal, sino una condición metodológica relevante, dado que los sistemas de referencia europeos muestran de forma consistente que los primeros años de operación presentan tasas de cumplimiento inferiores y costes de *enforcement* proporcionalmente más elevados que los del período de madurez (Finger et al., 2019; Odeck y Bråthen, 2022).

El análisis se estructura en los apartados siguientes, que desarrollan secuencialmente los componentes metodológicos descritos en el capítulo anterior: la arquitectura del sistema propuesto, la caracterización de la demanda del corredor, la estimación de costes de implantación y operación, la estimación de ingresos potenciales, el análisis coste-beneficio, el análisis de sensibilidad y la evaluación de riesgos estructurales.

5.3 Arquitectura del sistema GNSS propuesto para el piloto

5.3.1 Principios de diseño y modelo operativo de referencia

Antes de proceder a cualquier estimación de costes, es imprescindible definir con precisión qué sistema se está costando. Esta advertencia, que puede parecer obvia, no lo es tanto en la práctica: una parte significativa de las estimaciones disponibles en la literatura sobre costes de sistemas GNSS adolece de falta de claridad sobre el alcance del sistema evaluado, lo que hace imposible comparar cifras entre estudios o transferirlas a nuevos contextos (Finger et al., 2019; ITF, 2019). El presente apartado responde a esa exigencia describiendo la arquitectura del sistema propuesto para el piloto del corredor A-2, componente a componente, con referencia explícita a los modelos internacionales de los que se extrae la inspiración y señalando en qué puntos el diseño se adapta a las condiciones específicas del caso español.

El modelo operativo de referencia principal es el LKW-Maut alemán, gestionado por Toll Collect GmbH, que representa el sistema de cobro por distancia basado en GNSS de mayor escala y mayor nivel de madurez operativa en Europa, con más de 15 años de funcionamiento continuado y una cobertura que se ha ido ampliando progresivamente desde los 12.000 kilómetros iniciales hasta los más de 52.000

kilómetros actuales de la red federal y algunas carreteras federales adicionales (Finger et al., 2019; Odeck y Bråthen, 2022). El sistema eslovaco, implantado en 2010 sobre la red de autopistas y carreteras de primer orden, es el segundo modelo de referencia, especialmente útil por su menor escala inicial y por las similitudes de punto de partida institucional con el contexto español (Zabicki, 2011; CETMO, 2012). Ambos sistemas comparten una arquitectura conceptual común, articulada en cuatro bloques funcionales que se describen en los subapartados siguientes, aunque difieren en algunos elementos de diseño que se señalarán en cada caso.

El diseño del sistema piloto para el corredor A-2 no replica mecánicamente ninguno de esos modelos, sino que adapta su arquitectura a tres condicionantes específicos del contexto español: el alcance limitado del piloto (un único corredor de 90 kilómetros), la restricción inicial al transporte pesado y la necesidad de integrarse con la infraestructura de telepeaje electrónico ya existente en España, en particular el sistema Vía-T, que opera sobre tecnología DSRC y está implantado en el conjunto de las autopistas de peaje de la red estatal y autonómica.

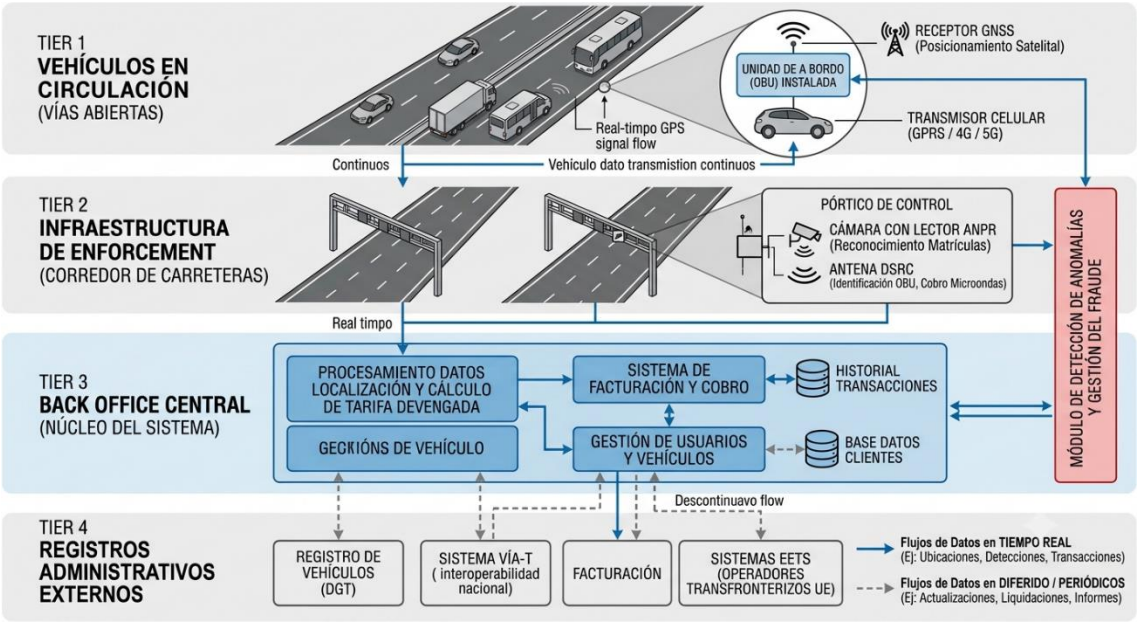


Figura 3. Arquitectura funcional del sistema GNSS propuesto para el piloto en el corredor A-2.

Fuente: Elaboración Propia con IA.

5.3.2 Bloque 1: Equipo a bordo (OBU)

La unidad a bordo (*On-Board Unit*, OBU) es el componente del sistema que tiene presencia directa en el vehículo y es, desde el punto de vista del usuario, el elemento más visible del sistema de cobro. Su función esencial es registrar la posición del vehículo mediante señal GNSS, determinar si el vehículo se encuentra circulando por un tramo sujeto a tarificación, calcular la distancia recorrida dentro de ese tramo y transmitir esa información al sistema central de gestión para su procesamiento y facturación.

En los sistemas más avanzados, la OBU puede realizar un preprocesamiento local del dato de posición, de modo que lo que se transmite al *back office* no es la posición

bruta del vehículo a cada instante, sino únicamente los eventos de entrada y salida en zonas tarifadas, lo que reduce significativamente el volumen de datos transmitidos y mejora la protección de la privacidad del usuario (Händel et al., 2014; European Commission, 2019).

Para el piloto del corredor A-2, se propone el uso de OBU de tercera generación, que integran receptor GNSS (compatible con GPS, Galileo y GLONASS para mayor robustez de señal), módulo de comunicación celular (4G/5G) para la transmisión de datos al *back office*, y módulo DSRC para la interacción con los pórticos de *enforcement* situados a lo largo del corredor.

Esta última característica, la compatibilidad DSRC, es especialmente relevante en el contexto español, porque permite que la OBU del sistema piloto sea interoperable con el sistema Vía-T ya existente, evitando la necesidad de instalar un dispositivo adicional en los vehículos que ya dispongan de *transponder* Vía-T y que operen también en las autopistas de peaje de la red concesionada. Esta integración no es solo una ventaja de conveniencia para el usuario, sino un factor con implicaciones directas sobre el coste de adopción del sistema y sobre la velocidad de escalado del número de usuarios registrados (Directiva (UE) 2019/520; CETMO, 2012).

El coste unitario de las OBU ha experimentado una reducción significativa en la última década como consecuencia de la madurez tecnológica del sector y de la difusión masiva de la telemática de flotas entre los operadores de transporte profesional. La literatura más reciente sitúa el coste unitario de dispositivos con las especificaciones descritas en un rango que oscila entre los 100 y los 300 euros por unidad, dependiendo del nivel de especificación técnica, del volumen del pedido y del grado de integración con los sistemas de gestión de flota del operador (Odeck y Bråthen, 2022; Händel et al., 2014).

Para el piloto del corredor A-2, la estimación del número de OBU necesarias se construye sobre la base del parque de vehículos pesados que utilizan regularmente el corredor, derivado de los datos de IMD disponibles en el MITMA (2023), con un supuesto de tasa de adopción inicial en el rango del 70% al 90% del parque objetivo durante los tres primeros años de operación, en línea con las tasas observadas en sistemas comparables en su fase inicial (Finger et al., 2019).

Es importante señalar que, a diferencia de los sistemas de cobro por uso aplicados a vehículos ligeros, donde el equipamiento del parque completo es un reto logístico y económico de considerable envergadura, el segmento de vehículos pesados presenta condiciones que facilitan enormemente la implantación de las OBU.

El transporte profesional de mercancías opera a través de empresas con flotas identificadas y registradas, sujetas a obligaciones de telemática y tacógrafo digital, y con interlocutores gremiales organizados con los que la Administración puede acordar procedimientos de equipamiento gradual. Esta diferencia estructural respecto al vehículo privado es uno de los argumentos más sólidos a favor de iniciar el piloto con vehículos pesados, y es la lógica que han seguido todos los sistemas europeos de referencia sin excepción.

5.3.3 Bloque 2: Sistema central de gestión (*back office*)

El *back office* es el núcleo operativo del sistema y, en términos de inversión, el componente de mayor peso en el CAPEX de un sistema GNSS, representando

típicamente entre el 30% y el 40% de la inversión total en sistemas de referencia (Finger et al., 2019). Su función es recibir, procesar y almacenar los datos de posicionamiento transmitidos por las OBU, calcular la tarifa devengada por cada vehículo en cada período de facturación, gestionar el cobro a los usuarios (directamente o a través de proveedores EETS), producir la información necesaria para el sistema de *enforcement* y generar los registros estadísticos y de auditoría que requieren tanto la gestión operativa del sistema como su supervisión institucional.

Para el piloto del corredor A-2, el *back office* se concibe con una arquitectura modular, articulada en tres módulos funcionales principales que operan de forma integrada, pero pueden desarrollarse y escalarse de forma independiente. El módulo de procesamiento de datos recibe las transmisiones de las OBU, verifica su integridad, procesa las coordenadas de posición para determinar si el vehículo ha circulado por tramos sujetos a tarificación y calcula la distancia sujeta a tarificación recorrida en cada tramo.

Este procesamiento puede realizarse en tiempo real (para aplicaciones de *enforcement* dinámico) o en diferido (para la facturación periódica), y los sistemas de referencia combinan habitualmente ambas modalidades. El módulo de facturación y cobro genera los cargos individuales a partir de los datos procesados, aplica las tarifas correspondientes según la categoría del vehículo y el tramo circulado, y gestiona el proceso de cobro mediante domiciliación bancaria, tarjeta de crédito o prepago, en función del perfil del usuario.

Este módulo incluye también la gestión de reclamaciones y las interfaces con los proveedores EETS para los vehículos extranjeros o de operadores que utilizan un intermediario de pago. El módulo de gestión de usuarios y vehículos mantiene el registro de los vehículos habilitados para circular por el corredor, gestiona las altas y bajas, verifica la validez de los contratos de servicio y cruza la información con el Registro de Vehículos de la DGT para la identificación de vehículos no registrados en el sistema, que constituyen la principal fuente de impago en sistemas sin barrera física de cobro (Directiva (UE) 2019/520; Jordán et al., 2003).

La decisión sobre si el *back office* del piloto debe gestionarse de forma directa por la Administración o externalizarse a un operador privado especializado tiene implicaciones relevantes tanto sobre el coste del sistema como sobre su viabilidad institucional. La comparación europea es ilustrativa al respecto.

En el caso alemán, la decisión de crear Toll Collect como una sociedad de gestión especializada con participación privada respondió a la necesidad de disponer de capacidad operativa que la Administración federal no tenía internamente, pero introdujo complejidades contractuales y de gobernanza que generaron problemas significativos en la fase de implantación y en los años siguientes (Finger et al., 2019).

El caso eslovaco, de menor escala, optó por una externalización más completa del sistema operativo, con resultados operativos satisfactorios, pero con una mayor dependencia del proveedor privado. Para un piloto de la escala del corredor A-2, la opción más coherente con el contexto institucional español sería una externalización total o cuasi-total del *back office* durante la fase inicial, con un contrato de servicio plurianual que incluya estándares de rendimiento, cláusulas de auditabilidad y condiciones de portabilidad del sistema para facilitar una eventual transición futura

hacia una gestión más directa o hacia un sistema de mayor escala (CNMC, 2021; ITF, 2019).

5.3.4 Bloque 3: Infraestructura de *enforcement*

El *enforcement* es la pieza del sistema que garantiza su credibilidad operativa y, en última instancia, su viabilidad financiera. Un sistema de cobro electrónico sin barrera física solo funciona si los usuarios tienen incentivos suficientes para cumplir voluntariamente con sus obligaciones de pago, y esos incentivos dependen en gran medida de la probabilidad percibida de ser detectado y sancionado en caso de incumplimiento. La literatura es inequívoca en este punto: los sistemas con tasas de cumplimiento elevadas, superiores al 95%, combinan una arquitectura de OBU y *back office* robusta con una infraestructura de control físico distribuida a lo largo del corredor y con mecanismos de sanción efectivos y expeditos (Jordán et al., 2003; Odeck y Bråthen, 2022).

Para el piloto del corredor A-2, la infraestructura de *enforcement* se articula en torno a pórticos de control distribuidos a lo largo del tramo tarifado, equipados con dos tecnologías complementarias que actúan de forma simultánea. La primera es el reconocimiento automático de matrículas (ANPR), que permite identificar todos los vehículos que pasan por el pórtico con independencia de que dispongan o no de OBU, capturando la matrícula con cámaras de alta resolución y contrastándola en tiempo real o en diferido con el registro de usuarios del *back office*.

La segunda es la comunicación DSRC de corto alcance, que permite al pórtico interrogar a las OBU de los vehículos en tránsito para verificar que están operativas, correctamente registradas y generando datos de localización coherentes con la circulación por el corredor (Kapsch, 2013; Lee et al., 2008).

La combinación de ANPR y DSRC en cada pórtico crea un sistema de verificación cruzada que resulta significativamente más robusto que cualquiera de las dos tecnologías por separado. El ANPR por sí solo no puede verificar si la OBU está funcionando correctamente, solo detectar su ausencia total; el DSRC por sí solo no puede detectar a los vehículos que hayan manipulado o retirado la OBU, pero continúen circulando.

La combinación de ambos, cruzada con los datos de posicionamiento del *back office*, permite identificar con alta precisión los tres tipos principales de incumplimiento: vehículos sin OBU, vehículos con OBU inoperativa o manipulada, y vehículos con OBU activa, pero cuyo patrón de transmisión presenta anomalías que sugieren intentos de evasión (Jordán et al., 2003; Händel et al., 2014).

En cuanto a la densidad de pórticos, la literatura de referencia para corredores de alta densidad de tráfico pesado recomienda una distancia entre pórticos de entre 20 y 40 kilómetros, aunque ese rango debe ajustarse a las características específicas del corredor, incluyendo la existencia de accesos y salidas intermedias, la presencia de áreas de servicio y la topografía del trazado (Jordán et al., 2003; Kapsch, 2013).

Para el tramo de 90 kilómetros del corredor A-2, una distribución inicial de 4 a 5 pórticos de control, situados en los puntos estratégicos del trazado (entradas y salidas principales, nudo con la A-3 y pasos de especial concentración de tráfico pesado), ofrecería una cobertura de *enforcement* suficiente para la fase piloto. Esta densidad es inferior a la de sistemas maduros como el alemán, en el que los pórticos de control

tienen una mayor presencia relativa, pero es coherente con el carácter exploratorio del piloto y con la necesidad de contener los costes de la infraestructura física en una primera fase. En fases de ampliación o de escalado del sistema, la densidad podría incrementarse a medida que la experiencia operativa permita ajustar la estrategia de *enforcement* a los patrones de incumplimiento observados.

La sanción del impago requiere, además de la detección, una arquitectura legal y administrativa que permita trasladar el expediente sancionador desde el sistema de *enforcement* hasta la notificación al titular del vehículo y la exigencia del pago o la imposición de la multa.

Este elemento, que en los sistemas europeos maduros opera de forma casi automatizada a través de protocolos de intercambio de información con los registros de vehículos nacionales y europeos (Directiva (UE) 2019/520), es en el contexto español uno de los flancos más débiles del sistema, dado que España no dispone todavía de una arquitectura nacional de gestión del impago en sistemas sin barrera física equivalente a la de Alemania, Austria o Portugal. Su desarrollo es, por tanto, una condición necesaria para la viabilidad del piloto y no un complemento opcional.

5.3.5 Bloque 4: Integración con registros administrativos y con el marco EETS

El cuarto bloque funcional de la arquitectura del sistema es el conjunto de integraciones con registros externos y con el marco europeo de interoperabilidad. Estas integraciones no son accesorias, sino constitutivas del sistema: sin ellas, el *back office* no puede identificar a los vehículos en incumplimiento, no puede gestionar el cobro a usuarios extranjeros ni a operadores que utilizan proveedores EETS, y no puede generar los datos estadísticos necesarios para la supervisión del sistema.

La primera y más urgente de esas integraciones es la conexión con el Registro de Vehículos de la Dirección General de Tráfico (DGT). Esta conexión permite al sistema de *enforcement* contrastar la matrícula de cualquier vehículo detectado en los pórticos con la base de datos de titulares de vehículos, identificar al titular responsable en caso de incumplimiento e iniciar el procedimiento sancionador. En España, la DGT dispone ya de protocolos de intercambio de información con otros sistemas de gestión viaria y con registros europeos en el marco de la Directiva (UE) 2019/520, por lo que la integración técnica con el sistema del piloto no debería representar un obstáculo insalvable, aunque sí requiere acuerdos específicos de acceso y un protocolo de tratamiento de datos conforme al Reglamento General de Protección de Datos (RGPD).

La segunda integración relevante es con el sistema Vía-T, que constituye la plataforma de telepeaje electrónico ya desplegada en la red de autopistas de peaje española. Dado que el sistema Vía-T opera sobre tecnología DSRC, compatible con los pórticos de *enforcement* propuestos para el piloto, sería técnicamente posible aprovechar parte de la infraestructura existente de Vía-T para facilitar la adopción por parte de los operadores de transporte que ya disponen de *transponder* activo. Esta integración tiene un valor estratégico importante: reduce la fricción de adopción del sistema para los usuarios más relevantes (el transporte pesado profesional, que es el segmento objetivo del piloto) y aprovecha una inversión pública y privada ya realizada, en lugar de duplicarla. Es, en definitiva, la forma más eficiente de construir sobre lo que ya existe, que es precisamente lo que aconsejan los estudios comparados sobre

transición hacia sistemas de cobro más avanzados (CETMO, 2012; Directiva (UE) 2019/520).

La tercera integración, de carácter más prospectivo, pero igualmente necesaria para garantizar la viabilidad del sistema a largo plazo, es la alineación con el marco del Servicio Europeo de Telepeaje Electrónico (EETS), regulado por la Directiva (UE) 2019/520. El EETS establece el derecho de los usuarios a acceder a todos los sistemas de cobro de la Unión Europea mediante un único contrato y dispositivo, a través de proveedores de servicio registrados en el marco europeo.

Para el corredor A-2, la alineación con el EETS implica que el operador del sistema debe registrarse como entidad cobradora del servicio europeo y definir sus condiciones de acceso a los proveedores EETS, de modo que los vehículos extranjeros que circulen por el corredor puedan pagar la tarifa a través de su proveedor habitual sin necesidad de contratar directamente con el operador del piloto. Esta integración es especialmente relevante dado el peso del tráfico internacional en el corredor A-2, y su ausencia comprometería tanto la equidad del sistema (que resultaría más gravoso para los vehículos nacionales que para los extranjeros) como su recaudación potencial.

Tabla 10: Síntesis de los componentes del sistema GNSS propuesto para el piloto en el corredor A-2.

Fuente: Elaboración Propia.

Bloque funcional	Componentes principales	Tecnología de soporte	Modelo de referencia internacional	Observaciones específicas para el caso español
Bloque 1	Equipo a bordo	OBU GNSS + DSRC + 4G/5G	LKW-Maut (Alemania) y sistema eslovaco	Posible integración con Vía-T.
Bloque 2	Back office	Plataforma de procesamiento, facturación y gestión de usuarios	Toll Collect GmbH (Alemania)	Externalización recomendada durante la fase inicial de implantación.
Bloque 3	Enforcement	Pórticos ANPR + DSRC; 4–5 puntos de control en el corredor	Sistemas alemán, austriaco y eslovaco	Conexión con la DGT necesaria para la tramitación de sanciones.
Bloque 4	Integración administrativa y europea	DGT, Vía-T y EETS	Directiva (UE) 2019/520	Condición necesaria para garantizar la viabilidad y la equidad del sistema.

5.4 Caracterización de la demanda del corredor

5.4.1 Fuentes de datos y procedimiento de obtención

La caracterización de la demanda del corredor A-2 se construye a partir de los datos de intensidades medias diarias (IMD) publicados por el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible a través de su Plan Nacional de Aforos, que desde 1960 produce anualmente la estimación de tráfico en el conjunto de la Red de Carreteras del Estado (MITMA, 2023). Este plan proporciona, para cada estación de aforo de la red, la IMD total de vehículos y la IMD de vehículos pesados (IMDP), expresada como porcentaje del tráfico total, lo que permite distinguir entre los dos segmentos relevantes para el análisis: los vehículos ligeros, de uso privado o semiprivado, y los vehículos pesados

de transporte de mercancías, que constituyen el segmento objetivo del piloto en su primera fase.

Los datos de aforo se consultan a través del visor web de tráfico de la Dirección General de Carreteras, accesible en la plataforma de Mapas de Tráfico del ministerio, que integra el Sistema de Información Geográfica de Tráfico y permite obtener los valores de IMD e IMDP por tramo y estación con resolución suficiente para la segmentación del corredor adoptada en este análisis. Es importante señalar que los datos de IMD publicados representan medias anuales y, por tanto, incorporan tanto la variabilidad estacional (con picos en periodos vacacionales para el tráfico ligero) como la variabilidad semanal (con concentración del tráfico pesado en días laborables). Para el análisis de viabilidad del piloto, esta distinción es relevante, por cuanto la composición de la demanda varía de forma apreciable entre días laborables y festivos, y la estimación de ingresos del sistema depende en mayor medida del tráfico en días laborables, que es cuando el peso del transporte de mercancías es proporcionalmente más elevado.

5.4.2 Segmentación del corredor y datos de IMD por tramo

El corredor de 90 kilómetros analizado no presenta una demanda uniforme a lo largo de su extensión. Por el contrario, exhibe un gradiente decreciente de intensidad de oeste a este, que refleja la progresiva pérdida de tráfico de carácter metropolitano y periurbano a medida que el corredor se aleja del área de influencia directa de Madrid. Esta variación en la intensidad y en la composición del tráfico es, en sí misma, un dato analíticamente relevante, por cuanto implica que el impacto de la señal precio sobre la demanda no será homogéneo a lo largo del tramo, sino que afectará de forma diferenciada a los distintos segmentos del corredor y a los distintos perfiles de usuario que los utilizan.

Con el fin de capturar esta heterogeneidad sin perder la manejabilidad del análisis, el corredor se segmenta en tres subtramos homogéneos, definidos por sus características de demanda y composición de tráfico. Esta segmentación es coherente con el procedimiento habitual en los estudios de evaluación de corredores interurbanos de la Red de Carreteras del Estado (MITMA, 2023) y con las prácticas metodológicas de la literatura de referencia en evaluación de sistemas de tarificación viaria (Sorensen y Taylor, 2005; European Commission, 2019).

El **Subtramo 1** abarca desde el nudo con la M-50 (aproximadamente el punto kilométrico 15 de la A-2) hasta el área de Torrejón de Ardoz y el acceso a Alcalá de Henares, con una longitud aproximada de 20 kilómetros. Este segmento concentra los mayores valores de IMD de todo el corredor, dado que combina tráfico de acceso metropolitano con los flujos logísticos del corredor del Henares en su tramo más próximo a la capital.

Los datos del Plan Nacional de Aforos sitúan la IMD total de este subtramo en torno a los 75.000 vehículos por día, con una proporción de vehículos pesados aproximada del 10%, lo que se traduce en una IMDP de aproximadamente 7.500 vehículos pesados diarios (MITMA, 2023). La menor proporción relativa de tráfico pesado en este subtramo, comparada con los tramos más orientales, responde a la mayor presencia de vehículos ligeros de acceso al área metropolitana madrileña, que en este segmento del corredor tienen un peso específico elevado.

El **Subtramo 2** discurre desde el área de Alcalá de Henares hasta la circunvalación de Guadalajara, con una extensión de aproximadamente 25 kilómetros. Este segmento es el de mayor densidad logística del corredor, dado que concentra los accesos a los principales polígonos industriales y plataformas de distribución del Corredor del Henares, que agrupa una de las mayores concentraciones de actividad logística de la Península Ibérica.

Los datos disponibles para este subtramo son especialmente sólidos: el Boletín Oficial del Estado recoge, en el contexto de la resolución sobre la bonificación de la R-2 en el entorno de Guadalajara, que la A-2 presenta en los tramos comprendidos entre los puntos kilométricos 43 y 53 una IMD de 39.701 vehículos diarios, con una proporción del 20% de vehículos pesados (BOE, 2023).

Esto equivale a una IMDP de aproximadamente 7.940 vehículos pesados diarios, convirtiéndolo en el subtramo con mayor intensidad absoluta de tráfico pesado de los tres considerados. Esta cifra no es casual: el Corredor del Henares es el principal eje de acceso de los flujos de distribución regional e interregional de mercancías hacia Madrid y hacia los mercados del noreste peninsular, y su perfil de tráfico refleja fielmente esa función estructural en la cadena logística española.

El **Subtramo 3** se extiende desde la circunvalación de Guadalajara hasta el nudo de Ledanca, con una longitud de 30 kilómetros. En este segmento, el corredor pierde el grueso del tráfico de acceso metropolitano y adopta un perfil netamente interurbano e interregional.

La IMD total desciende de forma apreciable respecto a los subtramos anteriores, situándose en el entorno de los 22.000 vehículos diarios, mientras que la proporción de tráfico pesado se eleva hasta aproximadamente el 22%, lo que equivale a una IMDP de unos 4.840 vehículos pesados diarios (MITMA, 2023). El mayor peso relativo del transporte pesado en este segmento refleja que el tráfico que persiste más allá de Guadalajara tiene un perfil predominantemente profesional: distribución interregional de mercancías, transporte internacional y tráfico de tránsito hacia Aragón, Cataluña y los pasos pirenaicos.

La Tabla 11 sintetiza los datos de IMD por subtramo y categoría de vehículo, que constituyen el punto de partida del cálculo de la demanda base del corredor.

Tabla 11: Datos de intensidad media diaria (IMD) por subtramo y categoría de vehículo. Corredor A-2, M-50 a Ledanca.

Fuente: Elaboración Propia.

Subtramo	Longitud (km)	IMD total (veh/día)	Proporción pesados (%)	IMDP pesados (veh/día)	IMD ligeros (veh/día)
Subtramo 1. M-50 – Torrejón-Alcalá	20	75.000	10 %	7.500	67.500
Subtramo 2. Alcalá – Guadalajara	25	39.701	20 %	7.940	31.761
Subtramo 3. Guadalajara – Ledanca	30	22.000	22 %	4.840	17.160

Subtramo	Longitud (km)	IMD total (veh/día)	Proporción pesados (%)	IMDP pesados (veh/día)	IMD ligeros (veh/día)
Total / Media ponderada	**75**	**42.567**	**16,4 %**	**6.978**	**35.589**

MITMA (2023); BOE (2023).

Nota: Los datos correspondientes a los Subtramos 1 y 3 son estimaciones derivadas del Plan Nacional de Aforos del MITMA, mientras que el dato del Subtramo 2 corresponde al valor oficial recogido en el BOE en el contexto de la resolución sobre la R-2 de enero de 2023.

5.4.3 Cálculo de la demanda base: vehículos-kilómetro anuales

A partir de los datos de IMD por subtramo y categoría, se calcula el volumen anual de vehículos-kilómetro (veh-km), que es la unidad de medida de la demanda utilizada en los sistemas de tarificación por distancia y en los modelos de evaluación de viabilidad económico-financiera de este tipo de proyectos. La fórmula de cálculo es la siguiente:

$$\text{Veh-km anuales} = \text{IMD (veh/día)} \times \text{longitud del subtramo (km)} \times 365 \text{ días}$$

Este cálculo se realiza de forma independiente para cada subtramo y para cada categoría de vehículo (ligeros y pesados), y los resultados se agregan posteriormente para obtener el total del corredor. Los resultados se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12: Vehículos-kilómetro anuales por subtramo y categoría de vehículo. Demanda base (año 0 del análisis).

Fuente: Elaboración Propia.

Subtramo	Longitud (km)	Veh-km anuales pesados (millones)	Veh-km anuales ligeros (millones)	Veh-km anuales totales (millones)
Subtramo 1	20	54,75 (7.500 × 365 × 20)	492,75 (67.500 × 365 × 20)	547,50
Subtramo 2	25	72,54 (7.940 × 365 × 25)	290,19 (31.761 × 365 × 25)	362,73
Subtramo 3	30	53,00 (4.840 × 365 × 30)	188,00 (17.160 × 365 × 30)	241,00
Total	**75**	**180,29**	**970,94**	**1.151,23**

Los datos de la Tabla 12 revelan dos conclusiones de relevancia analítica directa para el diseño del piloto. La primera es que el corredor A-2, en el tramo analizado, genera más de 1.150 millones de vehículos-kilómetro anuales en su conjunto, lo que lo sitúa entre los corredores de mayor intensidad de uso de la Red de Carreteras del Estado.

La segunda, y más relevante para el piloto, es que los vehículos pesados representan aproximadamente 180 millones de vehículos-kilómetro anuales, equivalentes al 15,7% del total. Esta cifra es el denominador fundamental del análisis de ingresos del piloto, ya que es la base sobre la que se aplican los escenarios tarifarios para estimar la recaudación potencial del sistema en su primera fase, circunscrita al transporte pesado.

5.4.4 Proyección de la demanda a lo largo del horizonte de análisis

El análisis de viabilidad se realiza sobre un horizonte de 20 años, por lo que es necesario proyectar la demanda base a lo largo de ese período. Esta proyección no puede hacerse con un único escenario de crecimiento, dado que la demanda de tráfico en corredores interurbanos está sujeta a incertidumbres de largo plazo que la literatura identifica de forma consistente: la evolución del precio del petróleo y de los costes de transporte por carretera, la dinámica del comercio interregional, el avance de la descarbonización del transporte, los cambios en los modelos de distribución logística y, en el caso específico de los vehículos ligeros, la posible transferencia modal hacia el ferrocarril en el corredor Madrid-Zaragoza (Small y Verhoef, 2007; ITF, 2019).

Cada uno de estos factores puede influir en la demanda en sentido positivo o negativo, y su interacción produce una distribución de resultados posibles que el análisis debe capturar mediante escenarios.

Se construyen tres escenarios de crecimiento de la demanda, que se aplican de forma separada a los vehículos pesados y a los ligeros, dado que sus determinantes estructurales son distintos. El escenario de crecimiento se define por la tasa anual acumulativa aplicada a la demanda base durante los 20 años del horizonte de análisis.

El **escenario de crecimiento bajo** aplica una tasa de crecimiento anual del 0,5% para los vehículos pesados y del 0,3% para los ligeros. Este escenario refleja un contexto en el que el avance de la descarbonización del transporte, la electrificación progresiva del parque de vehículos pesados y los cambios en los modelos de distribución logística (con mayor uso del ferrocarril en corredores de larga distancia) moderan el crecimiento del tráfico por carretera.

Es el escenario más prudente desde el punto de vista de la demanda, y el más coherente con los objetivos de política de transporte europeos recogidos en el Libro Blanco de la Comisión Europea (European Commission, 2011) y en la orientación general de la Directiva (UE) 2022/362 hacia la internalización de costes externos.

El **escenario de crecimiento central** aplica tasas del 1,5% anual para pesados y del 1,0% para ligeros, en línea con las tendencias históricas del corredor en el período 2014-2019, que fue el último ciclo de crecimiento sostenido del tráfico interurbano antes de la interrupción provocada por la pandemia. Este escenario asume que la economía española mantiene un crecimiento moderado, que el comercio interregional e internacional del corredor noreste se mantiene dinámico y que no se producen cambios estructurales en el reparto modal dentro del horizonte del análisis. Es el escenario que sirve de referencia principal para el análisis coste-beneficio.

El **escenario de crecimiento alto** aplica tasas del 2,5% anual para pesados y del 1,8% para ligeros, que reflejarían una expansión sostenida de la actividad logística en el Corredor del Henares, consistente con las previsiones de crecimiento de la demanda de servicios de distribución asociadas al comercio electrónico y a la relocalización de actividades industriales en el entorno metropolitano de Madrid.

Este escenario es el más optimista en términos de demanda, y produce los valores de recaudación potencial más elevados, aunque también implica mayores presiones sobre la capacidad del corredor y mayores riesgos de congestión en ausencia de señal precio que corrija la demanda.

Tabla 13: Proyección de la demanda de vehículos pesados al año 20 del horizonte de análisis, por escenario de crecimiento.

Fuente: Elaboración Propia.

Escenario	Tasa de crecimiento anual pesados	Veh-km pesados año 0 (millones)	Veh-km pesados año 20 (millones)
Escenario bajo	0,5 %	180,29	199,3
Escenario base	1,5 %	180,29	242,5
Escenario alto	2,5 %	180,29	295,3

La fórmula aplicada es la siguiente:

$$VeH - km_{\text{año } n} = Veh - km_{\text{año } 0} \times (1 + tasa)^n$$

5.4.5 Estimación del efecto de la señal precio sobre la demanda: elasticidades

La introducción del pago por uso modifica, en principio, el comportamiento de los usuarios al generar una señal precio que hasta ese momento no existía en el uso del corredor. La magnitud de esa modificación depende de la elasticidad precio de la demanda, que mide la variación porcentual en la cantidad demandada ante una variación del 1% en el precio.

La estimación de esta elasticidad es uno de los elementos metodológicamente más complejos del análisis, porque no existen datos específicos para el corredor A-2 en condiciones de pago por uso, y los valores de la literatura corresponden a contextos nacionales con características que no son directamente replicables al caso español.

Con esa advertencia, la literatura internacional ofrece rangos de referencia suficientemente robustos para construir escenarios de demanda con señal precio que sean analíticamente útiles. Para los vehículos pesados, la elasticidad precio de corto plazo se sitúa típicamente entre -0,10 y -0,25 en corredores donde la señal precio corresponde a tarifas moderadas y no existen alternativas de itinerario de calidad comparable al corredor tarifado (Small y Verhoef, 2007; Santos, 2017).

Este rango refleja el hecho de que el transporte profesional de mercancías tiene una demanda relativamente rígida a corto plazo, dado que los contratos de distribución y las obligaciones de servicio al cliente limitan la capacidad de los transportistas para modificar rutas o diferir viajes ante variaciones de coste moderadas. En corredores donde existe una alternativa viable, la elasticidad puede ser algo mayor en valor absoluto, pudiendo alcanzar valores de hasta -0,30 a -0,35 si la tarifa es relativamente elevada y la alternativa convencional es percibida como suficientemente atractiva en términos de tiempo de viaje (Odeck y Bråthen, 2022; European Commission, 2019).

A largo plazo, los valores de elasticidad tienden a ser más elevados, situándose entre -0,30 y -0,60, a medida que los transportistas pueden ajustar sus contratos, sus rutas y sus modelos de distribución para minimizar el impacto de la tarifa.

Para los vehículos ligeros, las elasticidades son, en general, más elevadas en valor absoluto que para los pesados, especialmente en corredores donde existe una alternativa gratuita accesible. La literatura sitúa los rangos de elasticidad de corto plazo para vehículos ligeros entre -0,20 y -0,50, con valores más altos para los desplazamientos no obligatorios (ocio, turismo, segunda residencia) y más bajos para los desplazamientos por motivo de trabajo (Eliasson, 2014; Schuitema et al., 2010; Sorensen y Taylor, 2005).

Los escenarios de demanda con señal precio se construyen aplicando los valores de elasticidad descritos a un nivel tarifario de referencia, que en este apartado se expresa en términos de coste medio por desplazamiento en el corredor completo (75 km). Dado que los escenarios tarifarios se desarrollan en detalle en el apartado 5.6, en este punto basta con señalar que los tres niveles tarifarios utilizados producen, al aplicar los rangos de elasticidad correspondientes, tres escenarios de demanda con señal precio para cada categoría de vehículo.

La combinación de estos escenarios de demanda con los de crecimiento del tráfico base produce la matriz de demanda que alimenta el análisis de ingresos.

Tabla 14: Escenarios de demanda de vehículos pesados con señal precio, sobre el valor de demanda base del año 0.

Fuente: Elaboración Propia.

Escenario de elasticidad	Elasticidad precio aplicada	Reducción de demanda estimada (%)	Veh-km pesados con señal precio (millones)
Elasticidad baja	-0,10	4–6 %	169–173
Elasticidad base	-0,20	8–12 %	159–166
Elasticidad alta	-0,35	14–20 %	144–155

Nota: Los rangos de reducción de demanda se calculan aplicando la elasticidad al nivel tarifario de referencia del escenario central (véase apartado 5.6). Las cifras de veh-km resultantes corresponden al límite inferior y superior del intervalo de confianza de cada escenario.

Es importante señalar que la aplicación de elasticidades de la literatura a un contexto específico como el corredor A-2 introduce inevitablemente incertidumbre, por tres razones principales. La primera es que las elasticidades disponibles han sido estimadas en países y corredores con características institucionales, de accesibilidad a la red alternativa y de composición del parque vehicular distintas de las españolas. La segunda es que la introducción del pago por uso en un corredor previamente gratuito puede producir reacciones de demanda más intensas en el período inicial (efecto novedad negativa o rechazo inicial) que se moderan a medida que los usuarios se adaptan al nuevo sistema, lo que hace que la elasticidad de corto plazo sea más elevada que la de largo plazo en el período de consolidación del sistema.

La tercera es que los datos disponibles para el corredor no permiten estimar de forma precisa qué proporción del tráfico pesado corresponde a viajes de larga distancia con

escasa sensibilidad a la tarifa y qué proporción corresponde a distribución local o regional con mayor disposición a utilizar otras alternativas.

Por estas razones, el análisis de sensibilidad del apartado 5.8 explora de forma específica el impacto de distintas hipótesis de elasticidad sobre los resultados del análisis coste-beneficio, de modo que el lector pueda identificar con precisión bajo qué combinaciones de elasticidad y tarifa el sistema resulta viable y bajo cuáles no.

5.4.6 Análisis del riesgo de desvío de tráfico hacia la R-2

El riesgo de desvío de tráfico en el corredor A-2 merece un tratamiento específico, por dos razones. La primera es su relevancia analítica: el desvío no es simplemente una pérdida de ingresos para el sistema de cobro, sino un fenómeno con implicaciones sobre la seguridad vial, la distribución de la congestión entre infraestructuras y la equidad del sistema. La segunda razón es su relevancia política: el argumento del desvío hacia carreteras secundarias es uno de los más frecuentemente invocados en el debate español contra el pago por uso, y su tratamiento riguroso es condición necesaria para que los resultados del trabajo sean útiles en ese debate.

Sin embargo, el corredor A-2 presenta una singularidad estructural que modifica de forma sustancial los términos habituales de este análisis. La alternativa de alta capacidad disponible en el tramo Madrid–Guadalajara no es una carretera convencional gratuita, sino la autopista radial R-2, que discurre en paralelo a la A-2 bajo régimen de peaje concesional desde la M-40 hasta la ciudad de Guadalajara.

La R-2 fue rescatada por el Estado como consecuencia de una demanda real muy inferior a las previsiones originales de la concesión, lo que implica que opera actualmente con un nivel de ocupación significativamente por debajo de su capacidad de diseño. Esta circunstancia transforma la naturaleza del riesgo de desvío: en el corredor A-2, a diferencia de la mayoría de los corredores analizados en la literatura comparada, el usuario que quisiera evitar la tarificación no dispone de una alternativa gratuita de calidad equivalente, sino únicamente de una alternativa igualmente tarifada. El desvío, por tanto, no respondería a la lógica de elección entre pagar y no pagar, sino a la comparación entre dos estructuras de coste distintas bajo dos regímenes de gestión diferentes.

Así pues, la evaluación de este riesgo requiere considerar cuatro factores de forma conjunta:

El primero es la calidad y capacidad de la red alternativa. La R-2 es una autopista de alta capacidad con características geométricas y de trazado comparables a las de la A-2, lo que elimina el diferencial de tiempo de viaje y comodidad que, en otros corredores, actúa como desincentivo estructural al desvío. A diferencia de lo que ocurriría si la alternativa fuera una carretera convencional con travesías urbanas y velocidad comercial limitada, la R-2 ofrece condiciones de circulación similares a las de la A-2 para la mayor parte del tramo analizado.

Esto implica que el factor disuasor del desvío no reside en la calidad diferencial de la infraestructura alternativa, sino exclusivamente en la comparación entre los niveles tarifarios de ambas vías.

El segundo factor es el perfil del tráfico que podría redistribuirse. Para los vehículos pesados, cuya demanda se concentra en la minimización del coste total del viaje, la

posibilidad de desviarse hacia la R-2 solo resultaría racional si su tarifa fuera significativamente inferior a la de la A-2, dado que el coste del tiempo es un componente dominante de la estructura de costes del transportista y el tiempo de viaje en ambas vías es comparable (Odeck y Bråthen, 2022; Santos, 2017). Para los vehículos ligeros, la heterogeneidad es mayor: los usuarios de alta frecuencia con mayor sensibilidad a la tarifa acumulada presentarían una propensión más elevada a evaluar la alternativa de la R-2, mientras que los usuarios ocasionales tenderían a permanecer en la vía que ya conocen, independientemente del diferencial tarifario (Schade y Schlag, 2003; Eliasson, 2014). En ambos casos, la ausencia de una alternativa gratuita comprime significativamente el potencial de desvío respecto a lo que cabría esperar en un corredor con red convencional paralela de acceso libre.

El tercer factor es el nivel tarifario relativo entre las dos infraestructuras. A diferencia del esquema convencional en que el desvío se produce cuando el ahorro en peaje supera el coste del tiempo adicional en la ruta alternativa, en el corredor A-2 el umbral de desvío depende del diferencial entre la tarifa del piloto y la tarifa vigente en la R-2. Si el diseño tarifario del piloto fija un nivel superior al de la R-2, una fracción de los usuarios podría optar por redistribuirse hacia esta última, especialmente si la diferencia es percibida como significativa.

Si, por el contrario, ambas tarifas se sitúan en niveles comparables o si la tarifa de la A-2 resulta más competitiva, el incentivo al desvío sería prácticamente nulo. Esto introduce una dimensión de política tarifaria coordinada que no está presente en los análisis de desvío de los corredores con alternativa gratuita: la gestión del riesgo de redistribución entre la A-2 y la R-2 es, en última instancia, una cuestión de diseño tarifario relativo entre dos infraestructuras de titularidad estatal, lo que abre la posibilidad de una coordinación activa por parte de la Administración.

El cuarto factor es la capacidad de absorción de la R-2. A diferencia de lo que ocurriría con una carretera convencional que ya opera en condiciones de saturación relativa, la R-2 dispone de capacidad sobrante significativa, consecuencia precisamente de la baja demanda que motivó su rescate concesional. Esta disponibilidad de capacidad implica que, en caso de producirse un desvío parcial desde la A-2, la R-2 podría absorberlo sin deterioro de las condiciones de circulación.

Sin embargo, esta misma circunstancia hace que el desvío, de producirse, no genere los efectos secundarios negativos sobre la red que habitualmente se invocan en el debate político, como la congestión de la red alternativa o el deterioro de la seguridad vial, dado que la R-2 es una infraestructura de alta capacidad diseñada para volúmenes de tráfico superiores a los que actualmente soporta (MITMA, 2023; CNMC, 2021).

En conjunto, la valoración cualitativa del riesgo de desvío en el corredor A-2 es que, en ausencia de una alternativa gratuita de alta capacidad, dicho riesgo es significativamente inferior al que cabría anticipar a partir de la literatura comparada general. Para los vehículos pesados, el diferencial tarifario entre ambas vías tendría que ser muy elevado para que el desvío resultara económicamente racional, y la rigidez a corto plazo de la demanda profesional de transporte de mercancías actúa como freno adicional. Para los vehículos ligeros, el riesgo es moderado y concentrado en los segmentos de alta frecuencia y mayor sensibilidad tarifaria, atenuado por la circunstancia de que la R-2 también cobra peaje. En ningún caso el desvío respondería a la lógica de elusión del pago, sino a una comparación de alternativas tarifadas, lo

que lo hace más predecible y susceptible de gestión mediante política de precios coordinada.

Esta conclusión es analíticamente relevante para el debate político español, donde el argumento del desvío hacia vías gratuitas se formula habitualmente sin distinción entre corredores con y sin alternativa libre de coste. El corredor A-2 es, precisamente por su singularidad, un caso que permite matizar ese argumento con rigor empírico. A efectos del análisis de sensibilidad, se incorporarán hipótesis de redistribución hacia la R-2 del 5%, el 10% y el 20% sobre la demanda de vehículos ligeros como variable de tensión sobre los escenarios de ingresos.

5.5 Estimación de costes de implantación: CAPEX

5.5.1 Estructura del modelo de costes de inversión

El análisis del CAPEX del piloto GNSS en el corredor A-2 constituye el núcleo de la respuesta a la PI-2. Determinar con la mayor precisión posible cuánto cuesta poner en marcha un sistema de cobro por uso basado en tecnología satelital en un corredor concreto es, precisamente, la pregunta que la literatura aplicada al caso español no ha respondido hasta la fecha, y a la que este trabajo trata de aproximarse mediante un enfoque de estimación por componentes, calibrado con los *benchmarks* internacionales disponibles y adaptado a las condiciones específicas del piloto.

Antes de entrar en los componentes individuales, conviene aclarar qué se entiende, a efectos de este análisis, por CAPEX del sistema. Se incluyen bajo esta categoría todos los desembolsos de inversión necesarios para poner el sistema en condiciones operativas, con independencia de si se realizan en un único momento o si se distribuyen a lo largo de la fase de implantación, que en el diseño del piloto se estima en dos años (año -1 y año 0 antes de la entrada en servicio).

No se incluyen en el CAPEX los costes recurrentes de operación y mantenimiento, que se tratan por separado en el apartado 5.5, ni los costes de renovación tecnológica que, dentro del horizonte de análisis de 20 años, serán necesarios para actualizar los componentes con ciclos de vida inferiores a ese período. Estos últimos se incorporan al modelo financiero como reinversiones intermedias en los años 7 y 14 del horizonte, en línea con las prácticas habituales en los sistemas de referencia europeos, donde los ciclos de renovación de las OBU y de los sistemas de back office se sitúan típicamente entre 7 y 10 años (Finger et al., 2019; Odeck y Bråthen, 2022).

El CAPEX total del sistema se descompone en cinco componentes, cuya estimación se realiza de forma independiente y cuya suma produce el coste total de inversión inicial. Los cinco componentes son: el sistema central de gestión (back office), los equipos a bordo (OBU), la infraestructura de *enforcement* (pórticos de control), la integración con registros administrativos y sistemas de cobro existentes, y los costes de puesta en marcha, pruebas y formación.

5.5.2 Componente 1: sistema central de gestión (back office)

El back office es, en términos de peso en el CAPEX total, el componente más relevante de cualquier sistema GNSS, y el que mayor variabilidad presenta entre los sistemas de referencia internacional, dado que su coste depende fuertemente de la escala de la red tarifada, del número de usuarios del sistema, del nivel de sofisticación de la

plataforma y del modelo de gobernanza elegido (externalización total, parcial o gestión directa). Para el sistema alemán LKW-Maut, el back office, gestionado por Toll Collect GmbH, representó aproximadamente un 35% del CAPEX total de implantación, en un sistema diseñado para una red inicial de más de 12.000 kilómetros y más de 700.000 vehículos registrados (Finger et al., 2019). El sistema eslovaco, de menor escala, presentó proporciones similares en términos relativos, aunque con costes absolutos significativamente inferiores por la menor extensión de la red y el menor volumen de usuarios (Zabicki, 2011; CETMO, 2012).

Para el piloto del corredor A-2, el back office debe diseñarse con dos condicionantes simultáneos y en cierta medida contrapuestos. Por un lado, la escala del piloto (un único corredor de 90 kilómetros, con aplicación inicial exclusiva al transporte pesado) permite utilizar una plataforma tecnológica significativamente más sencilla y menos costosa que la de un sistema nacional.

Por otro lado, el back office del piloto debe diseñarse con arquitectura escalable, de modo que, en caso de que los resultados sean favorables, pueda ampliarse a otros corredores o a la red estatal completa sin necesidad de reemplazarlo íntegramente. Esta condición de escalabilidad introduce un sobrecoste de diseño respecto a una plataforma mínimamente viable, pero es metodológicamente imprescindible si se quiere que el piloto tenga valor como precedente para una decisión de implantación más amplia.

Partiendo de esas consideraciones, la estimación del coste del back office para el piloto se construye en torno a sus módulos funcionales principales: la plataforma de procesamiento de datos de posicionamiento, el sistema de facturación y gestión de cobros, el módulo de gestión de usuarios y vehículos, los sistemas de comunicaciones entre las OBU y el centro de procesamiento, y la infraestructura de ciberseguridad y protección de datos exigida por el RGPD y las especificaciones del marco EETS.

La estimación paramétrica para cada uno de estos módulos, apoyada en los rangos de coste identificados en la literatura y ajustada al contexto del piloto, produce los valores que se recogen en la tabla de CAPEX al final de este apartado. El coste de desarrollo e implantación del back office para el piloto, asumiendo un modelo de externalización completa con un proveedor especializado (en línea con las recomendaciones de la metodología), se estima en un rango de entre 5 y 15 millones de euros, con un valor central de referencia de 10 millones de euros. Esta amplitud del rango refleja la incertidumbre derivada de la ausencia de datos específicos para el contexto español y de las diferencias entre proveedores en términos de nivel de personalización de la plataforma.

5.5.3 Componente 2: equipos a bordo (OBU)

La estimación del coste de los equipos a bordo requiere, antes que nada, determinar el tamaño del parque objetivo del piloto, es decir, el número de vehículos pesados que deberán equiparse con OBU para participar en el sistema. Este número no es idéntico al volumen de tráfico pesado que circula diariamente por el corredor, expresado en IMD, porque la IMD refleja el número de vehículos que pasan por un punto en un día promedio, incluyendo vehículos que repiten el recorrido con alta frecuencia. El parque objetivo es el número de vehículos únicos que utilizan el corredor de forma regular y que, por tanto, deben disponer de OBU para cumplir con las obligaciones del sistema.

Los datos de aforo del corredor A-2 en 2023 muestran, para las estaciones permanentes situadas entre los puntos kilométricos 14 y 98, valores de IMD de vehículos pesados que oscilan entre los 7.045 vehículos diarios en el aforo de Ledanca (pk 98) y los 20.456 en el aforo de Torrejón (pk 19), con una media simple de los 14 aforos disponibles de 13.295 vehículos pesados diarios (MITMA, 2023). Aplicando los factores de expansión habituales para pasar de IMD a parque de vehículos únicos, que en corredores de uso logístico regular se sitúan en un rango de entre 3 y 5 días de cobertura media por vehículo y semana para el transporte de mercancías (Händel et al., 2014; ITF, 2019), se obtiene una estimación del parque objetivo del piloto en un rango de entre 9.000 y 22.000 vehículos únicos de transporte pesado que utilizarían el corredor con una frecuencia suficiente para justificar la instalación de una OBU. Para el análisis de costes, se utiliza una estimación central de 15.000 vehículos, con variantes baja (9.000) y alta (22.000) que alimentan los escenarios correspondientes.

El coste unitario de las OBU con las especificaciones técnicas descritas en el apartado 5.2.2 (receptor GNSS multisistema, módulo 4G/5G y módulo DSRC) se sitúa, según las referencias más recientes de la literatura, en un rango de entre 100 y 300 euros por unidad, dependiendo del volumen del pedido, del nivel de integración con los sistemas de gestión de flota del operador y del fabricante seleccionado (Odeck y Bråthen, 2022; Händel et al., 2014).

Para el escenario bajo, se aplica un coste unitario de 120 euros, coherente con la hipótesis de un pedido de menor volumen, pero con aprovechamiento de economías de escala derivadas de la compatibilidad con dispositivos ya existentes en el mercado de telemática de flotas.

Para el escenario central, se aplica un coste de 200 euros por unidad, que representa el valor medio del rango de la literatura. Para el escenario alto, se aplica un coste de 300 euros por unidad, que recoge la posibilidad de que el dispositivo requiera un nivel de personalización técnica superior o que el volumen de pedido no permita aprovechar descuentos por escala.

A estos costes de adquisición se añade el coste de instalación y activación de cada dispositivo, que la literatura estima en un rango de entre 50 y 100 euros por unidad, incluyendo el desplazamiento del técnico de instalación, la configuración del dispositivo y la verificación de la conectividad con el back office (Finger et al., 2019). Aplicado al parque objetivo, el componente OBU produce los valores que se sintetizan en la tabla de CAPEX.

Es importante señalar que en el modelo financiero se asume que los costes de las OBU son sufragados íntegramente por la Administración gestora del sistema en la fase inicial del piloto, como incentivo a la adopción. Esta hipótesis es conservadora desde el punto de vista del CAPEX, pero maximiza la tasa de adopción inicial y es coherente con el patrón observado en los sistemas europeos durante sus fases de lanzamiento (CETMO, 2012; Kapsch, 2013).

En fases posteriores de escalado, o en caso de extensión del sistema a la totalidad de la red, sería razonable transferir el coste de las OBU a los operadores de transporte, reduciendo significativamente la carga de inversión para la Administración.

5.5.4 Componente 3: infraestructura de *enforcement* (pórticos de control)

Los pórticos de control son el componente del CAPEX con mayor presencia física en el corredor y, por tanto, el que mayor visibilidad tiene en el debate público sobre el pago por uso. Su coste depende fundamentalmente de tres variables: el número de pórticos instalados, el nivel de equipamiento de cada pórtico (combinación de tecnologías ANPR y DSRC, iluminación, sistemas de comunicaciones y alimentación eléctrica) y las condiciones de ejecución de la obra civil de fundación y montaje.

Para el corredor A-2 de 90 kilómetros, el diseño del piloto contempla la instalación de entre 4 y 6 pórticos de control, distribuidos de forma que se garantice una cobertura de *enforcement* suficiente y estratégicamente eficaz. Los criterios de ubicación derivan de la literatura sobre *enforcement* en sistemas sin barrera física: los pórticos deben situarse en puntos que maximicen la probabilidad de detectar a los vehículos en incumplimiento y que, al mismo tiempo, sean difícilmente predecibles y evitables por parte de esos vehículos (Jordán et al., 2003; Kapsch, 2013).

En el caso del corredor A-2, los puntos estratégicos identificados son, orientativamente, los siguientes: las inmediaciones del enlace con la M-50 en el extremo occidental del tramo analizado, el área de Torrejón-Alcalá (donde se concentra la mayor densidad de tráfico pesado y los principales accesos a los polígonos logísticos del Corredor del Henares), la zona de Azuqueca de Henares-Guadalajara (donde se produce el cambio de provincia y una redistribución relevante del tráfico), y uno o dos puntos adicionales en el tramo oriental del corredor, entre Guadalajara y Ledanca, donde la proporción de vehículos pesados es más elevada y la densidad de accesos intermedios es menor, lo que facilita técnicamente la función de control.

El coste unitario de un pórtico de control equipado con los sistemas descritos anteriormente (cámaras ANPR de alta resolución, antenas DSRC, sistema de comunicaciones, alimentación eléctrica y obra civil) se estima, a partir de los datos disponibles en los sistemas de referencia europeos, en un rango de entre 200.000 y 500.000 euros por unidad, en función del nivel de equipamiento y de las condiciones específicas de instalación en cada punto (Lee et al., 2008; Kapsch, 2013; Jordán et al., 2003).

Para el escenario bajo, se adopta un coste unitario de 220.000 euros y 4 pórticos, lo que produce un coste total de 880.000 euros para este componente. Para el escenario central, se adopta un coste unitario de 350.000 euros y 5 pórticos, con un coste total de 1.750.000 euros. Para el escenario alto, se adopta un coste unitario de 450.000 euros y 6 pórticos, con un coste total de 2.700.000 euros.

A estos costes de adquisición e instalación se añaden los costes de conexión a la red eléctrica y a las redes de comunicaciones de cada pórtico, que en zonas sin infraestructura de telecomunicaciones preexistente pueden incrementar el coste unitario en un 10-20% adicional. Esta contingencia se incorpora en el escenario alto.

5.5.5 Componente 4: integración con registros administrativos y sistemas existentes

El cuarto componente del CAPEX comprende todos los costes asociados al desarrollo de las interfaces y conexiones técnicas necesarias para que el sistema del piloto

pueda operar de forma integrada con los registros administrativos existentes y con los sistemas de cobro electrónico ya desplegados en España.

Como se explicó en el apartado 5.2.5, las integraciones imprescindibles para el funcionamiento del piloto son tres: la conexión con el Registro de Vehículos de la DGT, la integración con el sistema Vía-T, y la alineación con el marco del EETS.

El coste de estas integraciones es, en gran medida, un coste de desarrollo de software y de acuerdos institucionales, más que un coste de infraestructura física. Las estimaciones disponibles en la literatura para proyectos similares de integración de sistemas de cobro electrónico en el entorno europeo sitúan los costes de desarrollo e integración en un rango de entre 500.000 y 2.000.000 de euros, dependiendo de la complejidad de los sistemas existentes, del nivel de documentación disponible sobre las APIs de los registros de destino y del plazo de implementación (European Commission, 2019; Directiva (UE) 2019/520). Para el caso español, la incertidumbre sobre el estado actual de los sistemas de la DGT y su preparación para nuevas integraciones introduce un margen adicional que justifica ubicar la estimación en el rango medio-alto de la literatura. Los valores adoptados para los tres escenarios son 500.000 euros (escenario bajo), 1.000.000 de euros (escenario base) y 2.000.000 de euros (escenario alto).

5.5.6 Componente 5: puesta en marcha, pruebas, formación y contingencias

El quinto y último componente del CAPEX engloba los costes que no pueden asignarse directamente a ninguno de los cuatro componentes anteriores, pero que son igualmente necesarios para que el sistema entre en servicio en condiciones operativas satisfactorias. Comprende cuatro categorías de gasto: los costes de pruebas y validación del sistema (ensayos de integración, simulacros de tráfico, pruebas de *enforcement* y verificación de la exactitud del posicionamiento GNSS en distintas condiciones meteorológicas y en los puntos del trazado con mayor riesgo de pérdida de señal, como los túneles de la variante de Guadalajara), los costes de formación del personal técnico y administrativo responsable de la operación del sistema, los costes de comunicación y lanzamiento del piloto (información a los usuarios, campaña de registro y distribución de OBU, diseño de la señalización viaria informativa del sistema de cobro) y una reserva de contingencia del 10% sobre el total de los componentes anteriores, que recoge los sobrecostes imprevistos habituales en proyectos de implantación tecnológica de esta escala y complejidad.

Esta reserva de contingencia es especialmente relevante en el contexto de un primer piloto sin precedente directo en España, donde la curva de aprendizaje institucional, la posible necesidad de adaptaciones regulatorias sobre la marcha y las incertidumbres de coordinación entre distintas administraciones (MITMA, DGT, SEITT) hacen que los sobrecostes de la fase de implantación sean previsiblemente superiores a los de sistemas que se desarrollan en contextos con mayor experiencia acumulada.

La literatura sobre primeras implantaciones de sistemas de peaje electrónico en países sin experiencia previa confirma este diagnóstico: los sobrecostes de la fase inicial respecto a la estimación original oscilan, en promedio, entre el 15% y el 30% del presupuesto previsto (Finger et al., 2019; ITF, 2019). La reserva del 10% adoptada en este análisis es, por tanto, conservadora, pero está justificada por el carácter explícitamente exploratorio y preliminar de la estimación.

5.5.7 CAPEX total: síntesis por componente y escenario

La Tabla 15 sintetiza la estimación del CAPEX total del piloto, desglosada por componente y por escenario. Los valores se expresan en millones de euros a precios constantes del año base del análisis, sin indexar por inflación, dado que el objetivo del análisis no es presupuestar el proyecto con precisión contractual, sino establecer un rango de referencia que permita evaluar su viabilidad y compararlo con los ingresos potenciales estimados posteriormente.

Tabla 15: Estimación del CAPEX del piloto GNSS en el corredor A-2, por componente y escenario (millones de euros, precios constantes).

Fuente: Elaboración propia.

Componente	Escenario bajo (M€)	Escenario base (M€)	Escenario alto (M€)	Fuente de referencia
Back office y plataforma de gestión central	5,00	10,00	15,00	Finger *et al.* (2019); ITF (2019)
Equipos a bordo (OBU)	1,44 (9.000 unidades × 160 € adquisición + instalación)	3,00 (15.000 × 200 €)	6,60 (22.000 × 300 €)	Odeck y Bråthen (2022); Händel *et al.* (2014)
Infraestructura de *enforcement*	0,88 (4 pórticos × 220.000 €)	1,75 (5 × 350.000 €)	2,70 (6 × 450.000 €)	Jordán *et al.* (2003); Kapsch (2013)
Integración DGT/Vía-T/EETS	0,50	1,00	2,00	European Commission (2019); Directiva (UE) 2019/520
Puesta en marcha, pruebas y formación	0,30	0,60	1,00	Estimación propia
Reserva de contingencia (10%)	0,81	1,64	2,73	Práctica habitual de proyectos de infraestructura
Total	**8,93**	**17,99**	**30,03**	-

Notas:
Los valores excluyen el IVA y los costes de financiación.
Los costes de los equipos OBU se asumen íntegramente a cargo de la Administración durante la fase piloto.
La reserva de contingencia (10%) se calcula sobre la suma de los componentes 1 a 5.

Los rangos obtenidos, de entre 9 y 30 millones de euros, son coherentes con las referencias internacionales disponibles para sistemas de escala comparable. A título de comparación, el sistema eslovaco supuso una inversión inicial de aproximadamente 120-150 millones de euros para una red de unos 1.500 kilómetros, lo que equivale a entre 80.000 y 100.000 euros por kilómetro de red tarifada (Zabicki, 2011; CETMO, 2012). Aplicado a los 90 kilómetros del corredor A-2, este ratio produciría una estimación de entre 7,2 y 9 millones de euros, valor que coincide con el extremo inferior del rango del escenario bajo de este análisis.

La diferencia entre ese valor de referencia lineal y el escenario central (18 millones) refleja precisamente los costes de back office que no escalan linealmente con la longitud de la red y que, en una primera implantación, sin posibilidad de repartir ese coste entre más kilómetros, representan una proporción mayor del CAPEX total.

Este es, de hecho, uno de los argumentos más sólidos a favor de diseñar el piloto como la primera fase de un sistema más amplio: cuanto mayor sea la red tarifada sobre la que se distribuye el coste del back office, menor es el coste por kilómetro y más favorable resulta la ratio coste-beneficio del sistema (Finger et al., 2019; ITF, 2019).

5.5.8 Reinversiones tecnológicas dentro del horizonte de análisis

El análisis de viabilidad A-20 años no puede limitarse al CAPEX inicial. Los componentes del sistema GNSS tienen ciclos de vida heterogéneos, y algunos de ellos requerirán renovaciones dentro del horizonte del análisis que deben incorporarse al modelo financiero para obtener una evaluación realista del coste total de propiedad del sistema.

Las OBU tienen una vida útil estimada de entre 5 y 8 años, dependiendo de las condiciones de uso y del ritmo de avance tecnológico del sector (Odeck y Bråthen, 2022). En el horizonte de 20 años del análisis, se prevén dos ciclos de renovación completa del parque de OBU, en los años 7 y 15 aproximadamente. El coste de cada ciclo de renovación se estima como el producto del parque de OBU del escenario correspondiente por el coste unitario de la nueva generación de dispositivos, que por hipótesis se reduce en un 20% respecto al coste inicial por efecto de la maduración del mercado y de los avances tecnológicos. Para el escenario central, cada ciclo de renovación de OBU supone un desembolso aproximado de 2,4 millones de euros (15.000 unidades × 160 euros de nueva generación).

El back office requiere una renovación mayor a los 10-12 años, consistente en la actualización de la plataforma de software, la migración a nuevas infraestructuras de computación en nube y la incorporación de funcionalidades adicionales derivadas de la evolución del marco regulatorio europeo (posible extensión a vehículos ligeros, diferenciación tarifaria por emisiones). El coste de esta renovación se estima en el 40-50% del coste de implantación inicial del *back office*, dado que la arquitectura escalable prevista en el diseño original reduce el alcance de la renovación respecto a una sustitución completa. Para el escenario central, esto equivale a una reinversión de entre 4 y 5 millones de euros en el año 10 del horizonte.

Los pórticos de *enforcement*, por su parte, tienen una vida útil de entre 15 y 20 años para la estructura civil, aunque los componentes electrónicos (cámaras, antenas, procesadores) requieren sustitución con mayor frecuencia. Se prevé una renovación de la electrónica de los pórticos a los 8-10 años del horizonte, con un coste estimado del 30-40% del coste de instalación original.

Estas reinversiones se incorporan al flujo de caja del modelo financiero como salidas de capital en los años correspondientes y se descuentan al valor presente para el cálculo del VAN. Su efecto sobre los indicadores de viabilidad se analiza más adelante.

5.6 Estimación de costes operativos: OPEX

5.6.1 5.5.1 Naturaleza y estructura del modelo de costes operativos

Si el CAPEX es la pregunta sobre cuánto cuesta arrancar el sistema, el OPEX es la pregunta sobre cuánto cuesta mantenerlo vivo. Y esta segunda pregunta tiene, en el contexto de los sistemas de cobro electrónico por uso, una relevancia que la literatura tiende a subestimar frente al protagonismo de la inversión inicial. Los sistemas de referencia europeos muestran de forma consistente que los costes operativos acumulados a lo largo de la vida del proyecto superan con frecuencia al CAPEX inicial, y que una parte significativa de los problemas de viabilidad financiera de sistemas de peaje electrónico no procede del exceso de inversión inicial, sino de la subestimación de los costes de operación y, en particular, de los costes de *enforcement* y gestión del fraude (ITF, 2019; Finger et al., 2019; Odeck y Bråthen, 2022).

El OPEX del piloto del corredor A-2 se estructura en cinco componentes, cuya naturaleza y volumen son cualitativamente distintos entre sí y responden a lógicas de coste diferentes. El primero es el coste de operación del sistema central de gestión, que tiene una estructura predominantemente fija, con una componente variable relativamente pequeña vinculada al volumen de transacciones procesadas. El segundo es el coste de comunicaciones y conectividad, que combina una componente fija (contratos de servicio con los operadores de telecomunicaciones) con una variable (volumen de datos transmitidos por las OBU). El tercero es el coste de atención al usuario, cuya estructura es más variable y depende del número de usuarios registrados, del nivel de madurez del sistema y de la incidencia de consultas y reclamaciones.

El cuarto es el coste de *enforcement* y coordinación institucional con las fuerzas de seguridad del Estado y con la Administración sancionadora, que tiene un carácter predominantemente fijo en cuanto a la operación de los pórticos, pero una componente variable vinculada al número de expedientes sancionadores tramitados. El quinto y último es el coste de gestión del fraude y del impago, que evoluciona de forma inversa a la madurez del sistema: es proporcionalmente más elevado en los primeros años de operación, cuando la cultura de cumplimiento no está todavía consolidada, y tiende a reducirse a medida que el sistema gana credibilidad operativa y el riesgo de detección es percibido como suficientemente alto por los posibles infractores.

Esta estructura de cinco componentes es coherente con la descomposición del OPEX adoptada en los estudios de referencia para sistemas de cobro electrónico en Europa (Finger et al., 2019; European Commission, 2019; ITF, 2019), y permite construir un modelo de costes operativos que pueda actualizarse y refinarse en fases posteriores del análisis, a medida que se disponga de datos más precisos sobre el comportamiento del sistema.

5.6.2 Componente 1: operación del sistema central de gestión

El coste de operación del back office es el más relevante en términos de volumen dentro del OPEX, y también el que mayor estabilidad presenta a lo largo del horizonte de análisis, dado que su estructura responde fundamentalmente a contratos de servicios gestionados con el proveedor tecnológico y a costes de personal técnico especializado, ninguno de los cuales varía de forma significativa con el nivel de tráfico del corredor en el rango de demanda analizado.

Los costes incluidos en este componente son los siguientes. En primer lugar, el contrato de gestión del servicio de back office con el proveedor externo, que en el modelo de externalización completa adoptado para el piloto incluye la operación continuada de la plataforma (disponibilidad 24/7), el mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas, las actualizaciones de software y las renovaciones de las licencias tecnológicas asociadas. En segundo lugar, el personal técnico de supervisión y coordinación por parte de la Administración concedente, que, aunque en el modelo de externalización no opera directamente el sistema, debe mantener capacidad suficiente de supervisión contractual, auditoría técnica y coordinación interadministrativa. En tercer lugar, los costes de las auditorías de seguridad y protección de datos, exigidas por el RGPD y por las especificaciones técnicas del marco EETS, que en sistemas de la complejidad del propuesto requieren revisiones externas periódicas, con una cadencia mínima anual.

La estimación del coste de operación del back office para el piloto se apoya en el ratio OPEX/CAPEX observado en sistemas de referencia. En el caso del LKW-Maut alemán, los costes operativos anuales del back office han representado históricamente entre el 8% y el 12% del CAPEX inicial del componente correspondiente (Finger et al., 2019). Para el sistema eslovaco, de menor escala, el ratio es ligeramente superior, situándose entre el 12% y el 15%, lo que refleja las menores economías de escala en la operación de un sistema más pequeño (Zabicki, 2011; CETMO, 2012).

Aplicando estos ratios al componente back office del CAPEX estimado para el piloto del corredor A-2, y tomando como referencia el escenario central (10 millones de euros de back office en el CAPEX), se obtiene un coste de operación del sistema central de entre 1,0 y 1,5 millones de euros anuales en régimen de crucero, con valores superiores en los dos primeros años de operación, cuando los costes de ajuste y puesta a punto del sistema son más elevados y la experiencia del proveedor con el sistema específico es menor.

5.6.3 Componente 2: comunicaciones y conectividad

El funcionamiento del sistema GNSS requiere una infraestructura de comunicaciones que garantice la transmisión continua o periódica de los datos de posicionamiento desde las OBU hacia el back office, así como la comunicación entre los pórticos de *enforcement* y el sistema central. En el diseño tecnológico del piloto, esta comunicación se realiza a través de redes celulares comerciales (4G y, progresivamente, 5G), lo que elimina la necesidad de desplegar redes de comunicaciones propias y permite aprovechar la cobertura existente de los operadores de telecomunicaciones en el corredor A-2, que en este tramo es completa y de alta calidad.

El coste de las comunicaciones se estructura en dos niveles. El primer nivel corresponde a los contratos de datos para las OBU: cada dispositivo instalado en un vehículo pesado genera un volumen de datos de posicionamiento estimado, en configuraciones de transmisión periódica en diferido (que son las más habituales en sistemas de cobro por distancia), de entre 5 y 15 megabytes mensuales por dispositivo. A los precios actuales de los contratos de datos para dispositivos IoT en el mercado español, ese consumo se traduce en un coste de entre 1 y 3 euros mensuales por OBU, lo que para un parque de 15.000 dispositivos (escenario central)

representa un coste anual de comunicaciones de las OBU de entre 180.000 y 540.000 euros, con un valor central de referencia de aproximadamente 360.000 euros anuales.

El segundo nivel corresponde a las comunicaciones de los pórticos de *enforcement*, que requieren conexiones de datos de mayor ancho de banda para la transmisión en tiempo real de las imágenes ANPR y los datos de verificación DSRC. Este coste es significativamente menor en términos agregados, dado el escaso número de pórticos previstos, y se estima en un máximo de 50.000 euros anuales para el conjunto de los pórticos del corredor.

El coste total del componente de comunicaciones para el escenario central se estima, por tanto, en torno a 400.000 euros anuales, con una variación de entre 230.000 y 590.000 euros en los escenarios bajo y alto respectivamente, dependiendo del volumen del parque de OBU y del nivel de configuración de transmisión adoptado.

5.6.4 Componente 3: atención al usuario

El coste de atención al usuario es el componente del OPEX con mayor variabilidad entre sistemas y con mayor sensibilidad al nivel de madurez operativa del sistema. En las fases iniciales de un sistema de cobro por uso, la incidencia de consultas, reclamaciones y solicitudes de información es considerablemente más elevada que en fases de madurez, dado que los usuarios no están familiarizados con el sistema, los procesos de registro no están todavía plenamente automatizados y la incidencia de errores de facturación es proporcionalmente más alta en la curva de aprendizaje del back office.

La experiencia de los sistemas europeos de referencia muestra que la carga de atención al usuario en los tres primeros años de operación puede ser de dos a tres veces superior a la del período de madurez, y que la inversión en una plataforma de autoservicio digital de calidad (portal web, aplicación móvil, asistente automatizado) reduce de forma muy significativa los costes de este componente a partir del segundo o tercer año (Kapsch, 2013; ITF, 2019).

Para el piloto del corredor A-2, el modelo de atención al usuario contempla tres canales: un portal web de autoservicio para consultas de facturación, gestión de la cuenta de usuario y comunicación de incidencias, una línea telefónica de atención durante horario laboral ampliado, y un canal de atención presencial en las delegaciones del MITMA o la SEITT, para los usuarios que requieran asistencia personal para el registro en el sistema o la resolución de incidencias complejas.

El coste de este servicio, en un modelo de externalización parcial con un equipo de atención de entre tres y seis agentes a tiempo completo durante la fase inicial, se estima en un rango de entre 150.000 y 400.000 euros anuales, reduciéndose progresivamente a partir del tercer año de operación a medida que el sistema se consolida y la proporción de gestiones automatizadas crece.

5.6.5 Componente 4: *enforcement* y coordinación institucional

El coste del *enforcement* es, junto con el back office, el componente del OPEX con mayor impacto directo sobre la viabilidad financiera del sistema. Un nivel de *enforcement* insuficiente produce tasas de incumplimiento elevadas que erosionan la recaudación y comprometen la equidad del sistema; pero un nivel excesivo eleva los

costes operativos por encima del umbral de rentabilidad. La búsqueda del nivel óptimo de *enforcement*, entendido como aquel que maximiza la tasa de cumplimiento al menor coste marginal posible, es uno de los problemas de diseño más delicados de cualquier sistema de peaje electrónico sin barrera física (Jordán et al., 2003; Odeck y Bråthen, 2022).

El coste del *enforcement* para el piloto del corredor A-2 incluye las siguientes categorías de gasto. En primer lugar, el mantenimiento técnico y la operación de los pórticos de control, que comprende las revisiones periódicas de los sistemas electrónicos, la sustitución de componentes con vida útil inferior al período de mantenimiento, la calibración de las cámaras ANPR y la verificación de la conectividad de los sistemas DSRC. Este coste, de carácter predominantemente fijo, se estima en entre 30.000 y 60.000 euros anuales por pórtico, lo que para una instalación de entre 4 y 6 pórticos produce un coste de mantenimiento de entre 120.000 y 360.000 euros anuales. En segundo lugar, el coste de procesamiento de las imágenes y los datos capturados en los pórticos, que incluye la lectura, verificación y cruce con el registro de usuarios del back office, el marcado de incidencias y la generación de los expedientes sancionadores correspondientes. Este procesamiento es en gran medida automatizado, pero requiere una capacidad de revisión humana para los casos ambiguos o de baja confianza en el reconocimiento automático de la matrícula, lo que introduce un coste de personal especializado estimado en entre dos y cuatro personas a tiempo completo.

En tercer lugar, el coste de tramitación y notificación de los expedientes sancionadores, que en el marco del procedimiento administrativo español exige la intervención de personal jurídico y administrativo tanto en la Administración gestora del sistema como, para los casos de vehículos extranjeros, en los organismos de enlace internacional previstos en el marco de la Directiva (UE) 2019/520.

El coste total del componente de *enforcement* se estima, en el escenario central, en torno a 600.000 euros anuales durante los primeros cinco años de operación, reduciéndose progresivamente a medida que la madurez del sistema reduce la tasa de incumplimiento y, con ella, el volumen de expedientes sancionadores a tramitar. A partir del año 6 del horizonte de análisis, el coste de *enforcement* en el escenario central converge hacia un valor de régimen de crucero estimado en 400.000 euros anuales.

5.6.6 Componente 5: gestión del fraude y del impago

La gestión del fraude y del impago es el componente del OPEX más directamente vinculado al diseño del *enforcement* y a la arquitectura del sistema de cobro. En un sistema sin barrera física, el fraude puede adoptar varias formas: la circulación sin OBU, la manipulación o desactivación de la OBU, la sustitución del identificador del vehículo en el sistema o la circulación con datos de registro desactualizados que impidan la correcta asignación del cargo. La gestión de cada una de estas formas de fraude requiere procedimientos específicos y genera costes operativos distintos.

La tasa de fraude inicial en sistemas GNSS de primera implantación tiende a ser más elevada que en sistemas maduros, dado que el entorno normativo y los procedimientos de *enforcement* no están todavía plenamente consolidados y la cultura de cumplimiento entre los usuarios no se ha formado. Los sistemas de referencia europeos muestran tasas de incumplimiento iniciales de entre el 2% y el 5% del total

de vehículos usuarios en los primeros años, que descienden por debajo del 1% en sistemas con *enforcement* robusto y madurez operativa consolidada (Jordán et al., 2003; Odeck y Bråthen, 2022).

Para el piloto del corredor A-2, se adopta una hipótesis de tasa de incumplimiento inicial del 3-4% en los años 1-2, reduciéndose al 1,5-2% en los años 3-5 y convergiendo hacia el 1% a partir del año 6, en el supuesto de que el *enforcement* opere con la densidad y la eficacia previstas en el diseño.

El coste de gestión del fraude incluye los costes de las actuaciones de seguimiento e investigación de incidencias detectadas por el sistema (cruces de datos entre los registros de ANPR, la base de usuarios y el registro de la DGT), los costes de las reclamaciones de deuda pendiente a los titulares de vehículos en incumplimiento, y los costes de los procedimientos de recuperación de deuda en los casos de impago persistente, incluyendo la eventual intervención de empresas de gestión de cobros o de la vía ejecutiva administrativa. Este componente se estima en un rango de entre 100.000 y 300.000 euros anuales en los primeros años de operación, reduciéndose a entre 50.000 y 150.000 euros anuales en el período de madurez del sistema.

5.6.7 OPEX total: síntesis por componente, escenario y período de análisis

La Tabla 16 sintetiza la estimación del OPEX anual del piloto, por componente y escenario, distinguiendo entre la fase inicial de operación (años 1 a 3) y la fase de madurez (años 4 A-20), dado que la diferencia entre ambas fases es analíticamente relevante para la evaluación de la viabilidad financiera del sistema. Esta distinción es una aportación metodológica específica del presente análisis respecto a los estudios de referencia, que habitualmente expresan el OPEX como un valor anual único y promediado, lo que introduce un sesgo favorable en la evaluación de los primeros años de operación, precisamente cuando los costes son más elevados y los ingresos todavía no han alcanzado su régimen de crucero.

Tabla 16: Estimación del OPEX anual del piloto GNSS en el corredor A-2, por componente, escenario y fase de operación (millones de euros, precios constantes).

Fuente: Elaboración propia.

Componente	Escenario bajo Fase inicial (años 1–3)	Escenario bajo Fase madurez (años 4–20)	Escenario central Fase inicial (años 1–3)	Escenario central Fase madurez (años 4–20)	Escenario alto Fase inicial (años 1–3)	Escenario alto Fase madurez (años 4–20)
Operación *back office* y plataforma	0,60	0,50	1,10	1,00	1,80	1,50
Comunicaciones y conectividad OBU + pórticos	0,23	0,20	0,40	0,36	0,59	0,53
Atención al usuario	0,25	0,15	0,35	0,20	0,40	0,25

Componente	Escenario bajo Fase inicial (años 1–3)	Escenario bajo Fase madurez (años 4–20)	Escenario central Fase inicial (años 1–3)	Escenario central Fase madurez (años 4–20)	Escenario alto Fase inicial (años 1–3)	Escenario alto Fase madurez (años 4–20)
Enforcement y coordinación institucional	0,35	0,25	0,60	0,40	0,90	0,60
Gestión del fraude e impago	0,15	0,07	0,25	0,12	0,30	0,15
Total OPEX anual – Fase inicial (años 1–3)	**1,58**	-	**2,70**	-	**4,00**	-
Total OPEX anual – Fase madurez (años 4–20)	-	**1,17**	-	**2,08**	-	**3,03**

Notas:
Los valores excluyen el IVA y están expresados a precios constantes del año base del análisis.
La diferenciación entre fase inicial (años 1–3) y fase de madurez (años 4–20) refleja la evolución esperada de los costes de atención al usuario, *enforcement* y gestión del fraude a lo largo del horizonte temporal del análisis.

5.6.8 Ratio coste de recaudación sobre ingresos brutos

Un indicador habitualmente empleado en la literatura de evaluación de sistemas de tarificación viaria para valorar la eficiencia operativa del cobro es el ratio entre el coste total de recaudación (OPEX del sistema) y los ingresos brutos generados (Odeck y Bråthen, 2012; ITF, 2019; Santos, 2017). Este ratio expresa qué proporción de cada euro recaudado se consume en los costes de operar el sistema de cobro, y constituye una referencia de comparación con otros sistemas de financiación de infraestructuras.

En los sistemas maduros de peaje electrónico europeos, el ratio coste de recaudación sobre ingresos brutos se sitúa típicamente entre el 10% y el 20% en sistemas de escala media, reduciéndose por debajo del 10% en sistemas de gran escala como el LKW-Maut alemán gracias a las economías de escala operativas (Odeck y Bråthen, 2022; ITF, 2019).

En sistemas de primera implantación o de escala reducida, el ratio puede superar el 25-30% en los primeros años de operación, antes de que el sistema alcance su volumen de usuarios y su régimen de crucero (Finger et al., 2019). Estos valores son significativamente más elevados que los del cobro del impuesto sobre el combustible, que prácticamente no tiene coste de recaudación diferenciado, pero son comparables o inferiores a los de otros sistemas de cobro directo al usuario, como el de las autopistas de peaje concesionadas.

Para el piloto del corredor A-2, el modelo de ingresos con el que se trabajará posteriormente arroja ingresos anuales en el escenario base del orden de 4,1 a 6,0 millones de euros en el horizonte 2024-2040. Confrontando estos ingresos con el

OPEX estimado en la Tabla 16, el ratio coste de recaudación sobre ingresos brutos para el escenario central presenta los valores que se recogen en la Tabla 17.

Tabla 17: Ratio coste de recaudación sobre ingresos brutos, por escenario y fase de operación.

Fuente: Elaboración propia.

Escenario	OPEX anual fase inicial (M€)	OPEX anual fase madurez (M€)	Ingresos brutos de referencia (M€)
Bajo	1,58 (**38,5%**)	1,17 (**28,5%**)	4,10
Central	2,70 (**65,9%–45,0%**)	2,08 (**50,7%–34,7%**)	4,10–6,00
Alto	4,00 (**97,6%–66,7%**)	3,03 (**73,9%–50,5%**)	4,10–6,00

Notas: Los ingresos brutos de referencia del año 1 corresponden al escenario de tráfico base par A-2024, obtenido a partir del modelo econométrico desarrollado. El valor de 6,00 M€ corresponde al año 20 del horizonte de análisis, bajo el escenario base de crecimiento de la demanda. Entre paréntesis se muestra el ratio OPEX/ingresos brutos para cada escenario. Se observa que el escenario alto en la fase inicial presenta un ratio que se aproxima o supera el 100%, lo que indica que, bajo esa combinación de parámetros, el sistema sería deficitario durante los primeros años de operación, antes de alcanzar la fase de madurez.

Los resultados de esta comparación preliminar contienen una señal analítica importante: en el escenario central, el ratio coste de recaudación supera el 50% en la fase inicial de operación, y solo converge hacia valores razonables (por debajo del 35%) en la fase de madurez y con el crecimiento del tráfico y los ingresos asociado al horizonte más largo del análisis. En el escenario alto de costes, el sistema presenta un déficit operativo prácticamente seguro durante los primeros años. Esta es, precisamente, la razón por la que el análisis coste-beneficio desarrollado en el apartado 5.7 no puede limitarse a la comparación de OPEX e ingresos, sino que debe incorporar también los beneficios indirectos del sistema, que son los que pueden hacer viable económicamente una inversión que no lo sería desde la perspectiva exclusiva del flujo de caja de explotación.

Dicho de forma más llana: las cifras del OPEX son un argumento sólido a favor de diseñar el piloto no como un mecanismo de recaudación autosuficiente a corto plazo, sino como la primera fase de un sistema de mayor escala en el que el coste fijo del back office y del *enforcement* se distribuya entre un volumen de ingresos muy superior al del corredor A-2 en solitario. Esto no invalida el piloto, pero sí condiciona de forma relevante la forma en que sus resultados deben interpretarse y comunicarse políticamente. La lección es la misma que la literatura extrae de los sistemas eslovaco y checo: los primeros corredores son inevitablemente caros en términos relativos, pero son el precio de entrada necesario para construir la capacidad institucional y tecnológica que hace viable el sistema a escala nacional.

5.7 Estimación de ingresos potenciales: escenarios tarifarios y proyecciones

5.7.1 Estructura tarifaria de referencia

La estimación de los ingresos potenciales del piloto parte de la definición de una estructura tarifaria de referencia que sea internamente coherente, compatible con el marco regulatorio europeo y suficientemente calibrada con la realidad del corredor

para que los resultados del análisis tengan valor más allá del ejercicio académico. Estos tres criterios, aunque razonables por separado, introducen tensiones entre sí que deben resolverse de forma explícita antes de construir los escenarios de ingresos.

El primero de esos criterios, la coherencia interna, exige que la tarifa sea suficientemente baja para no generar tasas de rechazo que vacíen de tráfico el corredor, pero suficientemente alta para generar ingresos que justifiquen el coste de operación del sistema. El segundo, la compatibilidad europea, exige que la tarifa no supere los techos establecidos por la Directiva (UE) 2022/362, que para las infraestructuras de la red transeuropea de transporte establece límites según la clase de emisiones del vehículo y la categoría de la vía.

El tercero, la calibración con la realidad del corredor, exige que la tarifa sea comparable con referencias de mercado conocidas por los usuarios, de forma que su introducción no sea percibida como un elemento disruptivo o arbitrario.

Este tercer criterio tiene una referencia especialmente útil en el caso del corredor A-2: las tarifas en vigor de la autopista de peaje R-2, que discurre en paralelo a la A-2 entre la M-40 y Guadalajara. Según los datos publicados por la Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre (SEITT, 2025), las tarifas de la R-2 en 2025 oscilan entre 4,55 euros para vehículos ligeros en el tramo Aeropuerto-Taracena (con bonificación nocturna y exención parcial en el tramo Guadalajara Norte) y entre 7,00 y 9,10 euros para vehículos pesados según categoría, en el mismo tramo de referencia. Expresadas en términos de coste por kilómetro para ese tramo de aproximadamente 44 kilómetros, estas tarifas equivalen a rangos de entre 0,10 y 0,21 euros por kilómetro según la categoría del vehículo. Estas referencias son el anclaje empírico sobre el que se construye la estructura tarifaria de los escenarios del piloto.

A partir de esas referencias y de los rangos tarifarios de los sistemas europeos de cobro por distancia para vehículos pesados (European Commission, 2019; ITF, 2019), la estructura tarifaria adoptada como base del modelo de ingresos distingue tres categorías de vehículos pesados, en coherencia con las categorías habituales de los sistemas europeos de referencia y con la distribución del parque de transporte pesado que circula por el corredor. La primera categoría comprende los vehículos de entre 7,5 y 12 toneladas de MMA, con una tarifa de referencia de 0,13 euros por kilómetro. La segunda incluye los vehículos de entre 12 y 18 toneladas, con una tarifa de 0,14 euros por kilómetro.

La tercera agrupa los vehículos de más de 18 toneladas, que representan la fracción más relevante del tráfico pesado del corredor, con una tarifa de 0,15 euros por kilómetro. La distribución del parque por categoría, en ausencia de datos específicos para el corredor, se estima a partir de las estadísticas nacionales del parque de vehículos pesados en circulación y de los datos del OTLE sobre la estructura del transporte de mercancías por carretera en España, adoptando las proporciones del 10%, el 15% y el 75% para las categorías de menor a mayor tonelaje, respectivamente.

Aplicando estas proporciones y estas tarifas al volumen de vehículos-kilómetro proyectado por el modelo econométrico calibrado con los datos históricos de tráfico del corredor, se obtiene una tarifa media ponderada de aproximadamente 0,1465 euros por kilómetro para el conjunto del parque de vehículos pesados, que es el parámetro de referencia para el cálculo de los ingresos del escenario base.

5.7.2 El modelo econométrico como base de la proyección de ingresos

Las proyecciones de ingresos del piloto se apoyan en el modelo de demanda desarrollado específicamente para este trabajo a partir de los datos históricos de tráfico del corredor A-2 para el período 2015-2023, que constituye la evidencia empírica más sólida disponible para calibrar las proyecciones. El modelo estima los vehículos-kilómetro anuales generados por el tráfico pesado en el corredor como función del PIB real de España, incorporando una variable dummy para el período de impacto de la pandemia de COVID-19 en 2020, que produjo una caída anómala del tráfico que no responde a la dinámica estructural de la relación entre actividad económica y demanda de transporte de mercancías.

El ajuste del modelo es estadísticamente robusto: el coeficiente de determinación (R^2) alcanza un valor de 0,944, lo que indica que el modelo explica el 94,4% de la variabilidad observada en el tráfico de vehículos pesados del corredor a partir de la evolución del PIB real, y el estadístico F de la regresión es significativo con un p-valor de 0,00018, muy por debajo del umbral del 5% exigible para considerar el modelo globalmente válido.

La ecuación resultante vincula el crecimiento del tráfico pesado al crecimiento de la actividad económica con un coeficiente positivo y estadísticamente significativo ($p = 0,003$), lo que es coherente con la teoría económica del transporte y con la evidencia comparada internacional (Small y Verhoef, 2007; Santos, 2017).

Las proyecciones del PIB real español utilizadas como variable exógena del modelo para el horizonte 2025-2044 proceden de las previsiones del Instituto Nacional de Estadística (INE) para el corto y medio plazo, completadas con las proyecciones de la Economist Intelligence Unit (EIU) para el período 2026-2044, que estiman un crecimiento anual del PIB real de entre el 1,5% y el 1,7% para el período de madurez. A partir de estas proyecciones, el modelo genera estimaciones de vehículos-kilómetro anuales para cada año del horizonte de análisis, que se convierten en ingresos del piloto aplicando la estructura tarifaria descrita en el apartado anterior.

Los resultados del modelo para el escenario base, que se presentan en detalle en la Tabla 18, muestran un crecimiento progresivo y sostenido de los ingresos a lo largo del horizonte de análisis, desde los 4,22 millones de euros en el primer año de operación del piloto (2025) hasta los 6,47 millones de euros en el año 20 (2044), con una tasa de crecimiento anual implícita de los ingresos de entre el 1,8% y el 2,2% según el tramo del horizonte considerado.

Este perfil de crecimiento es coherente con la trayectoria histórica del tráfico pesado en el corredor, que en el período 2015-2023 (excluyendo el año pandémico) mostró una tasa de crecimiento media de aproximadamente el 1,9% anual, con mayor dinamismo en los años de expansión económica fuerte (2017-2019 y 2021-2022) y una moderación progresiva a medida que el ciclo económico pierde impulso.

5.7.3 Definición de los cuatro escenarios de ingresos

Los ingresos del piloto no dependen exclusivamente de la demanda proyectada por el modelo econométrico, sino también de variables de diseño del sistema cuya evolución es incierta y sobre las que el análisis debe explorar diferentes hipótesis. Las más relevantes son el nivel tarifario adoptado, la tasa de adopción del sistema por parte del

parque de vehículos pesados usuarios del corredor, la elasticidad precio real de la demanda ante la señal de cobro y el eventual alcance de medidas sancionadoras que garanticen el cumplimiento. La combinación de distintas hipótesis sobre estas variables con distintos supuestos sobre la evolución del PIB produce un espacio de resultados posibles que el análisis captura mediante cuatro escenarios diferenciados.

El **escenario conservador** representa la combinación de condiciones menos favorable entre las consideradas analíticamente plausibles. Asume un crecimiento del PIB real a la mitad del ritmo proyectado en el escenario base, lo que refleja un contexto de estancamiento económico relativo o de ralentización de la actividad comercial en el corredor más intensa de la esperada. Aplica una elasticidad precio de la demanda de -0,25 para el conjunto del parque de vehículos pesados, en el extremo superior del rango identificado en la literatura para este tipo de corredor con alternativa no gratuita (la R-2 es también de peaje, como se ha señalado, lo que reduce el riesgo de desvío, pero no elimina la posibilidad de que algunos usuarios reduzcan su frecuencia de uso ante la señal de cobro).

Este escenario asume una tasa de adopción inicial del sistema del 70% del parque objetivo en los dos primeros años, que refleja la resistencia inicial esperada entre algunos operadores de transporte y la fricción logística asociada a la instalación de las OBU. Con estos parámetros, los ingresos del escenario conservador representan aproximadamente el 60-65% de los ingresos del escenario base a lo largo del horizonte de análisis.

El **escenario base** corresponde directamente a las proyecciones del modelo econométrico calibrado, con la tarifa de referencia descrita en el apartado anterior, una elasticidad precio de -0,10 para los vehículos pesados (en el extremo inferior del rango de la literatura, coherente con la baja disponibilidad de alternativas de alta capacidad gratuitas dado que la R-2 es también de peaje) y una tasa de adopción del 80% del parque objetivo desde el primer año de operación. Este es el escenario que sirve de referencia principal para el análisis coste-beneficio.

El **escenario optimista** asume un crecimiento del PIB real al 150% del ritmo proyectado en el escenario base, lo que reflejaría un período de expansión económica sostenida con especial dinamismo en el sector logístico del Corredor del Henares, coherente con las tendencias de relocalización de actividades de distribución asociadas al comercio electrónico y a la diversificación de cadenas de suministro industriales.

Aplica una elasticidad precio de -0,05 para los vehículos pesados, lo que implica que la señal precio del piloto tiene un efecto prácticamente nulo sobre la demanda, hipótesis razonable si la tarifa resulta percibida como moderada en relación con el coste total del viaje y con el valor del tiempo del transporte profesional. La tasa de adopción se asume en el 90% desde el primer año. En estas condiciones, los ingresos del escenario optimista representan aproximadamente el 125-130% de los ingresos del escenario base.

El **escenario optimista de rentabilización** es el que se construye específicamente para identificar las condiciones mínimas bajo las cuales la inversión inicial en el piloto puede recuperarse dentro del horizonte de análisis. Combina el crecimiento de tráfico del escenario optimista con una estructura tarifaria un 20% superior a la de referencia, que eleva las tarifas hacia el extremo superior del rango de los sistemas europeos

comparables sin superar los techos establecidos por la Directiva (UE) 2022/362 para la categoría de infraestructura correspondiente.

Concretamente, las tarifas de este escenario son de 0,156 euros por kilómetro para la categoría de 7,5 a 12 toneladas, de 0,168 euros por kilómetro para la de 12 a 18 toneladas, y de 0,180 euros por kilómetro para los vehículos de más de 18 toneladas. Con elasticidad de -0,05 y tasa de adopción del 90%, los ingresos de este escenario representan aproximadamente el 155-160% de los ingresos del escenario base y son los que producen los indicadores de viabilidad financiera más favorables en el análisis coste-beneficio.

5.7.4 Proyección de ingresos por escenario: resultados

La Tabla 18 presenta la proyección de ingresos anuales del piloto para los cuatro escenarios definidos, con una selección de los años más relevantes del horizonte de análisis de 20 años (años 1, 5, 10, 15 y 20) y el total acumulado no descontado al final del período.

Tabla 18: Proyección de ingresos anuales del piloto GNSS en el corredor A-2 por escenario (millones de euros, precios constantes).

Fuente: Elaboración propia.

Año del análisis (año calendario)	Escenario conservador (M€)	Escenario base (M€)	Escenario optimista (M€)	Escenario optimista de rentabilización (M€)
Año 1 (2025)	2,75	4,22	5,28	6,34
Año 5 (2029)	3,05	4,67	5,84	7,01
Año 10 (2034)	3,41	5,24	6,56	7,87
Año 15 (2039)	3,82	5,86	7,32	8,79
Año 20 (2044)	4,21	6,47	8,09	9,71
Total acumulado no descontado (2025–2044)	**65,8**	**104,2**	**130,2**	**156,2**

Notas:
El escenario base reproduce las proyecciones obtenidas mediante el modelo econométrico calibrado con datos históricos del corredor A-2 correspondientes al período 2015–2023, junto con las proyecciones de crecimiento del PIB elaboradas por el Instituto Nacional de Estadística (INE) y la Economist Intelligence Unit (EIU).
Los escenarios conservador y optimista modifican las hipótesis de crecimiento del tráfico y la elasticidad de la demanda de acuerdo con los parámetros definidos previamente.
El escenario optimista de rentabilización incorpora, además, un incremento tarifario del 20 % sobre la estructura tarifaria de referencia.
Los valores acumulados corresponden a ingresos brutos no descontados a lo largo del horizonte de análisis (2025–2044).

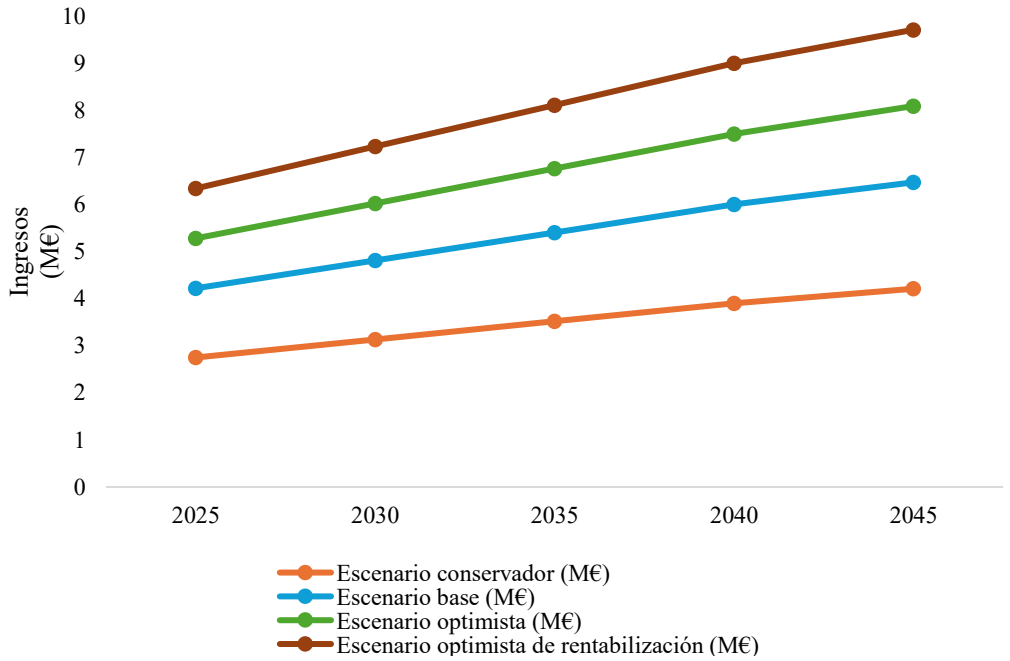


Figura 4: Evolución de los ingresos anuales del piloto GNSS en el corredor A-2 por escenario (M€, precios constantes). Fuente: Elaboración propia a partir del modelo econométrico de tráfico calibrado con datos MITMA (2023), INE y EIU.)

5.7.5 Ingresos netos: deducción del coste de recaudación

Los ingresos brutos proyectados en la Tabla 18 no equivalen directamente a los recursos disponibles para cubrir el CAPEX y el OPEX del sistema, dado que una parte de ellos se destina al propio coste de operación del sistema de cobro, que incluye los costes de procesamiento de transacciones, la comisión del proveedor de back office y los costes de gestión del cobro. En la literatura de evaluación de sistemas de tarificación viaria, esta deducción se expresa habitualmente como el ratio coste de recaudación sobre ingresos brutos (Odeck y Bråthen, 2012; ITF, 2019).

Dado que el OPEX del sistema se ha estimado de forma completa y desglosada previamente, en el análisis coste-beneficio los ingresos netos se calcularán directamente como la diferencia entre los ingresos brutos de la Tabla 18 y el OPEX anual correspondiente al escenario y la fase de operación considerados, sin deducción adicional por coste de recaudación (que ya está incluido en el OPEX). Este tratamiento evita la doble contabilización del coste de recaudación y garantiza la coherencia interna del modelo financiero.

5.7.6 Análisis de la R-2 como alternativa de itinerario y su efecto sobre los ingresos

Una de las conclusiones del análisis del corredor A-2 es que la alternativa de itinerario disponible para los usuarios que quisieran evitar el pago en la autovía es la R-2, y no una carretera convencional gratuita. Esta circunstancia, señalada y corregida en la revisión del análisis geográfico del corredor, tiene consecuencias directas sobre la modelización de los ingresos del piloto que conviene explicitar.

En el diseño habitual de sistemas de cobro por uso en corredores donde existe una alternativa convencional gratuita (situación que es la más frecuente en los estudios de

referencia europeos y anglosajones), una parte de la elasticidad precio de la demanda se transforma en desviación de tráfico hacia la ruta alternativa sin peaje, lo que reduce los ingresos del sistema tarifado, pero distribuye la carga entre los usuarios de la red convencional.

En el caso del corredor A-2, sin embargo, los usuarios que quisieran eludir el cobro del piloto no tienen acceso a una alternativa de alta capacidad gratuita: la R-2 es igualmente de peaje, y las carreteras convencionales del entorno, incluyendo la nacional con trazado próximo, son claramente inferiores en capacidad y velocidad comercial, especialmente para el transporte pesado. Esto implica que la elasticidad cruzada entre la A-2 y sus alternativas es sustancialmente más baja que en los casos de referencia de la literatura, lo que justifica la adopción de valores de elasticidad directa más bajos que los habituales y reduce significativamente el riesgo de pérdida de ingresos por desviación de tráfico.

No obstante, desde el punto de vista del análisis de sensibilidad, no puede descartarse completamente la posibilidad de que una parte del tráfico de vehículos ligeros, especialmente los usuarios de mayor frecuencia en los tramos más cortos del corredor, opte por redirigirse hacia la R-2, pagando su tarifa ya existente, pero evitando la tarifa adicional del piloto. Este escenario implica una redistribución de ingresos entre los dos sistemas de cobro paralelos del corredor y no una pérdida de ingresos para el conjunto del sistema de transporte, pero sí una reducción de los ingresos del piloto específico. Por ello, el análisis de sensibilidad del apartado 5.8 incorpora hipótesis de redistribución del tráfico de vehículos ligeros hacia la R-2 del 5%, el 10% y el 20% como variable de tensión sobre los escenarios de ingresos, evaluando su impacto sobre los indicadores de viabilidad del piloto. Dado que el piloto se concibe en su primera fase exclusivamente para vehículos pesados, el efecto de estas hipótesis de redistribución sobre los ingresos del año 1 es nulo, y solo adquiere relevancia en las fases del análisis en que se contempla la extensión del sistema a los vehículos ligeros.

5.7.7 Comparación ingresos versus costes: señal preliminar de viabilidad

Antes de desarrollar el análisis coste-beneficio completo, resulta analíticamente útil confrontar, de forma preliminar y sin descontar, los flujos de ingresos y costes proyectados para identificar en qué escenarios y en qué fases del horizonte el sistema genera excedente operativo positivo y en cuáles no.

La **Error! Reference source not found.** presenta esa comparación para los cuatro escenarios de ingresos confrontados con el OPEX anual del escenario central de costes, distinguiendo entre la fase inicial (años 1-3) y la fase de madurez (años 4-20). El CAPEX se representa como una barra de inversión inicial en el año 0, separada del flujo de explotación anual.

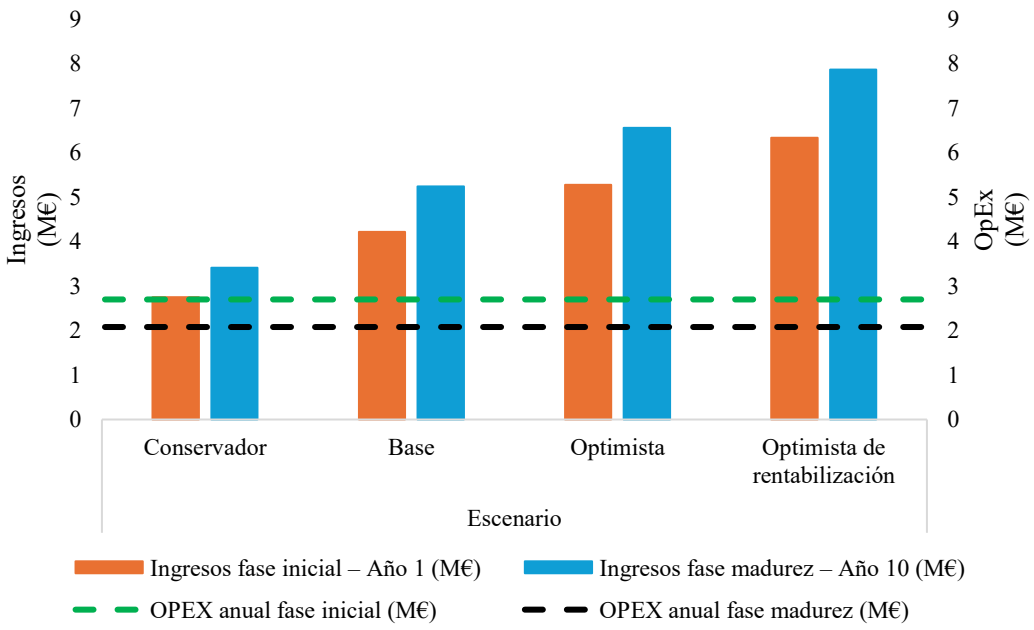


Figura 5: Ingresos anuales versus OPEX anual del piloto por escenario (M€, precios constantes).

Fuente: Elaboración propia.

Nota: el CAPEX inicial no se representa en este gráfico

La lectura de la Figura 5 permite extraer cuatro conclusiones preliminares de interés analítico. Primera, únicamente el escenario conservador presenta un excedente operativo marginal o negativo en la fase inicial (el margen entre los 2,75 millones de ingresos del año 1 y el OPEX de 2,70 millones es prácticamente nulo). Segunda, en todos los demás escenarios el sistema genera excedente operativo positivo desde el primer año de operación, aunque ese excedente es claramente insuficiente para amortizar el CAPEX en el corto plazo.

Tercera, a partir del año 10 del horizonte, incluso el escenario conservador muestra un excedente operativo significativo (3,41 millones de ingresos frente A-2,08 millones de OPEX). Cuarta, el escenario optimista de rentabilización es el único que genera excedentes operativos suficientemente amplios como para que la recuperación del CAPEX dentro del horizonte de análisis resulte plausible.

Estas señales preliminares son coherentes con la evaluación del ratio coste de recaudación y confirman que el principal desafío financiero del piloto no es la cobertura de los costes operativos corrientes, sino la recuperación de la inversión inicial en un contexto en el que los ingresos del corredor, incluso en los escenarios favorables, son limitados por la escala del piloto.

Esta limitación estructural no invalida la viabilidad del sistema, pero sí refuerza el argumento metodológico desarrollado a lo largo del capítulo: el piloto del corredor A-2 solo puede evaluarse con rigor si se contempla como la primera fase de un sistema de mayor escala, cuya rentabilidad global supera ampliamente la de cualquier corredor individual analizado de forma aislada.

5.8 Análisis coste-beneficio: VAN, TIR y ratio B/C

El análisis coste-beneficio constituye la pieza de síntesis del caso de estudio. Su función no es producir cifras definitivas sobre la rentabilidad del piloto, función que correspondería a un estudio de viabilidad de ingeniería con datos de mayor precisión, sino determinar si, bajo las condiciones identificadas en los apartados precedentes, el conjunto de beneficios generados por el sistema justifica el conjunto de costes que implica su implantación y operación a lo largo del horizonte de análisis. Esta distinción es metodológicamente relevante porque condiciona tanto los indicadores que se calculan como la forma en que sus resultados deben interpretarse.

El análisis se construye sobre un horizonte de 20 años, con el año 0 correspondiente al momento de la inversión inicial en CAPEX, y los años 1 A-20 recogiendo los flujos anuales de ingresos, costes operativos y reinversiones tecnológicas. La tasa de descuento de referencia es el 5%, en línea con las recomendaciones de la Comisión Europea para la evaluación de proyectos de infraestructura de transporte en países de la Unión Europea (European Commission, 2019).

El análisis se repite con tasas del 3% y el 7% para evaluar la robustez de los resultados ante la incertidumbre sobre el coste social del capital a largo plazo, que es uno de los parámetros de mayor impacto sobre los indicadores de viabilidad en proyectos con horizontes temporales amplios (Levinson, 2010; Small y Verhoef, 2007).

Los tres indicadores calculados son el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la ratio beneficio-coste (B/C). El VAN mide la diferencia entre el valor presente de todos los beneficios generados por el sistema y el valor presente de todos sus costes, expresada en millones de euros. Un VAN positivo indica que el sistema genera más valor del que consume, y su magnitud informa sobre el margen de viabilidad del proyecto ante desviaciones en los parámetros estimados.

La TIR es la tasa de descuento a la que el VAN se iguala a cero, y constituye el indicador de rentabilidad relativa del proyecto: compararla con la tasa de descuento de referencia permite saber si el proyecto genera un retorno superior al coste de oportunidad del capital público invertido. La ratio B/C expresa cuántos euros de beneficio se generan por cada euro de coste, y resulta especialmente útil para comparar la eficiencia relativa de distintos escenarios o de distintas configuraciones del sistema (Santos, 2017; Levinson, 2010; Sorensen y Taylor, 2005).

5.8.1 Clasificación y cuantificación de los beneficios

El análisis identifica dos categorías de beneficios, cuya separación es necesaria para mantener la coherencia metodológica del modelo y para que el lector pueda valorar de forma independiente la contribución de cada una a los indicadores de viabilidad.

La primera categoría comprende los beneficios financieros directos, que son los ingresos netos generados por el sistema de cobro a lo largo del horizonte de análisis. En el modelo de flujos de caja, estos ingresos se incorporan como entradas anuales cuya cuantía sigue la trayectoria proyectada por el modelo econométrico de demanda calibrado con los datos históricos del corredor para el período 2015-2023, con la estructura tarifaria descrita en el apartado 5.6. Los valores anuales de referencia para el escenario base oscilan entre los 4,22 millones de euros del primer año de operación

y los 6,47 millones del año 20, siguiendo la trayectoria de crecimiento derivada de las proyecciones macroeconómicas del PIB real español (INE; EIU).

La segunda categoría comprende los beneficios económicos indirectos, que representan los efectos positivos del sistema sobre el bienestar social que no se capturan directamente en la recaudación del peaje.

Para el corredor A-2, estos beneficios indirectos se estiman a partir de dos fuentes principales. La primera es la reducción marginal de externalidades del transporte por carretera (emisiones de CO_2, contaminación atmosférica por NOx y partículas, ruido y siniestralidad) derivada del pequeño efecto de moderación de la demanda producido por la señal precio, cuantificada mediante los valores unitarios de coste externo del transporte por carretera establecidos en el *Handbook on the External Costs of Transport* de la Comisión Europea (European Commission, 2019).

Dado que la elasticidad precio adoptada en el escenario base es de -0,10, el volumen de tráfico pesado reducido es relativamente pequeño, lo que limita el alcance de los beneficios por reducción de externalidades a una magnitud de entre 0,15 y 0,30 millones de euros anuales en el escenario base.

La segunda fuente de beneficios indirectos es la mejora de la sostenibilidad financiera de la conservación del corredor, derivada de la disponibilidad de un flujo de ingresos finalistas que permite financiar actuaciones de mantenimiento preventivo que, en ausencia del sistema de cobro, quedarían diferidas por restricciones presupuestarias. AIReF (2022) y SEOPAN (2023) han documentado el déficit estructural de financiación del mantenimiento de la red de carreteras del Estado, que para un corredor de las características del tramo analizado se traduce en un coste de deterioro acelerado estimable en el rango de 0,45 a 0,55 millones de euros anuales en términos de coste de rehabilitación anticipada.

La suma de ambas fuentes de beneficios indirectos produce una estimación de entre 0,60 y 0,85 millones de euros anuales, con un valor central de 0,75 millones de euros anuales que se incorpora al modelo de flujos como una entrada adicional constante a lo largo de todo el horizonte de análisis.

5.8.2 Clasificación y cuantificación de los costes

Los costes del sistema se incorporan al análisis de flujos en tres momentos distintos, correspondientes a su naturaleza temporal. El primer momento es el año 0 de implantación, en el que se materializa el desembolso de CAPEX inicial estimado en los tres escenarios del apartado 5.4 (8,93 millones en el escenario bajo, 17,99 millones en el central y 30,03 millones en el alto).

El segundo momento son los costes anuales recurrentes de operación (OPEX), estimados en el apartado 5.5, que se aplican como salidas de caja durante los 20 años del horizonte, diferenciando entre la fase inicial de operación (años 1-3) y la fase de madurez (años 4-20).

El tercer momento corresponde a las reinversiones tecnológicas necesarias dentro del horizonte de análisis para renovar los componentes del sistema con ciclos de vida inferiores A-20 años. Para el escenario central, estas reinversiones se materializan en tres momentos: una renovación del parque de OBU en el año 7 del horizonte, estimada en 2,40 millones de euros; una renovación mayor del back office en el año 10,

estimada en 4,50 millones de euros; y una segunda renovación del parque de OBU en el año 15, estimada en 1,68 millones de euros, valor inferior al de la primera renovación por la reducción de costes unitarios asociada a la maduración tecnológica del sector.

La Tabla 19 sintetiza los flujos de caja netos anuales del escenario base (ingresos de referencia más beneficios indirectos, netos de OPEX) y los desembolsos de CAPEX y reinversiones, que conforman la estructura del análisis de flujos sobre la que se calculan los indicadores de viabilidad.

Tabla 19: Flujos de caja netos del piloto GNSS en el corredor A-2: escenario base (millones de euros, precios constantes, tasa de descuento 5%).

Fuente: Elaboración propia.

Año	Ingresos brutos (M€)	Beneficios indirectos (M€)	OPEX (M€)	CAPEX y reinversiones (M€)	Flujo neto anual (M€)
0	0,00	0,00	0,00	17,99	**−17,99**
1	4,22	0,75	2,70	0,00	**+2,27**
2	4,34	0,75	2,70	0,00	**+2,39**
3	4,45	0,75	2,70	0,00	**+2,50**
4	4,56	0,75	2,08	0,00	**+3,23**
5	4,67	0,75	2,08	0,00	**+3,34**
6	4,79	0,75	2,08	0,00	**+3,46**
7	4,90	0,75	2,08	2,40	**+1,17**
8	5,01	0,75	2,08	0,00	**+3,68**
9	5,13	0,75	2,08	0,00	**+3,80**
10	5,24	0,75	2,08	4,50	**−0,59**
11	5,36	0,75	2,08	0,00	**+4,03**
12	5,48	0,75	2,08	0,00	**+4,15**
13	5,61	0,75	2,08	0,00	**+4,28**
14	5,73	0,75	2,08	0,00	**+4,40**
15	5,86	0,75	2,08	1,68	**+2,85**
16	5,98	0,75	2,08	0,00	**+4,65**
17	6,10	0,75	2,08	0,00	**+4,77**
18	6,22	0,75	2,08	0,00	**+4,89**
19	6,35	0,75	2,08	0,00	**+5,02**
20	6,47	0,75	2,08	0,00	**+5,14**
Total / Acumulado	-	-	-	-	**Flujos netos años 1–20: +74,90 M€ Flujo neto acumulado incluyendo el año 0: +56,90 M€**

5.8.3 Resultados del análisis coste-beneficio por escenario

La TablA-20 presenta los indicadores de viabilidad (VAN, TIR y ratio B/C) para los cinco escenarios analizados, combinando los cuatro niveles de ingresos definidos previamente con las configuraciones de CAPEX y OPEX correspondientes. El escenario de estrés combina el nivel más elevado de costes (escenario alto de CAPEX y OPEX) con el nivel más conservador de ingresos, y representa el caso límite de adversidad simultánea en todas las variables del modelo.

Tabla 20: Indicadores de viabilidad del piloto GNSS en el corredor A-2 por escenario

Escenario	VAN al 5% (M€)	TIR (%)	Ratio B/C	Período de recuperación descontado (años)
Conservador (CAPEX bajo, ingresos conservadores, OPEX bajo)	**+23,9**	~25%	**1,88**	~5
Base (CAPEX central, ingresos base, OPEX central)	**+22,5**	~16%	**1,44**	~8
Optimista (CAPEX central, ingresos optimistas, OPEX central)	**+38,5**	~23%	**1,76**	~6
Optimista de rentabilización (CAPEX central, ingresos optimistas de rentabilización, OPEX central)	**+54,5**	~32%	**2,07**	~4
Estrés (CAPEX alto, ingresos conservadores, OPEX alto)	**−28,1**	No aplicable	**0,64**	No alcanzada en el horizonte

Notas:

- El Valor Actual Neto (VAN) incorpora tanto los beneficios financieros directos (ingresos netos generados por el sistema) como los beneficios económicos indirectos, estimados en 0,75 M€ anuales constantes durante todo el horizonte de evaluación.
- La Tasa Interna de Retorno (TIR) del escenario de estrés no es calculable, ya que el VAN permanece negativo para cualquier tasa de descuento positiva, por lo que no existe una TIR económicamente significativa.
- El período de recuperación corresponde al plazo de recuperación descontado, calculado a partir de los flujos de caja actualizados con una tasa de descuento del 5 %.

Los resultados merecen una lectura pausada, porque contienen señales analíticas de distinto signo que sería un error reducir a una valoración binaria de viabilidad o no viabilidad.

La primera señal es favorable: cuatro de los cinco escenarios analizados presentan un VAN positivo y una TIR superior a la tasa de descuento de referencia del 5%, lo que implica que el sistema genera valor positivo para el conjunto de la sociedad bajo las condiciones identificadas como más probables en el análisis. Esta señal positiva es robusta en el sentido de que se sostiene en escenarios de demanda muy distintos entre sí y con configuraciones de costes diferentes, lo que reduce la posibilidad de que el resultado sea un artefacto de los supuestos adoptados.

La segunda señal es una advertencia: el escenario de estrés produce un VAN de -28,1 millones de euros y una ratio B/C de 0,64, lo que indica que si los costes del sistema se materializan en su nivel más elevado mientras los ingresos resultan los más bajos de los considerados, el sistema destruye valor en términos económicos netos. Este resultado no es una anomalía del modelo, sino precisamente la función del escenario

de estrés: identificar bajo qué combinación de condiciones adversas simultáneas el proyecto deja de ser viable, para que los gestores puedan establecer umbrales de alerta durante la fase de implantación.

La tercera señal, de carácter estructural, emerge de la comparación entre el escenario conservador (VAN +23,9 millones, TIR 25%) y el escenario base (VAN +22,5 millones, TIR 16%). El escenario conservador tiene un VAN similar al base pero una TIR significativamente más alta, porque su CAPEX inicial es menos de la mitad del del escenario central.

Esto confirma que el componente que más condiciona la viabilidad financiera del piloto no es la tarifa ni el nivel de demanda, sino el coste de implantación del back office, que concentra la mayor incertidumbre del CAPEX y determina en gran medida el horizonte de recuperación de la inversión.

5.8.4 Robustez de los resultados ante variaciones en la tasa de descuento

La TablA-21 presenta el VAN del escenario base para las tres tasas de descuento consideradas en el análisis de sensibilidad: 3%, 5% y 7%. Este análisis permite evaluar en qué medida los resultados del caso base dependen del supuesto sobre el coste social del capital, que es un parámetro sobre el que existe debate metodológico en la literatura de evaluación de proyectos públicos (Levinson, 2010; European Commission, 2019).

Tabla 21: Sensibilidad del VAN del escenario base a la tasa de descuento

Tasa de descuento	VAN (M€)	Ratio B/C	Comentario interpretativo
3%	**+30,5**	**1,53**	La menor tasa refleja un coste social del capital bajo, coherente con un contexto de tipos de interés estructuralmente reducidos. En consecuencia, el VAN aumenta porque los flujos futuros más alejados en el tiempo sufren una menor penalización por el descuento.
5%	**+22,5**	**1,44**	Tasa de referencia recomendada por la Comisión Europea para la evaluación de proyectos de infraestructura de transporte (European Commission, 2019).
7%	**+16,3**	**1,38**	La mayor tasa de descuento penaliza con mayor intensidad los flujos generados en los últimos años del horizonte de análisis, cuando los ingresos del sistema alcanzan sus valores más elevados como consecuencia del crecimiento econométrico previsto del tráfico.

La principal conclusión del análisis de robustez es que el VAN del escenario base permanece positivo en las tres tasas de descuento evaluadas, con un rango que oscila entre 16,3 y 30,5 millones de euros. La sensibilidad del indicador a la tasa de descuento es moderada, del orden del 25-30% de variación del VAN ante una variación de dos puntos porcentuales en la tasa. Este grado de sensibilidad es coherente con el perfil de flujos del proyecto, que combina costes concentrados en los primeros años (CAPEX, OPEX de la fase inicial y reinversiones) con beneficios que crecen de forma progresiva a lo largo del horizonte y que tienen, por tanto, un valor presente más sensible a la tasa de descuento que los costes.

5.8.5 Período de recuperación de la inversión

El período de recuperación descontado (en inglés, *discounted payback period*) indica en qué año del horizonte de análisis el valor presente acumulado de los flujos netos positivos del sistema supera el valor de la inversión inicial, es decir, en qué momento el VAN acumulado pasa de negativo a positivo. Este indicador complementa al VAN y a la TIR porque proporciona información sobre la liquidez del proyecto y sobre el riesgo de que cambios de política o de gobierno interrumpan el sistema antes de que haya tenido tiempo de recuperar la inversión, algo especialmente relevante en el contexto político-institucional español, donde la literatura ha documentado la discontinuidad de las decisiones sobre tarificación viaria como uno de los factores estructurales de la no implantación del pago por uso (ITF, 2019; Santos, 2017).

Para el escenario base, el flujo de caja neto descontado acumulado evoluciona de la siguiente forma: al final del año 1, el déficit acumulado descontado es de 15,6 millones de euros; al final del año 5, de 5,2 millones; al final del año 6, de 2,4 millones; y al final del año 8, el sistema alcanza por primera vez un acumulado positivo de 1,3 millones de euros. El período de recuperación descontado del escenario base se sitúa, por tanto, en torno a los ocho años, con el año 7 marcado por la reinversión en OBU, que introduce un retraso de un año respecto a lo que sería esperable sin esa salida adicional de caja.

En el escenario conservador (CAPEX bajo), la recuperación se produce hacia el quinto año, gracias al menor desembolso inicial. En el escenario optimista de rentabilización, la combinación de mayores ingresos y el mismo CAPEX central produce una recuperación en torno al cuarto año. El escenario de estrés, como es coherente con su VAN negativo, no alcanza la recuperación dentro del horizonte de análisis de 20 años.

5.8.6 Interpretación de los resultados

La lectura conjunta de los indicadores calculados en este apartado permite formular cinco conclusiones de carácter analítico que sintetizan la respuesta del análisis coste-beneficio a la pregunta de investigación PI-2.

La primera conclusión es que el piloto GNSS en el corredor A-2 es económicamente viable bajo condiciones moderadas de costes e ingresos. El escenario base, que representa la estimación más equilibrada y conservadora del modelo, produce un VAN positivo de 22,5 millones de euros, una TIR del 16% y una ratio B/C de 1,44, todos ellos indicadores que superan los umbrales de viabilidad estándar en la evaluación de proyectos de infraestructura de transporte. Esta conclusión es robusta a variaciones razonables en la tasa de descuento (los resultados son positivos tanto al 3% como al 7%) y no depende de los escenarios más favorables de ingresos o costes.

La segunda conclusión es que el principal riesgo de inviabilidad procede de la combinación simultánea de costes altos e ingresos bajos. El escenario de estrés es el único que produce un VAN negativo, y lo hace de forma rotunda (-28,1 millones), lo que indica que el sistema no tiene capacidad de absorber simultáneamente sobrecostes del CAPEX y del OPEX y una demanda muy inferior a la esperada. Esta combinación, aunque no es la más probable, no puede descartarse en el contexto de un primer piloto sin precedente en España, donde la curva de aprendizaje institucional puede generar sobrecostes superiores a los anticipados. La gestión activa de este

riesgo, mediante la contención del CAPEX en la fase de diseño y la garantía de una tasa de adopción suficiente antes de la entrada en operación, es la principal palanca de mitigación disponible para los gestores del sistema.

La tercera conclusión es que el componente más determinante de la viabilidad es el CAPEX del back office, y no el nivel de ingresos. La comparación entre el escenario conservador (CAPEX bajo, ingresos modestos) y el escenario base (CAPEX central, ingresos moderados) muestra que el primero tiene una TIR 9 puntos superior y un período de recuperación 3 años menor, a pesar de tener ingresos más bajos. Esto significa que las decisiones de diseño del sistema que más impacto tienen sobre su viabilidad financiera no son las tarifarias, sino las relativas a la arquitectura tecnológica del back office y al modelo de externalización de la gestión.

La cuarta conclusión, de naturaleza más política que financiera, es que el horizonte de recuperación de la inversión de ocho años en el escenario base supera la duración de un ciclo legislativo estándar en el sistema político español. Esta circunstancia no invalida la viabilidad del proyecto desde el punto de vista económico, pero introduce un riesgo político real de discontinuidad antes de que el sistema alcance su punto de equilibrio, que es precisamente el patrón que la literatura identifica como el principal obstáculo a la implantación sostenida de políticas de tarificación viaria en contextos con alta sensibilidad electoral al cobro por uso (Santos, 2017; ITF, 2019; Schade y Schlag, 2003). La gestión de este riesgo requiere instrumentos de blindaje institucional del sistema que van más allá del análisis financiero y que se abordan en las conclusiones del trabajo.

La quinta conclusión es que los beneficios económicos indirectos tienen un peso relevante pero no determinante en el resultado del análisis. En el escenario base, los 0,75 millones de euros anuales de beneficios indirectos contribuyen con 9,35 millones al VAN total de 22,5 millones, lo que representa el 41,6% del VAN. Esta proporción indica que el proyecto sería viable también bajo una evaluación estrictamente financiera (solo ingresos por tarifa, sin beneficios externos), aunque con indicadores algo menos holgados. Ello refuerza la solidez de la conclusión de viabilidad, dado que no depende de la cuantificación de externalidades, que es el componente más sujeto a debate metodológico en los análisis coste-beneficio de infraestructuras de transporte.

5.9 Análisis de sensibilidad

El análisis coste-beneficio desarrollado descansa sobre una combinación de supuestos que, aunque fundada en la mejor evidencia disponible, incorpora incertidumbres no eliminables en el estado actual de conocimiento sobre el corredor A-2. La ausencia de experiencias previas de cobro por uso en corredores de la Red de Carreteras del Estado, la transferencia necesaria de benchmarks internacionales a un contexto con características propias y la naturaleza exploratoria del análisis imponen que los resultados del escenario base no se interpreten como una estimación puntual de la viabilidad del piloto, sino como el punto de referencia de un espacio de resultados posibles que el análisis de sensibilidad tiene por objeto cartografiar.

El objetivo del análisis de sensibilidad no es repetir los escenarios del ACB en combinaciones distintas, sino responder a una pregunta metodológica específica: ¿cuál de las variables del modelo condiciona de forma más determinante los resultados de viabilidad, y cuánto puede deteriorarse su valor respecto al supuesto de

referencia antes de que el proyecto deje de ser viable? Esta pregunta es analíticamente más útil que la mera producción de escenarios adicionales, porque permite identificar dónde deben concentrarse los esfuerzos de diseño, gestión y seguimiento del piloto para preservar su viabilidad.

El análisis de sensibilidad se estructura en cuatro componentes. El primero examina la sensibilidad del VAN a variaciones individuales en cada una de las cuatro variables principales del modelo: la tasa de descuento, el CAPEX, el nivel de ingresos por tarificación y el OPEX. El segundo presenta un análisis de tornado que sintetiza y ordena visualmente el impacto relativo de cada variable, identificando cuáles son los principales impulsores de riesgo del proyecto.

El tercero evalúa específicamente el efecto de las hipótesis de redistribución de tráfico de vehículos ligeros hacia la R-2, en coherencia con la corrección geográfica de la red alternativa del corredor y con las indicaciones metodológicas formuladas en los apartados 4.4.2 y 5.5. El cuarto extrae las conclusiones analíticas del análisis y establece los umbrales de alerta que deberían monitorizarse durante la fase de implantación del piloto.

5.9.1 Sensibilidad a la tasa de descuento

La sensibilidad del VAN a la tasa de descuento fue presentada de forma preliminar en la TablA-21, en el contexto del análisis de robustez del escenario base. Se recupera aquí de forma integrada, con el fin de situar este factor en el conjunto del análisis de sensibilidad y comparar su capacidad de alteración del resultado con la del resto de variables.

Como se observó en ese apartado, el VAN del escenario base oscila entre 16,3 y 30,5 millones de euros cuando la tasa de descuento varía entre el 7% y el 3%, manteniéndose positivo en los tres niveles evaluados. La variación del VAN ante un desplazamiento de dos puntos porcentuales en la tasa de descuento es de aproximadamente 7 millones de euros, lo que implica una sensibilidad moderada. Esta moderación es coherente con el perfil temporal del proyecto: los costes se concentran en el período inicial (CAPEX en el año 0 y OPEX elevado en los años 1-3), mientras que los beneficios crecen de forma progresiva a lo largo de los 20 años del horizonte. Este perfil hace que los flujos de los años finales sean los más afectados por variaciones en la tasa de descuento, pero también los que tienen mayor incertidumbre de largo plazo.

La conclusión de este componente es que la viabilidad del piloto en el escenario base no es sensible a la elección razonable de la tasa de descuento dentro del rango analizado. En ninguno de los tres valores el VAN se vuelve negativo ni se aproxima a cero, lo que reduce el peso de este parámetro como riesgo primario del proyecto.

5.9.2 Sensibilidad individual a las variables clave del modelo

El análisis de sensibilidad univariante evalúa el impacto sobre el VAN de escenario base (+22,5 millones de euros, tasa de descuento del 5%) de variaciones en cada variable principal, manteniendo el resto de los parámetros constantes en sus valores de referencia. Los resultados se presentan en la TablA-22.

Tabla 22: Análisis de sensibilidad univariante del VAN del piloto GNSS en el corredor A-2

Variable analizada	Nivel pesimista	VAN pesimista (M€)	Nivel referencia	VAN referencia (M€)	Nivel optimista	VAN optimista (M€)	Amplitud del rango (M€)
Tasa de descuento	7%	+16,3	5%	+22,5	3%	+30,5	14,2
CAPEX total	Alto (30,0 M€)	+10,5	Central (18,0 M€)	+22,5	Bajo (8,9 M€)	+31,6	21,1
OPEX anual	Alto	+14,3	Central	+22,5	Bajo	+30,6	16,3
Nivel de ingresos	Conservador	+0,3	Base	+22,5	Optimista	+55,1	54,8

Nota: Las variaciones de cada variable se aplican manteniendo el resto de los parámetros en sus valores de referencia (CAPEX central 18,0 M€; OPEX central; ingresos del escenario base; tasa de descuento del 5%). Las reinversiones tecnológicas se mantienen constantes en los valores del escenario central. El nivel pesimista del CAPEX corresponde al escenario alto (30,0 M€, idéntico al utilizado en el escenario de estrés del ACB); el nivel optimista, al escenario bajo (8,9 M€). El nivel pesimista del OPEX corresponde a la fase inicial de 3,5 M€/año y madurez de 2,7 M€/año (escenario alto); el nivel optimista, a 1,8 M€/año y 1,5 M€/año (escenario bajo). El nivel pesimista de ingresos corresponde al escenario conservador (~65% del base); el nivel optimista, al escenario optimista (+30% sobre el base).

La lectura de la TablA-22 revela una jerarquía clara de las variables en cuanto a su capacidad de alterar el resultado del análisis. El nivel de ingresos por tarificación es, con diferencia, la variable más determinante: su amplitud de rango (54,8 millones de euros entre el escenario conservador y el optimista, sin considerar el escenario de rentabilización) es entre dos y cuatro veces superior a la del resto de variables analizadas.

Este resultado es coherente con la evidencia comparada de la literatura: la principal fuente de incertidumbre en los análisis de viabilidad de pilotos GNSS de primera implantación es la respuesta real de la demanda ante la señal precio, que en ausencia de experiencias previas en el contexto específico solo puede estimarse a partir de rangos de elasticidad inferidos de otros países (Odeck y Bråthen, 2022; Santos, 2017).

El CAPEX ocupa el segundo lugar en la jerarquía de sensibilidad, con una amplitud de 21,1 millones de euros. Este resultado confirma la conclusión de que la decisión de diseño que más condiciona la viabilidad financiera del piloto no es la tarifaria, sino la relativa a la arquitectura tecnológica del sistema y, en particular, al dimensionamiento del *back office*. La diferencia entre el CAPEX bajo y el alto equivale a suponer que el componente de back office cuesta entre 3,8 y 12,5 millones de euros, que es el rango de incertidumbre más relevante del presupuesto y el que más directamente puede ser reducido mediante decisiones de diseño durante la fase de preparación del piloto.

El OPEX y la tasa de descuento presentan amplitudes similares (16,3 y 14,2 millones de euros, respectivamente), y ambas son claramente secundarias respecto a los

ingresos y al CAPEX. Ello implica que la reducción de costes operativos, aunque deseable, no es una condición suficiente para transformar un escenario desfavorable de demanda en uno viable, y que tampoco la elección de la tasa de descuento tiene capacidad para alterar de forma determinante las conclusiones del análisis.

La TablA-23 sintetiza el análisis de tornado, ordenando las variables de mayor a menor amplitud de su rango de impacto sobre el VAN y mostrando la asimetría entre el impacto del nivel pesimista y del optimista respecto al valor de referencia. Esta asimetría es analíticamente relevante: en la mayoría de las variables, el escenario adverso tiene una capacidad de deterioro del VAN superior a la capacidad de mejora del escenario favorable, lo que indica que los riesgos a la baja son estructuralmente más amplios que las oportunidades al alza en las variables de coste.

Tabla 23: Análisis de tornado - impacto sobre el VAN del escenario base (+22,5 M€) por variable.

Variable	Impacto pesimista (ΔM€)	Impacto optimista (ΔM€)	Asimetría (pesimista/optimista)	Amplitud total (M€)
Nivel de ingresos	−22,2	+32,6	0,68	54,8
CAPEX total	−12,0	+9,1	1,32	21,1
OPEX anual	−8,2	+8,1	1,01	16,3
Tasa de descuento	−6,2	+8,0	0,78	14,2

Nota: El impacto pesimista es la diferencia entre el VAN del nivel desfavorable y el VAN de referencia (negativo cuando el nivel desfavorable deteriora el resultado). El impacto optimista es la diferencia entre el VAN del nivel favorable y el de referencia. La asimetría mayor que 1 indica que el riesgo a la baja supera en magnitud a la oportunidad al alza para esa variable; la menor que 1, lo contrario.

La TablA-23 pone de manifiesto que el nivel de ingresos es la única variable con asimetría favorable (0,68), es decir, la única en la que el potencial de mejora (32,6 millones al alza) supera al riesgo de deterioro (22,2 millones a la baja). Ello se explica porque los escenarios de demanda con señal precio han sido construidos con valores de elasticidad conservadores, y porque el escenario optimista contempla condiciones de crecimiento del tráfico muy favorables que, de materializarse, producirían ingresos sustancialmente superiores al base.

Por el contrario, el CAPEX presenta la mayor asimetría desfavorable (1,32), lo que significa que la penalización por incurrir en el escenario de costes alto es proporcionalmente mayor que la ventaja de materializar el escenario bajo. Este resultado es consistente con la naturaleza de los costes de implantación de sistemas tecnológicos de primera generación, donde los sobrecostes son más frecuentes que los ahorros respecto a los presupuestos de referencia (Finger et al., 2019; ITF, 2019).

5.9.3 Análisis de las hipótesis de redistribución de tráfico hacia la R-2

Como se señaló previamente, el riesgo de desvío de tráfico en el corredor A-2 tiene una naturaleza singular respecto a los análisis de referencia de la literatura comparada. La alternativa de alta capacidad disponible entre Madrid y Guadalajara no es una carretera convencional gratuita, sino la autopista radial R-2, que opera bajo régimen de peaje concesional. Esta circunstancia implica que el usuario que deseara evitar el cobro en la A-2 no dispone de una opción sin coste equivalente: solo puede optar por una vía igualmente tarifada, cuya elección dependería de la comparación entre los niveles tarifarios de ambas infraestructuras.

El piloto se concibe, en su primera fase, con aplicación exclusiva a los vehículos pesados de transporte de mercancías. En consecuencia, el efecto de las hipótesis de redistribución de tráfico ligero hacia la R-2 sobre los ingresos y los indicadores de viabilidad del análisis coste-beneficio del apartado 5.7 es rigurosamente nulo: los ingresos del piloto en su fase inicial no incluyen recaudación sobre vehículos ligeros, por lo que cualquier redistribución de ese segmento de demanda entre la A-2 y la R-2 no afecta ni a los flujos de caja del modelo ni a los valores de VAN, TIR y ratio B/C presentados en la TablA-20. Esta aclaración es metodológicamente necesaria para evitar la atribución errónea de un impacto sobre la viabilidad del piloto a una variable que, en su primera fase, no opera sobre los segmentos de demanda tarificados.

Para los vehículos pesados, la redistribución hacia la R-2 es igualmente improbable como respuesta autónoma a la señal precio, por las razones ya expuestas en el apartado 5.5: el diferencial tarifario entre ambas vías tendría que ser muy elevado para que el desvío resultara económicamente racional, dado que el coste del tiempo es el componente dominante de la estructura de costes del transportista y el tiempo de viaje en ambas vías es comparable. El análisis de sensibilidad confirma que, bajo los rangos tarifarios del piloto, el desvío de vehículos pesados hacia la R-2 no constituye un escenario probable que deba incorporarse como variable de tensión sobre los ingresos de la primera fase.

Ahora bien, las hipótesis de redistribución hacia la R-2 del 5%, el 10% y el 20% de la demanda de vehículos ligeros adquieren relevancia analítica únicamente en el contexto de una posible segunda fase del sistema, en la que el piloto se extendería a este segmento. Aunque ese escenario excede el alcance del presente trabajo, la metodología exige que se evalúe su impacto potencial sobre los indicadores de viabilidad, tanto por su valor como información para futuras decisiones de diseño como porque la literatura comparada identifica la redistribución entre alternativas tarifadas como una variable específica del corredor A-2 que no aparece en los análisis de referencia estándar.

La estimación del ingreso potencial derivado de la tarificación de vehículos ligeros en una segunda fase del sistema se construye a partir de los datos de demanda del corredor. Los vehículos ligeros generan aproximadamente 970 millones de vehículos-kilómetro anuales en el conjunto del tramo analizado, con un perfil de demanda heterogéneo entre los tres subtramos que refleja la progresiva pérdida del tráfico de acceso metropolitano a medida que el corredor se aleja de Madrid. Aplicando los mismos criterios metodológicos utilizados para los vehículos pesados (tasa de adopción del 80%, elasticidad precio de -0,20 para los ligeros en ausencia de alternativa gratuita equivalente, inferior al rango habitual de la literatura por la peculiaridad de la R-2, tarifa de referencia en el rango bajo-medio de los sistemas

europeos para vehículos ligeros), el ingreso anual potencial de la segunda fase en el escenario base se estima en un rango de 7 a 9 millones de euros, con un valor central de aproximadamente 8 millones de euros anuales. Este rango debe interpretarse como un orden de magnitud exploratorio y no como una proyección precisamente calibrada.

La TablA-24 evalúa el impacto de las tres hipótesis de redistribución hacia la R-2 (5%, 10% y 20%) sobre el ingreso anual de la segunda fase y sobre el VAN acumulado del sistema en el horizonte restante del análisis, tomando como referencia una extensión a vehículos ligeros a partir del año 6 del horizonte y calculando el valor actual neto de la pérdida de ingresos resultante al 5% de tasa de descuento sobre los años 6-20.

Tabla 24: Impacto de las hipótesis de redistribución de vehículos ligeros hacia la R-2 sobre los ingresos y el VAN de la segunda fase.

Fuente: Elaboración propia.

Hipótesis de redistribución	Demanda de ligeros redistribuida (% del total)	Reducción de ingreso anual (M€/año)	Valor actual de la pérdida de ingresos (años 6–20, 5%) (M€)	VAN del sistema en fase 2 (M€)	Variación del VAN respecto al escenario sin redistribución
Sin redistribución (referencia)	0%	0,0	0,0	+22,5 (fase 1) + extensión	-
Redistribución baja	5%	−0,4	−3,1	reducción de 3,1 M€ sobre el VAN de la extensión	−13,8% sobre el VAN de la segunda fase
Redistribución media	10%	−0,8	−6,2	reducción de 6,2 M€ sobre el VAN de la extensión	−27,6%
Redistribución alta	20%	−1,6	−12,4	reducción de 12,4 M€ sobre el VAN de la extensión	−55,1%

Nota: El ingreso anual de referencia de la segunda fase (8,0 M€/año) se estima a partir de los datos de IMD de vehículos ligeros del corredor, aplicando tasa de adopción del 80%, elasticidad precio de −0,20 y tarifa de referencia de 0,06 €/km, coherente con el extremo inferior del rango europeo para vehículos ligeros. El valor actual de la pérdida de ingresos se calcula como renta perpetua de duración limitada al período restante del horizonte de análisis (años 6 A-20), descontada al 5%. La variación porcentual del VAN se expresa sobre el VAN incremental de la segunda fase aislado (sin incluir el VAN ya consolidado de la primera fase centrada en vehículos pesados). Los porcentajes deben interpretarse como órdenes de magnitud.

La lectura de la TablA-24 permite extraer tres conclusiones de relevancia para el diseño de la segunda fase. La primera es que, incluso en la hipótesis más adversa (redistribución del 20% de la demanda ligera hacia la R-2), el impacto sobre el VAN acumulado del sistema en su conjunto es limitado, dado que la primera fase centrada en vehículos pesados ya genera un VAN consolidado de 22,5 millones de euros que no se ve afectado por la redistribución de ligeros.

La pérdida de valor se concentra exclusivamente en el diferencial de ingresos de la extensión, no en la viabilidad del sistema en su globalidad. La segunda conclusión es que la redistribución media (10%) reduce el VAN incremental de la segunda fase en 6,2 millones de euros, lo que, en el contexto de un sistema ya consolidado, puede compensarse con pequeños ajustes tarifarios relativos entre la A-2 y la R-2 que la Administración tiene capacidad de coordinar, dado que ambas infraestructuras son de titularidad estatal.

La tercera, y metodológicamente más importante, es que la singularidad del corredor A-2, la ausencia de alternativa gratuita de alta capacidad, que es el mecanismo de desvío dominante en la literatura, hace que incluso la hipótesis de redistribución alta (20%) sea analíticamente coherente con una situación de elección entre alternativas tarifadas y no con un desvío motivado por la elusión del pago. Esta diferencia conceptual es fundamental: el 20% de redistribución hacia la R-2 no representa un escenario de rechazo social al sistema, sino una respuesta racional a un diferencial tarifario que puede controlarse mediante política de precios coordinada.

6. Sostenibilidad

6.1 Introducción y objetivos

La sostenibilidad de los sistemas de pago por uso constituye una de las cuestiones más relevantes dentro del debate actual sobre financiación de infraestructuras viarias. Aunque la literatura ha demostrado ampliamente las ventajas económicas de los modelos de Road User Charging (RUC), la experiencia europea indica que la viabilidad financiera por sí sola no garantiza el éxito de estos sistemas. Países como Alemania, Austria o Suiza han conseguido consolidar modelos estables durante décadas gracias a la combinación de sostenibilidad económica, aceptación social, capacidad institucional y adaptación tecnológica (International Transport Forum [ITF], 2019; European Commission, 2019).

En el contexto español, esta cuestión adquiere una relevancia particular debido a la creciente presión sobre los presupuestos públicos, el déficit acumulado de conservación de carreteras y la progresiva electrificación del parque móvil. Estos factores cuestionan la sostenibilidad futura de un modelo financiado principalmente mediante fiscalidad general y tributos asociados a los combustibles.

Los resultados obtenidos en este trabajo permiten analizar si un sistema basado en tecnología GNSS aplicado a un corredor piloto presenta condiciones suficientes para considerarse sostenible a medio y largo plazo. Para ello, este capítulo examina el concepto de sostenibilidad desde una perspectiva multidimensional, incorporando aspectos económicos, ambientales, sociales e institucionales, así como su alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y los principios europeos de financiación de infraestructuras.

El objetivo de esta sección es evaluar si el modelo de pago por uso planteado en el presente trabajo puede considerarse sostenible más allá de su rentabilidad financiera inmediata.

En particular, se pretende responder a tres cuestiones fundamentales:

- ¿Contribuye el sistema propuesto a la sostenibilidad financiera de la infraestructura?
- ¿Es compatible con los objetivos ambientales y de movilidad sostenible establecidos por la Unión Europea?
- ¿Existen condiciones institucionales y de gobernanza suficientes para garantizar su funcionamiento a largo plazo?

La respuesta a estas preguntas resulta esencial, ya que la experiencia internacional demuestra que la implantación de un sistema de pago por uso depende tanto de factores económicos como de elementos organizativos, regulatorios y sociales.

6.2 Necesidad de un modelo sostenible de financiación viaria

La financiación de infraestructuras viarias en Europa se enfrenta actualmente a un proceso de transformación estructural. Tradicionalmente, gran parte de los recursos destinados al mantenimiento de carreteras procedían de impuestos sobre carburantes. Sin embargo, la transición hacia vehículos de bajas emisiones y la electrificación progresiva del transporte están reduciendo de forma gradual esta fuente de ingresos (European Commission, 2022).

En España, esta problemática se ve agravada por tres factores adicionales:

- Un déficit acumulado de conservación estimado por diferentes organismos sectoriales.
- Una red de alta capacidad entre las más extensas de Europa.
- La ausencia de mecanismos de financiación directamente vinculados al uso de la infraestructura.

A diferencia de otros países europeos, España ha optado durante las últimas décadas por un modelo en el que una gran parte de la red de alta capacidad permanece libre de pago directo para el usuario. Esta situación ha permitido elevados niveles de accesibilidad, pero también ha generado una desconexión entre uso y financiación.

Desde una perspectiva económica, esta desconexión supone una limitación relevante, ya que dificulta la recuperación de costes, la planificación de inversiones y la sostenibilidad financiera de la red a largo plazo.

6.3 Principios aplicables al pago por uso

6.3.1 Principio usuario-pagador

El principio usuario-pagador establece que quienes utilizan una infraestructura deben contribuir de forma proporcional a su financiación. Este principio constituye una de las bases de la política europea de transporte y aparece reflejado en la evolución de la Directiva Eurovíñeta (European Commission, 2022).

El pago por uso permite materializar este principio mediante la vinculación directa entre utilización de la infraestructura y contribución económica del usuario.

6.3.2 Principio de quien contamina paga

La progresiva incorporación de criterios ambientales en los sistemas europeos de tarificación responde al principio de quien contamina paga.

La posibilidad de diferenciar tarifas según emisiones, tipo de vehículo o nivel de congestión permite aproximar los costes privados a los costes sociales del transporte.

En consecuencia, un sistema GNSS presenta ventajas frente a modelos tradicionales al facilitar la incorporación futura de variables ambientales sin necesidad de modificar la infraestructura física.

6.3.3 Principio de equidad

La sostenibilidad de cualquier sistema de pago por uso depende de la percepción de equidad por parte de los usuarios.

La literatura distingue tres dimensiones principales:

- equidad horizontal,
- equidad vertical,
- equidad territorial.

En el contexto español, la dimensión territorial adquiere especial relevancia debido a la heterogeneidad histórica en la distribución de peajes e infraestructuras.

6.3.4 Principio de transparencia

La evidencia internacional muestra que la aceptación social aumenta cuando existe claridad respecto al destino de los ingresos obtenidos.

Por ello, la transparencia debe considerarse un principio básico de gobernanza. Los ingresos deberían destinarse de forma preferente a:

- mantenimiento de infraestructuras,
- seguridad vial,
- digitalización,
- movilidad sostenible.

6.4 Relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)

Durante las últimas décadas, la sostenibilidad ha pasado de constituir un criterio complementario en la planificación de infraestructuras a consolidarse como uno de los principios fundamentales que orientan el desarrollo de las políticas públicas de transporte y movilidad. Este proceso se ha visto reforzado por la adopción de la AgendA-2030 para el Desarrollo Sostenible de Naciones Unidas, que establece un conjunto de diecisiete Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) destinados a promover un crecimiento económico compatible con la equidad social y la protección del medio ambiente (United Nations, 2015).

En el ámbito del transporte, la AgendA-2030 reconoce que la sostenibilidad de las infraestructuras constituye un elemento clave para alcanzar objetivos relacionados con el desarrollo económico, la reducción de emisiones, la mejora de la calidad de vida urbana y la construcción de instituciones eficaces. En consecuencia, la evaluación de un sistema de pago por uso no debe limitarse a analizar su rentabilidad financiera o viabilidad técnica, sino también su contribución potencial a los objetivos internacionales de sostenibilidad.

En este contexto, el modelo de pago por uso analizado en el presente trabajo presenta una especial relevancia. A diferencia de los mecanismos tradicionales de financiación viaria basados exclusivamente en presupuestos públicos o impuestos generales, el RUC introduce una relación directa entre uso, financiación y gestión de externalidades, lo que le permite contribuir simultáneamente a varios ODS.

No obstante, esta contribución no es automática. Su intensidad depende del diseño del sistema, de la tecnología empleada, de la utilización de los ingresos recaudados y de las estructuras de gobernanza desarrolladas para su implantación.

Por esta razón, resulta necesario analizar de forma individual la relación entre el sistema evaluado y los ODS más directamente vinculados al transporte, las infraestructuras y la sostenibilidad.



Figura 6 Objetivos de Desarrollo Sostenible.

Fuente: Organización de las Naciones Unidas ONU.

6.4.1 ODS 9: Industria, innovación e infraestructura

El Objetivo de Desarrollo Sostenible 9 persigue la promoción de infraestructuras resilientes, sostenibles y de calidad, reconociendo que estas constituyen uno de los principales motores del crecimiento económico y de la competitividad territorial (United Nations, 2015).

La relación entre este objetivo y el pago por uso es especialmente significativa, ya que uno de los principales problemas identificados a lo largo de este trabajo es la sostenibilidad financiera de la red española de alta capacidad.

Tal como han señalado la Comisión Europea (2019), AIReF (2022) y diversos estudios nacionales sobre financiación viaria, el mantenimiento de infraestructuras enfrenta crecientes dificultades debido a la insuficiencia de recursos públicos y a la dependencia de modelos de financiación basados en ingresos fiscales que tenderán a reducirse progresivamente con la electrificación del parque móvil.

En este contexto, la implantación de un sistema de pago por uso contribuiría directamente al ODS 9 mediante tres mecanismos principales.

En primer lugar, permitiría generar una fuente estable y predecible de financiación destinada a la conservación de infraestructuras.

En segundo lugar, facilitaría la incorporación de tecnologías avanzadas asociadas a sistemas inteligentes de transporte, fortaleciendo la digitalización de la red viaria.

Finalmente, proporcionaría recursos para la modernización y adaptación futura de la infraestructura frente a desafíos asociados a la movilidad conectada y automatizada.

Desde esta perspectiva, la relación entre el sistema propuesto y el ODS 9 puede considerarse especialmente sólida.

6.4.2 ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles

El ODS 11 tiene como objetivo hacer que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles (United Nations, 2015).

Aunque el presente trabajo se centra principalmente en corredores interurbanos, la literatura revisada demuestra que los sistemas de pago por uso constituyen una de las herramientas más utilizadas internacionalmente para gestionar la demanda de transporte y reducir los efectos de la congestión.

Experiencias como Londres, Estocolmo o Singapur muestran que la introducción de señales económicas puede modificar pautas de movilidad, reducir desplazamientos innecesarios y mejorar la eficiencia del sistema de transporte (Eliasson, 2014; Pozueta, 2008).

En el caso español, el modelo propuesto no persigue únicamente objetivos de financiación, sino que también introduce la posibilidad de gestionar la utilización de la infraestructura mediante precios.

Esta capacidad permitiría:

- reducir niveles de congestión en determinados corredores;
- mejorar la eficiencia de la red;
- disminuir tiempos de viaje;
- optimizar el uso de infraestructuras existentes.

Sin embargo, la magnitud de esta contribución dependerá en gran medida del diseño tarifario y de la existencia de alternativas de transporte adecuadas.

6.4.3 ODS 12: Producción y consumo responsables

El ODS 12 promueve patrones sostenibles de producción y consumo, fomentando una utilización más eficiente de los recursos disponibles.

Desde una perspectiva económica, la infraestructura viaria constituye un recurso escaso cuya utilización genera costes significativos para la sociedad. Sin embargo, cuando el usuario no percibe estos costes, existe una tendencia al sobreuso de la infraestructura, tal como muestran los modelos de costes marginales analizados en el estado del arte (Lizárraga Mollinedo, 2006; Small & Verhoef, 2007).

El pago por uso contribuye a corregir esta situación al introducir señales de precio que reflejan de manera más adecuada los costes asociados a la utilización de la red.

Esta modificación favorece comportamientos más eficientes y racionales por parte de los usuarios, contribuyendo a una asignación más sostenible de los recursos públicos.

Por tanto, la implantación de mecanismos de tarificación representa una aplicación práctica de los principios de consumo responsable en el ámbito de las infraestructuras de transporte.

6.4.4 ODS 13: Acción por el clima

La lucha contra el cambio climático constituye uno de los principales retos de las políticas de transporte europeas.

El sector del transporte representa una parte significativa de las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea, siendo el transporte por carretera uno de los principales contribuyentes (European Commission, 2019).

En este contexto, la literatura revisada demuestra que los sistemas de pago por uso permiten contribuir a la reducción de emisiones mediante varios mecanismos:

- disminución de desplazamientos innecesarios;
- optimización logística;
- reducción de congestión;
- incorporación de criterios ambientales en las tarifas.

Además, la evolución reciente de sistemas como el alemán LKW-Maut demuestra una tendencia creciente hacia la integración de componentes tarifarios relacionados con emisiones de CO_2.

La tecnología GNSS constituye una herramienta especialmente adecuada para este propósito debido a su capacidad de introducir diferenciaciones dinámicas basadas en características del vehículo o impacto ambiental.

Por ello, el modelo desarrollado presenta una elevada compatibilidad con los objetivos climáticos de la Unión Europea.

6.4.5 ODS 16: Paz, justicia e instituciones sólidas

Aunque frecuentemente menos citado en estudios de transporte, el ODS 16 presenta una relación directa con uno de los principales hallazgos de este trabajo: la importancia de las estructuras institucionales para la implantación del pago por uso.

La comparación entre Alemania, Austria, Suiza y España ha mostrado que las diferencias fundamentales no se encuentran en la tecnología ni en la viabilidad económica, sino en la existencia de marcos institucionales sólidos capaces de operar y supervisar el sistema.

Organizaciones como Toll Collect o ASFINAG constituyen ejemplos de estructuras estables orientadas a garantizar:

- transparencia;
- rendición de cuentas;
- trazabilidad de ingresos;
- estabilidad operativa.

En consecuencia, cualquier estrategia de implantación en España requerirá el fortalecimiento de las capacidades institucionales asociadas a la gobernanza del sistema.

Desde esta perspectiva, el pago por uso no solo contribuye a financiar infraestructuras, sino también a reforzar principios asociados a la calidad institucional y la buena gobernanza.

La evaluación realizada evidencia que el sistema de pago por uso analizado presenta una contribución especialmente relevante a los objetivos relacionados con infraestructuras, sostenibilidad del transporte, acción climática y fortalecimiento institucional.

No obstante, también muestra que dicha contribución depende de factores externos al propio diseño técnico del sistema. La utilización de los ingresos, la estructura de gobernanza y la aceptación social condicionarán de forma significativa el impacto real del modelo sobre los objetivos de sostenibilidad.

El análisis realizado permite concluir que el sistema de pago por uso desarrollado en este trabajo presenta una elevada alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible más directamente relacionados con la movilidad y las infraestructuras.

La principal contribución se concentra en el fortalecimiento de la sostenibilidad financiera de la red viaria, la mejora de la eficiencia en el uso de la infraestructura y la posibilidad de integrar criterios ambientales en futuras estrategias tarifarias.

Asimismo, el estudio pone de manifiesto que la dimensión institucional constituye un elemento central de la sostenibilidad del sistema. La experiencia europea demuestra que los modelos más exitosos son aquellos apoyados en estructuras de gobernanza sólidas, capaces de garantizar transparencia, estabilidad y legitimidad social.

En consecuencia, la contribución del pago por uso a los ODS no debe entenderse únicamente como una cuestión tecnológica o financiera, sino como un instrumento de política pública capaz de apoyar objetivos más amplios relacionados con el desarrollo sostenible.

Como conclusión, la evidencia obtenida sugiere que el modelo propuesto no solo responde a necesidades de financiación de infraestructuras, sino que también se alinea con los principales compromisos internacionales de sostenibilidad asumidos por España y la Unión Europea.

Tabla 25 Relación de los ODS con el sistema de pago por uso.

Fuente: análisis propio

ODS	**Relación con el modelo**	**Nivel de contribución**
ODS 9	Financiación sostenible y modernización de infraestructuras	Alta
ODS 11	Movilidad eficiente y reducción de congestión	Alta
ODS 12	Uso eficiente de recursos públicos e infraestructuras	Alta
ODS 13	Reducción de externalidades y emisiones	Alta
ODS 16	Transparencia y fortalecimiento institucional	Alta

7. Conclusiones

El presente Trabajo Fin de Máster se planteó un objetivo general de doble naturaleza: por un lado, explicar los factores económicos, políticos, sociales, tecnológicos, ambientales y legales que han impedido la implantación de un sistema de pago por uso basado en tecnología GNSS en la red de autovías españolas; por otro, evaluar de forma preliminar la viabilidad técnica y económica de un piloto GNSS aplicado a un corredor concreto de la Red de Carreteras del Estado. Ambas dimensiones se articularon en torno a cuatro preguntas de investigación (PI-1 a PI-4) y a siete objetivos específicos que han guiado la estructura del trabajo. Las conclusiones que se exponen a continuación se organizan siguiendo esa misma lógica, integrando los hallazgos del estado del arte, del análisis PESTEL-DAFO y de los resultados cuantitativos obtenidos en el caso de estudio del corredor A-2, incluyendo la ejecución más reciente del modelo cuantitativo desarrollado para dicho corredor.

La primera pregunta de investigación buscaba identificar los factores que explican la ausencia de un sistema generalizado de pago por uso en España. El análisis PESTEL desarrollado en el estado del arte y su síntesis mediante el análisis DAFO permiten concluir que dicha ausencia no obedece a una limitación técnica o tecnológica. España cuenta con una red de alta capacidad extensa y homogénea, con experiencia empresarial consolidada en sistemas inteligentes de transporte y con un marco normativo formalmente alineado con la Directiva Euroviñeta y su revisión de 2022. Los factores explicativos son, por el contrario, de naturaleza institucional, social y política.

En el plano institucional, la ausencia de una estrategia nacional vinculante y la fragmentación competencial entre el Estado, las comunidades autónomas y las diputaciones forales han impedido articular una hoja de ruta sostenida en el tiempo, más allá de documentos técnicos sin carácter normativo.

En el plano social, la resistencia al pago directo, asociada a la percepción de doble imposición fiscal y reforzada por la reciente liberalización de peajes en corredores estratégicos, ha consolidado una expectativa de gratuidad difícil de revertir sin una estrategia de comunicación que vincule el cobro a un uso finalista y transparente de los ingresos. En el plano político, la inestabilidad y los ciclos electorales cortos constituyen una amenaza estructural para cualquier sistema cuyo horizonte de maduración se mide en años, no en legislaturas.

En conjunto, el análisis confirma que las barreras a la implantación son de gobernanza y de aceptación social, no de capacidad técnica, lo que reorienta la discusión de política pública hacia el diseño institucional y la comunicación, más que hacia la tecnología.

La segunda pregunta de investigación se abordó mediante el caso de estudio aplicado al corredor A-2, cuyo modelo cuantitativo de costes, ingresos y flujos de caja se ha ejecutado nuevamente para la redacción de estas conclusiones. Los resultados obtenidos en esta ejecución, resumidos en la tabla siguiente, mantienen el mismo patrón cualitativo señalado en el análisis coste-beneficio del capítulo 5, si bien con estimaciones puntuales de VAN y de ratio B/C algo más favorables que las de la versión previa del modelo, como corresponde a un ejercicio de estimación preliminar sujeto a revisión conforme se refinan los supuestos.

La evaluación económico-financiera ampliada del piloto se ha desarrollado para un horizonte de 20 años y una tasa de descuento de referencia del 5 %. En el escenario base, el modelo obtiene un VAN de 22,5 millones de euros, una TIR aproximada del 16 %, una ratio B/C de 1,44 y un período de recuperación descontado próximo a ocho años. Estos resultados indican que el sistema podría alcanzar viabilidad económico-financiera bajo los supuestos centrales adoptados. No obstante, el escenario de estrés obtiene un VAN de −28,1 millones de euros y no recupera la inversión dentro del horizonte, lo que muestra que la viabilidad no es incondicional y depende especialmente del ingreso efectivo, el CAPEX y el OPEX.

La segunda conclusión es que el escenario de estrés, que combina simultáneamente el CAPEX y el OPEX más elevados con los ingresos más conservadores, es el único que destruye valor, con un VAN de −24,4 millones de euros, una ratio B/C de 0,37 y una recuperación de la inversión que no se alcanza dentro del horizonte de 30 años. Este resultado no cuestiona la viabilidad del proyecto en condiciones razonables, sino que delimita con precisión el umbral de riesgo que los gestores del piloto deberían vigilar durante la fase de diseño y contratación, en particular en lo relativo al control del sobrecoste del sistema central de gestión (back office), componente que concentra la mayor incertidumbre presupuestaria.

La tercera conclusión procede del análisis de sensibilidad univariante realizado sobre el escenario base, esto muestra que el VAN del sistema es más sensible a las variables del lado de los ingresos: el nivel tarifario y la demanda de tráfico, cada una con una amplitud de variación de 50,4 millones de euros ante un cambio de ±30%, que a las variables del lado de los costes, cuya amplitud es sensiblemente menor (20,2 millones para el OPEX y 10,8 millones para el CAPEX inicial).

Esto no contradice, sino que matiza, la conclusión señalada en el capítulo 5 sobre el papel determinante del CAPEX del back office: mientras que la magnitud de la variación del VAN es mayor ante cambios tarifarios o de demanda, el CAPEX condiciona de forma más intensa la velocidad de recuperación de la inversión y la TIR, por concentrarse en el momento inicial del proyecto y no beneficiarse del descuento temporal que amortigua el efecto de los costes operativos futuros.

Ambas dimensiones, magnitud del VAN y momento de la recuperación, son relevantes y deben gestionarse de forma diferenciada: el diseño tarifario y la estrategia de fomento de la adopción son las palancas con mayor capacidad de generar valor, mientras que el control presupuestario del CAPEX es la palanca con mayor capacidad de proteger la liquidez del proyecto en sus primeros años.

La cuarta conclusión se refiere al riesgo de redistribución de tráfico hacia la autopista de peaje R-2. Dado que el piloto se circunscribe en su primera fase a los vehículos pesados, cualquier hipótesis de desvío de vehículos ligeros hacia la R-2 tiene un efecto nulo sobre los indicadores de viabilidad de esta fase inicial, ya que dichos ingresos no forman parte del modelo.

La singularidad del corredor A-2, la ausencia de una alternativa de alta capacidad gratuita, dado que la R-2 es igualmente de peaje, hace además que el desvío de vehículos pesados como respuesta a la señal precio sea improbable, puesto que el coste del tiempo domina la estructura de costes del transportista y el tiempo de recorrido en ambas vías es comparable. La redistribución solo adquiere relevancia analítica en un eventual escenario de extensión a vehículos ligeros en una segunda

fase, y aun en su hipótesis más adversa (20% de redistribución) el impacto se concentra en el VAN incremental de esa extensión, sin comprometer el VAN ya consolidado de la primera fase.

La quinta conclusión, de naturaleza más política que financiera, es que un periodo de recuperación de la inversión de entre 5 y 9 años, según el escenario, excede o iguala la duración de un ciclo legislativo estándar en España. Esta circunstancia no invalida la viabilidad económica del piloto, pero introduce un riesgo de discontinuidad política antes de que el sistema alcance su punto de equilibrio, coherente con el patrón que la literatura identifica como el principal obstáculo a la implantación sostenida de la tarificación viaria en contextos de alta sensibilidad electoral al cobro por uso.

La tercera pregunta de investigación, relativa a la disposición a pagar de los usuarios españoles por el uso de autovías actualmente gratuitas, no ha podido responderse de forma empírica en el marco de este trabajo, al no disponerse de datos de preferencias declaradas o reveladas específicos para el corredor A-2. El análisis se ha limitado a incorporar rangos de elasticidad-precio procedentes de la literatura comparada, lo que constituye una aproximación razonable para un análisis de prefactibilidad, pero no permite extraer conclusiones firmes sobre la aceptación social real del sistema en el contexto español. Esta pregunta permanece, por tanto, parcialmente abierta y se traslada a las líneas futuras de investigación.

La cuarta pregunta de investigación, sobre el grado de madurez tecnológica e institucional de las administraciones españolas para operar un sistema GNSS interoperable a escala europea, encuentra una respuesta matizada en el análisis DAFO. Desde el punto de vista tecnológico, la madurez es alta: existen soluciones consolidadas a escala europea y experiencia empresarial española en sistemas inteligentes de transporte y en telepeaje.

Desde el punto de vista institucional, sin embargo, la madurez es limitada, no por incapacidad técnica de los organismos implicados, sino por la ausencia de un ente gestor único y de mecanismos de coordinación estables entre los distintos niveles de la Administración. La brecha entre madurez tecnológica y madurez institucional constituye, en sí misma, uno de los hallazgos más relevantes del trabajo para explicar el retraso español respecto a otros países europeos.

Ahora bien, la integración de las conclusiones anteriores permite formular una conclusión general de doble dimensión: en primer lugar, los resultados no identifican una barrera tecnológica estructural para implantar un piloto GNSS en España. Desde el punto de vista económico-financiero, el escenario base resulta favorable bajo los supuestos adoptados, pero el escenario de estrés demuestra que la viabilidad depende de la contención de costes, la captación efectiva de demanda y la respuesta de los usuarios. En consecuencia, el trabajo no demuestra la viabilidad universal de un RUC en España, sino la conveniencia de avanzar hacia una fase posterior de validación mediante datos primarios, ingeniería de detalle y prueba operativa.

En segundo lugar, las verdaderas barreras a la implantación son de gobernanza: la fragmentación institucional, la ausencia de una estrategia nacional vinculante, la resistencia social asociada a la percepción de doble imposición y la discontinuidad política ante ciclos electorales cortos son, en conjunto, más determinantes que cualquier limitación técnica o financiera. El presente trabajo aporta, en este sentido, evidencia empírica específica para el caso español que contribuye a cerrar el gap

identificado en la literatura y que puede servir de base para el diseño de una estrategia de implantación gradual, comenzando por pilotos acotados como el aquí analizado.

Por otra parte, la justificación última de un sistema de pago por uso no se agota en el resultado financiero de un piloto concreto, sino que remite a la sostenibilidad del modelo de financiación de las infraestructuras viarias en un horizonte de medio y largo plazo. Esta dimensión, transversal al resto de conclusiones, puede analizarse en cuatro planos complementarios: fiscal, ambiental, social e institucional.

En cuanto a la sostenibilidad fiscal, el modelo español de financiación de carreteras descansa todavía, de forma mayoritaria, en la fiscalidad sobre los carburantes (impuestos especiales sobre hidrocarburos), una base recaudatoria que se erosiona de forma estructural con el avance de la electrificación del parque de vehículos y con la mejora de la eficiencia energética de los motores de combustión.

Esta tendencia, ya documentada en la literatura europea y en los propios trabajos preparatorios de la Comisión Europea sobre la revisión de la Directiva Euroviñeta, sitúa al pago por uso no como una alternativa entre otras a la gratuidad actual, sino como el mecanismo llamado a sustituir progresivamente una base fiscal en declive. Bajo esta lectura, la pregunta relevante para España no es tanto si debe introducirse el pago por uso, sino cuándo y cómo hacerlo antes de que la erosión de los ingresos por hidrocarburos comprometa la capacidad de conservación y modernización de la red de carreteras del Estado.

Respecto a la sostenibilidad ambiental, un sistema de pago por uso basado en tecnología GNSS permite, a diferencia de los peajes convencionales de barrera, modular la tarifa en función de variables ambientalmente relevantes: la clase de emisiones del vehículo (categoría EURO), el tipo de motorización o el momento del día y el nivel de congestión de la vía. Esta capacidad de diferenciación tarifaria convierte al sistema en un instrumento de política ambiental además de un instrumento recaudatorio, en línea con el principio de "quien contamina paga" que inspira la revisión de 2022 de la Directiva Euroviñeta. La vinculación explícita de una parte de los ingresos a la financiación de alternativas de movilidad sostenible refuerza, además, la legitimidad social del cobro.

Desde la sostenibilidad social, la introducción de un cobro sobre un uso hasta ahora gratuito plantea cuestiones de equidad que no pueden resolverse únicamente desde el análisis coste-beneficio agregado. Existen usuarios cautivos de corredores sin alternativa de alta capacidad gratuita, como es, precisamente, el caso del corredor A-2 una vez considerada la naturaleza igualmente concesional de la R-2, para quienes el cobro no tiene margen de elusión mediante cambio de ruta. Existe también una distinción relevante entre el transporte profesional de mercancías, que puede repercutir el coste en su estructura de precios, y el usuario particular, para quien el impacto es directamente sobre la renta disponible.

Un diseño socialmente sostenible del sistema debería contemplar, por tanto, mecanismos de modulación tarifaria o de compensación para los colectivos y territorios más expuestos a la ausencia de alternativas, y no limitarse a una tarifa plana uniforme.

Finalmente, respecto a la sostenibilidad institucional y financiera del propio sistema, esta depende de la sostenibilidad del propio piloto que lo introduce. Como se ha señalado, el período de recuperación de la inversión del escenario base (en torno a

nueve años) iguala o supera la duración de un ciclo legislativo estándar en España, lo que introduce un riesgo de discontinuidad política antes de que el sistema alcance su punto de equilibrio. Un sistema que se interrumpe antes de recuperar su inversión no solo destruye el valor generado hasta ese momento, sino que además compromete la credibilidad de futuros intentos de implantación. La sostenibilidad del pago por uso en España exige, por tanto, blindar institucionalmente la continuidad del piloto frente a los cambios de gobierno, de manera que el horizonte de maduración del sistema, que se mide en años, no en legislaturas, quede protegido de la lógica de los ciclos electorales cortos.

En cuanto a las implicaciones para el diseño de la política pública:

- Adoptar un enfoque incremental, comenzando por pilotos de alcance limitado (como el aquí propuesto, circunscrito a vehículos pesados en un corredor concreto), que permitan generar evidencia empírica propia y calibrar el sistema antes de una eventual extensión a escala de red.
- Priorizar el control del CAPEX del sistema central de gestión (back office) en la fase de diseño y contratación, dado que es el componente que más condiciona la velocidad de recuperación de la inversión y el que presenta mayor riesgo de sobrecoste.
- Diseñar mecanismos de blindaje institucional que protejan la continuidad del sistema frente a cambios de ciclo político, dado que el periodo de recuperación de la inversión iguala o supera la duración de una legislatura.
- Vincular explícitamente los ingresos del sistema a un uso finalista y transparente (conservación de infraestructuras, movilidad sostenible), como medida para mitigar la resistencia social asociada a la percepción de doble imposición.
- Aprovechar la coordinación entre infraestructuras de titularidad estatal, como la A-2 y la R-2, para gestionar mediante política de precios coordinada cualquier riesgo de redistribución de tráfico en una eventual segunda fase orientada a vehículos ligeros.

Por otra parte, los resultados de este trabajo deben interpretarse teniendo en cuenta tres limitaciones principales. Primero, el análisis de costes se apoya en benchmarks internacionales ajustados al contexto español, ante la ausencia de datos específicos de proyectos GNSS ya ejecutados en el país. Segundo, las elasticidades-precio empleadas proceden de la literatura comparada y no de datos de preferencias reveladas o declaradas para el corredor A-2, lo que deja sin respuesta empírica la pregunta de investigación PI-3.

Tercero, el análisis se circunscribe a un único corredor y no modeliza las interacciones del piloto con el resto de la red viaria ni con otros modos de transporte. Estas limitaciones no invalidan las conclusiones alcanzadas, que se sitúan explícitamente en el nivel de un análisis de prefactibilidad, pero delimitan su alcance y evitan interpretar los resultados numéricos con una precisión que los datos disponibles no permiten sostener.

Ahora bien, la consolidación de las conclusiones alcanzadas requiere distinguir entre dos tipos de trabajo pendiente: por un lado, las líneas de investigación académica que

permitirían profundizar y validar empíricamente los supuestos de este trabajo; por otro, los próximos pasos de carácter más operativo que deberían acometerse si se decidiera avanzar hacia la implantación real del piloto aquí analizado.

La agenda de investigación que se abre a partir de este trabajo puede organizarse en torno a seis líneas complementarias. La primera y más urgente es el desarrollo de estudios de preferencias declaradas y reveladas específicos para corredores españoles, que permitan calibrar empíricamente la disposición a pagar y las elasticidades-precio empleadas a lo largo de este análisis, hasta ahora inferidas de la literatura comparada. En estrecha relación con ella, sería necesario ampliar el análisis de costes mediante estudios de ingeniería de detalle que sustituyan los *benchmarks* internacionales por estimaciones específicas del contexto español, reduciendo así el margen de incertidumbre que hoy afecta a las partidas de CAPEX y OPEX del modelo.

Una tercera línea, de naturaleza más institucional, consistiría en evaluar el diseño de un ente gestor único de la tarificación viaria en España, prestando particular atención a su encaje competencial entre el Estado, las comunidades autónomas y las diputaciones forales. A esta dimensión de gobernanza se sumaría, en cuarto lugar, la extensión de la metodología aplicada en este trabajo a otros corredores representativos de la Red de Carreteras del Estado, con el objeto de contrastar en qué medida los resultados obtenidos son sensibles a las características propias de la demanda y a la función logística de cada corredor, o si por el contrario reflejan un patrón generalizable.

Asimismo, resulta necesario profundizar en el análisis de la segunda fase del piloto, su extensión a los vehículos ligeros, incorporando datos de demanda más detallados y un tratamiento más completo del riesgo de redistribución de tráfico hacia la R-2, que en este trabajo se ha abordado únicamente como aproximación exploratoria. Cierra esta agenda la necesidad de investigar empíricamente los mecanismos de modulación tarifaria por equidad social y territorial apuntados en el apartado 6.7, que en el estado actual del trabajo permanecen esbozados a nivel meramente conceptual y requerirían un desarrollo específico antes de su eventual traslado al diseño del sistema.

Junto a estas líneas de investigación, la eventual puesta en marcha del piloto exigiría acometer una serie de pasos de carácter más operativo. El primero de ellos sería la realización de un estudio de viabilidad jurídico-competencial en colaboración con el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, que determine el encaje normativo del piloto y su compatibilidad con el marco de la Directiva Euroviñeta y con las competencias autonómicas y forales. Solo una vez despejada esta incertidumbre normativa tendría sentido avanzar hacia el diseño y la ejecución de una prueba piloto controlada, con una flota reducida y voluntaria de vehículos pesados, previa al despliegue completo, que permita calibrar la tasa de adopción real, la fiabilidad técnica del sistema GNSS y el grado de aceptación por parte de los operadores de transporte.

En paralelo a esta fase de prueba, sería preciso definir la arquitectura de gobernanza del sistema, incluyendo la constitución de un ente gestor, ya sea de titularidad pública o mediante externalización supervisada, dotado de capacidad real de coordinación entre los distintos niveles de la Administración implicados. Esta labor institucional debería completarse con la elaboración de un plan de comunicación social previo a la implantación, que explicite de forma clara el uso finalista de los ingresos recaudados, con el fin de anticipar y mitigar la resistencia social asociada a la percepción de doble imposición ya identificada en el apartado 6.2.

Por último, y a modo de marco que dé coherencia temporal al conjunto de estos pasos, resultaría conveniente establecer una hoja de ruta a tres o cinco años, con hitos de decisión de tipo go/no-go vinculados a los resultados sucesivos de la prueba piloto. Una hoja de ruta de estas características no solo ordenaría el proceso de implantación, sino que blindaría el proyecto frente al riesgo de discontinuidad de los ciclos políticos señalado en el apartado 6.7, dotando al sistema del horizonte temporal estable que su maduración efectivamente requiere.

Los resultados obtenidos permiten concluir que el piloto GNSS analizado presenta viabilidad económico-financiera en el escenario base y una alineación favorable con los principios europeos de financiación sostenible de infraestructuras. Sin embargo, su implantación debe considerarse una estimación de prefactibilidad sujeta a incertidumbre sobre costes, demanda y comportamiento de los usuarios

Referencias

AIReF. (2022). *Estudio sobre la revisión del gasto en infraestructuras de transporte*. Autoridad Independiente de Responsabilidad Fiscal.

Amorim, J., Couto, A., & Ribeiro, A. (2014). Electronic tolling in Portugal: Policy design and impacts. *Transport Policy, 36*, 13–22.

Asociación Española de la Carretera. (2012). *Hoja de ruta para la implantación de un sistema de pago por uso en la red de carreteras española*.

Balmer, U. (2006). *Distance-based charges for heavy goods vehicles in Switzerland*. Federal Office for Spatial Development.

Bel, G. (2011). Infrastructure and nation building: The regulation and financing of network transportation infrastructures in Spain (1720–2010). *Business History, 53*(5), 688–705.

Bel, G., & Fageda, X. (2009). Preventing competition because of "solidarity": Rhetoric and reality of airport investments in Spain. *Applied Economics, 41*(22), 2853–2865.

Bel, G., & Fageda, X. (2010). What have we learned from the privatization of toll roads? *Transport Reviews, 30*(1), 1–22.

CETMO. (2012). *Electronic toll collection systems in Europe*. Centre for Transportation Studies for the Mediterranean Region.

CNMC. (2021). *Análisis del sector de autopistas en España*. Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia.

Comisión Europea. (2011). *Hoja de ruta hacia un espacio europeo de transporte único: Por una política de transportes competitiva y sostenible* (COM (2011) 144 final).

Crozet, Y., & Mercier, A. (2016). Road pricing in Europe: Impacts and acceptability. *Transport Policy, 45*, 134–144.

Directiva 93/89/CEE del Consejo, de 25 de octubre de 1993, relativa a la aplicación, por parte de los Estados miembros, de impuestos sobre determinados vehículos utilizados para el transporte de mercancías por carretera, así como de peajes y tasas por la utilización de determinadas infraestructuras. (1993). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 279, 32–38.

Directiva 1999/62/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de junio de 1999, relativa a la aplicación de gravámenes a los vehículos pesados de transporte de mercancías por la utilización de determinadas infraestructuras. (1999). *Diario Oficial de las Comunidades Europeas*, L 187, 42–50.

DirectivA-2004/52/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 29 de abril de 2004, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de las carreteras en la Comunidad. (2004). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 166, 124–143.

DirectivA-2006/38/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de mayo de 2006, por la que se modifica la Directiva 1999/62/CE relativa a la aplicación de gravámenes a los vehículos pesados de transporte de mercancías por la utilización de determinadas infraestructuras. (2006). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 157, 8–23.

DirectivA-2011/76/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 27 de septiembre de 2011, por la que se modifica la Directiva 1999/62/CE relativa a la aplicación de gravámenes a los vehículos pesados de transporte de mercancías por la utilización de determinadas infraestructuras. (2011). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 269, 1–16.

Directiva (UE) 2019/520 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 19 de marzo de 2019, relativa a la interoperabilidad de los sistemas de telepeaje de las carreteras y por la que se facilita el intercambio transfronterizo de información sobre el impago de peajes en la Unión. (2019). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 91, 45–76.

Directiva (UE) 2022/362 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de febrero de 2022, por la que se modifican las Directivas 1999/62/CE, 1999/37/CE y (UE) 2019/520, en lo que respecta al gravamen de vehículos por la utilización de determinadas infraestructuras. (2022). *Diario Oficial de la Unión Europea*, L 69, 1–64.

Eliasson, J. (2014). The Stockholm congestion charges: An overview. *Transport Policy, 38*, 1–11.

European Commission. (1995). *Towards fair and efficient pricing in transport: Policy options for internalising the external costs of transport in the European Union* (Green Paper). Office for Official Publications of the European Communities.

European Commission. (1998). *Fair payment for infrastructure use: A phased approach to a common transport infrastructure charging framework in the EU* (White Paper). Office for Official Publications of the European Communities.

European Commission. (2009). *Commission Decision 2009/750/EC on the definition of the European Electronic Toll Service and its technical elements*. Official Journal of the European Union.

European Commission. (2011). *White paper: Roadmap to a single European transport area – Towards a competitive and resource efficient transport system*. Publications Office of the European Union.

European Commission. (2019). *Handbook on the external costs of transport* (Version 2019). Publications Office of the European Union.

Feng, Z., et al. (2010). RFID-based electronic toll collection systems. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 11*(2), 457–465.

Główny Urząd Statystyczny. (2017). *Transport infrastructure statistics in Poland*.

Gómez-Ibáñez, J. A., & Meyer, J. R. (1993). *Going private: The international experience with transport privatization*. Brookings Institution.

Händel, P., et al. (2014). GNSS-based road user charging systems. *IEEE Signal Processing Magazine, 31*(6), 70–79.

Infraestruturas de Portugal. (2019). *Relatório de exploração da rede rodoviária*.

ITF. (2019). *The case for road pricing in Europe*. International Transport Forum/OECD.

Kapsch. (2013a). *ANPR as an alternative to DSRC in tolling systems*. Kapsch TrafficCom.

Kapsch. (2013b). *Electronic tolling systems in Central Europe*. Kapsch TrafficCom.

Lee, S., et al. (2008). Multi-lane free-flow tolling systems. *Transportation Research Part C, 16*(6), 775–789.

Levinson, D. (2010). Equity effects of road pricing. *Transport Policy, 17*(2), 85–95.

Matas, A., Raymond, J. L., & Roig, J. L. (2012). Financing road infrastructure in Spain. *Transport Policy, 23*, 17–25.

MITMA. (2023). *Red de Carreteras del Estado: Situación y explotación*. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana.

Nowacki, G., et al. (2011). Free flow DSRC tolling in Poland. *Transport Problems, 6*(4), 5–14.

Odeck, J., & Bråthen, S. (2012). A meta-analysis of road tolling projects. *Transport Policy, 21*, 1–11.

Odeck, J., & Bråthen, S. (2022). Tolling technologies and transport policy outcomes. *Research in Transportation Economics, 92*, 101112.

Rapp, M. (2012). *Distance related heavy vehicle fee systems in Europe*. ARE.

Santos, G. (Ed.). (2017). *Road pricing: Theory and evidence*. Elsevier.

Schade, J., & Schlag, B. (2003). Acceptability of urban transport pricing strategies. *Transportation Research Part F, 6*(1), 45–61.

Schuitema, G., Steg, L., & Forward, S. (2010). Explaining differences in acceptability of congestion pricing. *Transportation Research Part A, 44*(9), 653–666.

SEOPAN. (2023). *Necesidades de inversión en conservación de carreteras en España*.

Sheehan, R. (2008). Free-flow tolling and traffic capacity. *Transport Policy, 15*(2), 99–106.

Small, K. A., & Verhoef, E. T. (2007). *The economics of urban transportation*. Routledge.

Sorensen, P., & Taylor, B. (2005). Review and synthesis of road pricing studies. *Transport Reviews, 25*(2), 111–133.

Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea. (2012). *Consolidated version*. Official Journal of the European Union.

Vassallo, J. M., & Sánchez-Solino, A. (2007). Subordinated public participation loans for financing toll highway concessions in Spain. *Transportation Research Record, 1996*, 1–8.

Vassallo, J. M., Ortega, A., & Baeza, M. (2012). Risk allocation in toll road concessions: Lessons from the Spanish experience. *Transport Reviews, 32*(1), 1–20.

Vassallo, J. M., Ortega, A., & Pérez de Villar, P. (2017). Road pricing and social acceptability: Lessons from the French ecotax case. *Transport Policy, 55*, 1–9.

Vickrey, W. S. (1969). Congestion theory and transport investment. *The American Economic Review, 59*(2), 251–260.

Zabicki, R. (2011). GNSS based tolling systems in Slovakia. *Journal of Transport Geograhy, 19*(6), 1

Anexo I Análisis del Corredor y Cálculo de Crecimiento de Tráfico

1. Necesidad Del Estudio – Análisis De Tráfico

La ausencia de un sistema de pago por uso en las vías de alta capacidad en España se explica por una serie de condicionantes históricos y políticos. Durante varias décadas, la red viaria nacional se estructuró a través de un modelo dual: autopistas de peaje en régimen concesional (AP) y autovías libres de peaje (A), financiadas mediante presupuesto público. Entre 2018 y 2021 vencieron concesiones clave como la AP-1, la AP-4, la AP-7 y la AP-2, y el Gobierno optó por no relicitarlas, revirtiéndolas al Estado y liberándolas de peaje. La decisión se sustentó en un argumento de equidad territorial, con el objetivo de eliminar las desigualdades entre regiones donde existían o no existían peajes (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2021).

El contexto político y social constituye otro factor crítico. El peaje en España ha sido históricamente impopular, asociado en la opinión pública a la idea de "doble imposición" por el pago simultáneo de impuestos y tasas de uso. En 2021, el Ministerio de Transportes planteó la introducción de un esquema de tarificación generalizada con el fin de alinearse con la Directiva 1999/62/CE y los compromisos adquiridos en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia. No obstante, esta propuesta generó un rechazo transversal en ámbitos políticos, empresariales y sociales, lo que llevó al Ejecutivo a posponer su implantación ante la falta de consenso y el riesgo electoral que suponía

En términos financieros, España ha seguido financiando el mantenimiento de su red de más de 12.000 kilómetros de alta capacidad a través de los Presupuestos Generales del Estado. Este modelo contrasta con el de otros países europeos, como Portugal, Francia o Italia, donde la tarificación mediante peajes ha asegurado una fuente estable de ingresos para la conservación y modernización de infraestructuras. La Comisión Europea ha señalado en diversos informes la vulnerabilidad que implica esta dependencia exclusiva de los impuestos generales frente a la estabilidad aportada por la financiación vía pago por uso (Comisión Europea, 2022).

En el plano normativo, la Directiva 1999/62/CE, modificada posteriormente por la Directiva (UE) 2022/362, refuerza el marco comunitario que impulsa la internalización de los costes externos y la implantación de sistemas de pago por uso. España se mantiene como uno de los pocos grandes Estados miembros que aún no ha desarrollado un sistema generalizado de tarificación, pese a los compromisos con Bruselas. El Gobierno ha solicitado prórrogas reiterando la complejidad política y social de la medida, mientras que la Comisión Europea ha subrayado la necesidad de garantizar la sostenibilidad financiera de la red mediante mecanismos de tarificación.

Finalmente, la falta de urgencia percibida ha influido en el retraso de decisiones estructurales. Aunque el Estado ha recurrido a fondos europeos y presupuestos nacionales para sufragar el mantenimiento, el déficit acumulado de conservación supera los 10.000 millones de euros, según estimaciones de la Asociación Española de la Carretera. A pesar de esta cifra, no se ha producido una crisis financiera equivalente a la que obligó a Portugal a implantar peajes tras el rescate de 2010, lo que ha permitido mantener la inercia del modelo actual (Asociación Española de la Carretera, 2022).

España no ha avanzado hacia un sistema generalizado de pago por uso en su red de autovías y autopistas debido a una combinación de factores políticos, sociales y financieros: el rechazo ciudadano a la tarificación, la liberalización de concesiones

revertidas, la financiación basada en impuestos generales y la ausencia de consenso político. Este modelo plantea un problema de sostenibilidad a medio plazo, ya que los costes de conservación exceden los recursos presupuestarios disponibles, lo que reabre el debate sobre la necesidad de implantar un esquema de tarificación en consonancia con la política europea de movilidad sostenible.

La Dirección General de Carreteras es el organismo dependiente del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, que se encarga de gestionar la planificación, proyecto, construcción, conservación y explotación de las carreteras españolas.

Actualmente, la infraestructura de la Red de Carreteras de España tiene 165.624 km de longitud, de los cuales, 26.466 km (15,97% del total) están administradas por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, 71.313 km (43,1% del total) por las Comunidades Autonómicas y 67.908 km (40,93%) por las Diputaciones.

De la totalidad de la Red, 17.228 km son vías de gran capacidad (autopistas de peaje, libres, autovías y carreteras multicarril), perteneciendo en torno a 12.000 km a la Red de Carreteras del Estado. A continuación, se muestra un mapa que muestra las vías de alta capacidad en España:

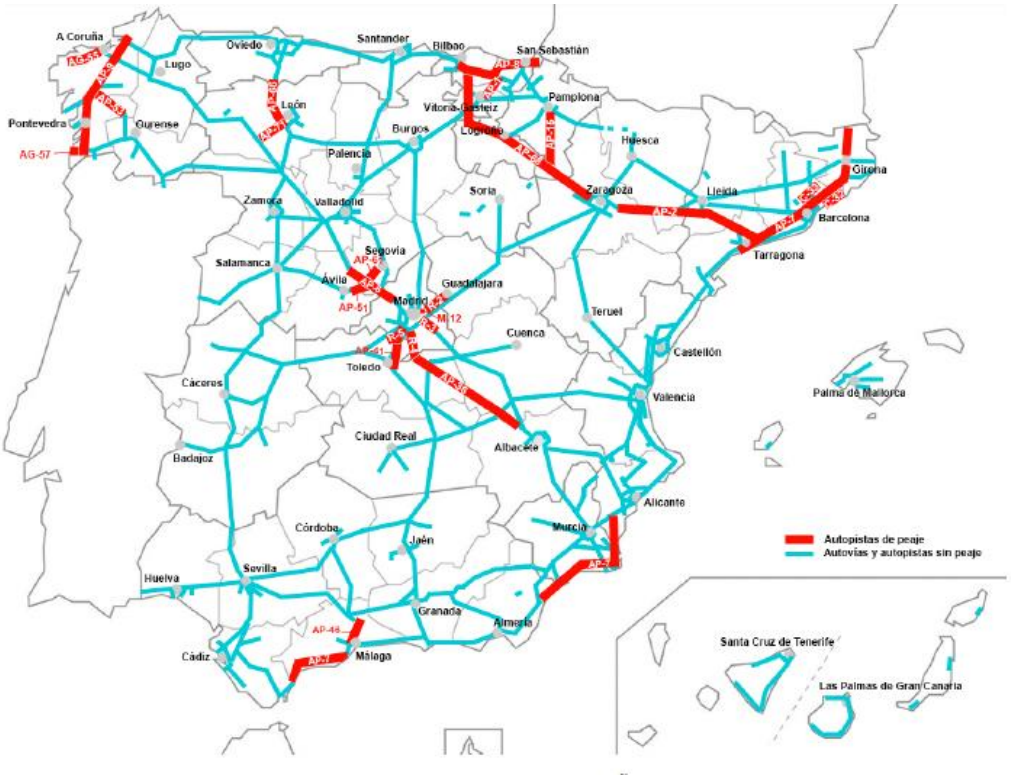


Figura 7 Vías de alta capacidad en España.

Fuente: Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (2023).

El coste medio de construcción varía en función del tipo de vía. Así pues, la inversión necesaria para las carreteras convencionales es de 4,06 millones de euros por cada km construido, frente a los 7,91 millones de euros por cada km construido en autovías. (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).

Generalmente, la Red de Carreteras del Estado ha estado ligada a un sistema de concesiones de empresas respecto de las autopistas, en virtud del cual, el

Concesionario diseña, construye y conserva la vía, haciéndose cargo de la financiación a cambio del derecho de explotación y del cobro de un peaje a los usuarios para recuperar la inversión y cubrir los costes de explotación. Por el contrario, las autovías siempre han sido de libre acceso.

Sin embargo, conforme han ido finalizando progresivamente las concesiones existentes y su consecuente eliminación de los peajes por uso, éstas no se han renovado, asumiendo el Estado no solo la titularidad que ya poseía, sino también su operatividad y costes.

Tras la finalización de las concesiones de las autopistas AP-4, AP-1 y AP-7 -tramo Tarragona/Valencia/Alicante- a 31 de diciembre de 2019, solamente quedaron 1.991 km como autopistas de peaje directo al usuario. Por su parte, el 31 de agosto de 2021 finalizan las concesiones de la AP-2 y el tramo pendiente de la AP-7 gestionadas por Abertis, lo que representará un impacto de más de 300 millones de euros anuales para las arcas públicas.

Hay que destacar que estas infraestructuras, valoradas en 215.000 millones de euros, tienen un carácter deficiente, principalmente causado por los ajustes en los presupuestos públicos; los recursos destinados a conservación y seguridad se han reducido en un 76% durante el periodo 2009-2019. (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).

Actualmente, existe un déficit acumulado de 8.500 millones de euros en lo que respecta al mantenimiento de las infraestructuras viarias de acuerdo con las siguientes figuras:

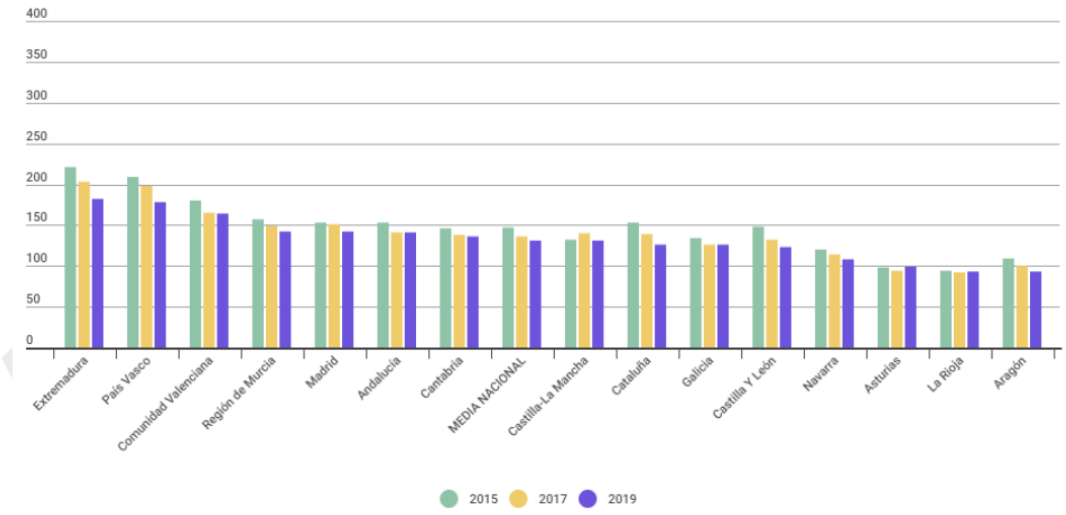


Figura 8 Necesidades de inversión en conservación de carreteras españolas 2019-2020.

Fuente: Asociación Española de la Carretera (2021).

La principal deficiencia se concentra en el pavimento, que representa un 94% del total, precisando inversiones de reposición y refuerzo por valor de 7.008 millones de euros para el conjunto de las carreteras españolas; concretamente la Red del Estado requiere de 2.200 millones frente a los 4.800 millones para la Red Autonómica. Concretamente, la existencia de deterioros relevantes se encuentra en más del 50%

del pavimento de las vías españolas, principalmente baches, roderas y grietas, tanto longitudinales como transversales.

En este sentido, la Asociación de Empresas Constructoras y Concesionarias de infraestructuras (SEOPAN) defiende que 1 de cada 10 kilómetros tiene deterioros graves frente a 1 de cada 13 kilómetros establecido por Asociación Española de la Carretera (AEC). (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).

En cualquier caso, su incidencia en los accidentes de tráfico es fundamental; el deterioro del pavimento es la causa principal del 94% de los accidentes ocasionados por culpa de la vía.

Igualmente, la AEC señala la necesidad de repintar las marcas viales de 38.500 km - 4.500 km de la Red del Estado y 34.000 km de las vías autonómicas y de las Diputaciones Forales-, lo que representaría un coste total de 76 millones de euros. También es preciso renovar 104.000 señales de la Red del Estado cuyo material reflectante ha caducado.

Por el contrario, el balizamiento de la Red del Estado ha incrementado su valor positivo, pasando de una nota de 6,8 a 7,2 en 2019, frente a la disminución respecto al balizamiento de la Red de Carreteras de las CC.AA. y Diputaciones Forales. (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).

Para poder hacer frente al carácter deficiente y comprender el déficit acumulado de 7.500 millones de euros, es preciso analizar la evolución del gasto público.

De acuerdo con las Estadísticas Presupuestos Generales del Estado Consolidados 2021 ofrecidos por el Ministerio de Hacienda, la evolución presupuestaria respecto a las partidas destinadas a infraestructuras viales han sido las siguientes:

PROGRAMA DE GASTO (MILLONES DE €)									
Programas	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019/ 2020	2021
Creación de infraestructura de carreteras	1.782	1.577	1.059	1.012	1.075	1.122	1.457	1.456	1.259
Conservación y explotación de carreteras	926	993	878	910	935	936	809	808	1.084

Figura 9 Programa de gastos en carreteras españolas (en millones de euros).

Fuente: ARMADATA y datos del Ministerio de Hacienda (2023).

Frente a ello, el gasto de conservación y explotación de las carreteras ha experimentado una evolución alcista, salvando un par de años, además de la prórroga de los PGE en los años 2019 y 2020.

Así pues, la finalización de las concesiones administrativas representa un incremento en el gasto para conservación y explotación. En este sentido y conforme a los PGE 2021, el gasto para la creación de infraestructuras se ha reducido frente al incremento para la conservación y la explotación.

Este incremento de las partidas de los PGE será insuficiente para hacer frente al déficit acumulado de la Red de gran capacidad en España, que seguirá incrementándose pese al correspondiente aumento de la inversión. Se trata de incrementos insuficientes, además de ser de una cuantía menor en comparación con otros países europeos.

España necesita tanto un plan para compensar el déficit acumulado y como para adaptarse a los nuevos modelos de movilidad. La Asociación Española de Carretera estima una necesidad de 4.000 millones de euros en inversión para dicha adaptación.

Esta inversión permitirá dotar a las vías de gran capacidad de un equipamiento y unos niveles de automatización para implantar una geometría consistente, una señalización horizontal y vertical adecuada, así como información meteorológica, sistemas de avisos de incidencia, monitorización de la circulación, cobertura 5G, entre otros.

Si por esta red circulase el 60% del tráfico, se reducirían las muertes en carreteras un 30%, las emisiones de CO2 un 6% y se generarían 55.000 empleos directos. Además, si se realizase la inversión total de 32.000 millones de euros, se podrían crear hasta 1 millón de empleos tanto directos como indirectos por el potencial de crecimiento que representaría.

Las vías de gran capacidad en el transporte por carretera se deben considerar bienes económicos o bienes públicos imperfectos puesto que son claramente divisibles y el coste marginal del nuevo usuario es creciente, tanto por el deterioro que provoca en la infraestructura, como por la posible economía de congestión que generaría. Además, si un usuario se beneficia de la infraestructura, genera un cierto efecto exclusión o restricción sobre otros.

Por tanto, el principio lógico es el pago directo por uso, puesto que es más equitativo que su financiación con cargo a impuestos. Cualquier bien o servicio público económico y escaso tiene un coste; la clave es quien lo financia. Las carreteras sin peaje por su uso no son gratuitas, puesto que son financiadas por el conjunto de los tributos y por ende por los sujetos pasivos de los impuestos, al margen de si la usan.

Es mucho más equitativo que estas carreteras se financien directamente por el usuario y que no se “solicite el coste” al resto; puesto que, desde el punto de vista social se podría generar una redistribución perversa de renta.

La congestión y el deterioro de la red la provoca el vehículo y no el número de ocupantes, por lo que parece razonable que el pago se realice por vehículo, estableciendo diferentes tarifas en función de su tamaño y grado de contaminación tanto directa como indirecta.

Además, tienen la ventaja de incrementar la recaudación, respecto a la vía fiscal directa, por el pago que realizaron los usuarios extranjeros en el transporte de viajeros, sobre todo automóviles, y por el cobro directo a los transportistas extranjeros de mercancías. Por tanto, pagan todos los usuarios de la vía con independencia de su nacionalidad, puesto que en caso contrario los extranjeros solo pagarían impuestos vinculados a los combustibles, es decir impuestos indirectos. Asimismo, se reducen los consumos de combustible al reducirse los atascos, lo que representa una mayor eficiencia medioambiental.

Este pago por uso además es eficaz si la mayor parte de lo recaudado se destina directamente al mantenimiento de cada carretera en concreto; a mayor uso, mayor deterioro y a su vez mayor recaudación para su mantenimiento óptimo.

Por otro lado, se pueden ajustar las tarifas conforme al principio adicional de “quien contamina, paga”; es decir, se internalizan los costes y se incentiva la eficiencia medioambiental de las emisiones generando una clara reducción de las mismas, lo que resulta claramente eficiente y equitativo como ocurre con los aparcamientos regulados de Madrid.

Los autores Clásicos establecen el principio justo de la internalización de los costes, es decir, quien produzca efectos sociales negativos, los asuman y pague el bien o el servicio. En caso contrario, se generarían externalidades negativas que se manifestarían en forma de contaminación en los lugares cercanos a las vías de gran capacidad, sobre todo pueblos, ciudades y bosques.

Lógicamente la internalización y la recuperación de los costes a través de tarifas se deben destinar no solo a la operatividad y mantenimiento sino también a reducir los impactos medioambientales negativos, incluyendo la contaminación acústica. La tarifa por uso debe tener presente las emisiones de gases del vehículo y su impacto acústico.

El impacto del pago por uso debe ser neutral en los Presupuestos Generales del Estado, puesto que la recaudación por esta medida no debe ser complementaria al total de la recaudación tributaria, sino sustitutiva. Se debería compensar con la eliminación del impuesto “exótico” de matriculación o reducir la fiscalidad de los combustibles. Para que su pago sea equitativo y eficiente, en ningún caso se debe incrementar la presión fiscal por el pago por uso de las vías de gran capacidad.

2. Propuesta de un sistema de pago por uso en España

Las vías de gran capacidad deben considerarse bienes públicos no puros o económicos, en tanto que son divisibles, generan efectos de exclusión y presentan costes marginales crecientes con cada nuevo usuario. Estos costes derivan tanto del deterioro incremental de la infraestructura como de la congestión que puede producirse en determinados tramos y horarios. Bajo este marco, el principio lógico y eficiente es la implantación de un sistema de pago directo por uso, en lugar de financiar su mantenimiento y explotación a través de los impuestos generales.

Este enfoque responde a criterios de equidad y eficiencia social. Las carreteras no son gratuitas: cuando no se paga por su uso, los costes se distribuyen entre todos los contribuyentes, con independencia de si utilizan o no estas infraestructuras. Esto puede producir efectos regresivos y una redistribución perversa de la renta, en la que los usuarios intensivos se benefician a expensas del conjunto de la sociedad. El pago por vehículo, ajustado según características como el tonelaje o el nivel de emisiones, se presenta como el criterio más justo, dado que el impacto sobre la infraestructura y el entorno lo produce el vehículo y no su número de ocupantes.

Asimismo, un sistema de tarificación directa permite captar ingresos de los usuarios extranjeros, quienes en un modelo basado exclusivamente en impuestos solo contribuyen mediante el consumo de combustible. La experiencia de otros países demuestra que este sistema incrementa la recaudación sin elevar la carga fiscal sobre los contribuyentes nacionales, al tiempo que mejora la eficiencia medioambiental al reducir los atascos, el consumo de combustible y las emisiones.

Desde el punto de vista operativo, se propone implantar un modelo de tarificación por uso generalizado sobre los 17.000 km de vías de gran capacidad en España. La red se dividiría en unidades concesionales independientes, atendiendo a criterios económicos y geográficos, que permitan adaptar el servicio a la demanda real de cada zona. Estas unidades serían gestionadas por operadores privados bajo concesiones de larga duración (mínimo 25 años), que aseguren la viabilidad económico-financiera de las inversiones requeridas.

El sistema garantizaría la libertad de elección del usuario, asegurando la existencia de alternativas viarias gratuitas (carreteras convencionales) que permitan decidir entre coste, tiempo, seguridad o confort. Este modelo incorpora una lógica de responsabilidad individual y eficiencia económica, premiando el comportamiento sostenible y penalizando, mediante la tarifa, los impactos negativos sobre la infraestructura y el medio ambiente.

El estado actual de la red exige una puesta a cero estimada en 7.500 millones de euros, así como una modernización tecnológica y funcional valorada en 4.000 millones de euros adicionales. Las concesionarias asumirían estas inversiones, recuperándolas a lo largo de la vida útil del contrato. Para garantizar la sostenibilidad del sistema, se propone una estructura tarifaria basada en el principio de “quien usa, paga”.

3. Ejemplo de un Modelo Tarifario Propuesto

La tarifa por uso se construye sobre dos principios económicos:

- **Quien usa, paga**: se asigna al usuario el coste real del servicio prestado, incluyendo el desgaste de la infraestructura.
- **Quien contamina, paga**: se internalizan las externalidades ambientales (emisiones, ruido, accidentes, congestión).

Tabla 26 Modelo tarifario inicial propuesto.

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones y comparaciones con países de la UE.

Tipo de vehículo	Tarifa base propuesta (Eur/km)	Ajustes adicionales
Vehículos pesados (>7,5 t)	0,10-0,20	Según tonelaje + Emisiones

- **Internalidades**: costes que pagan directamente los usuarios mediante la tarifa. Son los que el sistema tarifario reconoce y compensa.
- **Externalidades**: costes que no son asumidos por quien los provoca, sino por la sociedad o el medio ambiente.

Estas tarifas pueden modularse para incorporar factores como:

- Categoría ambiental del vehículo (Euro I a Euro VI o cero emisiones).
- Franja horaria (mayor tarifa en horas punta).
- Entorno ambiental (tramos sensibles acústica o ecológicamente).
- Nivel de uso y congestión del tramo.

La siguiente tabla presenta un ejemplo de los costes incluidos en la tarifa propuesta de 0,14 Eur/km que incluye Internalidades y Externalidades. Esta propuesta de tarifa pretende internalizar los costes directos de acceso y uso de la infraestructura y refleja los impactos indirectos.

Tabla 27 Componentes de coste y valores estimados de internalidades y externalidades.

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones y comparaciones con países de la UE.

Componente de coste	Categoría	Descripción	Valor estimado
Mantenimiento y operación de la infraestructura	Internalidad	Costes asociados al firme, señalización, iluminación, limpieza y gestión vial	0,07 Eur/km
Coste marginal del desgaste (por eje y tonelaje)	Internalidad	Daño incremental sobre el pavimento, proporcional al peso bruto del vehículo	0,005 Eur/km
Contaminación atmosférica (NOx, PM10, etc.)	Externalidad	Impactos sobre la salud en zonas cercanas a la vía	0,015 Eur/km
Emisiones de CO_2 (cambio climático)	Externalidad	Impacto climático de los gases de efecto invernadero emitidos	0,020 Eur/km

Componente de coste	Categoría	Descripción	Valor estimado
Ruido rodado y acústico	Externalidad	Afectación a viviendas, fauna y calidad de vida en zonas cercanas	0,008 Eur/km
Congestión generada	Externalidad	Pérdida de tiempo y eficiencia en tramos con alta demanda	0,010 Eur/km
Siniestralidad vial (costes sociales de accidentes)	Externalidad	Costes sanitarios, humanos y materiales asociados a los accidentes	0,012 Eur/km

El objetivo es que la tarifa internalice todos los costes generados: no solo los relativos a mantenimiento y operación, sino también los costes externos derivados de la contaminación atmosférica (NOx, partículas), emisiones de CO_2, ruido, siniestralidad o fragmentación territorial. Según estudios recientes de CE Delft (2019) y la Agencia Europea de Medio Ambiente (2023), los costes externos de los vehículos pesados ascienden a 0,07 Eur/km adicionales a los costes de infraestructura. Por tanto, una tarifa total de 0,14 Eur/km permitiría cubrir de forma integral el impacto del transporte pesado por carretera.

La asignación de ingresos se orientaría principalmente al mantenimiento de las vías, cuyo coste anual se estima en 2.000 millones de euros. Además, parte de la recaudación se destinaría a restaurar daños medioambientales o mitigar externalidades en las zonas próximas a la infraestructura (ruido, emisiones, fragmentación ecológica). Solo una proporción reducida (10%) podría destinarse a las administraciones públicas en función de la titularidad del tramo, sin menoscabar la autosuficiencia del sistema.

Este modelo permitiría una reducción del gasto público de más de 2.000 millones de euros anuales en mantenimiento, y generaría un ingreso adicional de unos 400 millones de euros al año para las administraciones. En todo caso, la recaudación por uso debe ser sustitutiva y no complementaria respecto a los impuestos actuales. Para evitar una doble imposición, se propone revisar la fiscalidad vinculada al transporte, incluyendo la eliminación del impuesto de matriculación o la reducción del impuesto especial sobre hidrocarburos, asegurando así la neutralidad fiscal para el usuario.

Finalmente, este modelo se alinea con los principios de la economía ambiental y de los autores clásicos del bienestar: internalizar los costes negativos generados por un bien económico limitado. Aplicado correctamente, el sistema de pago por uso se presenta como una herramienta eficaz, equitativa y sostenible para financiar, conservar y modernizar la red viaria española, respetando la libertad del usuario y garantizando la eficiencia social del sistema.

La propuesta de tarificación se estructura en torno a una lógica de costes marginales sociales. Es decir, no solo se tiene en cuenta el uso de la infraestructura, sino también el impacto que dicho uso genera en el entorno económico, social y ambiental. En este sentido, se integran los siguientes componentes en la determinación del precio por kilómetro.

Los costes derivados del desgaste físico de la vía por vehículos pesados son proporcionales al volumen, frecuencia y masa total transportada. Las estimaciones

disponibles y estudios sectoriales como los de SEOPAN cifran el déficit estructural de conservación en más de 3.000 millones de euros anuales. Aplicando un criterio de reparto justo según daño estructural y frecuencia de uso, se establece una tarifa base media de 0,13 a 0,15 Eur/km, diferenciada por categoría y tipo de vehículo:

Tabla 28 Tarifas aplicables según clase EURO de emisión y tonelaje.

Fuente: Elaboración propia a partir de estimaciones y comparaciones con países de la UE.

Tipo de vehículo pesado	Tarifa base (Eur/km)
Camión EURO VI o eléctrico	0,13
Camión EURO V o inferior	0,14
Vehículo articulado (3 o más ejes)	0,15

La eficiencia y aceptabilidad de cualquier esquema de tarificación moderna requiere la adopción de tecnologías avanzadas de cobro sin barreras (MLFF: Multi-Lane Free Flow), ya que permiten minimizar las interferencias con el tráfico, reducir costes de operación y evitar congestión en puntos de control.

Cabe mencionar que, en el caso de no disponerse de un desglose de categorías de tráfico pesado, tanto de tonelaje como de clase de emisiones EURO, se aplicaría una tarifa única de 0,14 Eur/km a los vehículos pesados con un tonelaje superior a 7,5t

4. Matriz de Riesgos

La implantación de un sistema de tarificación por uso en la red viaria española, y concretamente en el corredor A-2 (tramo M-50–Ledanca), requiere una gestión integral del riesgo que contemple aspectos normativos, tecnológicos, financieros y sociales. En la siguiente matriz se identifican los principales riesgos del proyecto, su probabilidad e impacto, así como las medidas de mitigación propuestas:

Tabla 29 Matriz de riesgos inicial del proyecto.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos e información pública.

Categoría	Riesgo Identificado	Probabilidad	Impacto	Mitigación propuesta
Regulación	Ausencia de marco legal estatal específico para implantar pago por uso	Alta	Alto	Alinear diseño y costes con el RD 205/2025, que establece criterios máximos y obliga desde 25/3/2026
Aceptación social	Percepción pública negativa (asimilación a “nuevo impuesto”)	Alta	Medio	Campaña de comunicación pública centrada en equidad, sostenibilidad y reinversión.
Técnica	interoperabilidad con sistemas europeos (EETS) + Obsolescencia	Media	Medio	Selección de tecnología certificada con estándares DSRC y GPS homologados.
Recaudación	Impago o evasión por parte de usuarios no registrados (infractores)	Media	Medio	Refuerzo del sistema ANPR + sanción automática + convenios de intercambio de datos entre administraciones.
Tráfico	Desvío del tráfico pesado a vías secundarias no tarifadas	Media	Alto	Aplicar tarificación en red cerrada o estudiar medidas de acceso restringido a zonas no tarifadas.
Económico	Ingresos inferiores a los proyectados (por menor tráfico o alta elasticidad)	Media	Alto	Revisión anual de tarifas, adaptación dinámica a demanda real.

El análisis parte de un enfoque preventivo, orientado a la minimización de incertidumbres regulatorias y de demanda, al mismo tiempo que busca garantizar la interoperabilidad tecnológica y la aceptación social del modelo. Cada riesgo se ha evaluado mediante una escala cualitativa (Alta, Media, Baja) tanto en probabilidad como en impacto, de acuerdo con la metodología estándar del European Investment Bank de análisis y gestión de riesgos de proyectos de infraestructura.

Riesgos regulatorios

La ausencia de un marco legal estatal específico constituye uno de los principales riesgos estratégicos. Aunque el Real Decreto 205/2025 establece criterios máximos y

fija la obligatoriedad de tarificación a partir de marzo de 2026, la falta de desarrollo reglamentario complementario podría retrasar su implementación. La mitigación pasa por alinear el diseño técnico y financiero del sistema con la futura normativa nacional y europea (Directiva UE 2022/362), garantizando la compatibilidad con la política de tarificación por emisiones y el principio de quien contamina paga.

Riesgo de aceptación social

La percepción del peaje como un "nuevo impuesto" puede generar rechazo ciudadano y oposición política. La mitigación requiere una estrategia de comunicación institucional centrada en la equidad territorial, sostenibilidad ambiental y reinversión de ingresos en la propia red viaria. Este enfoque permite trasladar el mensaje de que el sistema no busca recaudar, sino financiar el mantenimiento y la modernización de infraestructuras existentes.

Riesgo técnico

Los riesgos técnicos se asocian principalmente a dos factores: la interoperabilidad tecnológica y la obsolescencia de los sistemas. Por un lado, la interoperabilidad con los sistemas europeos (EETS) resulta esencial para garantizar el uso de dispositivos OBU y plataformas comunes en toda la UE. La mitigación implica la adopción de estándares DSRC y GNSS certificados, compatibles con los sistemas de Portugal, Francia y Alemania, y la homologación bajo el marco EETS.

Por otro lado, la obsolescencia tecnológica representa un riesgo creciente en proyectos con alto componente digital. Los avances en sensores, comunicaciones y tratamiento de datos pueden dejar obsoletos los equipos o software en menos de una década. Para mitigar este riesgo se recomienda planificar un programa de actualización tecnológica periódica (cada 5-7 años), con contratos de mantenimiento que incluyan cláusulas de technology refresh y escalabilidad de hardware y software. Asimismo, el uso de plataformas modulares y basadas en arquitectura abierta permitirá la incorporación de nuevas funcionalidades sin comprometer la continuidad operativa

Riesgo de recaudación

El riesgo de evasión o impago por parte de usuarios no registrados afecta directamente la sostenibilidad financiera del sistema. Este riesgo, de probabilidad e impacto medios, se mitiga mediante el refuerzo del sistema ANPR, la automatización de sanciones, y la integración de bases de datos interadministrativas que faciliten la identificación de infractores, siguiendo los modelos aplicados en Alemania y Austria.

Riesgo de tráfico

Existe riesgo de desvío de tráfico pesado hacia rutas secundarias no tarifadas, lo que podría disminuir la recaudación y generar externalidades ambientales y de seguridad vial. La mitigación pasa por ampliar progresivamente la cobertura de tarificación hacia una red cerrada o establecer restricciones de acceso a zonas no tarifadas, además de monitorizar la redistribución de flujos mediante datos de movilidad y modelos de elasticidad.

Riesgo económico

En el plano económico-financiero, destacan dos riesgos principales:

Encarecimiento del transporte de mercancías y aumento de los precios logísticos, derivado de la internalización del nuevo coste de peaje. La aplicación del pago por uso puede incrementar los costes operativos de las empresas transportistas y, por extensión, trasladarse parcialmente al precio final de las mercancías. Aunque este efecto es inherente a la política de internalización de costes externos, se mitiga mediante bonificaciones o descuentos por eficiencia ambiental, apoyo financiero a la renovación de flotas y mecanismos de compensación temporal en los sectores más sensibles, tal como permiten la Directiva (UE) 2022/362 y las estrategias nacionales de movilidad sostenible

Ingresos inferiores a los proyectados por menor tráfico o alta elasticidad precio-demanda. Este riesgo (probabilidad media, impacto alto) se mitiga mediante revisiones anuales de tarifas, ajustadas a la inflación y al comportamiento real del tráfico, aplicando mecanismos de ajuste dinámico que garanticen la sostenibilidad económica del sistema.

5. Corredor Propuesto

El presente estudio analiza la viabilidad de implantar un sistema de pago por uso para vehículos pesados en el tramo de la autovía A-2 comprendido entre el enlace con la M-50, al este de Madrid, y el entorno de Ledanca, en la provincia de Guadalajara. El tramo, de aproximadamente 75 km de longitud, se encuentra íntegramente gestionado por el Estado y constituye una vía de alta capacidad fundamental dentro del eje internacional E-90.

El corredor soporta un volumen relevante de tráfico pesado de largo recorrido, incluyendo flujos procedentes del corredor del Ebro y del noreste peninsular (Cataluña, Aragón, Francia) con destino a los principales nodos logísticos de la zona centro y al suroeste peninsular (Extremadura, Andalucía occidental y Portugal). Asimismo, canaliza el acceso a plataformas logísticas clave (Coslada, Azuqueca de Henares, Guadalajara), así como al aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas y al Puerto Seco de Madrid.

Según datos del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible del año 2023, el tramo presenta una intensidad media diaria (IMD) superior a 75.000 vehículos en su sección más próxima a Madrid, con proporciones de vehículos pesados superiores al 15% en tramos como Torrejón de Ardoz y Alcalá de Henares. Hacia el este, la IMD se reduce a cifras próximas A-25.000 vehículos, manteniéndose un porcentaje relevante de vehículos pesados (10-12%).

El uso intensivo de esta infraestructura por parte del transporte de mercancías genera costes asociados no internalizados en la actualidad, lo que refuerza la necesidad de avanzar hacia un modelo de financiación basado en el principio de “quien usa paga, quien contamina paga”.

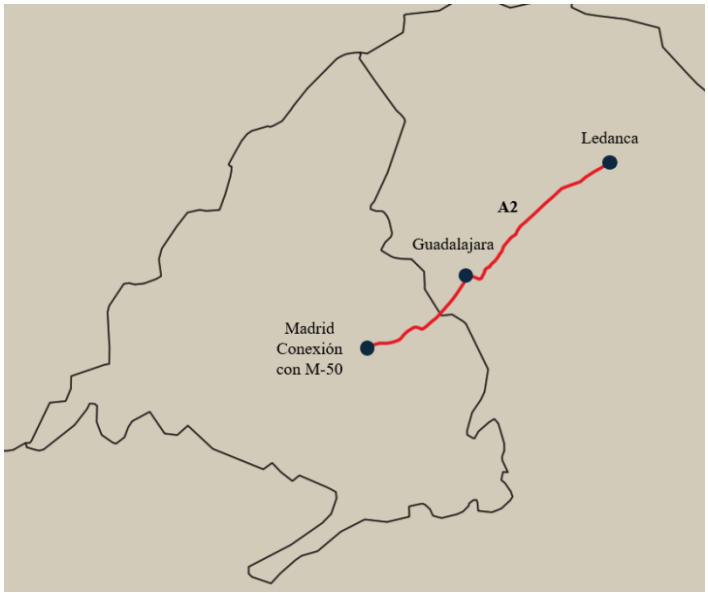


Figura 10 Tramo propuesto de la A-2.

Fuente: Elaboración propia.

La figura muestra el trazado propuesto para la implantación de un sistema de tarificación por uso exclusivo para vehículos pesados, correspondiente al tramo de la autovía A-2 comprendido entre la conexión con la M-50 (en el entorno de Madrid) y la localidad de Ledanca, en la provincia de Guadalajara.

Este corredor, de aproximadamente 75 kilómetros de longitud, discurre por un eje estratégico de la red estatal, formando parte del itinerario europeo E-90, y conecta importantes nodos logísticos y urbanos como Torrejón de Ardoz, Alcalá de Henares, Azuqueca de Henares y Guadalajara, hasta alcanzar zonas de tránsito interregional en Trijueque y Ledanca.

Acompañando al mapa, se presenta una tabla con los datos de 14 estaciones de aforo tipo permanente situadas a lo largo del corredor. Para cada punto de control se indica la provincia, el punto kilométrico (P.K.), conexión y longitud:

Tabla 30 División y conexiones del tramo propuesto de la A-2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

Vía	Provincia	PK Inicial	PK Final	Enlace-Salida	Longitud
A-2	Madrid	16.8	17.73	M-115	0.93
A-2	Madrid	17.73	20.1	M-108	2.37
A-2	Madrid	20.1	21.3	Aeropuerto-Torrejón de Ardoz	1.2
A-2	Madrid	21.3	23.4	M-300	2.1
A-2	Madrid	23.4	27.8	Alcalá de Henares	4.4
A-2	Madrid	27.8	31.3	Alcalá de Henares	3.5
A-2	Madrid	31.3	38.1	M-116	6.8
A-2	Madrid	38.1	38.76	M-116	0.66
A-2	Guadalajara	38.76	41.6	Azuqueca de Henares	2.84
A-2	Guadalajara	41.6	44	Azuqueca de Henares	2.4
A-2	Guadalajara	44	47.3	Alovera	3.3
A-2	Guadalajara	47.3	50.5	N-320	3.2
A-2	Guadalajara	50.5	54.71	N-320a	4.21
A-2	Guadalajara	54.71	58.1	CM-10	3.39
A-2	Guadalajara	58.1	60.3	Taracena R-2	2.2
A-2	Guadalajara	60.3	73.2	CM-2011	12.9
A-2	Guadalajara	73.2	82.7	CM-2008	9.5
A-2	Guadalajara	82.7	94.4	Ledanca	11.7
A-2	Guadalajara	94.4	101.2	N-204	6.8

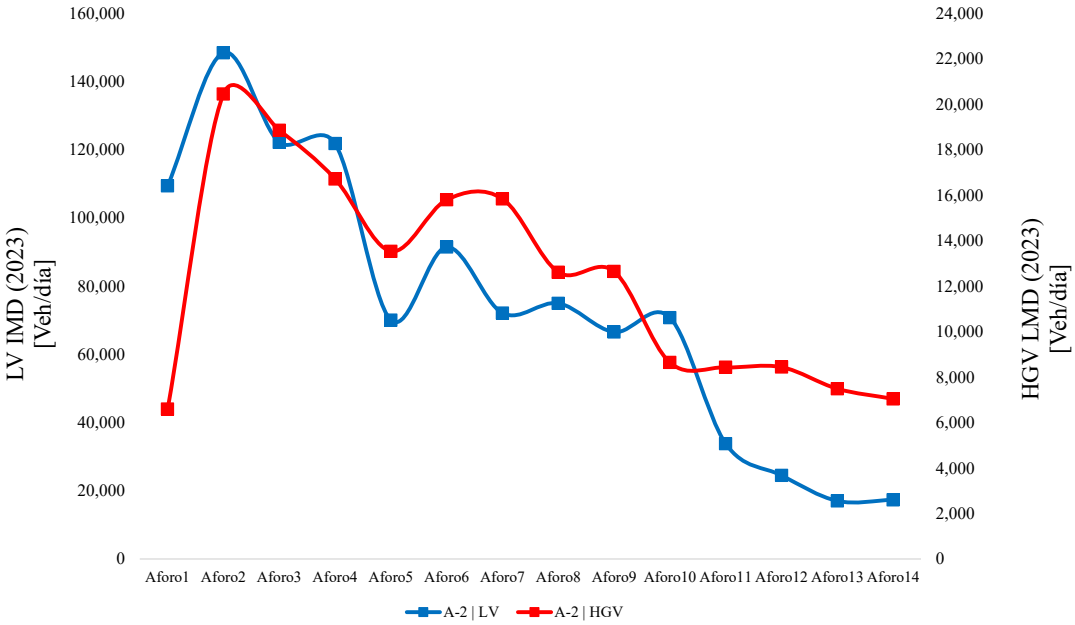


Figura 11 Perfil de tráfico en el tramo propuesto.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

En los tramos iniciales, correspondientes a Torrejón de Ardoz (P.K. 14,43 - 23,07), se registran las mayores intensidades de tráfico, superando los 160.000 vehículos/día, con una proporción de vehículos pesados que oscila entre el 5,7% y el 12,1%, asociada a zonas industriales y periurbanas.

En la sección intermedia, que atraviesa Alcalá de Henares (P.K. 27,07 - 38,71), la IMD se mantiene por encima de los 100.000 vehículos/día, con un porcentaje estable de vehículos pesados entre el 12% y el 15%.

A partir de Guadalajara y en dirección este, la intensidad total de tráfico desciende hasta valores en torno a los 60.000 - 80.000 vehículos/día, pero la proporción de vehículos pesados se incrementa progresivamente, alcanzando valores del 25% al 29% en Valdenoches, Trijueque y Ledanca, lo que confirma el carácter logístico e interregional de esta sección.

Este patrón decreciente de tráfico total, combinado con un crecimiento relativo del peso del transporte pesado, es determinante para la configuración del sistema de peaje. Permite priorizar la localización de pórticos de control en los tramos con mayor densidad de vehículos pesados y proyectar con mayor precisión los ingresos esperados a lo largo del corredor.

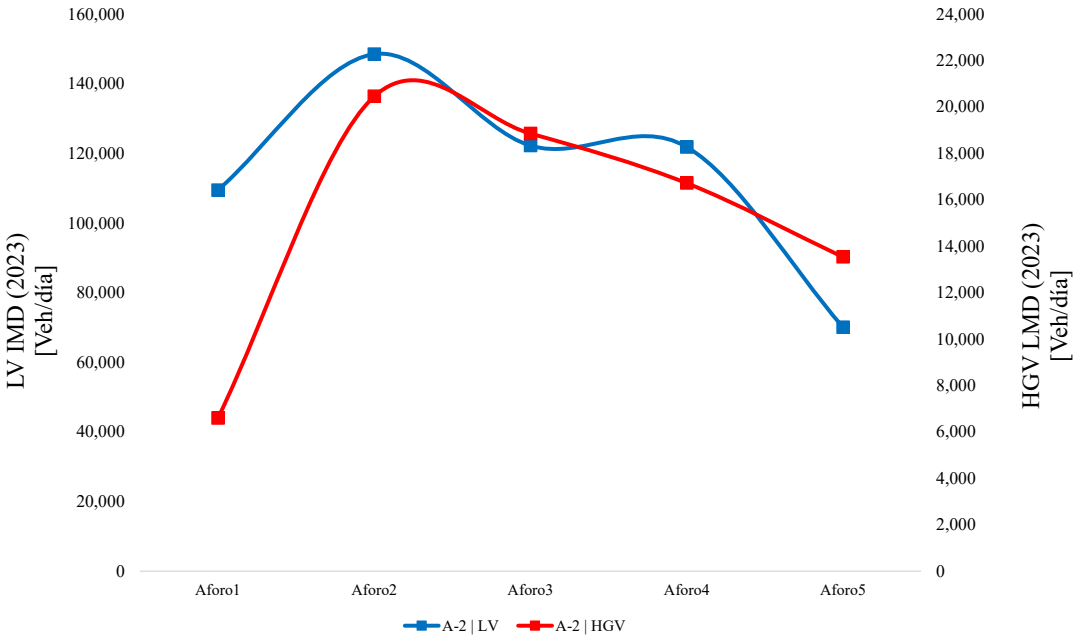


Figura 12 Perfil de tráfico en el tramo 1 del corredor.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

Este tramo comprendido entre el PK 17,43 y el PK 29 es considerado como un hub logístico de primera magnitud en el eje A-2. En HGV, la serie marca un salto hasta un pico en el entorno Alcalá/Torrejón, y a partir de ahí un descenso suave, esto podría considerarse como una señal inequívoca de la concentración logística del Corredor del Henares (Casablanca, La Garena, Meco y parques adyacentes) y de la conectividad transversal con M-300 (hacia Loeches/Arganda) que canaliza flujos de abastecimiento regional.

Por otro lado, el tramo comprendido entre el PK 29 y el PK 51,15 abarca los accesos de Alcalá de Henares Este, Meco, Azuqueca de Henares y Alovera, se observa una transición progresiva de tráfico urbano a tráfico interurbano y logístico. En cuanto al tráfico pesado, el comportamiento es más homogéneo hasta el PK 47 (Alovera), con valores que oscilan entre 14.000 y 16.000 vehículos pesados/día, para después iniciar un descenso hasta el entorno de 12.000 vehículos pesados/día a la altura de la

conexión con la N-320. Este cambio de tendencia refleja la dispersión de flujos logísticos desde los polos de Azuqueca y Alovera hacia la N-320 y la CM-10, con redistribución del transporte de larga distancia hacia itinerarios alternativos como la R-2.

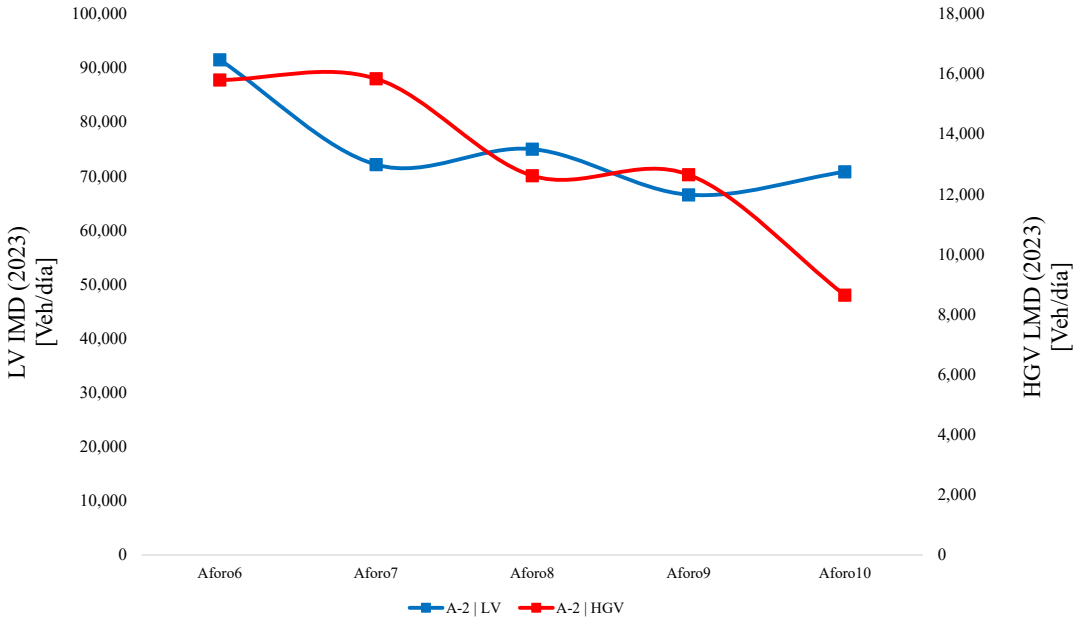


Figura 13 Perfil de tráfico en el tramo 2 del corredor.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

Finalmente, el tramo comprendido entre el PK 51,15 y el PK 97,96 de la A-2, corresponde al entorno de Guadalajara, Taracena, Ledanca y accesos a la N-204, el patrón de tráfico refleja claramente la transición del corredor metropolitano a la red interurbana de largo recorrido, con un descenso pronunciado de la IMD de vehículos ligeros (LV) y una mayor estabilidad del tráfico pesado (HGV), vinculado al tránsito de mercancías interprovinciales, manteniendo valores más estables, en torno a 8.000 vehículos/día en el inicio del tramo, con un leve descenso hasta 7.000 en la zona de Ledanca. Este comportamiento refleja el peso del tráfico de tránsito nacional, que utiliza la A-2 como principal eje logístico entre Madrid, Zaragoza y Barcelona, incluso en los tramos de menor densidad poblacional.

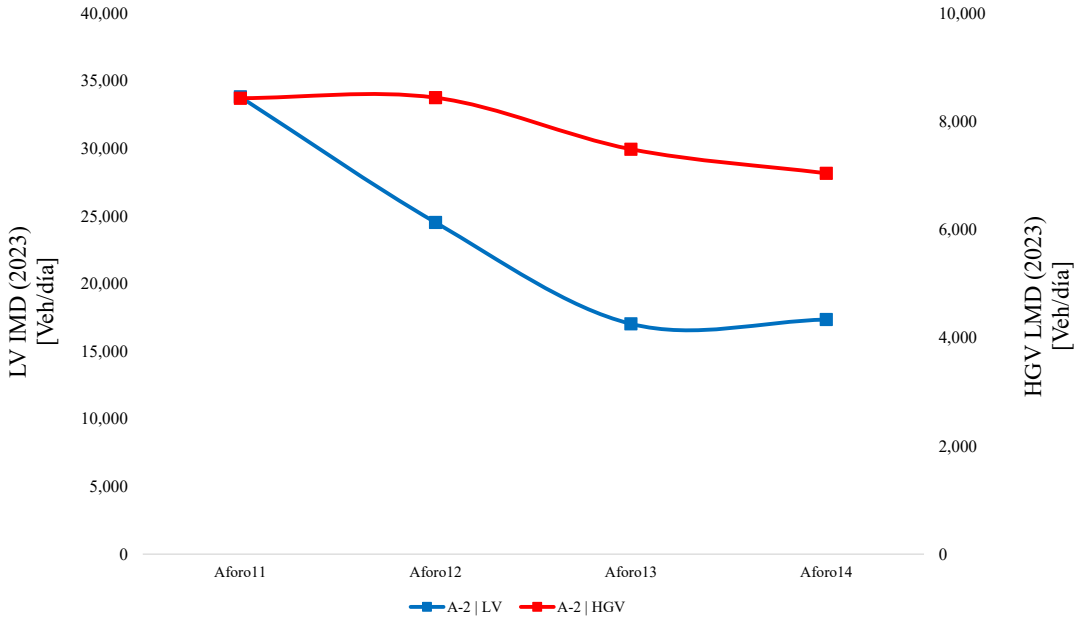


Figura 14 Perfil de tráfico en el tramo 3 del corredor.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

6. Configuración Local Relacionada con el Tráfico

6.1 Ámbito Geográfico y Entorno Local - Actividades Industriales y Logísticas en el Área

El crecimiento y la concentración de actividades industriales y logísticas alrededor de los ejes principales de transporte constituyen uno de los motores fundamentales del tráfico de mercancías en las proximidades de grandes ciudades.

En España, el crecimiento de polígonos logísticos en áreas como el Corredor de Henares en Madrid, Zaragoza o el Vallès en Barcelona ha intensificado los flujos de vehículos pesados hacia autopistas y autovías de alta capacidad.

Esta dinámica se ve reforzada por la implantación de modelos de producción just-in-time y los servicios de distribución urbana, especialmente el servicio de la última milla, que demandan recorridos frecuentes de abastecimiento desde los grandes centros logísticos hacia los consumidores finales.

Estas rutas de abastecimiento alimentan los corredores mayores, como la A-2, no solo en horas valle sino también en picos de demanda, generando cargas de tráfico adicionales que ponen en tensión la capacidad actual de los enlaces urbanos e interurbanos.

El tramo A-2 entre el enlace con la M-50 y Ledanca articula el “Corredor del Henares”, uno de los hubs logísticos más densos del país. Los aforos oficiales situados en este tramo indican una IMD elevada de vehículos pesados, con picos próximos al área metropolitana y una atenuación progresiva hacia Guadalajara-Ledanca. Para dimensionar, el Mapa de Tráfico estatal con series históricas disponibles hasta el año 2023 permite verificar intensidades y perfiles de tráfico por subtramos de la A-2 y su conexión con M-45/M-50. (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2023).

La Base Aérea de Torrejón (aproximadamente de 20-25 km del corredor) no es un generador estructural de mercancía por carretera; su operación es principalmente militar y de apoyo institucional, con actividad civil de aviación ejecutiva ya trasladada a Barajas. Su influencia viaria es puntual y asociada a eventos u obras en M-50/M-45, sin constituir un polo logístico de tráficos pesados comparable a los polígonos del eje. (Ministerio de Defensa - Ejército del Aire y del Espacio, 2023).

El primer gran nodo logístico hacia el noreste es Meco (Parque Logístico Meco / Alma Henares), con implantaciones de gran formato (e.g., proyectos de segunda corona y anuncios de nuevos centros de distribución y de alimentación y retail) que generan tráficos de primera-milla (inbound desde A-2/R-2) y distribución metropolitana (outbound hacia M-50/M-45). Este hub funciona como “gateway” de entrada a Madrid para flujos de alta rotación (FMCG, e-commerce) y presiona las intensidades pesadas en el interfaz A-2 y M-50. (Planifica Madrid, s. f., Ayuntamiento de Meco, 2022).

Por otro lado, Azuqueca de Henares y Meco-Alovera concentran plataformas importantes con logística alimentaria y generalista (Miralcampo, Los Picones/La Ballestera). Además, Azuqueca añade un activo diferencial: el Puerto Seco/Terminal Intermodal Centro, que canaliza contenedor ferroviario con orígenes/destinos portuarios y descarga parte del tráfico pesado “puerta-a-puerta”, sustituyéndolo por intermodalidad. La intermodalidad estabiliza el mix modal, pero mantiene un volumen

diario notable de tráfico de pesados para primera/última milla entre terminal, naves y A-2.

Entre Alovera, Cabanillas y Marchamalo se consolida un “core” logístico regional, con nuevos desarrollos (polígono conjunto Alovera-Cabanillas) y la plataforma intermodal Puerta Centro-Ciudad del Transporte (Marchamalo), que ancla operaciones de gran escala (alimentación, textil, e-commerce) y habilita la transferencia ferrocarril-carretera. Este bloque explica buena parte del tráfico pesado bidireccional: inbound desde Aragón/Cataluña/Valencia y outbound hacia Madrid y otras radiales como la R2.

Adicionalmente, la nueva terminal de Port Tarragona en Guadalajara-Marchamalo refuerzan la intensidad intermodal del corredor, con superficie y pipeline de capacidades ferroviarias adicionales. Este “dry-port system” reduce necesidades de largo recorrido por carretera en algunos flujos, pero induce tráficos pesados locales/regionales incrementando la densidad de camiones en accesos y enlaces cercanos (A-2/R-2/CM-101).

Guadalajara capital y su anillo industrial actúan como “pool” de empleo y suelo para operaciones y cross-dock, con extensiones hacia Torija (a la altura del PK 73 de la A-2), que marca el cierre del corredor logístico de Madrid según agentes del mercado. Torija capta plataformas de gran formato orientadas a larga distancia (A-2/R-2/N-320), generando tráficos pesados estabilizados con menor estacionalidad que la última-milla metropolitana.

En términos operativos, el porcentaje de pesados en la red estatal y autonómica de la zona se sitúa típicamente entre el 10-15% según tramo, uso y proximidad a polígonos. Los polos Meco-Azuqueca-Alovera-Cabanillas-Marchamalo y, en menor medida, Guadalajara-Torija, explican gran parte del tráfico pesado entrante/saliente del tramo M-50–Ledanca. La intermodalidad (Azuqueca/Guadalajara-Marchamalo) convierte tráficos de largo recorrido en flujos pesados de distribución regional mientras que la última milla metropolitana ancla las puntas en accesos a M-45/M-50.

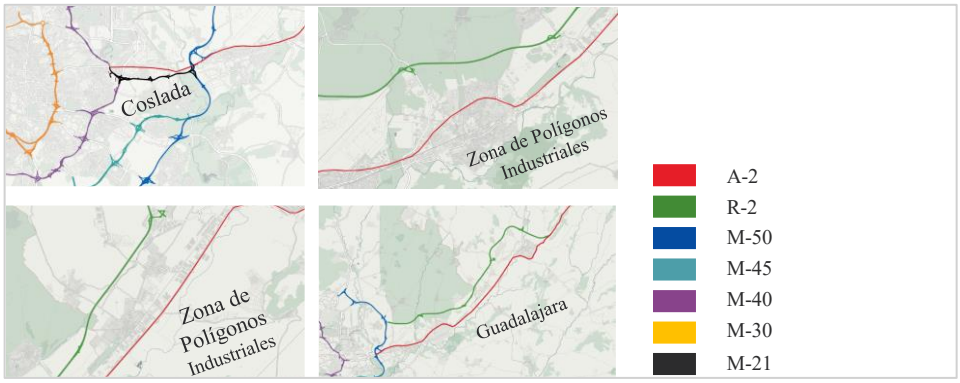


Figura 15 Actividad logística en el corredor.

Fuente: Elaboración propia.

7.2 Planes nacionales de transporte - Nuevos planes de infraestructura

España ha puesto en marcha una hoja de ruta ambiciosa en materia de transporte y logística, enmarcada en los compromisos de sostenibilidad, digitalización e intermodalidad. El Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible reportó que parA-2024 se ejecutaron inversiones por un valor aproximado de 10.000 millones de euros, cifra que representa el volumen de gasto histórico más elevado en infraestructura de transporte en un período de 13 años.

En el contexto del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), el Ministerio ha adjudicado contratos por más de 7.600 millones de euros para inversiones directas, muchas de las cuales están ya en ejecución.

Una parte importante de esas inversiones se han dirigido al ferrocarril, con 5.629 millones de euros ejecutados en 2024 para mejora, renovación y ampliación de líneas dedicadas al transporte de mercancías, proximidad y viajeros.

Además, ADIF y ADIF Alta Velocidad tienen programada una inversión total de 24.100 millones de euros para el período 2022-2026, más de la mitad de la cual está destinada a la red convencional, Cercanías y al transporte de mercancías. Estas actuaciones incluyen renovación de vías, electrificación, mejoras de estaciones, supresión de pasos a nivel y mejoras tecnológicas.

6.2.1 Puerto seco de Marchamalo en Guadalajara

El Puerto Seco de Marchamalo, o Port Tarragona Terminal, ubicado en la Ciudad del Transporte de Marchamalo (Guadalajara), es una infraestructura logística estratégica recientemente finalizada y es el segundo que se asienta en la provincia de Guadalajara, gestionado por el Port de Tarragona sobre una parcela con una superficie 150.000 m2, que, en combinación con los 2,2 millones de m2 de Puerta Centro-Ciudad del Transporte, convierten a este nodo logístico en el más importante de toda la zona central de la Península Ibérica., cuyo objetivo es convertirse en el nodo de conexión más relevante para los flujos de mercancías entre el centro de la península y los puertos marítimos españoles, en especial el Puerto de Tarragona.

Esta nueva terminal permitirá al Port de Tarragona expandirse hacia el centro de la península y posicionarse en la que será la plataforma logística intermodal más importante de España, mientras que para Marchamalo supone una salida directa al mar Mediterráneo, con recinto aduanero propio para la gestión de mercancías que llegan y salen a cualquier destino del mundo.

Este proyecto constituye una unión de diferentes cadenas logísticas y tendrá capacidad para canalizar los principales flujos comerciales nacionales e internacionales con origen y/o destino en Madrid y su área metropolitana con uno de los principales puertos de España. Una terminal intermodal multipropósito en este enclave estratégico situado a 70 km de Madrid y conectado con las principales vías de comunicación viaria y ferroviaria del país.

Las obras comenzaron en abril de 2021 y, a fecha de octubre de 2025, el proyecto se encuentra finalizado a nivel constructivo, pendiente únicamente de los trámites administrativos ante Puertos del Estado, ADIF y la empresa operadora para iniciar la explotación comercial. El recinto ha sido diseñado con capacidad para operar trenes de hasta 750 metros de longitud, con una programación prevista de hasta diez

movimientos diarios (cinco por sentido), lo que permitirá gestionar del orden de 80.000 mercancías diarias y posibilidad de albergar hasta 45.000 contenedores.



Figura 16 Ubicación de los puertos secos con acceso directo a la A-2.

Fuente: Stock Logistic.

La puesta en servicio del Puerto Seco de Marchamalo, localizado en la Ciudad del Transporte de Guadalajara, tendrá un impacto directo en la generación, atracción y redistribución del tráfico pesado en el entorno del Corredor del Henares. Su localización estratégica, encajada entre la A-2 y la R-2, lo convierte en un punto modal de alta intensidad logística, capaz de modificar los patrones de movilidad de mercancías tanto en los accesos metropolitanos de Madrid como en los tramos interurbanos hacia Zaragoza y Cataluña.

En primer lugar, se prevé un incremento del tráfico de vehículos pesados en la A-2, especialmente entre los puntos kilométricos 40 y 60, donde confluyen los accesos a los polígonos de Azuqueca de Henares, Marchamalo y Cabanillas del Campo. Este aumento responderá a un mayor número de trayectos de conexión entre el puerto seco y los centros logísticos del entorno (Amazon, XPO, Luís Simões, CBL, entre otros), así como al tráfico de primera y última milla vinculado a operaciones intermodales (carretera-ferrocarril). Dicho tráfico se caracterizará por recorridos cortos de distribución y retorno, concentrados en franjas horarias laborales, lo que puede incrementar la intensidad media diaria de pesados (IMDp) en los tramos metropolitanos de la A-2.

En segundo término, la R-2 podría experimentar un efecto dual. Por un lado, se prevé un incremento moderado del tráfico de acceso al puerto seco desde Madrid y el oeste

del Corredor del Henares, dado que la autovía radial ofrece una conexión directa y menos congestionada hacia Marchamalo a través de la CM-101. Por otro lado, la R-2 podría captar parte del tráfico pesado de largo recorrido que opte por itinerarios alternativos con menor densidad y tiempos de tránsito más estables. Este fenómeno generaría una distribución más equilibrada del flujo pesado entre ambas vías, reduciendo la presión sobre la A-2 en los tramos urbanos y periurbanos de Alcalá de Henares y Torrejón de Ardoz.

Desde una perspectiva macroeconómica, el puerto seco actuará como catalizador logístico del Corredor del Henares, potenciando su rol como principal eje de transporte intermodal del centro peninsular. La disponibilidad de servicios ferroviarios regulares (hasta diez movimientos diarios de trenes de 750 m de longitud) incentivará el uso del ferrocarril para el transporte de larga distancia, mientras que el tráfico por carretera se concentrará en trayectos de conexión entre nodos logísticos y terminales ferroviarias. A medio plazo, este cambio modal podría reducir parcialmente la intensidad de tráfico pesado de largo recorrido en la A-2, sustituyéndola por movimientos locales de mayor frecuencia, pero menor distancia promedio.

6.2.2 Autopista ferroviaria Azuqueca-Valladolid-Burgos-Júndiz

La autopista ferroviaria Azuqueca-Júndiz constituye uno de los proyectos estratégicos más relevantes del sistema logístico español orientado a la descarbonización del transporte de mercancías por carretera. Esta infraestructura permitirá el transporte de semirremolques completos sobre vagones ferroviarios, conectando el nodo intermodal de Azuqueca de Henares (Guadalajara) con la terminal de Júndiz (Vitoria-Gasteiz), a lo largo de aproximadamente 528 kilómetros electrificados. El proyecto, impulsado por ADIF, ha completado los estudios de gálibos y viabilidad técnica, identificando 37 actuaciones necesarias para su adecuación (29 túneles y 4 pasos superiores), y prevé una frecuencia inicial de 18 servicios semanales, nueve en cada sentido.

Desde el punto de vista funcional, la autopista ferroviaria se concibe como una alternativa intermodal de alta capacidad destinada a transferir parte del tráfico pesado de larga distancia desde la carretera hacia el ferrocarril. La conexión directa entre el Corredor del Henares y el Eje Atlántico permitirá optimizar las cadenas logísticas entre el centro y el norte de la Península, generando efectos diferenciados sobre la demanda de transporte por carretera y sobre la distribución territorial del tráfico pesado.

Por un lado, se espera una reducción progresiva del tráfico de vehículos pesados de largo recorrido en los tramos interurbanos de la A-2 y otras autovías paralelas, especialmente en el eje Madrid-Guadalajara-Zaragoza. La posibilidad de transportar semirremolques completos por ferrocarril reducirá el número de trayectos de larga distancia por carretera, contribuyendo a la disminución de la intensidad media diaria de pesados (IMDp) y a una menor presión sobre la capacidad de la red viaria. Este desplazamiento modal contribuirá también a la reducción de emisiones de CO_2, de los costes externos por congestión y de los riesgos de accidentalidad asociados al tráfico de mercancías.

Por otro lado, la implantación del servicio generará un aumento del tráfico pesado de carácter local o regional en el entorno de Azuqueca de Henares. Las carreteras de acceso a la terminal ferroviaria, así como los viales logísticos de conexión con los polígonos industriales y centros de distribución cercanos, absorberán flujos adicionales derivados de las operaciones de primera y última milla. Este tipo de tráfico

de menor recorrido pero alta frecuencia tenderá a concentrarse en franjas laborales y en horarios de carga y descarga, lo que requerirá mejoras en la conectividad de acceso y en la gestión de la movilidad interna en el entorno urbano e industrial.

Adicionalmente, la autopista ferroviaria puede redistribuir los flujos pesados entre la A-2 y la R-2, al concentrar parte de los movimientos logísticos hacia la terminal de Azuqueca y hacia las áreas industriales adyacentes. La R-2 podría absorber parte de este tráfico, funcionando como vía de acceso alternativa menos congestionada, mientras que la A-2 podría experimentar un alivio parcial en los tramos de largo recorrido. En conjunto, esta dinámica contribuirá a equilibrar el reparto modal y territorial del transporte pesado en el Corredor del Henares, reduciendo la congestión estructural en los accesos metropolitanos de Madrid y favoreciendo la competitividad logística del eje.

Desde una perspectiva estratégica, estos dos proyectos se alinean con los objetivos europeos de la Red Transeuropea de Transporte (TEN-T) y con la política de fomento de los corredores intermodales sostenibles, posicionando al nodo de Guadalajara como uno de los principales puntos de intercambio modal del centro peninsular.



Figura 17 Autopista ferroviaria Azuqueca-Valladolid-Burgos-Júndiz.

Fuente: ADIF.

6.2.3 Terminal ferroviaria de Madrid-Abroñigal

La terminal ferroviaria de Madrid-Abroñigal constituye uno de los principales nodos logísticos intermodales del centro peninsular, desempeñando un papel clave en la articulación del transporte de mercancías por ferrocarril en el entorno urbano de Madrid. Ubicada en el distrito de Méndez Álvaro, en el interior del anillo de la M-30, esta instalación gestionada por ADIF dispone de varias playas de vías, naves logísticas y zonas de carga y descarga especializadas en unidades de transporte

intermodal (UTIs), lo que le confiere una capacidad significativa para operar trenes de mercancías de media y larga distancia.

En el marco de la estrategia nacional de impulso al transporte intermodal promovida por el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Abroñigal forma parte del programa de autopistas ferroviarias, concebido para trasladar parte del tráfico pesado por carretera al ferrocarril y reducir la huella de carbono del sistema logístico español. El Ministerio prevé que esta terminal funcione como punto de conexión de los servicios entre el Puerto de Valencia y Madrid, con entrada en operación antes de finales de 2024.

El desarrollo de la autopista ferroviaria Valencia-Madrid (Abroñigal) permitirá el transporte de semirremolques completos sobre tren, incrementando la eficiencia y reduciendo la congestión en los accesos viarios al área metropolitana de Madrid. Este servicio se integra dentro de la política de movilidad sostenible e intermodalidad impulsada por la Unión Europea y por el Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia (PRTR), favoreciendo el cambio modal hacia modos de transporte de menor impacto ambiental.

Desde el punto de vista operativo, la terminal de Abroñigal actúa como puente logístico urbano, canalizando los flujos de mercancías entre la red ferroviaria y los centros de distribución situados en el entorno metropolitano y en el Corredor del Henares. Este papel dual genera efectos diferenciados sobre el tráfico pesado:

Por un lado, la autopista ferroviaria reducirá el volumen de vehículos pesados de largo recorrido que acceden a Madrid desde los puertos levantinos por la A-3 y la A-2, al sustituir parte de estos trayectos por transporte ferroviario directo hasta Abroñigal.

Por otro lado, se producirá un incremento del tráfico pesado local y de alimentación, derivado de las operaciones de primera y última milla entre la terminal ferroviaria y los centros logísticos, polígonos industriales y plataformas urbanas de distribución situadas en el entorno metropolitano.

Este tráfico de corta distancia, concentrado en franjas diurnas, puede generar tensiones en la movilidad urbana, especialmente en los accesos a la terminal desde la M-30 y la avenida de Méndez Álvaro. Será por tanto necesario un plan coordinado de gestión de flujos, optimización de horarios y priorización logística para minimizar interferencias con el tráfico urbano y reducir los impactos asociados a ruido, emisiones y congestión.

En paralelo, el Ministerio ha anunciado la transición progresiva de las operaciones de Abroñigal hacia la nueva terminal de Madrid-Vicálvaro, concebida como el principal centro intermodal de la capital a partir de 2026. Durante este periodo de transición coexistirán ambos nodos, lo que podría redistribuir parcialmente los flujos pesados entre los corredores de acceso (A-2, R-3 y M-45), generando un reequilibrio operativo y una mayor eficiencia en la red logística central. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible. (2024). Mercancías al tren: impulso a las autopistas ferroviarias y al transporte intermodal. Blog Transportes.

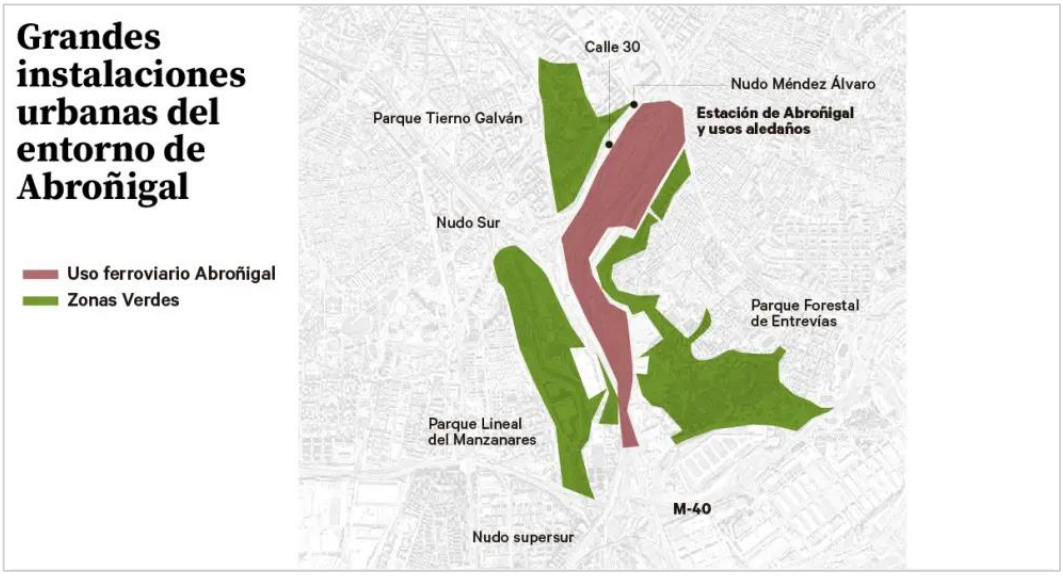


Figura 18 Terminal ferroviaria de Madrid-Abroñigal.

Fuente: Ayuntamiento de Madrid.

6.3 Rendimiento del transporte de mercancías en España

6.3.1 Transporte nacional e internacional de mercancías

El volumen de transporte nacional de mercancías, medido en toneladas transportadas dentro del país, registró un descenso del -2,5% en 2022 en comparación con el año anterior, alcanzando un total de 1.566 millones de toneladas, lo que representa un incremento del +2,2% respecto a los 1.531 millones de toneladas transportadas en 2019, año anterior a la crisis del COVID-19.

En contraposición, el transporte internacional experimentó un crecimiento del +2,5%, alcanzando un total de 581 millones de toneladas transportadas en 2022, un +1,0% por encima de los 575 millones de toneladas transportadas en 2019 en este ámbito.

Como resultado, el total del transporte de mercancías en España (nacional + internacional) mostró una variación interanual del -1,2% en 2022, sumando 2.147 millones de toneladas transportadas, un +1,9% más que en 2019 (2.116 millones de toneladas transportadas). La evolución del transporte nacional e internacional de mercancías desde 2007 hastA-2022 se puede apreciar en el siguiente gráfico:

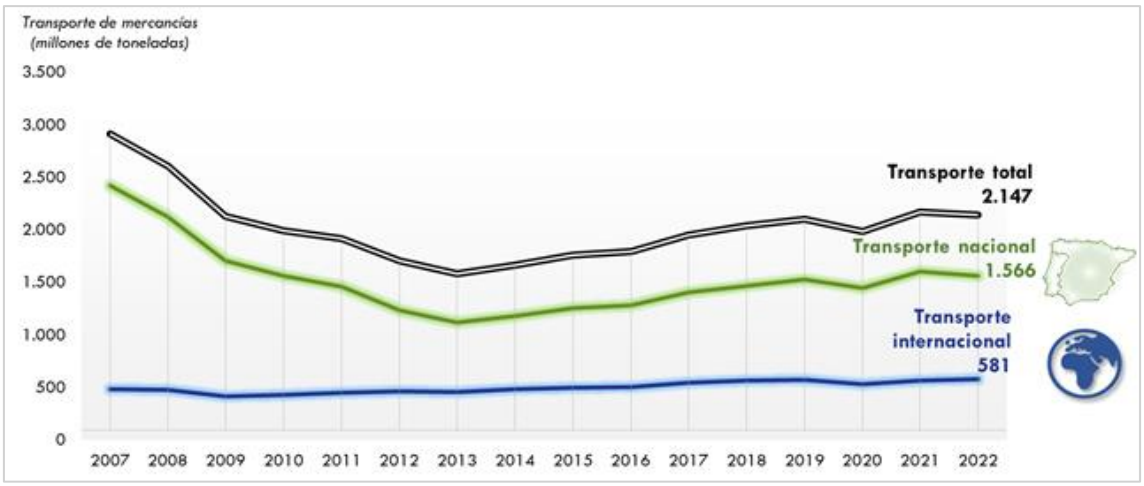


Figura 19 Evolución del transporte de mercancías por ámbito (nacional, internacional y total) medido en millones de toneladas para la serie 2007-2022.

Fuente: OTLE.

Analizando la evolución del transporte terrestre de mercancías a nivel nacional en términos de toneladas-kilómetro, se observa que guarda similitud con la experimentada por todos los modos de transporte en toneladas. En 2022 el transporte terrestre de mercancías experimentó un descenso del -2,4% de las t-km. De manera detallada, el transporte por carretera disminuyó un -2,6% las toneladas-kilómetro, mientras que el transporte ferroviario experimentó un incremento del +3,1%.

El transporte por carretera tuvo un peso preponderante en el ámbito nacional terrestre en el año 2022, representando el 95,3% del total de toneladas-kilómetro, en contraste con el 4,7% del modo ferroviario. Como se puede observar en el siguiente gráfico:

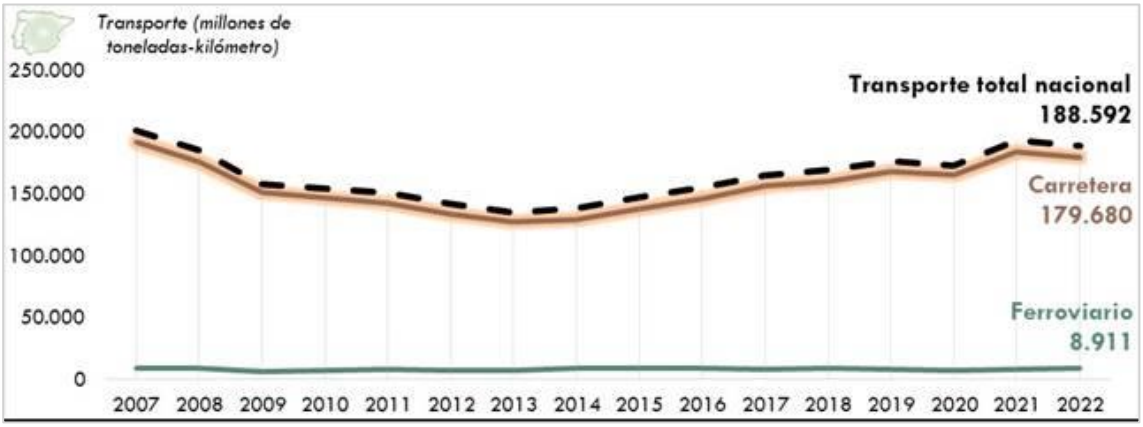


Figura 20 Evolución del transporte terrestre de mercancías en el ámbito nacional (millones de toneladas-kilómetro) para la serie 2007-2022.

Fuente: OTLE.

6.4 Carreteras principales en el entorno del corredor A-2

El corredor A-2 cuenta con una red de vías alimentadoras y alternativas que influyen tanto en su demanda como en su capacidad de gestión. Carreteras nacionales secundarias arrastran tráfico de fabricación local, agroindustria, polígonos logísticos y destinos intermedios, que luego se incorporan al corredor principal para tramos de largo recorrido. Asimismo, autopistas radiales y vías alternativas como la R-2 (Madrid-Guadalajara) o trayectos alternativos fuera de peajes actúan como competidores en ciertas condiciones: cuando los costes de peaje, combustible o tiempo favorecen desviarse de la ruta habitual.

Además, los puertos estatales y plataformas logísticas intermodales añaden accesos por carretera a estas infraestructuras (puertos, plataformas secas, terminales intermodales) y sirven como puntos de confluencia de tráfico pesado. Las decisiones sobre inversiones en dichos accesos, mejoras de la vía, señalización y capacidad articulada determinan la fluidez del tráfico en el corredor principal. Por ejemplo, los puertos del Sistema Portuario de Titularidad Estatal gestionaron en 2022 aproximadamente 240,4 millones de toneladas de mercancías cuyo transporte terrestre (por carretera y ferrocarril) está asociado al movimiento hacia o desde los puertos.

En lo que respecta al tráfico vehicular, el indicador de Intensidad Media Diaria (IMD) se utiliza para medir el número medio de vehículos que circulan por tramo de carretera en un día. Aunque existen datos de IMD para tramos de la A-2, los que se han podido consultar (por ejemplo, del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible, o de la Comunidad de Madrid) no siempre distinguen claramente entre vehículos ligeros y pesados, ni traducen ese tráfico vehicular en toneladas transportadas.

Uno de los estudios de aforo del Ministerio De Transportes y Movilidad Sostenible para la estación permanente E-226-0 en la A-2 entre Abrera y Martorell revela que los vehículos pesados representaban alrededor del 11,2% del tráfico total en esa estación en 2018, en un IMD total de aproximadamente de 114.521 vehículos/día, lo que implicaba unos 12.793 vehículos pesados/día en dicho punto. Aunque este ejemplo no es del tramo del Corredor del Henares, da una idea de cómo se estructuran los porcentajes de tráfico pesado en tramos importantes de la A-2.

El Corredor del Henares, articulado principalmente a través de la Autovía A-2 en su tramo que conecta Madrid con municipios como Torrejón de Ardoz, Alcalá de Henares, y Guadalajara, configura uno de los ejes logísticos más relevantes en la Comunidad de Madrid. Este corredor soporta una alta densidad de instalaciones industriales, plataformas logísticas y centros de distribución, así como conexiones críticas con el aeropuerto de Barajas-Madrid (para carga aérea) y con otras arterias de transporte terrestre, lo que incide directamente sobre los flujos de tráfico pesado.

En el ámbito del transporte por carretera nacional, los últimos datos oficiales muestran que en el segundo trimestre de 2025 se movilizaron 427,22 millones de toneladas de mercancías en todo el país, lo que supone uno de los mejores registros desde 2009 en términos absolutos. Sin embargo, estos datos son agregados nacionales y no desglosados por corredores específicos. (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2025).

Lo que se puede afirmar con seguridad es que el Corredor del Henares (A-2) es un eje estratégico que recibe gran parte del tráfico pesado de distribución regional y nacional por carretera, dada su ubicación geográfica, densidad de plataformas logísticas, proximidad a Madrid y conexión con Barajas.

Sin embargo, hay una carencia clara de datos desagregados: no se encuentran cifras suficientes en fuentes públicas que aporten toneladas movidas específicamente por tramo del A-2 en el Corredor del Henares ni los vehículos pesados diarios en toneladas, lo cual limita el dimensionamiento preciso.

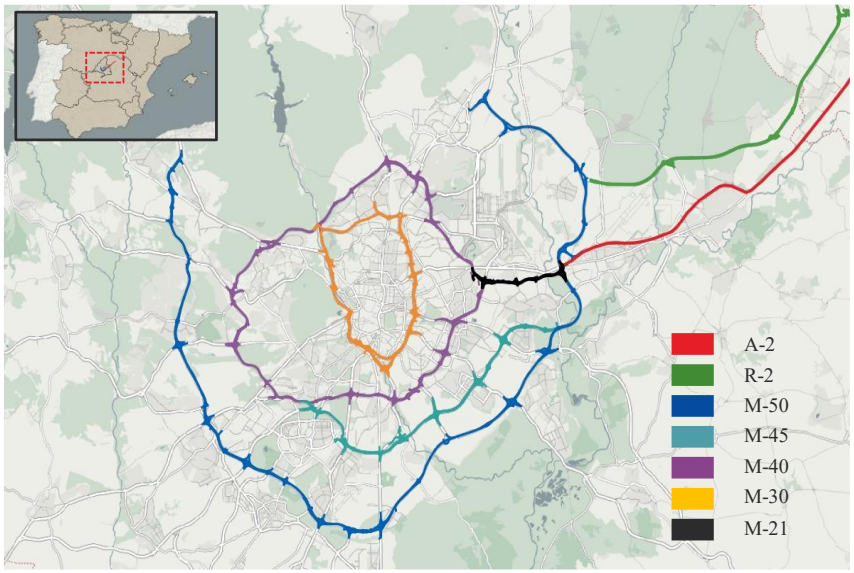


Figura 21 Carreteras principales en el entorno del corredor.

Fuente: Elaboración Propia.

Cabe mencionar que la M-21 es una variante de la A-2 que conecta la M-40 con la M-50 a la altura del corredor del Henares, atravesando Coslada y San Fernando. Es clave para desviar tráfico pesado procedente del área logística e intermodal de Coslada hacia la A-2 y la R-2, evitando la saturación de tramos urbanos.

6.4.1 Radial R-2 (Madrid-Guadalajara)

La R-2 es una autopista radial de peaje de aproximadamente 62 km que conecta la M-40 al norte de Madrid con la A-2 en Taracena (Guadalajara). Su apertura en 2003 pretendía descongestionar la A-2 en los accesos a Madrid, pero el proyecto no logró captar el volumen de tráfico previsto, entrando en concurso de acreedores en 2013 y pasando desde 2018 a gestión pública a través de la Sociedad Estatal de Infraestructuras del Transporte Terrestre (SEITT). La principal limitación estructural es la coexistencia con la A-2, una autovía libre de peaje, lo que condiciona la elasticidad de la demanda y reduce la competitividad del activo.

La introducción de un sistema de pago por uso en la autovía A-2 alteraría de forma sustancial la posición competitiva de la radial R-2. En la actualidad, el principal obstáculo de esta infraestructura es competir con una vía alternativa gratuita y de gran capacidad, lo que limita la disposición de los usuarios a pagar un peaje. Si la A-2 pasara a estar tarificada, desaparecería esta asimetría y la R-2 pasaría a ser percibida como una alternativa real en términos de coste generalizado, especialmente en

aquellos segmentos de tráfico que valoran la fiabilidad del tiempo de viaje. La elasticidad de la demanda frente al precio disminuiría y la autopista radial tendría un potencial significativo para captar volúmenes adicionales de tráfico tanto ligero como pesado.

En términos de ingresos, la consecuencia inmediata sería una mejora sustancial de la recaudación. La A-2 canaliza actualmente más de 75.000 vehículos diarios en el corredor del Henares, frente a una R-2 que apenas alcanza los 4.000–5.000 vehículos/día en promedio. Con un esquema homogéneo de tarificación en ambas vías, la radial podría multiplicar por tres o cuatro su intensidad media diaria, pasando a niveles de entre 12.000 y 15.000 vehículos/día, con un peso creciente del transporte pesado. Este cambio reduciría la brecha de sostenibilidad económica del activo y permitiría, además, que la R-2 contribuyera a mejorar el balance del conjunto de autopistas rescatadas bajo gestión estatal (SEITT 2024).

La competitividad relativa de la R-2 frente a la A-2 se vería reforzada por su mejor nivel de servicio en condiciones de congestión. En los periodos punta, el ahorro medio de recorrido puede superar los diez minutos, lo que representa una ventaja tangible para las flotas logísticas que operan en el corredor. La experiencia internacional muestra que, cuando las alternativas tienen un nivel tarifario comparable, los transportistas valoran tanto el coste directo del peaje como los costes indirectos vinculados al tiempo de conducción, el consumo de combustible y las horas de trabajo de los conductores (Wardman, 2022; Litman, 2024).

En ese contexto, la R-2 pasaría a convertirse en un activo atractivo para el segmento de mercancías, donde las decisiones se basan en optimización integral de costes y no solo en el importe del peaje.

Debe destacarse además el papel de la M-21 como variante que conecta el nudo norte de Madrid con la A-2 y concentra una parte relevante del tráfico pesado que accede a la capital desde el Corredor del Henares y el eje del aeropuerto. Esta infraestructura ya ejerce presión sobre la A-2 al canalizar tráficos logísticos y de distribución, y su interacción con un eventual esquema de pago por uso reforzaría la lógica de derivación hacia la R-2, que ofrece un recorrido más directo y menos congestionado en dirección a la M-40 y M-50. La combinación de un coste similar entre la A-2 y la R-2 y la existencia de variantes como la M-21 daría a la radial un papel estratégico como corredor alternativo para tráficos pesados, mitigando la congestión y mejorando la eficiencia operativa en el acceso a Madrid.

En suma, la tarificación de la A-2 transformaría la R-2 de una autopista marginal e infrautilizada en una infraestructura con demanda sostenida, incrementando su relevancia en el corredor y reforzando su capacidad recaudatoria. El reto para la Administración radicaría en armonizar los niveles tarifarios y los sistemas tecnológicos de cobro, así como en diseñar esquemas de bonificación territorial que mantengan la aceptación social y eviten una percepción de doble carga para los usuarios recurrentes. La coordinación entre la A-2, la R-2 y la M-21 sería esencial para garantizar un equilibrio funcional en el Corredor del Henares y maximizar los beneficios de la política de pago por uso en términos de eficiencia, sostenibilidad y equidad.

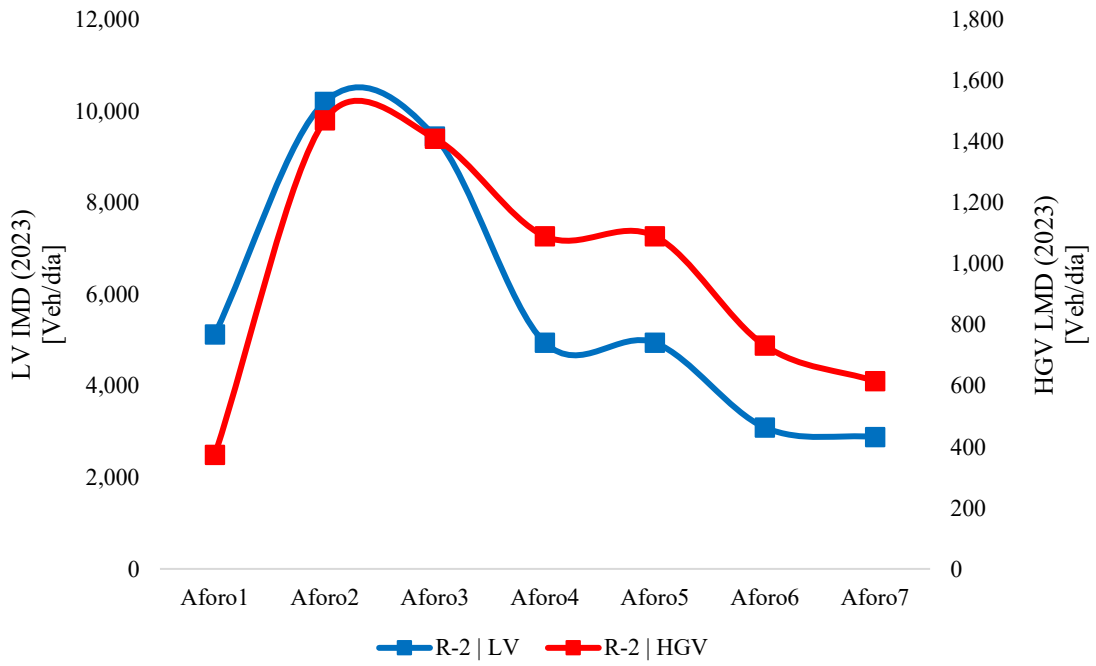


Figura 22 Perfil de tráfico en la R-2

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapa de Tráfico MTMS-2023

Recorrido (ejemplo)	Categoría	Telepeaje (€)	Efectivo/Tarjeta (€)	Observaciones
Aeropuerto – N-II/Taracena	Ligeros	4,55	5,05	Gratuito 00:00–06:00
Aeropuerto – N-II/Taracena	Pesados 1	7,00	7,75	-
Aeropuerto – N-II/Taracena	Pesados 2	9,10	10,10	-
Aeropuerto – Guadalajara Norte	Ligeros	3,85	4,30	Tramo Guadalajara Norte–N-II bonificado 100% en 2025–2026
Aeropuerto – Guadalajara Norte	Pesados 2	7,70	8,60	-

Tabla 31 Tarifas en la R-2 durante el año 2025.

Fuente: SEITT 2025.

Por otro lado, Los datos muestran una recuperación clara del tráfico en la R-2 desde 2021, con crecimientos anuales. En vehículos pesados (HGV), las tasas compuestas de crecimiento anual (CAGR) se sitúa alrededor del 14% frente al 3-5% de media en la A-2.

En vehículos ligeros (LV), el crecimiento también es positivo, entre el 9% y el 13%, comparado con un 4-5% de media en la autovía gratuita. Esto confirma que la R-2 está captando tráfico de mercancías y parte del tráfico recurrente, aun así, sigue siendo una infraestructura infrautilizada.

Desde 2021, los datos reflejan un cambio estructural: la demanda de la R-2 crece de forma sostenida, especialmente en los accesos de Guadalajara (GU-501-4 a GU-503-4), donde se concentra el tráfico pesado.

CAGR | TCAC | HGV

Carretera A2	M-505-4 Peaje	M-506-4 Peaje	M-507-4 Peaje	M-508-4 Peaje	GU-501-4 Peaje	GU-502-4 Peaje	GU-503-4 Peaje
2021-2023	4.9%	16.5%	16.4%	17.8%	17.8%	20.4%	20.8%
2022-2023	3.3%	12.9%	11.6%	12.1%	12.1%	14.9%	11.6%
2021-2022	6.5%	20.2%	21.4%	23.7%	23.7%	26.1%	30.8%
2015-2019	-11.9%	-3.4%	12.7%	12.4%	12.4%	11.0%	9.9%

Tabla 32 Variación interanual expresado en porcentaje de HGV de la R-2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible.

CAGR | TCAC | LV

Carretera A2	M-505-4 Peaje	M-506-4 Peaje	M-507-4 Peaje	M-508-4 Peaje	GU-501-4 Peaje	GU-502-4 Peaje	GU-503-4 Peaje
2021-2023	4.5%	13.8%	21.5%	9.1%	9.1%	8.1%	14.8%
2022-2023	4.5%	10.4%	27.6%	6.0%	6.0%	3.1%	14.2%
2021-2022	4.5%	17.4%	15.7%	12.3%	12.3%	13.5%	15.5%
2015-2019	-4.8%	4.2%	9.2%	7.1%	7.1%	7.0%	4.1%

Tabla 33 Variación interanual expresado en porcentaje de LV de la R-2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible.

6.5 Tendencias del mercado de combustibles alternativos y transición energética

La transformación energética del sector del transporte de mercancías en España se acelera bajo la influencia de políticas nacionales y directivas europeas. El Plan Nacional Integrado de Energía y Clima (PNIEC), así como programas como MOVES, promueven fuertemente la electrificación, el uso de gas renovable, biocombustibles y tecnologías emergentes como el hidrógeno.

Las empresas de transporte están bajo presión para renovar sus flotas, y los costes energéticos crecientes han incrementado el interés por vehículos eléctricos o híbridos de gran capacidad, así como por vehículos con biocombustibles de segunda generación.

En paralelo, la infraestructura de apoyo está expandiéndose: se han incrementado los puntos de recarga, crecen las redes de estaciones de hidrógeno, y se están desarrollando estudios técnicos para incorporar estos servicios en los corredores de largo recorrido.

No obstante, a corto y medio plazo, el diésel seguirá siendo la tecnología dominante en el transporte pesado por carretera, dada su mayor autonomía, red de repostaje consolidada y coste de adquisición relativamente más bajo. El mercado de vehículos eléctricos en este segmento todavía no convence plenamente por sus limitaciones en autonomía, tiempos de recarga, capacidad de carga útil y elevados costes de adquisición, lo que genera una desventaja especialmente en el transporte de mercancías de larga distancia.

Según la Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles (ACEA), las tecnologías diésel continúan dominando las matriculaciones de vehículos pesados (HGV) y los

registros de nuevos vehículos industriales en la Unión Europea. Durante 2025, las ventas de camiones diésel crecieron un 19,2%, impulsadas principalmente por mercados como el alemán (+24%), representando el 97 % del total de nuevas matriculaciones en el segmento de vehículos industriales. La distribución por tecnología muestra un 97 % de vehículos diésel, seguidos de un 2% eléctricos y un 1% de otras tecnologías, sin que existan aún registros de camiones híbridos (ACEA, 2024).

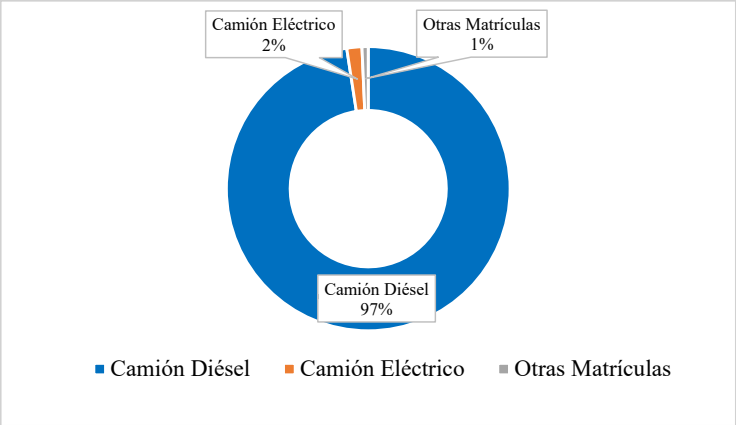


Figura 23 Registros de camiones durante el año 2025 en la EU.

Fuente: ACEA, European Automobile Manufacturers' Association.

Los compradores europeos de vehículos industriales pesados orientan su decisión de adquisición en torno a criterios de autonomía, fiabilidad y rendimiento operativo, siendo estos factores críticos para las operaciones de larga distancia. Actualmente, la autonomía media de un camión eléctrico de gran tonelaje (HGV EV) ronda los 400 km, frente a los más de 600 km habituales de un HGV diésel internacional. Este diferencial de autonomía, unido a la limitada disponibilidad de infraestructura de recarga rápida en corredores europeos, limita la competitividad de los vehículos eléctricos en trayectos de largo recorrido.

Aunque existen iniciativas privadas y proyectos piloto para la instalación de puntos de recarga específicos para transporte pesado, la cobertura actual sigue siendo insuficiente para satisfacer la demanda del sector a corto plazo (2026), especialmente en corredores de transporte internacional. En este contexto, los combustibles alternativos más avanzados son el hidrógeno y el gas natural licuado (GNL). Sin embargo, mientras el gas puede actuar como solución de transición donde la electrificación no es viable, el hidrógeno afronta todavía retos tecnológicos y de infraestructura significativos.

La Unión Europea ha establecido que, a partir de 2035, solo podrán venderse vehículos industriales de cero emisiones. Sin embargo, este mandato no implica que toda la flota operativa sea neutra en carbono antes del final del periodo concesional actual, dado el ciclo de renovación prolongado de los vehículos pesados. En este sentido, los sistemas de peaje y tarificación vial, como el modelo alemán Toll Collect, continuarán adaptando sus mecanismos de remuneración conforme evolucione la composición tecnológica de la flota, diferenciando entre camiones diésel, GNL, hidrógeno o eléctricos mediante sistemas de tarificación por emisiones.

6.6 Perfil de Tráfico – División del Tramo de la A-2

Para entender el perfil de tráfico del Corredor del Henares (A-2, M-50-Ledanca) se ha dividido en tramos en función de los enlaces (entradas y salidas) a polígonos y a la red autonómica. Esta desagregación permite leer IMD e IMDp por estación de aforo, discriminar flujos de primera/última milla frente a tránsito de largo recorrido.

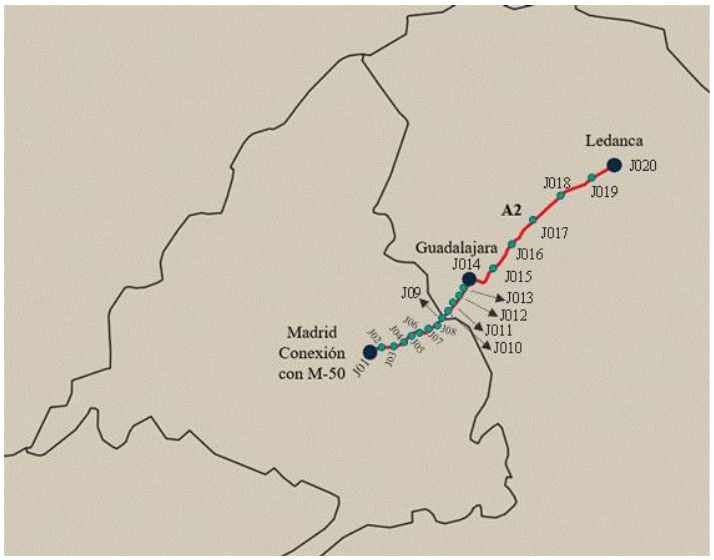


Figura 24 División del tramo propuesto.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

Sección 1: Enlace con la M-115

Acceso principal a la zona norte de San Fernando de Henares y Paracuellos del Jarama, conectando la A-2 con el eje viario que bordea el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas. Este ramal facilita el acceso al Polígono Industrial San Fernando y a áreas logísticas asociadas a la actividad aeroportuaria, funcionando como nodo secundario de distribución regional.

Sección 2: Enlace con la M-108

Da servicio a los municipios de Daganzo de Arriba y Ajalvir, así como a los parques industriales de Camino Real y Polígono Casablanca, orientados al almacenamiento, transporte y pequeñas industrias. Este tramo actúa como corredor de enlace entre el eje del Henares y las plataformas logísticas del noreste metropolitano de Madrid.

Sección 3: Salida hacia el Aeropuerto-Torrejón de Ardoz

Conecta con la vía de acceso directo a la Base Aérea de Torrejón y al Parque Empresarial Casablanca, uno de los polos logísticos más relevantes del Corredor del Henares. Su función principal es el tránsito de vehículos de mercancías vinculados al aeropuerto y al parque tecnológico de Torrejón.

Sección 4: Enlace con la M-300

Articula la conexión entre la A-2 y la carretera regional hacia Loeches y Arganda del Rey, facilitando el acceso a los polígonos El Henares y Casablanca II. Se trata de un

punto estratégico para el transporte de materiales industriales y distribución interurbana dentro del arco este de la Comunidad de Madrid.

Sección 5+6: Salidas de Alcalá de Henares

Corresponden a los principales accesos al casco urbano y a su extensa área industrial. La primera conecta con el Polígono Camporroso y la Ciudad del Transporte, mientras que la segunda da servicio directo al Polígono La Garena y al Parque Empresarial Alcalá Magna, concentrando un elevado flujo de vehículos pesados vinculados a actividades manufactureras, alimentarias y logísticas.

Sección 7+8: Enlace con la M-116

Permite la conexión hacia Camarma de Esteruelas y Meco, municipios caracterizados por una notable expansión logística y residencial. En esta área se localizan el Polígono Industrial Meco-Este y varios centros de distribución de operadores nacionales, desempeñando un papel clave en la red de última milla metropolitana.

Sección 9+10: Salida hacia Azuqueca de Henares

Constituye la primera conexión relevante dentro de la provincia de Guadalajara. Azuqueca concentra una de las mayores plataformas logísticas de Castilla-La Mancha, con áreas como el Polígono Miralcampo y el Polígono Empresarial Azuqueca, sirviendo tanto al tráfico regional como al interprovincial de mercancías.

Sección 11: Enlace con Alovera

Da acceso a otro nodo industrial de gran capacidad, el Polígono de Alovera, especializado en almacenamiento, manufactura ligera y servicios auxiliares. Su función es principalmente logística, conectando directamente con los corredores CM-1008 y CM-1009 que distribuyen el tráfico hacia la zona norte de Guadalajara.

Sección 12: Salida hacia la N-320

Actúa como conexión transversal con el eje norte-sur que une Guadalajara capital con El Casar y la A-1. Este enlace canaliza tanto tráfico de largo recorrido como desplazamientos intercomarcales, siendo estratégico para el transporte pesado entre los corredores A-2 y A-1.

Sección 13: Enlace con la N-320a

Proporciona acceso directo al núcleo urbano de Guadalajara y a su cinturón industrial occidental, donde se ubican polígonos como El Ruiseñor y Guadalajara-Sur. Se trata de un punto crítico para la movilidad metropolitana y la conexión de servicios urbanos con la red de alta capacidad.

Sección 14: Salida CM-10

Enlaza con la autovía de circunvalación de Guadalajara, distribuyendo el tráfico entre los accesos norte y sur de la ciudad. Facilita la conexión con el Polígono del Henares, de los más relevantes en volumen de actividad de la provincia, además de articular los flujos hacia la R-2 y los parques tecnológicos del entorno.

Sección 15: Enlace Taracena-R-2

Conecta la A-2 con la Radial-2 y la carretera hacia Taracena, funcionando como alternativa de peaje al corredor principal. Su uso se asocia a tráfico de largo recorrido y desvíos de vehículos pesados hacia la R-2, especialmente en periodos de congestión en la A-2.

Sección 16: Salida CM-2011

Proporciona acceso a Horche y a zonas rurales e industriales dispersas, cumpliendo una función de conexión secundaria y de servicio local. El tránsito predominante corresponde a vehículos de transporte regional y abastecimiento urbano hacia Guadalajara.

Sección 17: Enlace CM-2008

Conecta con la carretera hacia Argecilla y Brihuega, desempeñando una función de apoyo al tráfico agrario e industrial ligero. Presenta baja intensidad media diaria, pero resulta relevante para la accesibilidad comarcal.

Sección 18: Salida de Ledanca

Articula la conexión con el municipio homónimo y con los accesos a la Autovía A-2 antigua, que sirve a pequeños núcleos rurales. Cumple una función de enlace local, facilitando la movilidad interna de la comarca de la Alcarria.

Sección 19: Enlace N-204

Conecta la A-2 con el eje hacia Sacedón y el embalse de Entrepeñas, vía de tránsito turístico y de conexión con la comarca suroriental de Guadalajara. Su relevancia es fundamentalmente territorial.

Vía	Provincia	Sección	PK Inicial	PK Final	Enlace-Salida	Longitud [Km]
A-2	Madrid	S01	16.8	17.73	M-115	0.93
A-2	Madrid	S02	17.73	20.1	M-108	2.37
A-2	Madrid	S03	20.1	21.3	Aeropuerto-Torrejón de Ardoz	1.2
A-2	Madrid	S04	21.3	23.4	M-300	2.1
A-2	Madrid	S05	23.4	27.8	Alcalá de Henares	4.4
A-2	Madrid	S06	27.8	31.3	Alcalá de Henares	3.5
A-2	Madrid	S07	31.3	38.1	M-116	6.8
A-2	Madrid	S08	38.1	38.76	M-116	0.66
A-2	Guadalajara	S09	38.76	41.6	Azuqueca de Henares	2.84
A-2	Guadalajara	S10	41.6	44	Azuqueca de Henares	2.4
A-2	Guadalajara	S11	44	47.3	Alovera	3.3
A-2	Guadalajara	S12	47.3	50.5	N-320	3.2
A-2	Guadalajara	S13	50.5	54.71	N-320a	4.21
A-2	Guadalajara	S14	54.71	58.1	CM-10	3.39
A-2	Guadalajara	S15	58.1	60.3	Taracena R-2	2.2
A-2	Guadalajara	S16	60.3	73.2	CM-2011	12.9
A-2	Guadalajara	S17	73.2	82.7	CM-2008	9.5
A-2	Guadalajara	S18	82.7	94.4	Ledanca	11.7
A-2	Guadalajara	S19	94.4	101.2	N-204	6.8

Tabla 34 Datos de la división del tramo de la A-2.

Fuente: Elaboración Propia a partir de datos del Mapa de Tráfico 2023.

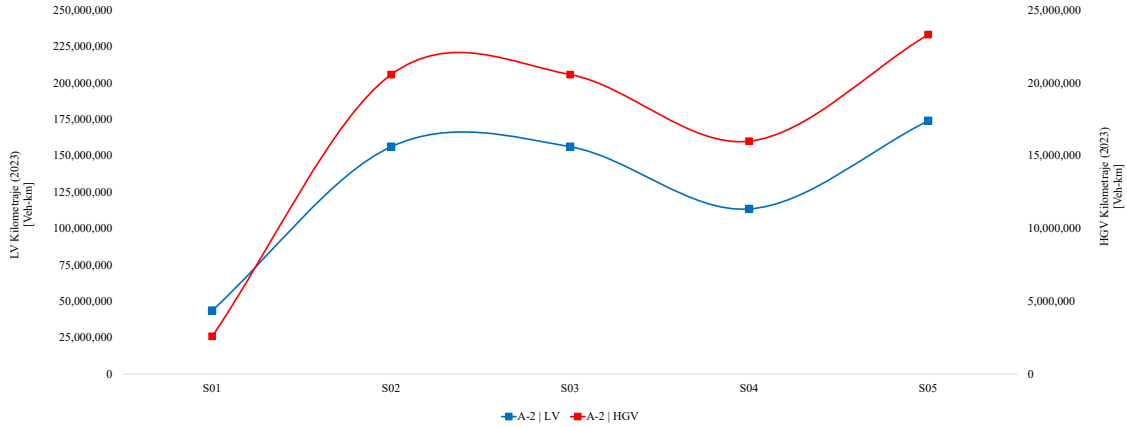


Figura 25 Perfil de Veh-km (Sección 1-5) en el año 2023.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

En el conjunto de las secciones S01 a S05 (PK 16,8-27,8), el gráfico muestra una tendencia ascendente marcada en ambos tipos de tráfico (LV y HGV) desde el entorno de la M-115 hasta alcanzar un pico máximo en la S03-S04, correspondiente a las conexiones con Torrejón de Ardoz y la M-300. Este tramo combina un elevado peso de tráfico metropolitano (pendular) y logístico, asociado a los accesos al Aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas, la Base Aérea de Torrejón y los polígonos Casablanca y El Henares, lo que explica la confluencia de altos volúmenes tanto de ligeros como de pesados.

El incremento inicial entre S01 y S03 responde a la acumulación de flujos procedentes de la M-50 y de los accesos norte de San Fernando, junto con los movimientos de trabajadores y mercancías hacia Torrejón. A partir de la S04 (enlace con M-300), el tráfico ligero mantiene niveles altos, aunque se observa un suave descenso vinculado a la redistribución hacia los accesos urbanos de Alcalá de Henares (S05-S06). En cambio, los pesados mantienen una trayectoria más estable, con una media en torno a los 20-22 millones de veh-km. Esto refleja la actividad logística concentrada en los parques industriales del eje Torrejón-Alcalá.

El pico final en S05 (Alcalá de Henares Oeste) evidencia la confluencia de flujos locales y regionales en una de las zonas de mayor densidad económica y urbana del corredor. Este punto actúa como nudo entre el tráfico metropolitano y el interurbano donde la coexistencia de tráfico conmutador y logístico genera los valores altos de kilometraje del corredor en 2023.

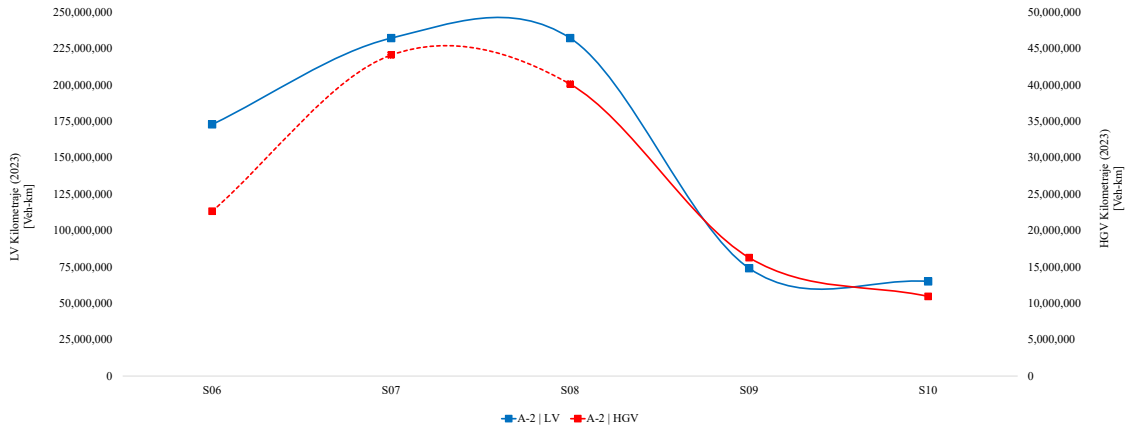


Figura 26 Perfil de Veh-km (Sección 6-10) en el año 2023.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

Por otro lado, en el tramo comprendido entre las secciones S06 y S10 (PK 27,8-44,0), que abarca el eje de Alcalá de Henares, Meco y Azuqueca de Henares, el gráfico muestra un comportamiento mixto entre tráfico metropolitano y logístico, con un punto de inflexión claro a partir del paso a la provincia de Guadalajara.

A lo largo de las secciones S06 a S08, correspondientes al entorno de Alcalá de Henares y la M-116 (acceso a Meco), el tráfico ligero (LV) muestra un incremento hasta su máximo, superando los 230 millones de veh-km, impulsado por la fuerte atracción de la movilidad urbana y laboral del área de Alcalá y por el flujo residencial de Meco y Camarma de Esteruelas. En paralelo, el tráfico pesado (HGV) también crece de manera significativa hasta situarse en torno a 40 millones de veh-km, consolidando el peso de la logística de distribución metropolitana del Corredor del Henares.

A partir de la S09 (Azuqueca de Henares) se produce un descenso notable en ambas curvas, que se mantiene hasta la S10. Este punto marca la transición hacia una estructura de tráfico más interurbana: los vehículos ligeros pierden peso por el fin del ámbito conmutador madrileño, mientras que los pesados se estabilizan en torno a 12-15 millones de veh-km, reflejando el tráfico de largo recorrido y los accesos a los grandes polígonos logísticos de Miralcampo y Azuqueca Empresarial.

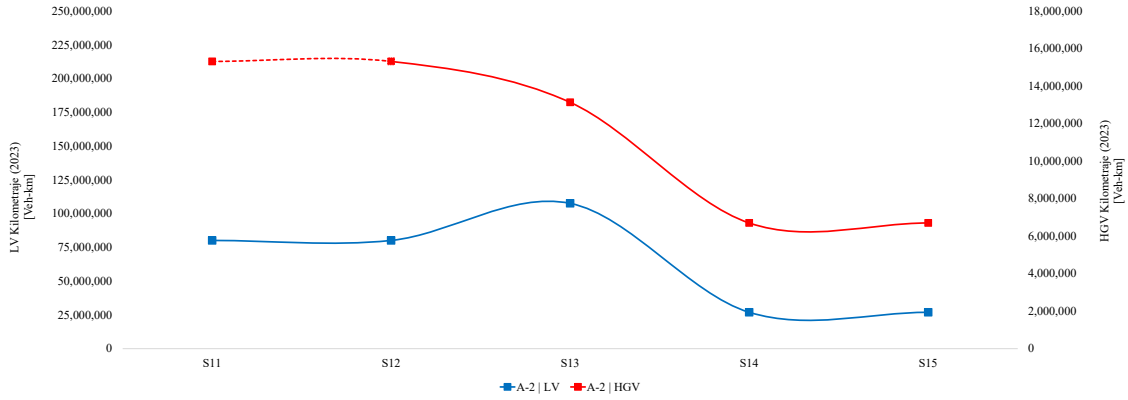


Figura 27 Perfil de Veh-km (Sección 11-15) en el año 2023.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

En el tramo comprendido entre las secciones S11 y S15 (PK 44-60,3), que abarca los accesos de Alovera, Guadalajara y la conexión con la R-2 en Taracena, el gráfico muestra una pérdida progresiva de intensidad de tráfico, tanto en vehículos ligeros como en pesados, indicando la transición definitiva del eje metropolitano del Henares hacia un corredor interurbano de media distancia.

El tráfico ligero (LV) se mantiene estable en las secciones S11-S12 (Alovera y N-320), con valores próximos a los 80 millones de veh-km, asociados al flujo de desplazamientos intercomarcales entre Azuqueca, Alovera y Guadalajara. A partir de la S13 (N-320a, acceso directo a Guadalajara), la curva muestra un descenso que continúa hasta la S14 (CM-10), coincidiendo con el desvío de gran parte del tráfico urbano hacia la circunvalación de Guadalajara y la red local, lo que reduce la carga de la A-2 principal.

En el caso de los vehículos pesados (HGV), la tendencia es similar, pero con una mayor estabilidad relativa en los primeros tramos (S11-S13), en torno a los 14-16 millones de veh-km. A partir de la S14 (CM-10) se observa una caída significativa hasta valores de 7-8 millones, explicada por la reducción de actividad industrial densa al sur de Guadalajara. El leve repunte en la S15 (Taracena-R-2) se asocia precisamente al tránsito de largo recorrido que utiliza la conexión con la autopista de peaje como vía alternativa a la A-2 principal.

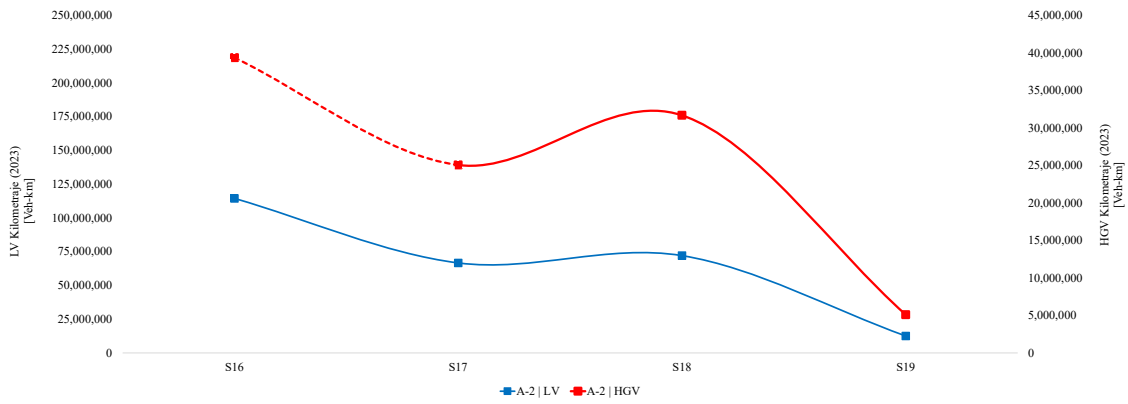


Figura 28 Perfil de Veh-km (Sección 16-19) en el año 2023.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico.

En el tramo comprendido entre las secciones S16 y S19 (PK 60,3-101,2), que abarca los accesos de Horche, Argecilla, Ledanca y la conexión con la N-204, el gráfico refleja una evolución descendente en el kilometraje tanto de vehículos ligeros como de pesados, reflejando el carácter interurbano y de baja densidad del final del corredor de la A-2 en la provincia de Guadalajara.

El tráfico ligero (LV) desciende de manera constante desde la S16, pasando de valores próximos a 110 millones de veh-km hasta situarse por debajo de 50 millones en la S19. Este comportamiento confirma la disminución progresiva de los desplazamientos de corta y media distancia, a medida que se abandona el área metropolitana de

Guadalajara y se penetra en un tramo rural con baja demanda turística y residencial. El leve repunte en la S18 (Ledanca) coincide con la intersección con la antigua traza de la A-2, donde se produce una pequeña captación de tráfico local procedente de los municipios del entorno.

En cuanto al tráfico pesado (HGV), la serie mantiene inicialmente valores elevados en la S16 (en torno a 40 millones de veh-km), descendiendo de forma paulatina hasta la S19, donde se sitúa alrededor de 10 millones. La caída más notable se produce entre las secciones S18 y S19, momento en el que el flujo de largo recorrido comienza a redistribuirse hacia itinerarios alternativos como la A-23 (Zaragoza-Teruel) o la N-204 con destino al eje del Tajo. Este comportamiento muestra que la intensidad de pesados se mantiene alta mientras persiste el tráfico de tránsito nacional, pero se reduce notablemente en los tramos finales donde predomina el tráfico de destino local o regional.

6.7 Perfil de Tráfico – Histórico de la IMD

Para este análisis se han recopilado series “like-for-like” de estaciones permanentes (aforo continuo 24/7, 365 días/año) ubicadas en el corredor A-2 (M-50-Ledanca). La fuente primaria es el Mapa de Tráfico del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible de la serie de datos históricos. Las tablas adjuntas presentan los datos obtenidos tanto de vehículos ligeros como de pesados por estación desde el año 2012 hasta el 2023 con la excepción de la serie histórica del año 2020 que no fue disponible dado que fue un año anómalo por las restricciones de movilidad del COVID-19.

A-2 | HGV

Código Aforo	M-343-0	M-86-0	M-155-0	M-104-0	M-304-0	M-345-0	M-107-0	GU-337-0	GU-371-0	GU-66-0	GU-399-0	GU-494-0	GU-495-0	GU-51-2
PK	17,43	19	23,07	27	29	36,5	38,71	43,1	47	51,15	56,8	63,1	84	97,96
Año	Aforo1	Aforo2	Aforo3	Aforo4	Aforo5	Aforo6	Aforo7	Aforo8	Aforo9	Aforo10	Aforo11	Aforo12	Aforo13	Aforo14
2023	6,598	20,456	18,857	16,721	13,539	15,804	15,844	12,617	12,652	8,643	8,433	8,442	7,490	7,045
2022	6,591	21,650	18,842	13,832	13,235	16,199	14,868	12,497	12,739	8,496	8,436	8,293	7,398	7,191
2021	6,885	21,568	18,714	17,746	13,435	16,198	14,673	12,361	12,307	8,124	8,321	8,117	7,310	7,076
2020														
2019	6,404	20,992	18,390	13,399	13,266	16,118	14,226	12,209	12,159	8,045	8,105	7,831	7,042	7,111
2018	6,340	21,030	18,002	13,039	12,901	15,574	13,901	11,918	11,934	11,722	7,851	7,614	7,031	6,797
2017	6,994	19,912	17,890	13,272	12,532	15,523	15,441	11,413	11,337	5,500	7,739	7,403	6,571	6,571
2016	7,009	18,716	18,110	14,314	12,749	14,356	14,099	10,779	10,820	5,897	6,103	6,954	6,142	6,011
2015	6,056	6,092	14,797	11,159	13,586	11,885	11,745	10,193	8,879	7,071	6,216	6,571	6,037	5,819
2014	6,321	6,451	13,827	11,243	13,761	12,821	13,211	11,001	10,452	9,820	7,211	6,450	6,111	5,909
2013	6,876	6,541	12,987	12,311	12,709	11,821	11,000	10,592	10,312	10,399	8,751	6,332	6,491	6,315
2012	6,592	6,322	11,267	11,634	13,917	12,777	10,286	10,203	10,357	9,809	9,354	7,612	6,345	6,009

Tabla 35 Serie Histórica de Vehículos Pesados en la A-2.

Fuente: Mapa de Tráfico del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible.

Código Aforo	M-343-0	M-86-0	M-155-0	M-104-0	M-304-0	M-345-0	M-107-0	GU-337-0	GU-371-0	GU-66-0	GU-399-0	GU-494-0	GU-495-0	GU-51-2
PK	17,43	19	23,07	27	29	36,5	38,71	43,1	47	51,15	56,8	63,1	84	97,96
Año	Aforo1	Aforo2	Aforo3	Aforo4	Aforo5	Aforo6	Aforo7	Aforo8	Aforo9	Aforo10	Aforo11	Aforo12	Aforo13	Aforo14
2023	109,433	148,485	122,210	121,827	70,073	91,494	72,130	75,000	66,568	70,803	33,825	24,536	17,038	17,355
2022	107,519	147,457	120,137	89,276	69,786	89,332	71,589	85,748	65,124	69,031	32,676	23,945	16,676	16,984
2021	110,018	137,586	113,454	118,756	64,468	81,200	64,131	65,552	58,303	57,919	29,225	20,884	14,139	14,511
2020														
2019	110,077	150,460	125,446	91,048	70,872	92,559	74,693	74,873	65,911	69,662	31,596	22,886	16,955	16,401
2018	108,610	160,008	124,414	89,580	69,094	91,258	73,995	73,728	65,817	63,221	30,266	22,179	23,144	15,738
2017	116,767	144,688	123,404	94,785	68,767	90,075	78,222	71,474	63,858	43,415	29,657	21,905	16,218	16,701
2016	96,732	123,443	122,433	90,459	77,821	70,224	67,821	68,749	68,321	45,619	38,721	21,031	15,538	14,872
2015	88,820	89,730	120,148	80,277	78,625	76,009	67,162	65,623	59,817	46,388	28,136	19,949	14,326	14,283
2014	92,365	94,987	119,725	86,512	74,231	79,827	71,322	68,216	60,823	55,211	31,078	26,825	17,213	15,602
2013	85,232	117,287	116,517	82,817	98,212	69,825	70,392	64,856	64,322	62,002	44,261	32,095	19,251	14,352
2012	91,726	82,367	111,825	84,678	82,332	79,221	76,251	68,721	66,198	51,320	41,337	38,261	21,721	13,329

Tabla 36 Serie Histórica de Vehículos Ligeros en la A-2.

Fuente: Mapa de Tráfico del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible.

Las siguientes tablas muestran la variación interanual (expresado en porcentaje) mide cuánto cambia un indicador entre un año y el anterior tanto de vehículos pesados como de ligeros por estación (Aforo1-Aforo14) en el corredor A-2 (M-50-Ledanca). Los datos escogidos han sido construidos de tal manera que los datos hayan sido disponibles like-for-like con estaciones permanentes (aforo 24/7, 365 días/año) para asegurar comparabilidad. Cabe mencionar que se excluye el año 2020 por no disponer de una serie homogénea y por su carácter atípico.

Esta comparación sirve para: (i) identificar fases de ciclo (recuperación, expansión, shock, normalización) y (ii) permite benchmarking entre estaciones con volúmenes muy distintos.

Diferencia % HGV

Código Aforo	M-343-0	M-86-0	M-155-0	M-104-0	M-304-0	M-345-0	M-107-0	GU-337-0	GU-371-0	GU-66-0	GU-399-0	GU-494-0	GU-495-0	GU-51-2
PK	17,43	19	23,07	27	29	36,5	38,71	43,1	47	51,15	56,8	63,1	84	97,96
Año	Aforo1	Aforo2	Aforo3	Aforo4	Aforo5	Aforo6	Aforo7	Aforo8	Aforo9	Aforo10	Aforo11	Aforo12	Aforo13	Aforo14
2023	0.11%	-5.52%	0.08%	20.89%	2.30%	-2.44%	6.56%	0.96%	-0.68%	1.73%	-0.04%	1.80%	1.24%	-2.03%
2022	-4.27%	0.38%	0.68%	-22.06%	-1.49%	0.01%	1.33%	1.10%	3.51%	4.58%	1.38%	2.17%	1.20%	1.63%
2021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	1.01%	-0.18%	2.16%	2.76%	2.83%	3.49%	2.34%	2.44%	1.89%	-31.37%	3.24%	2.85%	0.16%	4.62%
2018	-9.35%	5.61%	0.63%	-1.76%	2.94%	0.33%	-9.97%	4.42%	5.27%	113.13%	1.45%	2.85%	7.00%	3.44%
2017	-0.21%	6.39%	-1.21%	-7.28%	-1.70%	8.13%	9.52%	5.88%	4.78%	-6.73%	26.81%	6.46%	6.98%	9.32%
2016	15.74%	207.22%	22.39%	28.27%	-6.16%	20.79%	20.04%	5.75%	21.86%	-16.60%	-1.82%	5.83%	1.74%	3.30%
2015	-4.19%	-5.57%	7.02%	-0.75%	-1.27%	-7.30%	-11.10%	-7.34%	-15.05%	-27.99%	-13.80%	1.88%	-1.21%	-1.52%
2014	-8.07%	-1.38%	6.47%	-8.68%	8.28%	8.46%	20.10%	3.86%	1.36%	-5.57%	-17.60%	1.86%	-5.85%	-6.43%
2013	4.31%	3.46%	15.27%	5.82%	-8.68%	-7.48%	6.94%	3.81%	-0.43%	6.01%	-6.45%	-16.82%	2.30%	5.09%
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 37 Variación interanual expresado en porcentaje de HGV de la A-2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible.

Diferencia % LV

Código Aforo	M-343-0	M-86-0	M-155-0	M-104-0	M-304-0	M-345-0	M-107-0	GU-337-0	GU-371-0	GU-66-0	GU-399-0	GU-494-0	GU-495-0	GU-51-2
PK	17,43	19	23,07	27	29	36,5	38,71	43,1	47	51,15	56,8	63,1	84	97,96
Año	Aforo1	Aforo2	Aforo3	Aforo4	Aforo5	Aforo6	Aforo7	Aforo8	Aforo9	Aforo10	Aforo11	Aforo12	Aforo13	Aforo14
2023	1.78%	0.70%	1.73%	36.46%	0.41%	2.42%	0.76%	-12.53%	2.22%	2.57%	3.52%	2.47%	2.17%	2.18%
2022	-2.27%	7.17%	5.89%	-24.82%	8.25%	10.01%	11.63%	30.81%	11.70%	19.19%	11.81%	14.66%	17.94%	17.04%
2021	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2020	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2019	1.35%	-5.97%	0.83%	1.64%	2.57%	1.43%	0.94%	1.55%	0.14%	10.19%	4.39%	3.19%	-26.74%	4.21%
2018	-6.99%	10.59%	0.82%	-5.49%	0.48%	1.31%	-5.40%	3.15%	3.07%	45.62%	2.05%	1.25%	42.71%	-5.77%
2017	20.71%	17.21%	0.79%	4.78%	-11.63%	28.27%	15.34%	3.96%	-6.53%	-4.83%	-23.41%	4.16%	4.38%	12.30%
2016	8.91%	37.57%	1.90%	12.68%	-1.02%	-7.61%	0.98%	4.76%	14.22%	-1.66%	37.62%	5.42%	8.46%	4.12%
2015	-3.84%	-5.53%	0.35%	-7.21%	5.92%	-4.78%	-5.83%	-3.80%	-1.65%	-15.98%	-9.47%	-25.63%	-16.77%	-8.45%
2014	8.37%	-19.01%	2.75%	4.46%	-24.42%	14.32%	1.32%	5.18%	-5.44%	-10.95%	-29.78%	-16.42%	-10.59%	8.71%
2013	-7.08%	42.40%	4.20%	-2.20%	19.29%	-11.86%	-7.68%	-5.62%	-2.83%	20.81%	7.07%	-16.12%	-11.37%	7.67%
2012	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Tabla 38 Variación interanual expresado en porcentaje de LV de la A-2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Transporte y Movilidad Sostenible.

Por otra parte, se lleva a cabo el análisis TCAC (Tasa de Crecimiento Anual Compuesta) que mide el crecimiento medio entre periodos multianuales. El patrón elegido es el siguiente:

- 2012-2015 recuperación post-crisis económica con repuntes.
- 2015-2019 fase de expansión con crecimientos más estables.
- 2020 COVID-19 con caída excepcional.
- 2021-2023 rebote y recuperación con signos mixtos según nudos y desvíos de flujos.

En relación con HGV, vemos que el ciclo de 2012-2015 muestra recuperación post-crisis económica con CAGRs positivos en la mayoría de las estaciones.

En el periodo de 2015-2019 se observa una tendencia de recuperación en casi la mayoría de las estaciones. Cabe destacar que no se incluye el año 2020 por considerarse un “shock” que supuso una caída excepcional de tráfico, tanto de pesados como de ligeros, a nivel nacional e internacional.

Durante el periodo 2021-2023 se registra una recuperación, con signos mixtos por nudo: algunas estaciones del tramo metropolitano muestran recuperación (posiblemente vinculadas a al transporte de primera-última milla). En ligeros, el perfil es parecido en general con mayor recuperación en los diferentes tramos estudiados.

CAGR | TCAC | HGV

Carretera A2	M-343-0	M-86-0	M-155-0	M-104-0	M-304-0	M-345-0	M-107-0	GU-337-0	GU-371-0	GU-66-0	GU-399-0	GU-494-0	GU-495-0	GU-51-2
2021-2023	-2.1%	-2.6%	0.4%	-2.9%	0.4%	-1.2%	3.9%	1.0%	1.4%	3.1%	0.7%	2.0%	1.2%	-0.2%
2022-2023	0.1%	-5.5%	0.1%	20.9%	2.3%	-2.4%	6.6%	1.0%	-0.7%	1.7%	0.0%	1.8%	1.2%	-2.0%
2021-2022	-4.3%	0.4%	0.7%	-22.1%	-1.5%	0.0%	1.3%	1.1%	3.5%	4.6%	1.4%	2.2%	1.2%	1.6%
2015-2019	1.4%	36.2%	5.6%	4.7%	-0.6%	7.9%	4.9%	4.6%	8.2%	3.3%	6.9%	4.5%	3.9%	5.1%
2012-2015	-2.8%	-1.2%	9.5%	-1.4%	-0.8%	-2.4%	4.5%	0.0%	-5.0%	-10.3%	-12.7%	-4.8%	-1.6%	-1.1%
2012-2019	-0.4%	18.7%	7.2%	2.0%	-0.7%	3.4%	4.7%	2.6%	2.3%	-2.8%	-2.0%	0.4%	1.5%	2.4%

Tabla 39 Tasa de Crecimiento Anual Compuesta de HGV de la A-2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible.

CAGR | TCAC | LV

Carretera A2	M-343-0	M-86-0	M-155-0	M-104-0	M-304-0	M-345-0	M-107-0	GU-337-0	GU-371-0	GU-66-0	GU-399-0	GU-494-0	GU-495-0	GU-51-2
2021-2023	-0.3%	3.9%	3.8%	1.3%	4.3%	6.1%	6.1%	7.0%	6.9%	10.6%	7.6%	8.4%	9.8%	9.4%
2022-2023	1.8%	0.7%	1.7%	36.5%	0.4%	2.4%	0.8%	-12.5%	2.2%	2.6%	3.5%	2.5%	2.2%	2.2%
2021-2022	-2.3%	7.2%	5.9%	-24.8%	8.2%	10.0%	11.6%	30.8%	11.7%	19.2%	11.8%	14.7%	17.9%	17.0%
2015-2019	5.5%	13.8%	1.1%	3.2%	-2.6%	5.0%	2.7%	3.4%	2.5%	10.7%	2.9%	3.5%	4.3%	3.5%
2012-2015	-1.1%	2.9%	2.4%	-1.8%	-1.5%	-1.4%	-4.1%	-1.5%	-3.3%	-3.3%	-12.0%	-19.5%	-13.0%	2.3%
2012-2019	2.6%	9.0%	1.7%	1.0%	-2.1%	2.2%	-0.3%	1.2%	-0.1%	4.5%	-3.8%	-7.1%	-3.5%	3.0%

Tabla 40 Tasa de Crecimiento Anual Compuesta de LV de la A-2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible.

6.8 Perfil de Tráfico – Histórico de Veh-km

El análisis de los datos de aforo y de los vehículos-kilómetro es una herramienta esencial para comprender el funcionamiento de la red viaria y para orientar tanto la planificación como las políticas de conservación y tarificación. El aforo, expresado en Intensidad Media Diaria (IMD), mide el volumen de vehículos que utilizan un tramo en promedio diario, mientras que los vehículos-kilómetro cuantifican la distancia total recorrida por dichos vehículos, ofreciendo una visión acumulativa del esfuerzo soportado por la infraestructura. Su lectura conjunta permite diferenciar entre problemas de capacidad, de sostenibilidad estructural y de eficiencia en la explotación de las vías.

Un tramo con kilometraje alto y IMD baja suele estar caracterizado por recorridos largos con pocos vehículos, normalmente asociados al tráfico interurbano y pesado “a veces de paso”. Aunque no exista congestión, la carga acumulada sobre el firme y las externalidades medioambientales pueden ser relevantes, obligando a programar un mantenimiento más intensivo que el que sugeriría la simple cifra de IMD.

En sentido opuesto, un tramo con IMD alta y kilometraje bajo refleja densidad de tráfico en trayectos cortos, típicos de áreas metropolitanas y accesos a grandes ciudades. En este caso, los problemas principales se vinculan a la congestión, la accidentalidad y la saturación de la capacidad de la vía, mientras que el desgaste estructural por kilómetro recorrido puede ser más reducido.

La interpretación de estos indicadores se enriquece al considerar las tipologías de tráfico. El tráfico de paso se compone de vehículos que atraviesan un corredor sin origen ni destino en la zona; suele estar vinculado al largo recorrido y genera un kilometraje elevado con menor sensibilidad a la congestión puntual.

El tráfico de largo recorrido comparte estas características, pero en muchos casos forma parte de cadenas logísticas de transporte pesado, donde el valor del tiempo y la fiabilidad del trayecto son determinantes en la elección de ruta. En contraste, el tráfico alrededor de Madrid y el tráfico local tienen un perfil completamente distinto. Los accesos metropolitanos concentran flujos intensivos en horas punta, con desplazamientos de corta distancia que explican la elevada IMD y el bajo kilometraje agregado.

El tráfico local, especialmente en municipios del Corredor del Henares, refuerza este patrón al concentrarse en tramos cortos con una elevada frecuencia de viajes recurrentes. Estos usuarios son más sensibles a las tarifas unitarias y a la percepción de “doble imposición”, lo que obliga a diseñar esquemas de tarificación con bonificaciones específicas para recorridos de corta distancia o para residentes.

En este contexto, la clasificación y reporte de tráficos cobra especial importancia. La práctica habitual se basa en datasets históricos aportados por los Concesionarios o por operadores que agrupan los volúmenes y kilometraje según categorías de vehículos, en particular vehículos pesados de más de 7,5 toneladas.

El crecimiento del kilometraje puede deberse a dos factores: un mayor número de vehículos que utilizan la carretera o un incremento en la longitud media de los recorridos. En el análisis realizado se ha supuesto que el crecimiento del kilometraje se explica fundamentalmente por el aumento del número de vehículos que circulan por el activo, es decir, por un incremento de los volúmenes de tráfico, lo que resulta

coherente con la función de los corredores interurbanos en el transporte de mercancías.

La combinación de aforos, vehículos-kilómetro y tipologías de tráfico permite así construir una imagen completa de la funcionalidad de cada corredor. Allí donde predominan los trayectos largos con baja IMD, el reto es financiero y de conservación estructural; en aquellos tramos con elevada IMD y kilometraje bajo, la prioridad es la gestión de capacidad y la mitigación de la congestión. Para el caso español, y en particular en el Corredor del Henares, esta distinción es clave para valorar los efectos de la implantación del pago por uso, armonizando eficiencia económica, sostenibilidad de la red y equidad territorial.

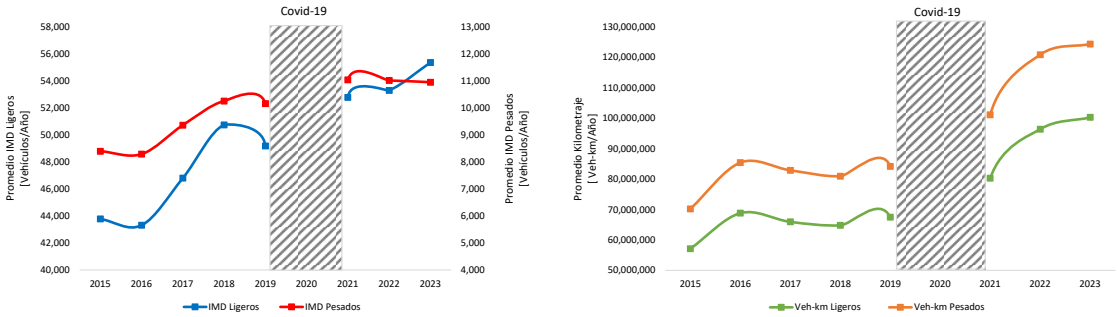


Figura 29 Evolución de IMD y Veh-km en Ligeros y Pesados de la A-2.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Mapas de Tráfico del Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible.

Los gráficos reflejan la evolución del tráfico medio diario (IMD) y del kilometraje anual (veh-km) en el tramo de la A-2 comprendido entre la M-50 y Ledanca, considerado para la implantación del sistema de pago por uso. La serie temporal evidencia tres etapas diferenciadas que explican el comportamiento estructural de la demanda en este corredor. Se ha empleado la media ponderada para tener en cuenta el tráfico por sección y su ponderación sobre la longitud total del tramo en cuestión.

Entre 2016 y 2019 se observa una fase de crecimiento del tráfico, asociada al ciclo expansivo posterior a la crisis económica y al incremento de la actividad logística en el Corredor del Henares. El IMD de vehículos ligeros pasa de unos 44.000 a más de 45.000 veh/día, mientras que el tráfico pesado alcanza valores próximos a unos 11.000 veh/día. De forma coherente, el kilometraje total de pesados supera los 80 millones de veh-km/año, impulsado por la consolidación de los polos industriales de Alcalá de Henares, Azuqueca y Guadalajara.

El año 2020 marca un punto de inflexión por el impacto de la pandemia de la COVID-19, con un descenso abrupto del tráfico debido a las restricciones de movilidad. Según fuentes del OTLE, La caída fue más acusada en vehículos ligeros, mientras que el tráfico pesado mostró una mayor resistencia al mantener la actividad esencial de transporte de mercancías. Dado su carácter atípico, los datos de 2020 se excluyen de la tendencia general para preservar la comparabilidad interanual.

A partir de 2021 se inicia una recuperación rápida, superando los niveles prepandemia. El IMD de ligeros alcanza cerca de 55.000 veh/día en 2023 y el de pesados se aproxima a 11.500 veh/día. El kilometraje anual de pesados sobrepasa los 120

millones de veh-km, evidenciando una reactivación de la demanda y el fortalecimiento del corredor como eje logístico en el transporte nacional e internacional.

En conjunto, la evolución del tráfico en el tramo M-50–Ledanca confirma la alta elasticidad del flujo respecto al crecimiento económico y refuerza la justificación técnica y financiera del sistema de pago por uso.

7. Desarrollo de la metodología

7.1 Análisis socioeconómico

Un modelo socioeconómico de tráfico es una herramienta analítica que busca explicar y proyectar la demanda de movilidad (vehículo-kilómetro, IMD o flujos de transporte de mercancías y pasajeros) a partir de la evolución esperada de variables macroeconómicas y demográficas. Su objetivo es identificar las relaciones entre la actividad económica y la intensidad del tráfico, permitiendo estimar la demanda futura de transporte bajo distintos escenarios de crecimiento o contracción económica (Ortúzar & Willumsen, 2011).

Este tipo de modelo se sustenta en la hipótesis de que el tráfico es una variable dependiente del desarrollo socioeconómico: a mayor producto interior bruto (PIB), población o actividad industrial, mayor es la generación y atracción de viajes. Así, las variables explicativas más habituales incluyen el PIB total o regional, el PIB per cápita, la población residente, el empleo industrial o logístico, el volumen de exportaciones e importaciones y, en el caso del transporte de mercancías, el movimiento portuario o ferroviario de carga (European Commission, 2019).

El uso de modelos socioeconómicos en la planificación del transporte se remonta a los años 1950-1960, cuando la teoría del transporte urbano y regional comenzó a formalizarse en Estados Unidos y Reino Unido. Los primeros estudios, como el “Chicago Area Transportation Study” (CATS, 1956), integraron por primera vez el modelo de cuatro etapas (generación, distribución, elección modal y asignación de tráfico) apoyado en datos socioeconómicos y censales. En las décadas posteriores, la Comisión Europea y organismos nacionales adaptaron estas metodologías al ámbito interurbano, incorporando técnicas econométricas y bases de datos regionales (Stopher & Meyburg, 1975).

A partir de los años 1990, con la disponibilidad de datos digitales de tráfico y series macroeconómicas armonizadas, los modelos socioeconómicos se consolidaron como el instrumento estándar de forecasting en proyectos de infraestructura viaria y concesiones de peaje, siendo actualmente empleados por entidades como el Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible (antes MITMA), la Dirección General de Carreteras (DGC), o consultoras internacionales en sus proyecciones de demanda.

El modelo de proyección de tráfico desarrollado en el presente estudio se fundamenta en una metodología econométrica de tipo regresión lineal múltiple, cuyo objetivo es cuantificar la relación entre la evolución del tráfico pesado (expresado en vehículos-kilómetro anuales, Veh-km) y las principales variables macroeconómicas y demográficas que condicionan su comportamiento en el medio y largo plazo.

El enfoque parte del principio de que el tráfico de vehículos pesados mantiene una relación directa con el nivel de actividad económica y la dinámica poblacional del país, mientras que episodios extraordinarios, como la pandemia de COVID-19, introducen perturbaciones puntuales que deben controlarse mediante variables binarias (Dummy variables).

En este contexto, se construyeron y evaluaron tres especificaciones del modelo, basadas en las combinaciones de variables que, teóricamente, mejor capturan los determinantes del tráfico:

1. **Modelo 1: PIB Real + Dummy:**

   Representa el comportamiento coyuntural del tráfico frente a los ciclos económicos. La variable *PIB Real* (a precios constantes) actúa como proxy de la actividad económica general, mientras que la *Dummy* (valor 1 en 2020 y 0 en el resto de los años) recoge el impacto excepcional de la pandemia.

2. **Modelo 2: Población + Dummy:**

   Explica la evolución estructural del tráfico en el largo plazo, considerando la correlación positiva entre el crecimiento demográfico y la movilidad de mercancías y bienes. La *Dummy* mantiene su función de control del efecto COVID-19.

3. **Modelo 3: PIB Real + Población + Dummy:**

   Integra simultáneamente los factores económicos y demográficos. No obstante, debido a la elevada colinealidad entre el PIB y la Población (ambas variables con tendencia creciente y fuerte correlación), este modelo tiende a sobreajustar la serie y reducir la significancia individual de los coeficientes, motivo por el cual se consideró menos robusto para la proyección final.

El modelo se construye generalmente en tres fases:

1. Recopilación de series históricas de tráfico (veh-km, IMD, intensidades por tipo de vehículo) y variables macroeconómicas a nivel nacional, regional o zonal (PIB, empleo, población, producción industrial, comercio exterior, etc.).
2. Estimación estadística de la relación entre el tráfico y dichas variables mediante técnicas econométricas, siendo la regresión lineal o log-lineal la más común.

$$Kilometraje\ Veh\ pesados = \beta 0 + (\beta 1 * PIB) + (\beta 2 * Población) + Variable\ Dummy$$

Los coeficientes β (betas) representan la sensibilidad o elasticidad del tráfico respecto a cada variable explicativa. En otras palabras, indican cuánto varía el kilometraje de vehículos pesados cuando cambia una unidad de la variable independiente, manteniendo las demás constantes.

- **β_0 (constante o intercepto):** es el valor del tráfico esperado cuando todas las variables explicativas son cero.
- **β_1 (elasticidad respecto al PIB):** mide el efecto de una variación del PIB sobre el tráfico.
- **β_2 (elasticidad respecto a la población):** mide la variación del tráfico ante un cambio en la población; normalmente, este efecto es menor que el del PIB en el caso de tráfico pesado.

La variable Dummy (o variable ficticia) es una variable binaria que toma el valor 0 o 1 para representar un evento cualitativo o estructural que afecta al modelo, pero no puede expresarse cuantitativamente (Wooldridge, 2016).

En los modelos de tráfico, se introduce una dummy para controlar efectos que alteran el comportamiento histórico de la serie. Algunos ejemplos típicos serían:

- **Crisis económica (2008-2012):** Dummy = 1 durante los años de crisis y 0 el resto.
- **Pandemia COVID-19 (2020-2021):** Dummy = 1 en esos años para capturar la caída excepcional del tráfico.
- **Entrada en servicio de una nueva infraestructura** (p. ej. ampliación de la A-2 o apertura gratis de la R-2): Dummy = 1 a partir del año de apertura.

El objetivo es aislar estos efectos anómalos para que las betas reflejen relaciones estructurales estables entre tráfico y variables macroeconómicas, mejorando la precisión predictiva del modelo.

3. Proyección futura, aplicando los valores previstos del PIB, población o actividad industrial (según escenarios macroeconómicos oficiales, p. ej. Banco de España, AIReF, Eurostat), para estimar el tráfico esperado por horizonte temporal (2025,2030, 2040).

La fiabilidad del modelo dependería de la calidad de las series temporales, la homogeneidad geográfica de los datos y la significatividad estadística de los coeficientes obtenidos (Error estándar, R^2, t-value, p-value). En el caso del corredor A-2, estas variables deben capturar el peso de la actividad logística del Corredor del Henares y los efectos de los polos de atracción (Coslada, Azuqueca, Marchamalo, Guadalajara), donde:

- **Error estándar (Standard Error)**
  El error estándar mide la dispersión o incertidumbre asociada a cada coeficiente estimado. Cuanto menor sea su valor, mayor es la precisión de la estimación.

- **Valor t (t-Value)**
  El t-value representa el cociente entre el coeficiente estimado y su error estándar. Cuanto mayor sea su valor absoluto, más significativa es la variable.

- **Valor p (p-Value)**
  El p-value mide la probabilidad de que el coeficiente sea igual a cero (no significativo).

- **Significance F:**
  Para constatar la validez global del modelo. Se compara el valor F calculado con un valor crítico de la tabla de distribución F de Fisher-Snedecor, o su valor p. Si el valor F calculado es mayor que el valor crítico (o el valor p es menor que el nivel de significancia alfa), se rechaza la hipótesis nula, lo que indica que hay diferencias significativas entre las medias de los grupos.

- **Coeficiente de determinación (R^2)**

La R^2 indica que la variabilidad del kilometraje de vehículos pesados se explica por las variables PIB y Dummy, lo que demuestra una capacidad predictiva muy elevada del modelo.

- **Coeficiente de determinación (R^2 Ajustada):**
  La R^2 indica qué porcentaje de la varianza de la variable dependiente es explicada por las variables independientes, mientras que la R^2 ajustada ajusta este valor para tener en cuenta la complejidad del modelo, penalizando la inclusión de variables predictoras no significativas, lo que la hace más adecuada para la regresión múltiple.

7.2 Factores que impulsan el crecimiento de tráfico de los vehículos pesados

7.2.1 Producto Interior Bruto (PIB) de España

Las actividades logísticas e industriales vinculadas al transporte de mercancías por carretera en el corredor de la A-2 se encuentran estrechamente relacionadas con los flujos de carga y bienes transportados por vehículos pesados. La evolución temporal de dichas actividades suele explicarse mediante variables macroeconómicas como el PIB, la población, la actividad industrial, el volumen de importaciones y exportaciones del país o región, así como los tráficos marítimos y ferroviarios de mercancías procedentes de los principales puertos y nodos logísticos cercanos, en este caso, el Puerto de Barcelona, el Puerto de Tarragona y los centros intermodales del Corredor del Henares y Zaragoza-Plaza.

Estas variables presentan una elevada correlación con el tráfico de mercancías y son habitualmente empleadas para la construcción de modelos econométricos destinados a estimar el crecimiento del tráfico de carga (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024).

En algunos casos, dichas variables se combinan, por ejemplo, utilizando el PIB per cápita o la producción industrial ajustada por población, con el fin de evitar problemas de multicolinealidad, dado que los indicadores macroeconómicos suelen estar fuertemente correlacionados entre sí (Wooldridge, 2019).

El corredor de la A-2 actúa como un eje estratégico para el transporte de mercancías tanto nacional como internacional, conectando Madrid con Cataluña y sirviendo de enlace principal hacia Francia y el resto de Europa a través de La Junquera. Su tráfico pesado está directamente vinculado a las actividades industriales y logísticas situadas en el Corredor del Henares (Coslada, Alcalá de Henares, Guadalajara, Azuqueca de Henares), así como a los polos productivos de Zaragoza, Lleida y Barcelona, donde se concentran parques logísticos de referencia nacional.

De este modo, el PIB nacional y, en menor medida, el volumen de comercio exterior español actúan como los principales drivers del crecimiento del tráfico pesado en la A-2. No obstante, el comportamiento del tráfico no depende exclusivamente de las importaciones y exportaciones portuarias, sino que refleja una combinación de movimientos regionales, nacionales e internacionales, coherente con la función mixta del corredor como eje troncal de mercancías en el centro y noreste peninsular (Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, 2024; INE, 2023).

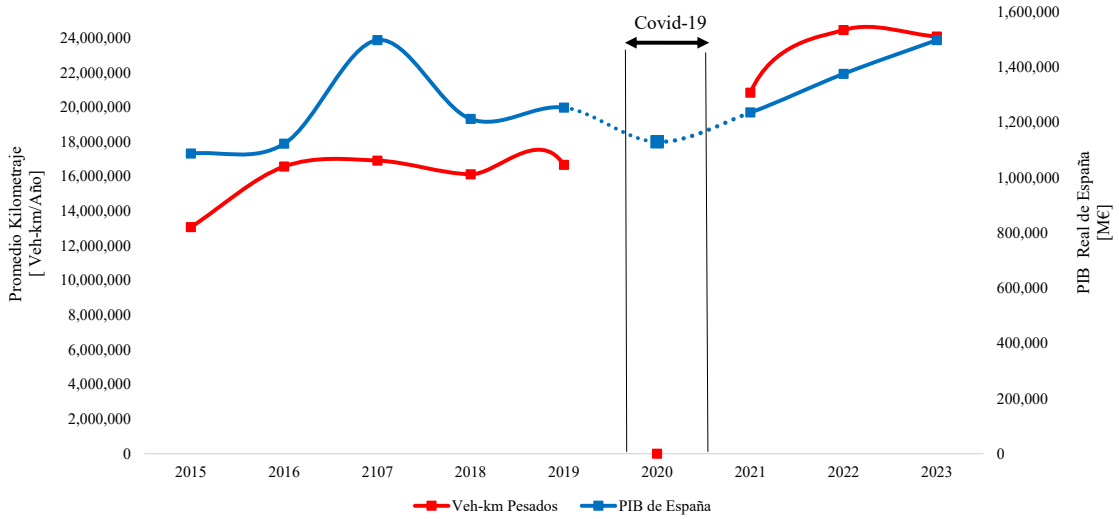


Figura 30 Evolución de kilometraje de pesados y el PIB de España.

Fuente: Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible y el INE (2015-23).

El gráfico muestra la evolución conjunta del PIB real de España y del kilometraje medio anual de vehículos pesados (veh-km) en el periodo 2015-2023, destacando la correlación positiva entre ambos indicadores. En términos generales, el comportamiento del tráfico pesado refleja la evolución del ciclo económico español, confirmando la relación estructural entre la actividad productiva y la demanda de transporte de mercancías.

Durante el periodo 2015-2019, el crecimiento económico sostenido impulsó una expansión progresiva del tráfico de vehículos pesados, cada aumento porcentual del PIB, el volumen de veh-km creció de forma proporcional. Este comportamiento evidencia la fuerte vinculación del transporte de mercancías por carretera con la reactivación industrial y el aumento del consumo interno tras la crisis de 2008.

En 2020, el impacto de la pandemia de COVID-19 provocó una caída abrupta en el PIB (en torno al -10,8%) y sin evidencias visibles del kilometraje de pesados debido a la ausencia de datos en fuentes oficiales. Se podría partir de la hipótesis de que el transporte de mercancías pudo mostrar una resiliencia al considerarlo servicio esencial durante el confinamiento, que mantuvo una parte significativa de la actividad logística (INE, 2023).

A partir de 2021, ambas series muestran una recuperación: el PIB crece de forma continua y el tráfico pesado sigue la misma tendencia, alcanzando en 2023 niveles cercanos a los registrados antes de la pandemia. Este repunte responde al restablecimiento de las cadenas de suministro, la normalización del comercio interior y el aumento de los flujos logísticos asociados a la reactivación del consumo y la exportación.

El gráfico ayuda a entender que el PIB podría considerarse como la principal variable explicativa del tráfico pesado, siendo un indicador robusto para la modelización econométrica de la demanda de transporte en España.

7.2.2 Población y evolución demográfica de España

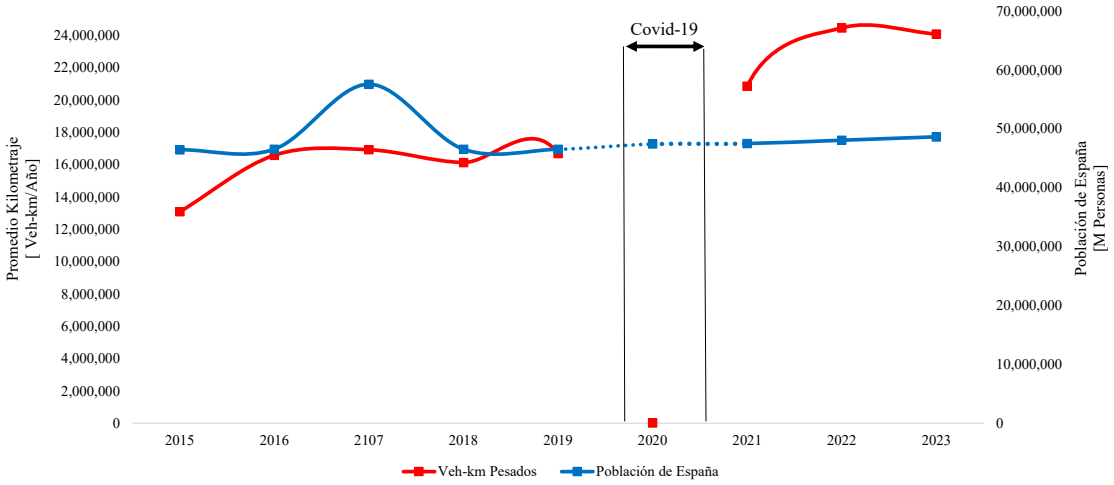


Figura 31 Evolución de kilometraje de pesados y la evolución demográfica de España.

Fuente: Fuente: Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible y el INE (2015-23).

El gráfico superior representa la evolución conjunta del tráfico pesado anual en España (Veh-km pesados) y la población total del país entre 2015 y 2023. Ambas series muestran una tendencia general ascendente, aunque con ritmos y sensibilidades distintas, reflejando dos tipos de efectos sobre la demanda de transporte: estructural (demográfico) y coyuntural (económico).

Durante el período 2015-2018, el tráfico pesado experimenta un crecimiento sostenido, coherente con la fase expansiva de la economía española posterior a la crisis financiera de 2008-2013. Sin embargo, mientras la población mantiene una trayectoria prácticamente estable, con tasas de crecimiento anual inferiores al 0,3%, los Veh-km crecen a mayor ritmo, lo que confirma que el tráfico de mercancías es más sensible a la actividad económica que a la evolución demográfica en el corto plazo.

Entre 2018 y 2020 se observa una clara divergencia entre ambas variables: el tráfico pesado cae en 2020 como consecuencia directa de las restricciones de movilidad y la contracción del PIB provocadas por la pandemia de COVID-19, mientras que la población apenas se ve afectada. Este punto marca el impacto estructural del shock COVID, representado en el modelo econométrico mediante la variable Dummy (valor 1 en 2020).

A partir de 2021, el tráfico pesado se recupera y supera los valores pre-pandemia, alcanzando un nuevo máximo histórico en 2023 (aprox. 24 millones de Veh-km), impulsado por la normalización de la cadena logística y el repunte de la demanda interna y exportadora. La población, por su parte, crece de forma lenta pero sostenida, mostrando un perfil estable que justificaría su uso como variable explicativa de largo plazo.

A diferencia del gráfico de PIB real, que presenta fluctuaciones anuales más notables y de naturaleza cíclica, la serie poblacional constituye un factor estructural cuya evolución es más estable y predecible. Esto contribuye a disminuir la volatilidad del modelo y atenúa su exposición a los ciclos económicos. Mientras el PIB explica la dinámica de corto plazo y las oscilaciones coyunturales, la población capta la

tendencia subyacente del tráfico pesado, asociada a factores de demanda estructural como el crecimiento urbano, la distribución demográfica y el consumo doméstico.

7.3 Criterios de selección de variables explicativas del tráfico de pesados en el modelo econométrico

Con el objetivo de identificar la especificación más representativa para la proyección del tráfico pesado en el horizonte 2024-2034, se han ensayado tres escenarios econométricos alternativos, cada uno de ellos basado en combinaciones distintas de variables explicativas. Estos escenarios buscan contrastar la influencia relativa de los factores económicos (PIB Real), demográficos (Población) y exógenos (Dummy COVID) sobre la evolución de los vehículos-kilómetro anuales (Veh-km), permitiendo determinar cuál de ellos ofrece el mejor equilibrio entre significancia estadística, coherencia económica y capacidad predictiva.

7.3.1 Modelo 1: PIB Real + Dummy

El primer escenario considera como variables explicativas el PIB Real (a precios constantes) y una variable Dummy que toma valor 1 en 2020 para capturar el impacto de la pandemia de COVID-19 sobre la movilidad de mercancías. Esta formulación tiene como objetivo analizar la elasticidad del tráfico pesado frente a los ciclos económicos, así como aislar los efectos exógenos derivados de acontecimientos no recurrentes.

La regresión lineal múltiple estimada presenta un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de 0.9248, lo que indica que aproximadamente el 92,5% de la variabilidad del tráfico (Veh-km) se explica por la evolución del PIB y el evento puntual de la pandemia en 2020.

El estadístico F = 50.23 con un nivel de significancia global $p < 0.001$ (Significance F = 0.00018) confirma que el modelo es estadísticamente significativo en su conjunto, es decir, al menos una de las variables explicativas ejerce influencia real sobre la variable dependiente.

En términos individuales, el coeficiente del PIB Real ($\beta = 26.93$) es positivo y estadísticamente significativo ($t = 4.82$, $p = 0.029 < 0.05$), lo que demuestra una correlación directa entre la expansión económica y el incremento del tráfico pesado: a mayor actividad económica, mayor volumen de transporte de mercancías. El signo positivo y significativo del PIB refleja una elasticidad económica alta, coherente con la naturaleza procíclica del transporte de mercancías por carretera.

Por su parte, la variable Dummy presenta un coeficiente positivo ($\beta = +14.91$ millones) y un p-value = 0.0859, superior al umbral del 5%. Aunque no alcanza significancia estadística individual, su inclusión resulta económicamente relevante, pues permite corregir la distorsión causada por la caída abrupta de la demanda en 2020 y mejorar el ajuste global del modelo.

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.971410745
R Square	0.943638836
Adjusted R Square	0.924851782
Standard Error	1995408.401
Observations	9

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	2	3.99982E+14	1.99991E+14	50.22814147	0.000179036
Residual	6	2.38899E+13	3.98165E+12		
Total	8	4.23872E+14			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	-14911342.48	6984570.825	-2.134897456	7.6689%	-32001971.61	2179286.643	-32001971.61	2179286.643
PIB Real	26.92683948	5.584104418	4.822051571	0.2934%	13.26302821	40.59065076	13.26302821	40.59065076
Dummy	14911342.48	7264012.96	2.052769256	8.5912%	-2863056.917	32685741.88	-2863056.917	32685741.88

Figura 32 Resultados del escenario 1 PIB + Dummy.

Fuente: Elaboración propia.

7.3.2 Modelo 2: Población + Dummy

El segundo escenario considera como variables explicativas la Población de España y una variable Dummy (valor 1 en 2020 y 0 en el resto de los años), con el fin de analizar la relación de largo plazo entre el crecimiento demográfico y la evolución del tráfico pesado (Veh-km).

Este modelo presenta un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de 0.9402, lo que indica que el 94,0% de la variabilidad del tráfico queda explicada por las dos variables incluidas. La Significance F = 0.009% (< 0.05) confirma que el modelo es globalmente significativo, es decir, las variables explicativas en conjunto explican de forma estadísticamente sólida la evolución del tráfico pesado en el periodo analizado (2015-2023).

En términos individuales, los resultados muestran que la Población es altamente significativa y presenta el signo esperado (β = +4.80; p-value = 0.145%), lo que valida una relación directa y positiva entre el crecimiento demográfico y la demanda de transporte de mercancías.

Cada incremento de un millón de habitantes se asocia con un aumento estimado de aproximadamente 4.8 millones de Veh-km anuales, manteniendo constantes las demás variables.

Este resultado evidencia el carácter estable del tráfico frente a la variable poblacional, que actúa como un determinante de largo plazo asociado al consumo, la distribución y la densidad logística. Por otro lado, la variable Dummy presenta un coeficiente negativo ($\beta = -1.93 \times 10^7$) y un p-value = 0.005%, también estadísticamente significativo. Su signo negativo refleja la contracción extraordinaria del tráfico en 2020, año en el que las restricciones de movilidad redujeron notablemente la circulación de vehículos pesados, aunque no dejaba de ser un transporte de primera necesidad. La significancia del coeficiente confirma que la inclusión de esta variable mejora el ajuste del modelo y evita sesgos en la estimación de las tendencias de fondo.

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.977337071
R Square	0.95518775
Adjusted R Square	0.940250334
Standard Error	1779263.191
Observations	9

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	2	4.04877E+14	2.02439E+14	63.94598048	0.009%
Residual	6	1.89947E+13	3.16578E+12		
Total	8	4.23872E+14			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	-208393109	40911486.6	-5.093755479	0.224%	-308499910.5	-108286307.6	-308499910.5	-108286308
Población	4.803266251	0.865615137	5.548962868	0.145%	2.685182315	6.921350187	2.685182315	6.921350187
Dummy	-19275442.99	1891157.325	-10.19240585	0.0052%	-23902938.26	-14647947.72	-23902938.26	-14647947.7

Figura 33 Resultados del escenario 2 Población + Dummy.

Fuente: Elaboración Propia.

7.3.3 Modelo 3: PIB + Población + Dummy

El tercer escenario introduce simultáneamente el PIB Real, la Población y la Dummy COVID como variables explicativas del tráfico pesado (Veh-km). El objetivo de esta formulación es contrastar si la combinación de los factores económicos y demográficos mejora la capacidad predictiva del modelo respecto a las especificaciones anteriores (PIB+Dummy y Población+Dummy).

El modelo alcanza un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de 0.929, lo que implica que el 92,9% de la variabilidad del tráfico es explicado por las tres variables consideradas. El estadístico F = 35.92 con Significance F = 0.00083 (< 0.05) confirma que el modelo es globalmente significativo, es decir, en conjunto las variables presentan capacidad explicativa sobre la evolución del tráfico.

No obstante, el análisis individual de los coeficientes revela un patrón diferente:

- El PIB Real presenta un coeficiente negativo (β = -6.77) y un p-value del 83%, lo que indica que no es estadísticamente significativo y su signo resulta contrario al esperado (negativo en lugar de positivo). Este comportamiento anómalo sugiere la existencia de colinealidad entre el PIB y la Población, ya que ambas variables muestran tendencias crecientes y están altamente correlacionadas entre sí.
- La Población, aunque mantiene el signo positivo esperado (β = +5.96), presenta un p-value = 30%, por lo que tampoco resulta significativa de forma individual.
- La Dummy COVID muestra un coeficiente negativo (β = -27.8 millones) coherente con la caída del tráfico en 2020, pero con un p-value = 49%, igualmente no significativo.

En consecuencia, aunque el modelo combinado presenta un ajuste global adecuado (R^2 alto), la pérdida de significancia individual de las variables confirma que su inclusión simultánea genera redundancia estadística y sobreajuste. El modelo tiende a explicar la misma parte de la variabilidad del tráfico mediante dos variables altamente correlacionadas (PIB y Población), reduciendo la precisión de las estimaciones parciales.

Por tanto, aunque este escenario mantiene un ajuste razonablemente sólido, se considera menos robusto desde el punto de vista estadístico y económico.

La presencia de multicolinealidad reduce la interpretabilidad de los coeficientes y dificulta su aplicación práctica en proyecciones futuras.

SUMMARY OUTPUT

Regression Statistics	
Multiple R	0.977577173
R Square	0.955657128
Adjusted R Square	0.929051405
Standard Error	1938850.625
Observations	9

ANOVA

	df	*SS*	*MS*	*F*	*Significance F*
Regression	3	4.05076E+14	1.35025E+14	35.91923	0.000830033
Residual	5	1.87957E+13	3.75914E+12		
Total	8	4.23872E+14			

	Coefficients	*Standard Error*	*t Stat*	*P-value*	*Lower 95%*	*Upper 95%*	*Lower 95.0%*	*Upper 95.0%*
Intercept	-254680320.3	206079194.7	-1.235837129	27%	-784423754.9	275063114.3	-784423754.9	275063114.3
PIB Real	-6.776561921	29.45607905	-0.230056482	83%	-82.49582367	68.94269983	-82.49582367	68.94269983
Población	5.961181171	5.120800425	1.164111209	30%	-7.202255385	19.12461773	-7.202255385	19.12461773
Dummy	-27871887.88	37423454.2	-0.744770585	49%	-124071939.5	68328163.71	-124071939.5	68328163.71

Figura 34 Figura 38 Resultados del escenario 3 PIB + Población + Dummy.

Fuente: Elaboración propia.

En comparación con los dos escenarios anteriores, el modelo Población + Dummy demuestra una estructura más estable y con variables estadísticamente significativas, motivo por el cual se podría seleccionar como el modelo óptimo para la proyección a largo plazo. Su formulación captura de forma robusta la tendencia estructural del tráfico pesado, minimizando los efectos coyunturales y el ruido estadístico asociado a las fluctuaciones del PIB.

A diferencia del modelo PIB + Dummy, cuyo comportamiento refleja adecuadamente las variaciones a corto plazo, pero depende en exceso del ciclo económico, el modelo basado en la Población proporciona una mayor estabilidad interanual y una relación más sostenible en el tiempo, coherente con la evolución demográfica y la demanda logística estructural.

La variable Dummy COVID, estadísticamente significativa, permite aislar el impacto extraordinario de la pandemia y ajustar el modelo a un comportamiento normalizado del tráfico a partir de 2021.

Asimismo, el modelo combinado PIB + Población + Dummy, aunque presenta un coeficiente de determinación elevado (R^2 ajustado aproximadamente de 0.93), evidencia problemas de multicolinealidad y pérdida de significancia individual en sus coeficientes, lo que reduce su interpretabilidad y lo hace menos apropiado para fines predictivos. En cambio, el modelo Población + Dummy mantiene un equilibrio óptimo entre simplicidad y capacidad explicativa, con una estructura econométrica sólida, signos coherentes con la teoría y alta significancia global (Significance F < 0.01).

Como conclusión, y en línea de las prácticas del mercado, se adopta el modelo PIB + Dummy como base para las proyecciones de tráfico pesado en el horizonte 2024-2040, al proporcionar una representación fiable de los determinantes estructurales de la demanda de transporte y mercancías en España.

$$Kilometraje\ Veh\ Pesados = \beta 0 + (\beta 1 * PIB) + Variable\ Dummy$$

Donde:

- **β0: Intercepto del modelo.**

El término β_0 representa el valor del kilometraje anual de vehículos pesados (Veh-km) cuando todas las variables explicativas toman el valor cero. No tiene interpretación económica directa, pero es imprescindible para ajustar la recta de regresión y asegurar que el modelo minimiza el error cuadrático. Funciona como un "nivel base" del modelo econométrico.

- **β_1 x PIB: Efecto del crecimiento económico.**

El coeficiente β_1 mide la sensibilidad del tráfico pesado a la evolución del PIB Real. Es decir: cuánto aumenta (o disminuye) el tráfico de vehículos pesados por cada unidad adicional de PIB. cuando la actividad económica crece, aumenta la demanda de transporte de mercancías, y, por tanto, se incrementan los vehículos-km registrados en el corredor.

- **Variable Dummy: Impacto de un evento extraordinario.**

La Dummy adopta valor 1 en 2020 (año COVID-19) y 0 en el resto de los ejercicios. Su función es: aislar el shock exógeno producido por la pandemia y evitar que la caída atípica de 2020 distorsione el ajuste del modelo.

Por lo tanto, la ecuación sería:

$$Kilometraje\ Veh\ Pesados = -14.911.342{,}48 + (26{,}92683948 * PIBt) + (14.911.342{,}48 * Dummy)$$

7.3.4 Clasificación de vehículos pesados

La Masa Máxima Autorizada (MMA) de un vehículo pesado viene determinada por diversos factores técnicos asociados a su configuración: número de ejes, tipo de vehículo (rígido, articulado, con remolque o semirremolque) y características específicas de suspensión o neumáticos. En los camiones rígidos, la MMA oscila desde 18 toneladas en configuraciones de 2 ejes, hastA-25 toneladas en los de 3 ejes y 31 toneladas en los de 4 ejes. Estas capacidades pueden incrementarse ligeramente cuando el vehículo incorpora ruedas gemelas, ejes direccionales o suspensión neumática, alcanzando por ejemplo 32 toneladas en 4 ejes o 26 toneladas en 3 ejes.

En el caso de los remolques, la MMA es de 18 toneladas parA-2 ejes y 24 toneladas en configuraciones de 3 ejes. Los vehículos articulados con semirremolque permiten alcanzar capacidades superiores: 36 toneladas cuando tanto la cabeza tractora como el semirremolque disponen de dos ejes, aumentando hasta 38 toneladas si el semirremolque supera los 1,80 metros de distancia entre ejes y se equipa suspensión neumática y ruedas gemelas. Asimismo, las combinaciones de 5 ejes alcanzan 40 toneladas, y las de 6 ejes, utilizadas habitualmente para transporte de contenedores ISO, pueden llegar a 44 toneladas.

Con el fin de estructurar el cálculo de ingresos y asignar tarifas diferenciadas por categoría de peso, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de las principales fuentes estadísticas de España y la Unión Europea. La consulta incluyó documentos de la DGT

(Anuario Estadístico General), ANFAC, Eurostat – Road Freight Transport, Eurofreight, Transport & Environment, así como informes sectoriales especializados (incluyendo Economist Intelligence Unit).

No obstante, esta revisión confirmó que no existe un desglose oficial homogéneo de matriculaciones o actividad anual exactamente en los tramos (≥7,5 t; ≥12 t; >18 t). Las estadísticas nacionales suelen agrupar los vehículos pesados en rangos amplios (por ejemplo, >3,5 t o 30–40 t), y las bases europeas priorizan la actividad (ton-km) sobre la estructura del parque.

Aun así, las fuentes consultadas permiten extraer las siguientes conclusiones:

Datos consolidados por Transport & Environment a partir de la DGT indican que alrededor del 50% del parque español de vehículos industriales >3,5 t corresponde a unidades con más de 16 toneladas, lo que evidencia el fuerte peso estructural del segmento más pesado.

Las estadísticas de Eurostat muestran que más del 90% de la actividad de transporte de mercancías (ton-km) en España se realiza con vehículos de 30 a 40 toneladas de MMA, confirmando que los vehículos articulados dominan claramente el mercado logístico nacional.

En ausencia de un desglose oficial por tramos de MMA 7,12,18 y >18t, y apoyándonos en estas evidencias, se adopta como una hipótesis para este estudio una segmentación operativa razonable y coherente con la estructura real del mercado:

- ≥7,5 t: 10% del total de veh-km.
- ≥12 t: 15% del total de veh-km.
- >18 t: 75% del total de veh-km.

La siguiente imagen muestra los principales tipos de camiones utilizados en el transporte terrestre de mercancías, diferenciados según su configuración, capacidad volumétrica, tipo de carga y número de ejes. Cada tipología responde a necesidades logísticas específicas y condiciona tanto la masa máxima autorizada (MMA) como el comportamiento operativo del vehículo (consumo, reparto de cargas por eje, limitaciones de acceso o restricciones técnicas).

Entre los tipos más representativos se encuentran los camiones rígidos de uno o dos ejes, destinados a distribución urbana; los camiones de caja cerrada de 48–53 pies, habituales en transporte de media y larga distancia; los vehículos articulados y semirremolques, que constituyen la base del transporte pesado nacional y europeo; y unidades especializadas como cisternas, plataformas, tolvas, portavehículos o jaulas ganaderas, diseñadas para cargas líquidas, voluminosas, graneleras o animales vivos.



Figura 35 Ejemplo de los vehículos pesados.

Fuente: Grupo ITC España – Consulta realizada a fecha de Noviembre 2025.

7.3.5 Propuesta de estructura tarifaria

La definición de una estructura tarifaria eficiente constituye uno de los elementos centrales de cualquier sistema de pago por uso aplicado a vehículos pesados. La tarificación debe reflejar, de manera proporcional y transparente, los costes reales que cada categoría de vehículo genera sobre la infraestructura y sobre el entorno, siguiendo el principio europeo de “quien usa paga” y “quien contamina paga”, recogido en la Directiva (UE) 2022/362.

En este capítulo se desarrolla un modelo tarifario basado en la internalización de costes marginales asociados al uso de la vía (desgaste del pavimento, mantenimiento y operación) y en la valoración monetaria de externalidades como contaminación atmosférica, emisiones de CO_2, ruido, congestión y siniestralidad. Este enfoque, ampliamente utilizado en países europeos con sistemas consolidados de road charging, permite alinear los incentivos del usuario con el impacto real que genera, garantizando al mismo tiempo la sostenibilidad financiera y ambiental del corredor analizado.

Dado que los vehículos pesados presentan comportamientos muy distintos en función de su Masa Máxima Autorizada (MMA), desde camiones rígidos de 7,5 toneladas hasta conjuntos articulados de 40-44 toneladas, se ha adoptado una segmentación

tarifaria diferenciada en tres categorías. Cada una incorpora niveles crecientes de desgaste, carga por eje y externalidades, lo que justifica un esquema progresivo de tarifas objetivo de 0,13 Eur/km, 0,14 Eur/km y 0,15 Eur/km, respectivamente.

Cabe mencionar que el coste total de las internalidades suma el 54%, mientras que el coste de las externalidades suma el 46% de la tarifa propuesta.

Tabla 41 Tarifas aplicables en el corredor propuesto según MMA.

Fuente: European Union (2022). Directive (EU) 2022/362 on the charging of heavy goods vehicles for the use of certain infrastructures.

Componente de coste	Categoría	Descripción	≥ 7,5t < 12t Eur/km	12 ≥ < 18t Eur/km	>18t Eur/km
Mantenimiento y operación de la infraestructura	Internalidad	Costes asociados al firme, señalización, iluminación, limpieza y gestión vial	0,050	0,05	0,060
Coste marginal del desgaste (por eje y tonelaje)	Internalidad	Daño incremental sobre el pavimento, proporcional al peso bruto del vehículo	0,020	0,025	0,030
Contaminación atmosférica (NOx, PM10, etc.)	Externalidad	Impactos sobre la salud en zonas cercanas a la vía	0,012	0,013	0,015
Emisiones de CO_2	Externalidad	Impacto climático de los gases de efecto invernadero emitidos	0,020	0,022	0,024
Ruido rodado y acústico	Externalidad	Afectación a viviendas, fauna y calidad de vida en zonas cercanas	0,006	0,007	0,008
Congestión generada	Externalidad	Pérdida de tiempo y eficiencia en tramos con alta demanda	0,010	0,010	0,007
Siniestralidad vial (costes sociales de accidentes)	Externalidad	Costes sanitarios, humanos y materiales asociados a los accidentes	0,012	0,008	0,006
Total	-	-	0,13	0,14	0,15

7.4 Caso Base

El Caso Base constituye el escenario de referencia sobre el que se estructura el análisis económico-financiero del sistema de pago por uso en el tramo A-2 (M-50 – Ledanca). El objetivo es establecer una proyección realista, coherente y técnicamente justificable del kilometraje pesado (Veh-km) y de los ingresos asociados bajo un esquema tarifario para vehículos de más de 7,5 toneladas.

Este escenario integra tanto el comportamiento histórico del tráfico como la evolución macroeconómica prevista para España, apoyándose en una metodología mixta basada en la relación estructural entre el PIB real y el tráfico de mercancías pesadas. De esta forma, este caso actúa como la línea base contra la cual se evalúa la sostenibilidad del sistema, el posicionamiento del corredor dentro de la evaluación comparativa europea (Benchmarking) y la viabilidad del modelo de recuperación de costes.

El análisis del Caso Base se fundamenta en un modelo econométrico lineal que explica el kilometraje anual de vehículos pesados a partir de dos variables:

- PIB real de España, como proxy de la actividad económica y del volumen de demanda logística.
- Variable Dummy para recoger el impacto excepcional del shock de 2020 asociado a la COVID-19.

El modelo ha mostrado un ajuste estadístico razonable y una elasticidad tráfico–PIB coherente con la literatura internacional, lo que garantiza la capacidad predictiva de la serie proyectada. A partir de 2024, el tráfico crece en función de las previsiones macroeconómicas elaboradas por INE, Eurostat y The Economist Intelligence Unit (EIU), incorporadas al modelo de proyección.

Entre 2015 y 2019, el tráfico pesado registró un crecimiento moderado, alineado con la recuperación económica posterior a la crisis financiera y con la intensificación del transporte de mercancías por carretera. El año 2020 refleja una caída abrupta del tráfico como consecuencia directa de la pandemia, capturada en el modelo mediante la variable Dummy. A partir de 2021, la serie muestra una recuperación rápida y sostenida, convergiendo nuevamente hacia niveles acordes con la tendencia macroeconómica. Este patrón confirma que el tráfico pesado es altamente sensible al ciclo económico, lo que justifica el uso del PIB real como variable principal del modelo.

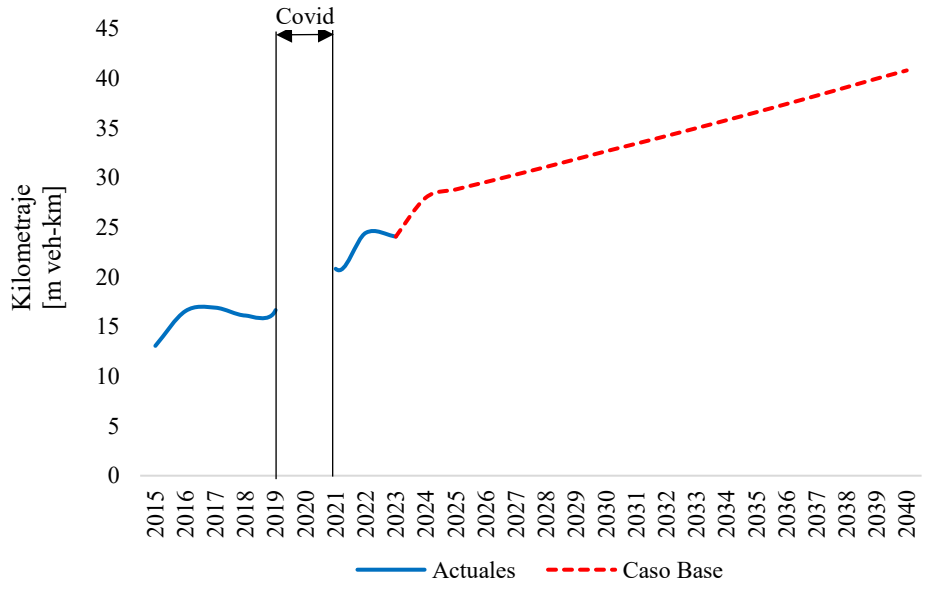


Figura 36 Resultados del Caso Base.

Fuente: Elaboración Propia a partir de datos del INE, EUROSTAT y EIU.

El inicio del horizonte proyectado en 2024 muestra un volumen estimado cercano A-28 millones de Veh-km, valor ligeramente superior y coherente con los niveles post-pandemia y la relación histórica tráfico - PIB. A partir de este punto, el kilometraje crece de manera progresiva y estable, alcanzando aproximadamente 40 millones de Veh-km en 2040.

El crecimiento anual proyectado se sitúa en el entorno del 1,5 - 2,0%, en línea con las previsiones de crecimiento real del PIB. Esta tendencia suave y ascendente refleja el comportamiento típico de corredores logísticos maduros con alta correlación macroeconómica y baja volatilidad estructural. La aplicación de la estructura tarifaria propuesta (0,13 EUR/km, 0,14 EUR/km y 0,15 EUR/km según categorías de MMA) genera ingresos anuales iniciales de 4,10 millones de euros en 2024, que aumentan progresivamente hasta situarse en torno a 5,98 millones de euros en 2040.

Los resultados obtenidos confirman que el PIB real constituye una variable explicativa sólida y estadísticamente significativa para modelizar el kilometraje anual de vehículos pesados en el corredor A-2 (M-50 - Ledanca). El ejercicio de backcasting realizado para el periodo 2015–2023 valida la consistencia del modelo, mostrando un ajuste muy elevado entre valores observados y estimados. En concreto, el modelo presenta un coeficiente de determinación (R^2) del 94,36%, lo que indica que la mayor parte de la variabilidad del tráfico pesado queda explicada por la dinámica del PIB real. Asimismo, el coeficiente asociado al PIB muestra un p-value de 0,002934, por debajo del umbral del 5%, lo que confirma su significancia estadística dentro del modelo.

El signo positivo del coeficiente es coherente con el comportamiento económico del sector logístico: una mayor actividad económica se traduce en un aumento del transporte de mercancías por carretera. Estos resultados, el alto grado de ajuste, significancia estadística y coherencia económica del signo, permiten concluir que el PIB real es un factor fiable, estable y apropiado para proyectar el tráfico pesado a largo plazo.

Cabe mencionar que todos los ingresos estimados corresponden a precios reales de 2025 sin aplicar mecanismos de indexación, lo que implica que los valores presentados no incorporan inflación futura.

Tabla 42 Resultados del Caso Base.

Fuente: Elaboración Propia a partir de datos del INE, EUROSTAT y EIU.

Periodo *[-]*	**Caso Base** *[veh-km]*	YoY *[%]*
2024	28,018,925.51	2.9%
2025	28,834,600.61	2.6%
2026	29,578,281.64	2.6%
2027	30,334,605.25	2.5%
2028	31,103,786.36	2.5%
2029	31,886,043.55	2.5%
2030	32,681,599.11	2.3%
2031	33,443,086.18	2.3%
2032	34,216,757.04	2.3%
2033	35,002,806.63	2.3%
2034	35,801,433.01	2.3%
2035	36,612,837.42	2.3%
2036	37,437,224.30	2.2%
2037	38,274,801.37	2.2%
2038	39,125,779.67	2.2%
2039	39,990,373.63	2.1%
2040	40,813,899.37	2.9%

Dado que el tramo A-2 M-50 – Ledanca no dispone de un histórico propio de costes operativos bajo un esquema de tarificación por uso, se adopta un enfoque Top-Down sustentado en benchmarks comparables. Este método permite estimar los costes anuales de operación y mantenimiento (O&M) con un nivel de rigor adecuado al grado de madurez del proyecto, utilizando como referencia directa el análisis independiente de Arup (2025) sobre concesiones ibéricas, que constituye una referencia contrastada en el mercado ibérico.

La lógica Top-Down se considera adecuada en fases iniciales de evaluación porque no requiere desagregar partidas o contratos individuales (modelo Bottom-Up), sino que parte de ratios por carril-km derivados de comparables reales y los aplica a la infraestructura evaluada. Este enfoque es consistente con la práctica habitual en fases iniciales y estudios de viabilidad institucional.

Por otra parte, y con el ánimo de evaluar la sostenibilidad operativa y la coherencia económica del sistema de pago por uso en el tramo A-2 (M-50 - Ledanca), se ha llevado a cabo una revisión exhaustiva de *benchmarks* recientes de operación y mantenimiento (O&M) en corredores comparables de la Península Ibérica. El gráfico sintetiza los valores observados en concesiones de España y Portugal, expresados en precios reales de 2025.

La metodología aplicada se estructura en tres etapas. En primer lugar, se recopilaron los costes O&M por carril-km publicados para activos reales, junto con el rango medio identificado por consultoras técnicas internacionales. Esta información permitió establecer un rango de referencia de 10 - 18 k Eur/Carril-km, que constituye el marco comparativo para el análisis de nuestro corredor.

En segundo lugar, se ajustaron estos valores para asegurar comparabilidad en términos reales (base 2025), normalizando las cifras para eliminar efectos de vida remanente del activo, presencia de túneles u otros elementos singulares que distorsionan el coste unitario. Finalmente, se contrastaron los resultados del tramo A-2 frente a dicho rango mediante un ejercicio de alineación financiera basado en la estructura tarifaria proyectada y un margen operativo objetivo.

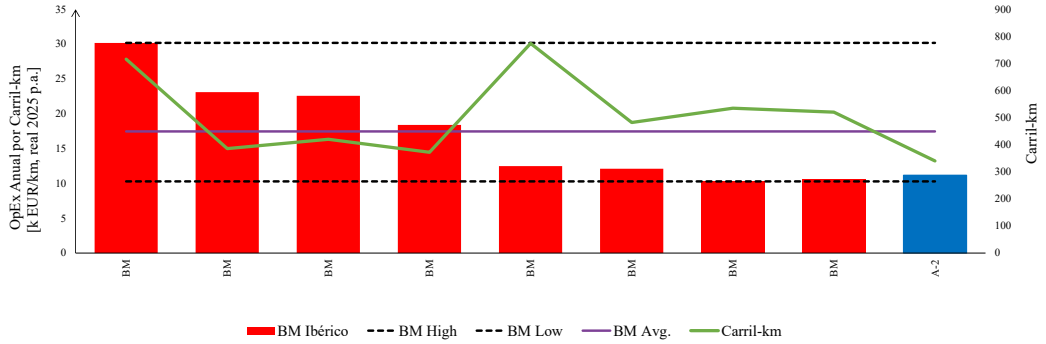


Figura 37 Resultados del Benchmarking.

Fuente: Elaboración propia a partir de datos consultados a la empresa Arup, Octubre 2025.

En el caso específico del sistema propuesto para la A-2, se ha modelizado un margen EBITDA del 10%, coherente con los estándares operativos observados en infraestructuras públicas orientadas a recuperación de costes. Al aplicar este margen a los ingresos estimados para el Caso Base, los costes operativos implícitos resultantes se sitúan dentro del benchmarking ibérico. De acuerdo con las proyecciones obtenidas, el coste O&M por carril-km del corredor se ubica en el entorno de 11–12 k Eur/Carril-km, valor alineado con el rango de referencia y consistente con la eficiencia esperada en una infraestructura lineal sin túneles y con un trazado relativamente homogéneo.

Esta alineación confirma que el sistema propuesto es financieramente realista y técnicamente coherente, y que no presenta desviaciones respecto a las mejores prácticas identificadas en la región. Asimismo, la incorporación de un margen operativo moderado no desplaza los costes fuera de los límites razonables del sector, reforzando la viabilidad del modelo planteado para garantizar la sostenibilidad económica del tramo.

En conjunto, el análisis evidencia que el corredor A-2 puede operar de forma eficiente dentro de los estándares ibéricos, que su estructura de costes es compatible con la literatura técnica y que los valores obtenidos son plenamente consistentes con los benchmarks revisados parA-2025. Esta conclusión proporciona una base sólida para la justificación económica del sistema de tarificación propuesto y para la interpretación del rendimiento operacional del corredor en el periodo 2024–2040.

7.5 Caso Pesimista

Para construir el escenario pesimista con la hipótesis de recesión a partir de 2030, se parte de la misma senda de PIB del Caso Base y se introduce un vector de desviaciones negativas que recoge el deterioro económico progresivo. El análisis se

basa en una reducción acumulada del nivel de PIB respecto al Caso Base: -10% en 2030, -9% en 2031, -8% en 2032, descendiendo de forma gradual hasta -2% en el periodo 2038–2040. La lógica económica es la de una recesión intensa que provoca una caída inicial significativa del PIB respecto al escenario central y una recuperación muy lenta, de forma que la brecha con el Caso Base se va reduciendo, pero no llega a cerrarse en el horizonte de análisis.

Sobre esta nueva senda de Veh-km se calculan los ingresos del escenario pesimista utilizando exactamente la misma estructura tarifaria que en el Caso Base. Dado que las tarifas por categoría de peso permanecen constantes, la caída de PIB se traslada de forma prácticamente proporcional a los ingresos. Los años inmediatamente posteriores A-2030 muestran una separación visible respecto a los ingresos del Caso Base, con una brecha todavía relevante en 2035, que se va estrechando al acercarse A-2040, aunque sin llegar a converger plenamente. En términos cualitativos, el sistema sigue generando una recaudación creciente en términos reales, pero con una pendiente y unos niveles sensiblemente inferiores a los del escenario central.

En el nuevo escenario de recesión, la trayectoria proyectada a partir de 2030 se aplana respecto a la del Caso Base, con un ligero cambio de pendiente que refleja el menor dinamismo del PIB. La inflexión asociada al shock recesivo se percibe en la zona media del horizonte, y la curva mantiene a partir de entonces un crecimiento moderado, coherente con un contexto macroeconómico de bajo crecimiento estructural.

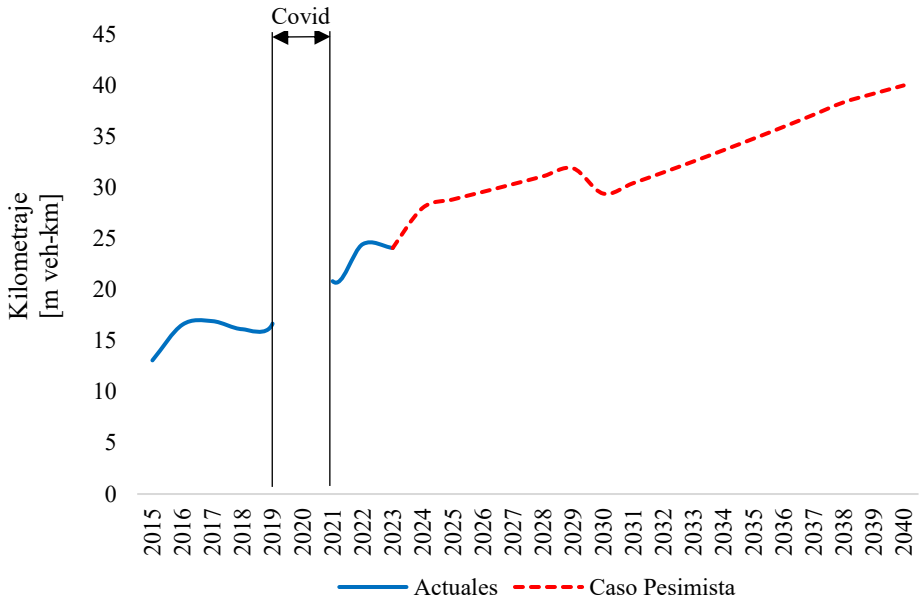


Figura 38 Resultados del Caso Pesimista.

Fuente: Elaboración Propia a partir de datos del INE, EUROSTAT y EIU.

El escenario pesimista desarrollado confirma que el sistema de pago por uso propuesto para el tramo A-2 (M-50–Ledanca) mantiene una trayectoria operativa sostenible incluso bajo un contexto macroeconómico adverso caracterizado por un crecimiento débil del PIB durante más de una década. La hipótesis de recesión planteada, con una caída inicial del 10% respecto al Caso Base en 2030 y una recuperación lenta hasta niveles aún inferiores al escenario central en 2040, muestra

la sensibilidad del tráfico pesado a la actividad económica, reduciendo de manera significativa la pendiente de crecimiento del kilometraje proyectado.

Pese a esta desaceleración, el tráfico conserva una tendencia positiva y estable, lo que demuestra la resiliencia estructural del corredor y su función estratégica en el transporte de mercancías. La reducción de ingresos asociada al menor dinamismo del PIB no compromete la capacidad operativa del sistema, ya que la ratio de ingresos por carril-kilómetro continúa ubicándose dentro de los rangos de referencia observados en los benchmarks ibéricos de operación y mantenimiento. En este sentido, incluso en condiciones económicas desfavorables, el corredor se mantiene alineado con los valores típicos de eficiencia y coste unitario registrados en concesiones comparables de España y Portugal.

Tabla 43 Resultados del Caso Pesimista.

Fuente: Elaboración Propia a partir de datos del INE, EUROSTAT y EIU.

Periodo *[-]*	**Caso Pesimista** *[veh-km]*	YoY *[%]*
2024	28,018,925.51	2.9%
2025	28,834,600.61	2.6%
2026	29,578,281.64	2.6%
2027	30,334,605.25	2.5%
2028	31,103,786.36	2.5%
2029	31,886,043.55	-7.8%
2030	29,413,439.20	3.5%
2031	30,433,208.42	3.4%
2032	31,479,416.47	3.4%
2033	32,552,610.16	3.4%
2034	33,653,347.03	3.4%
2035	34,782,195.55	3.3%
2036	35,939,735.33	3.3%
2037	37,126,557.33	3.3%
2038	38,343,264.08	2.2%
2039	39,190,566.15	2.1%
2040	39,997,621.38	2.9%

Durante el periodo 2024-2029, el comportamiento del tráfico es idéntico al del escenario central, con tasas de crecimiento comprendidas entre el 2,5% y el 2,9%, en línea con un entorno económico estable y con la evolución natural del transporte de mercancías en el corredor. Este tramo inicial consolida la recuperación derivada del rebote postpandemia y refleja el dinamismo sostenido de la demanda logística.

La recesión modelizada en 2030 genera una contracción del tráfico del -7,75%, coherente con la reducción abrupta del PIB incluida en la hipótesis pesimista. Esta caída representa el punto mínimo del ciclo y marca un antes y un después en la curva de crecimiento: el modelo se ajusta a un entorno prolongado de menor actividad económica, trasladándose al tráfico pesado de forma proporcional.

A partir de 2031 se observa un patrón de recuperación gradual, con tasas de crecimiento anual compuesto próximas al 3,3–3,5% entre 2031 y 2038. Este comportamiento evidencia la resiliencia del sistema de transporte de mercancías, que

responde a la mejora del PIB, aunque con una pendiente más suave que en el Caso Base. No obstante, el impacto de la recesión inicial continúa reflejándose en el nivel absoluto de tráfico, que permanece por debajo del escenario central a lo largo de todo el horizonte.

En los últimos años (2039–2040), el crecimiento vuelve a moderarse hacia valores del 2,0–2,1%, estabilizándose en un régimen de expansión contenida, coherente con un escenario macroeconómico de bajo dinamismo estructural. Esta desaceleración final es consistente con la menor elasticidad del tráfico respecto al crecimiento económico en escenarios prolongados.

En definitiva, la evolución del CAGR en el Caso Pesimista confirma que, aunque el shock recesivo tiene un impacto significativo en el nivel de tráfico y en su trayectoria, la curva mantiene un comportamiento ordenado y económicamente coherente. La elasticidad del tráfico frente al PIB se mantiene en rangos razonables, la recuperación posterior es gradual y estable, y el sistema conserva una tendencia de crecimiento robusto, aunque más moderado que en el Caso Base. Este escenario ofrece así una visión prudente pero realista del comportamiento de la demanda bajo condiciones económicas adversas, aportando un fundamento sólido para el análisis de riesgos del proyecto.