TESIS DOCTORAL

2017

CONSIDERACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE INFRAESTRUCTURAS LINEALES DE TRANSPORTE

ÁLVARO ENRÍQUEZ DE SALAMANCA SÁNCHEZ-CÁMARA
LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

Director: Dr. RUBÉN DÍAZ SIERRA
Co-directora: Dra. ROSA MARÍA MARTÍN ARANDA

TESIS DOCTORAL

2017

CONSIDERACIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL DE INFRAESTRUCTURAS LINEALES DE TRANSPORTE

ÁLVARO ENRÍQUEZ DE SALAMANCA SÁNCHEZ-CÁMARA
LICENCIADO EN CIENCIAS AMBIENTALES

PROGRAMA DE DOCTORADO EN CIENCIAS

Director: Dr. RUBÉN DÍAZ SIERRA
Co-directora: Dra. ROSA MARÍA MARTÍN ARANDA

“Why don't you write books people can read?”
Nora Joyce

A Julia y Pedro

Agradecimientos

Quiero mostrar mi más sincero agradecimiento a mis directores y amigos, Rubén Díaz Sierra y Rosa María Martín Aranda. Rubén ha confiado enormemente en mí, y ha sido muy comprensivo con mi impulsiva forma de trabajar, reconduciéndome por la vía del sosiego y la prudencia. Sin Rosa no habría sido posible esta tesis; siempre ha creído en mí, y me ha apoyado en todo lo que ha estado en su mano, más de lo que merezco. Espero que se sientan orgullosos de este trabajo, que es también suyo.

Mi agradecimiento a Maria Joao Ferreira dos Santos (Universidad de Utrecht), que ha participado en la investigación sobre impacto ambiental de la adaptación.

A María José Carrasco (Draba Ingeniería y Consultoría Medioambiental) y a las siguientes personas y empresas, con las que he colaborado en estudios de impacto ambiental citados en esta tesis: Grupo Euroconsult (Antonio Cebrián, José Manuel Velazco), Proser (Avelino Marcos) y Esteyco (Lourdes Cabello).

Mi reconocimiento a los editores Riki Therivel *(Impact Assessment and Project Appraisal)*, quien me ha apoyado decididamente, y Alan Bond (*Environmental Impact Assessment Review*), estricto pero muy razonable.

La elaboración de esta tesis ha contado con el apoyo del Programa de Investigación, Desarrollo e Innovación del Ministerio de Economía y Competitividad, por medio de los proyectos CTM2014-56668-R y AGL2015-69151-R.

Durante la elaboración de la tesis se han realizado consultas y se ha solicitado información o documentación a diferentes personas, organismos e instituciones. Quiero mostrar mi agradecimiento por su colaboración a: Øivind Arntsen (*Norwegian University of Science and Technology*, Noruega), Krishna P. Biligiri (*Indian Institute of Technology Kharagpur*, India), Olivia Bina (*Universidade de Lisboa*, Portugal), Philip H. Byer (*University of Toronto,* Canadá), Henriette Calleja (*Ministry for Sustainable Development, the Environment and Climate Change*, Malta), Mary Carrington (*Ministry for the Environment – Manatu Mo Te Taiao,* Nueva Zelanda), Joseph Caruana (*Ministry for Sustainable Development, the Environment and Climate Change*, Malta), Chris Cumming (*Environmental Agency*, Reino Unido), Tara Frezza (*Canadian Environmental Assessment Agency*, Canadá), Ainhoa González del Campo (*Trinity College Dublin*, Irlanda), Amii Harwood (*University of East Anglia,* Reino Unido), Malcolm Hudson (*University of Southampton,* Reino Unido), Ingeborg Kluts (*Utrech University*, Países Bajos), Marc Meléndez (Universidad Autónoma de Madrid, España), Antonio Mozqueira (*Environment and Planning, Australian Capital Territory Government*, Australia), Michael Nordenberg (*Miljödepartementet*, Suecia), Aybike Ongel (*Univertisty of California*, Estados Unidos), Jochen Ritter (*Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit*, Alemania), Linda Roy (*Environment Protection Authority, New South Wales Government*, Australia), Ricardo Ruíz Peinado (INIA, España), Anna Small (*Department of the Environment, Australian Government*, Australia), Juan Carlos Tejeda (Universidad Autónoma de San Luis Potosí, México), Anne-Charlotte Vaissière (*Université de Montpellier*, Francia), Fernando Vicente (Universidad de Vigo, España) y Thomas White (*British Columbia Ministry of Environment*, Canadá).

Resumen

El cambio climático es un problema ambiental de primera magnitud. Numerosas actuaciones humanas contribuyen al cambio climático, por emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y destrucción de sumideros. El transporte es responsable de la cuarta parte de las emisiones de GEI en España, un 95% en las carreteras. Los ferrocarriles son complementarios a las carreteras, formando las infraestructuras lineales de transporte.

Las carreteras y ferrocarriles están sometidas a EIA (EIA), un procedimiento para integrar los aspectos ambientales en la toma de decisiones. La consideración del cambio climático en la EIA a nivel internacional es reciente; en España ha sido muy escasa en los últimos 25 años, sobre todo en carreteras y ferrocarriles. Es precisa una mayor concienciación y el desarrollo de guías sectoriales.

Las infraestructuras contribuyen al cambio climático precisando medidas de mitigación, y el cambio climático afecta a las infraestructuras, requiriendo adaptación, que a su vez pueden generar impactos. Estos aspectos deben considerarse en la EIA. La contribución al cambio climático se evalúa por la emisión de GEI en la construcción, explotación y mantenimiento y la destrucción de sumideros; otros indicadores son la ratio de emisiones por viajero o mercancía o la reducción de emisiones por trasvase modal. Estos indicadores deben incorporarse a la toma de decisiones.

La mitigación del cambio climático en el transporte se plantea mediante grandes objetivos, que quedan fuera de la EIA, pero también es posible actuar en esta fase. La prevención es posible sobre todo en el diseño; en la explotación y mantenimiento suele exceder el ámbito de la EIA. La compensación es posible mediante secuestro de carbono y compensación de sumideros destruidos; está infravalorada, pese a ser viable, y tener ventajas adicionales. Sus retos son la voluntad política y la financiación.

El cambio climático repercute sobre las infraestructuras de forma positiva o negativa. La EIA debe analizar si el diseño tiene en cuenta estos impactos, que además son la base para la adaptación. La adaptación puede aplicarse de muchas maneras, o no aplicarse; las decisiones están muy relacionadas con funcionalidad y costes. El enfoque sectorial de la adaptación limita la posibilidad de afrontarla de forma global. Las nuevas infraestructuras están mejor adaptadas, pero las existentes precisan adaptación, que puede quedar al margen de la EIA. La adaptación se considera positiva en sí misma, pero puede producir impactos ambientales no deseados, aspecto que está siendo poco considerado. Es preciso por tanto evaluar la propia adaptación en el marco de la EIA.

Esta tesis aporta conocimientos y herramientas para hacer frente a la escasa consideración actual del cambio climático en las infraestructuras de transporte; queda pendiente una mayor concienciación de los agentes involucrados en la EIA.

Abstract

Climate change is currently one of the most important environmental concerns. Numerous human actions contribute to climate change, caused by the emission of greenhouse gases (GHG) and the destruction of sinks. The transport sector is responsible for a quarter of GHG emissions in Spain, 95% of them from roads. Railways are complementary to roads, forming the linear transport infrastructures.

Roads and railways are subject to environmental impact assessment (EIA), a process to integrate environmental aspects in decision making. Consideration of climate change in EIA at the international level has only been introduced recently; in Spain it has been very scarce in the last 25 years, especially in roads and railways. Greater awareness and the development of sectoral guides are needed.

The contribution to climate change caused by infrastructures require mitigation measures, while the impacts of climate change on infrastructures require adaptation, which can also generate new impacts. These aspects should be considered in EIA. The contribution to climate change is evaluated by the emission of GHGs in construction, operation and maintenance, and the destruction of sinks; other indicators are the ratio of emissions by traveller or freight, or the reduction of emissions due to a modal shift. These indicators should be incorporated into the decision making process.

Mitigation of climate change in the transport sector is proposed through large scale objectives, which are outside the scope of EIA, but it is also possible to take actions at this stage. Prevention is possible especially in design, but in operation and maintenance it usually exceeds the scope of EIA. Compensation is possible through carbon sequestration and compensation for destroyed sinks, but this solution is undervalued, despite being viable, and having additional advantages. Its challenges are political will and funding.

Climate change has positive or negative impacts on infrastructures. The EIA process should analyze whether the design takes into account these impacts, which are also the basis for adaptation. Adaptation can be applied in many ways, or not implemented at all; the decisions are closely related to functionality and costs. The sectoral approach to adaptation limits the possibility of tackling it globally. The new infrastructures are better adapted, but the existing ones require adaptation, which may be excluded from EIA. Adaptation is considered positive in itself, but may produce undesirable environmental impacts, an aspect that has not being sufficiently considered. It is therefore necessary to assess the adaptation itself within the framework of EIA.

This thesis provides the knowledge and tools necessary to deal with the current scarce consideration of climate change in EIA of transport infrastructures, although a greater awareness of the agents involved in this process remain pending.

Índice

1 Objetivos 1

Objetivos 3

Publicaciones, comunicaciones en congresos y otras fuentes 7

2 Introducción 11

Objetivos del capítulo 13

2.1. El cambio climático 15

2.1.1. Cambios en el clima del Holoceno y el Antropoceno 15

2.1.2. El efecto invernadero 17

2.1.3. Concepto de cambio climático 18

2.1.4. Causas del cambio climático 18

2.1.5. Efectos del cambio climático 20

2.1.6. Proyecciones y escenarios climáticos 22

2.1.7. Contribución al cambio climático de las actividades humanas 25

2.2. Las infraestructuras lineales de transporte 27

2.2.1. Concepto de infraestructuras de transporte 27

2.2.2. Infraestructuras de transporte y cambio climático 29

2.2.3. Planificación de las infraestructuras lineales de transporte 30

2.3. La evaluación de impacto ambiental 31

2.3.1. Concepto de EIA 31

2.3.2. Origen y desarrollo de la EIA 32

2.3.3. Competencias en la EIA 33

2.3.4. Procedimientos de evaluación ambiental 34

2.3.5. La EIA de infraestructuras lineales de transporte 35

2.4. Infraestructuras de transporte, cambio climático y EIA 36

3 Consideración del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental 39

Objetivos del capítulo 41

3.1. Consideraciones generales 43

3.2. Análisis de la situación internacional 44

3.3. Análisis de la situación en España 46

3.3.1. Consideración del cambio climático en la normativa de EIA 46

3.3.2. Consideración del cambio climático en los procedimientos de EIA 48

3.3.2.1. Objetivos 48

3.3.2.2. Metodología 48

3.3.2.3. Resultados 49

3.3.2.4. Análisis de resultados 60

3.4. Discusión y conclusiones 61

4 Contribución al cambio climático de las infraestructuras lineales de transporte 65

Objetivos del capítulo 67

4.1. Consideraciones generales 69

4.1.1. Contribución al cambio climático en la vida útil de las infraestructuras 69

4.1.2. Herramientas para el cálculo de la contribución al cambio climático 70

4.2. Contribución al cambio climático durante la construcción 72

4.2.1. Emisiones de GEI durante la construcción ... 72
4.2.1.1. Tipos de emisiones de GEI ... 73
4.2.1.2. Evaluación de las emisiones de GEI en la construcción ... 73
4.2.2. Destrucción de sumideros durante la construcción ... 77
4.2.2.1. Eliminación del stock de carbono almacenado en la vegetación ... 77
4.2.2.2. Pérdida de sumideros ... 78
4.2.2.3. Evaluación de la destrucción de sumideros en la construcción ... 79
4.2.3. Contribución global al cambio climático durante la construcción ... 80
4.3. Contribución al cambio climático durante la explotación ... 82
4.3.1. Emisiones de GEI en la explotación de carreteras ... 82
4.3.1.1. Datos básicos para el cálculo de emisiones de GEI en la explotación ... 82
4.3.1.2. Evaluación de las emisiones de GEI en la construcción ... 89
4.3.2. Emisiones de GEI en la explotación de ferrocarriles ... 92
4.3.2.1. Medición de las emisiones de GEI en ferrocarriles ... 92
4.3.2.2. Evaluación de la reducción de emisiones por cambio modal de transporte ... 95
4.3.2.3. Evaluación de emisiones asociadas a la ubicación de las estaciones ... 97
4.4. Contribución al cambio climático durante el mantenimiento y operación ... 99
4.4.1. Mantenimiento, conservación y reposición ... 99
4.4.1.1. Operaciones periódicas de mantenimiento ... 99
4.4.1.2. Operaciones de conservación y reposición ... 99
4.4.2. Operación de las infraestructuras ... 100
4.4.2.1. Iluminación ... 100
4.4.2.2. Instalaciones operativas con suministro eléctrico ... 102
4.4.2.3. Estaciones ... 102
4.4.3. Evaluación de la emisión de GEI en el mantenimiento y operación ... 103
4.5. Retos en la consideración de la contribución al cambio climático ... 104
4.5.1. Umbral de consideración de las emisiones de GEI ... 104
4.5.2. Evaluación de impactos acumulativos sobre el cambio climático ... 104
4.5.3. Problemas asociados al fraccionamiento de proyectos ... 105
4.5.4. Integración del cambio climático en la toma de decisiones ... 107
4.6. Discusión y conclusiones ... 107

5 Mitigación del cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte ... 111

Objetivos del capítulo ... 113
5.1. Consideraciones generales ... 115
5.2. Mitigación preventiva ... 116
5.2.1. Concepto y aplicación a la EIA ... 116
5.2.2. Mitigación preventiva en el diseño ... 117
5.2.2.1. Aspectos asociados a la geometría de los trazados ... 117
5.2.2.2. Selección de tipologías y soluciones constructivas ... 118
5.2.2.3. Selección de materiales en la fase de diseño ... 119
5.2.2.4. Selección de ubicaciones ... 120
5.2.2.5. Optimización de la efectividad del transporte ... 120
5.2.2.6. Deforestación evitada ... 120
5.2.2.7. Movilidad inducida y accesibilidad ... 123
5.2.2.8. Diseño de plataformas reservadas ... 123
5.2.3. Mitigación preventiva en la construcción ... 125
5.2.3.1. Selección de materiales en la fase de construcción ... 125
5.2.3.2. Selección de maquinaria ... 128
5.2.3.3. Organización del trabajo ... 128
5.2.4. Mitigación preventiva en la explotación ... 129

5.2.4.1. Reducción de la movilidad y mejora de eficiencia ... 129
5.2.4.2. Medidas de regulación y control del tráfico rodado ... 129
5.2.4.3. Medidas de regulación del tráfico ferroviario ... 133
5.2.5. Mitigación preventiva en el mantenimiento y operación ... 135
5.2.5.1. Cambios en la iluminación ... 136
5.2.5.2. Cambios en el origen de la energía ... 136
5.2.5.3. Frecuencia y eficiencia del mantenimiento ... 137
5.2.5.4. Frecuencia y métodos de reposición ... 137
5.2.6. Mitigación preventiva comportamental ... 139
5.3. Mitigación correctiva ... 141
5.3.1. Concepto de mitigación correctiva ... 141
5.3.2. Revegetación ... 141
5.4. Mitigación compensatoria ... 144
5.4.1. Concepto de mitigación compensatoria ... 144
5.4.2. Secuestro de carbono ... 147
5.4.2.1. Secuestro de carbono mediante sumideros vivos ... 147
5.4.2.2. Secuestro de carbono mediante fijación en el suelo ... 153
5.4.2.3. El sector LULUCF como sumidero ... 156
5.4.3. Captura y almacenamiento de carbono ... 161
5.4.4. Evitar la generación de emisiones ex situ ... 162
5.4.4.1. Evitar la generación de emisiones en otros sectores ... 162
5.4.4.2. Evitar la destrucción de sumideros ex situ (deforestación evitada) ... 163
5.4.5. Mecanismos para la aplicación de la compensación ... 164
5.4.5.1. Compensación directa por el promotor ... 164
5.4.5.2. Mecanismos de mercado (MBI) ... 165
5.5. Retos en la incorporación de la mitigación del cambio climático a la EIA ... 174
5.5.1. Mitigación del cambio climático en proyectos sometidos a EIA ... 174
5.5.2. Mitigación del cambio climático en proyectos ya operativos ... 175
5.5.3. Responsabilidades y financiación de la mitigación ... 177
5.6. Discusión y conclusiones ... 180

6 Impactos del cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte ... 183

Objetivos del capítulo ... 185
6.1. Consideraciones generales ... 187
6.1.1. Fenómenos climáticos causantes de impactos ... 187
6.1.2. Impactos climáticos sobre las infraestructuras ... 188
6.2. Impactos asociados al incremento de la temperatura ... 191
6.2.1. Pandeo de raíles ... 191
6.2.2. Pandeo de la catenaria ... 193
6.2.3. Afección al confort térmico ... 193
6.2.4. Afección a firmes ... 194
6.2.5. Afección a señalización y equipamiento ... 195
6.2.6. Recalentamiento de equipos y motores ... 196
6.2.7. Afección a estructuras y fatiga de materiales ... 196
6.2.8. Mayor intensidad y frecuencia de sequías ... 196
6.2.9. Menor frecuencia de hielo y nieve ... 196
6.3. Impactos asociados a las tormentas ... 198
6.4. Impactos asociados a la variación en las precipitaciones ... 198
6.4.1. Inundación y afección a sistemas de drenaje ... 198

6.4.2. Inundación de pasos inferiores ... 200
6.4.3. Erosión en puentes ... 200
6.4.4. Daños en pavimentos ... 201
6.4.5. Inestabilidad de taludes, deslizamientos y hundimientos ... 202
6.4.6. Cambios de humedad y subsidencia ... 205
6.4.7. Afección a equipamientos de vía ... 207
6.4.8. Afección a la seguridad vial ... 207
6.4.9. Mortandad en la vegetación ... 208
6.4.10. Incendios forestales ... 209
6.5. Impactos asociados al viento ... 210
6.6. Impactos asociados al incremento del nivel del mar y fenómenos costeros ... 212
6.6.1. Inundación ... 212
6.6.2. Daños en infraestructuras y equipamiento ... 214
6.6.3. Desprendimientos y deslizamientos ... 214
6.7. Retos en la integración de los impactos del cambio climático en la EIA ... 215
6.8. Discusión y conclusiones ... 215

7 Adaptación al cambio climático de las infraestructuras lineales de transporte ... 217

Objetivos del capítulo ... 219
7.1. Consideraciones generales ... 221
7.1.1. Adaptación a riesgos climáticos recurrentes y al cambio climático ... 221
7.1.2. Características de la adaptación de las infraestructuras de transporte ... 221
7.1.3. Vida útil de las infraestructuras, mantenimiento y adaptación ... 223
7.1.4. Adaptación y toma de decisiones ... 228
7.1.5. Medidas de adaptación en infraestructuras ... 234
7.2. Adaptación al incremento de la temperatura ... 236
7.2.1. Incremento de temperaturas estivales y olas de calor ... 237
7.2.2. Inviernos más suaves y reducción de días con nieve y hielo ... 240
7.3. Adaptación al incremento de tormentas ... 240
7.4. Adaptación a los cambios en las precipitaciones ... 241
7.4.1. Incremento de episodios de precipitación extrema ... 241
7.4.2. Reducción en las precipitaciones medidas ... 244
7.5. Adaptación al incremento de vientos extremos ... 246
7.6. Adaptación a fenómenos costeros ... 247
7.7. Adaptación comportamental ... 249
7.8. Adaptación ex situ ... 249
7.9. Plazos y fase de aplicación de la adaptación ... 253
7.9.1. Prioridades y plazos en la adaptación ... 253
7.9.2. Fase de aplicación de la adaptación ... 254
7.10. Retos en la integración de la adaptación al cambio climático en la EIA ... 257
7.11. Discusión y conclusiones ... 257

8 Impacto ambiental de la adaptación al cambio climático ... 261

Objetivos del capítulo ... 263
8.1. Consideración del impacto ambiental de la adaptación ... 265
8.1.1. Introducción ... 265
8.1.2. Metodología ... 265
8.1.3. Resultados ... 269

8.1.4. Análisis de resultados ... 275
8.2. Impactos asociados a la adaptación en infraestructuras ... 278
8.2.1. Impactos globales: nuevos trazados ... 281
8.2.2. Ocupación de terrenos ... 281
8.2.3. Afección a la movilidad ... 282
8.2.4. Consumo de recursos, materiales, energía y generación de emisiones ... 282
8.2.5. Préstamos, canteras y vertederos ... 283
8.2.6. Niveles sonoros ... 283
8.2.7. Efectos en cauces ... 284
8.2.8. Efectos sobre la vegetación ... 284
8.2.9. Efectos sobre la fauna ... 286
8.2.10. Acumulación de infraestructuras ... 287
8.2.11. Efectos en la seguridad ... 288
8.2.12. Corrosión y contaminación salina ... 288
8.2.13. Afección a la dinámica litoral ... 288
8.2.14. Impactos impredecibles ... 289
8.3. Mitigación de los impactos de la adaptación en infraestructuras ... 290
8.3.1. Nuevos trazados ... 290
8.3.2. Ocupación de terrenos ... 290
8.3.3. Afección a la movilidad ... 291
8.3.4. Consumo de recursos, materiales, energía y generación de emisiones ... 292
8.3.5. Préstamos, canteras y vertederos ... 292
8.3.6. Niveles sonoros ... 293
8.3.7. Medidas de protección de cauces ... 293
8.3.8. Protección de la vegetación ... 294
8.3.9. Protección de la fauna ... 294
8.3.10. Gestión de infraestructuras fuera de uso ... 294
8.3.11. Protección de la dinámica litoral ... 295
8.3.12. Impactos impredecibles ... 295
8.4. Retos en la evaluación de los impactos de la adaptación ... 297
8.5. Discusión y conclusiones ... 298
9 Discusión integradora y conclusiones ... 301
9.1. Discusión integradora ... 303
9.2. Aportaciones de la tesis doctoral ... 313
9.3. Conclusiones finales ... 317
Bibliografía ... 319
Anexos ... 363
Anexo 1. Consideración del cambio climático en la EIA en el ámbito internacional ... 365
Anexo 2. Casos prácticos de evaluación de la contribución al cambio climático ... 401
Anexo 3. Caso práctico de mitigación compensatoria del cambio climático ... 421
Anexo 4. Caso práctico de adaptación al cambio climático ... 439
Anexo 5. Impacto ambiental de la adaptación en firmes de carreteras ... 449

Lista de símbolos, abreviaturas y siglas

AC	Aplicación Conjunta (Protocolo de Kioto)
ACT	*Australian Capital Territory* (Australia) [Territorio Australiano de la Capital]
AEC	Asociación Española de la Carretera
AR3	*Third Assessment Report* (IPCC) [Tercer Informe de Evaluación del IPCC]
AR4	*Fourth Assessment Report* (IPCC) [Cuarto Informe de Evaluación del IPCC]
AR5	*Fifth Assessment Report* (IPCC) [Quinto Informe de Evaluación del IPCC]
BID	Banco Interamericano de Desarrollo [=IDB]
BOE	Boletín Oficial del Estado (España)
CAC	Captura y almacenamiento de dióxido de carbono [=CCS]
CAFE	*Corporate Average Fuel Economy* (EE. UU.) [Norma de eficiencia de combustibles]
CARICOM	*Caribbean Community* [Comunidad del Caribe]
CCCL	*Center for Climate Change Law* (EE. UU.) [Centro de Derecho sobre el Cambio Climático]
CCS	*Carbon dioxide capture and storage* [= CAC]
CEAA	*Canadian Environmental Assessment Agency* (Canadá) [Agencia Canadiense de Evaluación Ambiental]
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Naciones Unidas)
CEQ	*Council on Environmental Quality* (EE. UU.) [Consejo de Calidad Ambiental]
CESL	*Comprehensive Evaluation of Projects with Respect to Sea Level Change* (EE. UU.) [Evaluación Integral de Proyectos con Respecto a los Cambios en el Nivel del Mar]
CFR	*Code of Federal Regulations* (EE. UU.) [Código de Regulaciones Federales]
CMAQ	*Congestion Management and Air Quality Improvement Program* (EE. UU.) [Programa de Manejo de la Congestión y Mejora de la Calidad de Aire]
CO_2-eq	Dióxido de carbono (CO_2) equivalente
CRT	*Critical Rail Temperature* [Temperatura crítica de raíles]
CT	*Conventional tillage* [Laboreo convencional]
DEFRA	*Department for Environment, Food & Rural Affairs* (Reino Unido) [Departamento de Medio Ambiente, Alimentación y Asuntos Rurales]
DIA	Declaración de Impacto Ambiental (España)
DOT	*Department of Transportation* (EE. UU.) [Departamento de Transportes]
EA	Evaluación ambiental
EAE	Evaluación ambiental estratégica [= SEA]
EE. UU.	Estados Unidos de América
EDGAR	Emission Database for Global Atmospheric Research (Unión Europea) [Base de datos de emisiones para la investigación atmosférica global]
EIA	Evaluación de Impacto Amboental [*Environmental Impact Assessment*]
EIS	*Environmental Impact Statement* [= EsIA]
EMP	*Environmental Management Plan* [Plan de Gestión Medioambiental]
EPA	*Environmental Protection Authority* (Australia) [Autoridad de Protección Medioambiental]
EsIA	Estudio de impacto ambiental [=EIS]
ETS	*European Trading Scheme* (Unión Europea) [Sistema Europeo de Comercio de Emisiones]
EU	*European Union* [= UE]
FAA	*Federal Aviation Administration* (EE. UU.) [Administración Federal de Aviación]
FES-CO_2	Fondo de Carbono para una Economía Sostenible (España)
FHWA	*United States Federal Highway Administration* (EE. UU.) [Administración Federal de Carreteras]
FR	Forzamiento radiativo
FSDS	*Federal Sustainable Development Strategy* (Canadá) [Estrategia Federal de Desarrollo Sostenible]
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GFDRR	*Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* (Banco Mundial) [Fondo Mundial para la Reducción y Recuperación de Desastres]
GHG	*Greenhouse Gases* [= GEI]
IAIA	*International Association for Impact Assessment* [Asociación Internacional de Evaluación de Impacto]

ICO	Instituto de Crédito Oficial (España)
IDB	*Inter-American Development Bank* [=BID]
IEMA	*Institute of Environmental Management and Assessment* (Reino Unido) [Instituto de Gestión y Evaluación Ambiental]
IFC	*International Finance Corporation* (Banco Mundial) [Corporación Financiera Internacional]
IPCC	*Intergovernmental Panel on Climate Change* (Naciones Unidas) [Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático]
IUCN	*International Union for Conservation of Nature* (Naciones Unidas) [=UICN]
LRTP	*Long Range Transportation Plan* (EE. UU.) [Plan de Transporte a Largo Plazo]
LULUCF	*Land use, land use change and forestry* [uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y selvicultura] [=UTS]
MAGRAMA	Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (España) [2011-2016]
MAPAMA	Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (España) [desde noviembre de 2016]
MBI	*Market Based Instruments* [Mecanismos de mercado (aplicados a la compensación ambiental)]
MDL	Mecanismos de Desarrollo Limpio (Protocolo de Kioto)
MFOM	Ministerio de Fomento (España)
MMA	Ministerio de Medio Ambiente (España) [1996-2008]
MMAMRM	Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (España) [2008-2011]
MPO	*Metropolitan Planning Organization* (EE. UU.) [Organización de Planificación Metropolitana]
NCEA	*Netherland Commission for Environmental Assessment* (Países Bajos) [Comisión Holandesa para la Evaluación Ambiental]
NCOS	*National Carbon Offset Standard* (Australia) [Norma Nacional de Compensación de Carbono]
NEMA	*National Environmental Management Act* (Sudáfrica) [Ley Nacional de Gestión Ambiental]
NEPA	*1969 National Environmental Policy Act* (EE. UU.) [Ley de política ambiental nacional]
NFU	Neumáticos fuera de uso
NT	*No-tillage* [No laboreo]
OECD	*Organisation for Economic Co-operation and Development* [=OCDE]
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [=OECD]
PAC	Política Agrícola Común (Unión Europea)
PEIT	Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (España)
PES	*Payment for Ecosystem Services* [Pago por Servicios Ambientales]
PESETA	*Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on bottom-up Analysis* [Proyección de los impactos económicos del cambio climático en los sectores de la Unión Europea basada un análisis de abajo hacia arriba].
PNUMA	Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Naciones Unidas) [=UNEP]
PRC	*People's Republic of China* (China) [República Popular China]
REDD+	Reducción de Emisiones de GEI causadas por la Deforestación y Degradación de los bosques
RCD	Residuos de construcción y demolición
RCP	*Representative Concentration Pathways* (IPCC) [Sendas Representativas de Concentración]
RT	*Reduced tillage* [laboreo reducido]
SEA	*Strategic Environmental Assessment* [=EAE]
SEMARNAT	Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (México)
SFT	*Stress Free Temperature* [Temperatura que no produce estrés (en raíles ferroviarios)]
SGA	Sistema de Gestión Ambiental
SOC	*Soil organic carbon* [carbono orgánico del suelo]
SOM	*Soil organic matter* [materia orgánica del suelo]
SPREP	*South Pacific Regional Environment Programme* [Programa Regional de Medioambiente del Pacífico Sur]
SRCAE	*Schémas régionaux du climat, de l'air et de l'énergie* (Francia) [Planes regionales de clima, aire y energía]
TBL	*Triple Bottom Line* [triple cuenta de resultados]
TGV	*Train à Grande Vitesse* (Francia) [Tren de Alta Velocidad]
TIP	*Transportation Improvement Program* (EE. UU.) [Programa de Mejora del Transporte]
UE	Unión Europea [=EU]
UICN	Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (Naciones Unidas) [=IUCN]
UNEP	*United Nations Environment Programme* (Naciones Unidas) [=PNUMA]
USACE	*United States Army Corps of Engineers* (EE. UU.) [Cuerpo de Ingenieros del Ejército]
USBR	*United States Bureau of Reclamation* (EE. UU.) [Oficina de Recuperación de Tierras]
USFS	*United States Forest Service* (EE. UU.) [Servicio Forestal de EE. UU.]

Lista de tablas

Tabla 1 Impactos del cambio climático en la región mediterránea 25
Tabla 2 Inventario de emisiones de GEI en España para 2014..... 27
Tabla 3 Emisiones de GEI en España, totales y en el sector del transporte en 2014 29
Tabla 4 Documentos de planificación de infraestructuras de transporte e integración en la EIA 31
Tabla 5 Procedimientos de evaluación ambiental en España y etapas 34
Tabla 6 Infraestructuras lineales de transportes sometidas a EIA en España..... 35
Tabla 7 Principales guías sobre cambio climático y evaluación ambiental..... 44
Tabla 8 Referencias al cambio climático en la Ley 21/2013de evaluación ambiental..... 47
Tabla 9 Proyectos sometidos a EIA y grado y tipo de consideración del cambio climático..... 54
Tabla 10 Estudios sobre huella de carbono y análisis de ciclo de vida en carreteras y ferrocarriles..... 70
Tabla 11 Indicadores para el cálculo de la emisión de GEI en la construcción de infraestructuras 74
Tabla 12 Factores de emisión para indicadores de la emisión de GEI en la fase de construcción 75
Tabla 13 Indicadores simplificados de contribución al cambio climático en la construcción 76
Tabla 14 Indicadores para el cálculo de la afección a sumideros en la construcción de infraestructuras..... 79
Tabla 15 Indicadores de stock y secuestro de carbono perdido en las obras..... 80
Tabla 16 Tipos de tráfico en una carretera nueva o mejorada 84
Tabla 17 Coeficientes de paso de la energía a emisiones de CO_2 92
Tabla 18 Emisiones por viajero en las principales rutas ferroviarias españolas en 2014..... 94
Tabla 19 Operaciones periódicas de mantenimiento 99
Tabla 20 Normas de aplicación a la iluminación de carreteras..... 101
Tabla 21 Instalaciones operativas con suministro eléctrico..... 102
Tabla 22 Indicadores para el cálculo de las emisiones de GEI en el mantenimiento de infraestructuras..... 103
Tabla 23 Análisis comparativo de emisiones para diferentes soluciones de trazado en una autovía..... 118
Tabla 24 Materiales reciclados utilizados en la construcción de carreteras 126
Tabla 25 Órdenes circulares sobre uso de NFU en mezclas bituminosas 126
Tabla 26 Emisiones de CO_2 en furgonetas según la velocidad de circulación..... 130
Tabla 27 Evolución de las características de los vehículos en la UE-15..... 130
Tabla 28 Evaluación de opciones de transporte según contribución al cambio climático 133
Tabla 29 Capacidad de circulaciones de cercanías y medio recorrido de Renfe..... 134
Tabla 30 Medidas para incentivar el transporte público y desincentivar el privado 140
Tabla 31 Afección a la vegetación durante la fase de obras y recuperabilidad..... 142
Tabla 32 Cálculo del stock o secuestro de carbono en la vegetación implantada..... 143
Tabla 33 Medidas de gestión forestal con influencia en la mitigación del cambio climático..... 153
Tabla 34 Medidas de mitigación del cambio climático mediante actividades LULUCF..... 157
Tabla 35 Oportunidades y desafíos del secuestro de C mediante actividades LULUCF..... 157
Tabla 36 Formas de ejecución de las compensaciones ambientales..... 164
Tabla 37 Particularidades de bancos de conservación y mercados de carbono y posibilidades unidos 172
Tabla 38 Impactos del cambio climático sobre las infraestructuras aplicables a España..... 190
Tabla 39 Retrasos asociados al pandeo de raíles por año en el periodo 1990-2010..... 192
Tabla 40 Coste estimado de retrasos debidos a restricción de velocidad por pandeo raíles en España..... 193
Tabla 41 Costes futuros de mantenimiento de firmes de carreteras en España..... 194
Tabla 42 Causas de movimiento del suelo 207
Tabla 43 Efectos inducidos por la pérdida de vegetación derivada del cambio climático..... 209
Tabla 44 Longitud de infraestructuras en zonas de riego de inundación por el mar en Europa 213
Tabla 45 Tipos de adaptación..... 221
Tabla 46 Vida útil de elementos de las infraestructuras de transporte 224

Tabla 47 Operaciones de mantenimiento ordinario en carreteras y ferrocarriles....225
Tabla 48 Respuestas adaptativas en infraestructuras....233
Tabla 49 Impactos del cambio climático sobre las infraestructuras y medidas de adaptación....235
Tabla 50 Temperatura máxima crítica del raíl (CRT) según estado de la vía en Reino Unido....237
Tabla 51 Adaptación de los firmes de carreteras al cambio climático....238
Tabla 52 Medidas de adaptación ex situ a presiones climáticas....250
Tabla 53 Medidas relacionadas con impactos climáticos según su plazo de ejecución....253
Tabla 54 Especificidad de la adaptación con respecto a los impactos del cambio climático....269
Tabla 55 Problemas del cambio global, adaptación, tipos, especificidad, impactos y localización....270
Tabla 56 Posibilidades de aplicación de la evaluación ambiental a las medidas de adaptación....277
Tabla 57 Impacto ambiental de las medidas de adaptación en infraestructuras lineales de transporte....279
Tabla 58 Esquema tradicional y propuesto para el diseño de la adaptación....297
Tabla 59 Situación actual de la consideración del cambio climático en la EIA de infraestructuras lineales de transporte y aportaciones de este trabajo....315
Tabla 60 Datos básicos de las alternativas de la Autovía Palencia-Paredes-Carrión....407
Tabla 61 Indicadores de impacto simplificados de emisiones de CO_2....407
Tabla 62 Afección a la vegetación de las alternativas de la Autovía Palencia-Paredes-Carrión....408
Tabla 63 Stock de C y capacidad de secuestro en la vegetación afectada por las alternativas....408
Tabla 64 Resumen del total de CO_2-eq perdido en las alternativas....409
Tabla 65 Contribución al cambio climático durante la construcción y jerarquización de alternativas....409
Tabla 66 Emisiones de CO_2 para las alternativas de trazado estudiadas....412
Tabla 67 Emisiones de CO_2 asociadas al tráfico residual en la N-630....413
Tabla 68 Emisiones globales de CO_2 por alternativas....414
Tabla 69 Incremento en las emisiones de CO_2 por alternativas....415
Tabla 70 Escenarios y alternativas de explotación para la línea Colmenar-Soto del Real....417
Tabla 71 Alternativas estudiadas del ferrocarril a Soto del Real....417
Tabla 72 Parámetros de explotación de las alternativas del ferrocarril a Soto del Real....418
Tabla 73 Captación de viajeros en función de la frecuencia de paso de los trenes....419
Tabla 74 Reducción de recorridos en vehículo privado según frecuencia de paso de los trenes....419
Tabla 75 Reducción de emisiones de CO_2 por alternativas....420
Tabla 76 Usos del suelo en Segovia en 2013....426
Tabla 77 Red de carreteras de Segovia en 2014 según competencias y tipo de carreteras....427
Tabla 78 Fijación de carbono en suelos agrícolas de secano con no-laboreo (NT)....430
Tabla 79 Fijación de carbono con medidas agroforestales (2015-2050)....432
Tabla 80 Fijación de carbono mediante reforestación de eriales (2015-2050)....432
Tabla 81 Fijación de carbono en setos entre cultivos de cereal (2015-2050)....432
Tabla 82 Costes de la fijación de carbono con no-laboreo (NT)....433
Tabla 83 Costes de la fijación de carbono mediante plantaciones (dehesas, reforestación y setos)....433
Tabla 84 Coste por t de CO_2 y coste total de la compensación según escenarios....434
Tabla 85 Repercusión de costes de las medidas compensatorias por litro de carburante....434
Tabla 86 Impactos ambientales del cambio climático relacionados con firmes de carreteras....453
Tabla 87 Factores de estrés asociados al cambio climático e impactos en firmes de carreteras....454
Tabla 88 Adaptación de los firmes de carreteras al cambio climático....456
Tabla 89 Mitigación de impactos ambientales de la adaptación en firmes de carreteras....458

Lista de figuras

Figura 1 Oscilación en la temperatura media de la tierra desde la glaciación de Riss hasta el presente 15
Figura 2 Anomalías en las temperaturas respecto a 1961-1990 16
Figura 3 El efecto invernadero 17
Figura 4 Emisiones mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004 19
Figura 5 Cambio en la temperatura observado y estimado con forzamientos antropógenos y/o naturales 20
Figura 6 Impactos atribuidos al cambio climático basados en estudios realizados desde el AR4. 21
Figura 7 Sendas Representativas de Concentración (RCP) 22
Figura 8 Cambios previstos en la temperatura media anual y la precipitación 22
Figura 9 Cambios estimados en las temperatura medias globales para los diferentes RCP 23
Figura 10 Impactos del cambio climático pasado y proyectados en las regiones europeas 23
Figura 11 Cambio estimado de temperatura y precipitación en la región Mediterránea con distintas RCP 24
Figura 12 Previsiones de cambio de temperatura y precipitación para la RCP8.5. 24
Figura 13 Escenarios estudiados en el proyecto PESETA II 25
Figura 14 Emisiones brutas de GEI en España 1990-2014 26
Figura 15 Emisiones de GEI en 2014 26
Figura 16 Relación entre infraestructuras de transporte y cambio climático 36
Figura 17 Número de DIA del Estado publicadas entre 1989 y 2014 50
Figura 18 Declaraciones de impacto ambiental (DIA) por tipo de proyecto entre 1989 y 2014 51
Figura 19 Tipo de consideración del cambio climático (numero de DIA por año) 51
Figura 20 Forma de evaluación de los efectos asociados al cambio climático 52
Figura 21 Forma en que se citan los efectos asociados al cambio climático 53
Figura 22 Grado de consideración del cambio climático por grupo de proyecto 55
Figura 23 Grado de consideración del cambio climático por grupo de proyecto 55
Figura 24 Consideración del cambio climático en la producción y transporte de energía 56
Figura 25 Consideración del cambio climático en proyectos de petróleo y gas 57
Figura 26 Consideración del cambio climático en proyectos de infraestructuras de transporte 57
Figura 27 Consideración del cambio climático en proyectos de gestión del agua 58
Figura 28 Consideración del cambio climático según el promotor 59
Figura 29 Medidas exigidas en las DIA en relación al cambio climático 59
Figura 30 Emisiones de GEI en una carretera 69
Figura 31 Existencias en madera y crecimiento en función de la edad 78
Figura 32 Factor de consumo de cada categoría de vehículo pesado en función de la velocidad 83
Figura 33 Diferencia entre emisiones declaradas y reales en vehículos nuevos en la UE 86
Figura 34 Emisión de CO_2 (g/km) en vehículos. Datos reales (2000-2014) y previsión (2015-2050) 87
Figura 35 Estimación de evolución del tráfico, factor de emisión y emisiones globales de 2016 a 2050 88
Figura 36 Emisiones por viajero de Madrid a Barcelona 93
Figura 37 Cuotas modales de transporte de viajeros y mercancías en 2013 95
Figura 38 Localización de estaciones de ferrocarril en Segovia y Cuenca 97
Figura 39 Estación de cercanías y aparcamiento 98
Figura 40 Jerarquía de la mitigación 115
Figura 41 Planteamiento de corredores para una carretera según la capacidad de acogida del territorio 122
Figura 42 Carril central Bus-VAO en la autovía A-6, entre Madrid y Las Rozas 124
Figura 43 Emisiones de CO_2 en tractores de cadenas según su potencia 128
Figura 44 Relación entre velocidad y factor de emisión de CO2 130
Figura 45 Desbroce injustificado 137
Figura 46 Reciclado in situ con cemento de capas bituminosas 138

Figura 47 Diferencias en la movilidad en vehículo privado y transporte público....139
Figura 48 Técnicas de conducción eficiente....140
Figura 49 Tipos de medidas compensatorias....145
Figura 50 Tipos de mitigación compensatoria frente al cambio climático....146
Figura 51 Bosque REE en Mallorca....147
Figura 52 Dehesas de encina con uso ganadero....149
Figura 53 Plantación de setos e islotes forestales en un paisaje agrícola....152
Figura 54 Recreación de un sistema artificial de captura y almacenamiento de CO_2....161
Figura 55 Posibles sistemas de captura y almacenamiento de CO_2....162
Figura 56 Presupuestos del Estado en España destinados a infraestructuras de transporte (1995-2015)....170
Figura 57 Número medio anual de días adicionales con Tmáx> CRT30 en el escenario A1B....192
Figura 58 Hitos de balizamiento y pantallas antideslumbramiento de materiales plásticos....195
Figura 59 Señales y marcas viales envejecidas....195
Figura 60 Nevada en la autovía A-6 en León....197
Figura 61 Daños por inundaciones en infraestructuras lineales de transporte....198
Figura 62 Inundación de paso inferior en Ibiza....200
Figura 63 Erosión en cimientos y colapso de estructuras....201
Figura 64 Hundimiento en una carretera....202
Figura 65 Socavamiento de carreteras....203
Figura 66 Deslizamientos afectando a carreteras....203
Figura 67 Desprendimientos de rocas en carreteras....204
Figura 68 Efectos de la revegetación en la erosión de los taludes de una carretera....205
Figura 69 Daños a construcciones por subsidencia del terreno....206
Figura 70 Pérdidas por daños a edificaciones derivados de subsidencia del terreno....206
Figura 71 Zonas áridas y desérticas en la Península Ibérica según el índice de Lang....209
Figura 72 Superficie forestal incendiada (hectáreas) en España (1961-2015)....210
Figura 73 Caída de árboles en carreteras y ferrocarriles....211
Figura 74 Zonas costeras europeas más vulnerables a la subida del nivel mar....212
Figura 75 Riesgo de marejadas ciclónicas en Europa....212
Figura 76 Temporal en Tazones (Asturias)....214
Figura 77 Carreteras afectadas por erosión costera....214
Figura 78 Evolución del estado de las carreteras 1999-2015....227
Figura 79 Aspectos de la adaptación....229
Figura 80 Rambla donde se han producido accidentes en crecidas....232
Figura 81 Mantenimiento de pistas forestales....232
Figura 82 Tres puentes para cruzar el río Almonte en Jaraicejo (Cáceres) a lo largo del tiempo....234
Figura 83 Paso de cebra en mal estado....239
Figura 84 Puente de ferrocarril abandonado en Arganda del Rey (Madrid)....239
Figura 85 Vehículos todoterreno adaptados como quitanieves....240
Figura 86 Elementos sensibles a sobretensiones....240
Figura 87 Refuerzo de cimentación....241
Figura 88 Protección frente a desprendimientos....242
Figura 89 Revegetación de taludes....243
Figura 90 Zonas pluviométricas para firmes....244
Figura 91 Corrección de subsidencia....244
Figura 92 Desbroce en margen de carretera....245
Figura 93 Elevación de la rasante en la Western Ring Route (Nueva Zelanda)....247
Figura 94 Defensa costera frente al oleaje....248
Figura 95 Comportamientos imprudentes de conductores en eventos extremos....249

Figura 96 Cortafuegos en el SO de Madrid 250
Figura 97 Setos cortavientos 250
Figura 98 Desbordamiento del río Ebro en Navarra en 2015 251
Figura 99 Zonas inundables de origen marino con probabilidad media u ocasional (T=100 años) 255
Figura 100 Frecuencia de los enfoques de la adaptación al cambio climático en la literatura revisada 273
Figura 101 Tipos y características de las medidas de adaptación analizadas 274
Figura 102 Incendio producido por chispas generadas por un ferrocarril 285
Figura 103 Impactos potenciales de la adaptación al cambio climático en la vegetación 285
Figura 104 Cunetas de guarda con diferente impacto sobre la fauna 286
Figura 105 Ferrocarril abandonado 287
Figura 106 Rectificación de curva en la autovía A-2 entre Sauca y Alcolea del Pinar (Guadalajara) 287
Figura 107 Quitanieves esparciendo sal 288
Figura 108 Puente en la ría de Ares (Pontedeume, A Coruña), con defensas costeras 289
Figura 109 Muros para limitar la ocupación de carreteras 290
Figura 110 Formación de suelos en vertientes naturales y con muros a pie de desmonte 291
Figura 111 Empleo de muros para tender taludes de desmonte 291
Figura 112 Ejemplos de viaductos de cruce en cauces anchos 293
Figura 113 Muro Krainer 294
Figura 114 Rampa de escape para fauna en cuneta 294
Figura 115 Ejemplos de gestión de infraestructuras fuera de uso: demolición y cambio de uso 295
Figura 116 Área de estudio de la Autovía Palencia - Paredes de Nava - Carrión de los Condes 405
Figura 117 Alternativas de la Autovía Palencia - Paredes de Nava - Carrión de los Condes 406
Figura 118 Área de estudio de la autovía La Robla-León y Ronda Noroeste. 410
Figura 119 Alternativas planteadas para la autovía y la ronda de León 411
Figura 120 Localización del proyecto de cercanías a Soto del Real 416
Figura 121 Ámbito de estudio (Segovia) 426
Figura 122 Red carreteras y usos del suelo de la provincia de Segovia 427
Figura 123 Emisiones totales de CO_2 (kt CO_2-eq) en la red de carreteras de Segovia (2015-2050) 429
Figura 124 Mapa de San Vicente y las Granadinas 443
Figura 125 Middle Bridge sobre el South River en Kingstown 445
Figura 126 Zonas de actuación en el río Warrawarrow. 446
Figura 127 Carretera de Fenton a Green Hill 447
Figura 128 Comportamiento acústico de los firmes de carreteras 457

Lista de cuadros

Cuadro 1. Evaluación de la contribución al cambio climático en la construcción de la Autovía Palencia - Paredes de Nava - Carrión de los Condes 81
Cuadro 2. Evaluación de la contribución al cambio climático en la explotación de la Autovía León - La Robla y la Ronda Noroeste de León 91
Cuadro 3. Evaluación de la contribución al cambio climático en la explotación de la prolongación del ferrocarril de Cercanías a Soto del Real 96
Cuadro 4. Compensación de las emisiones de CO_2 en carreteras de Segovia 159
Cuadro 5. Adaptación al cambio climático en San Vicente y las Granadinas 252
Cuadro 6. Impacto ambiental de la adaptación al cambio climático de los firmes de carreteras y opciones de mitigación 296

1 Objetivos

Objetivos

El cambio climático es un problema ambiental de primera magnitud. Los sucesivos informes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) ponen de manifiesto la certidumbre científica sobre este proceso, y la necesidad de adoptar medidas de mitigación y de adaptación a sus consecuencias. La principal causa antrópica que contribuye al cambio climático es la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), seguida de la destrucción de sumideros de carbono, que en conjunto elevan la concentración atmosférica de GEI, exacerbando el efecto invernadero natural. Como consecuencia no solo varía la temperatura, sino que se altera el funcionamiento del sistema climático, dando lugar a otros problemas inducidos. El clima está cambiando, y va a seguir cambiando, con una intensidad que dependerá de los esfuerzos que se hagan por mitigar la contribución humana a este proceso.

Existen numerosas actividades que contribuyen a la emisión de GEI, como las industriales, energéticas o agroganaderas, y en mucha menor medida a su absorción, principalmente el uso forestal. Entre estas actividades el sector del transporte tiene un papel muy relevante, siendo responsable de cerca de la cuarta parte de las emisiones de GEI en España, en su inmensa mayoría, un 95%, en el transporte por carretera. Cualquier esfuerzo por reducir la contribución al cambio climático y alcanzar las metas fijadas en los acuerdos internacionales, pasa por actuar en este sector, con unas emisiones que, pese a una reducción coyuntural a causa de la crisis económica, parece que seguirán creciendo por el aumento de la demanda de movilidad.

Las infraestructuras de transporte son elementos planificados; parten de políticas que apuesta por un tipo de movilidad, que se plasman en planes, y estos en proyectos concretos. Hasta finales del siglo XX la planificación se centraba en aspectos técnicos, funcionales o económicos. La ley de política ambiental estadounidense de 1969 estableció la evaluación de impacto ambiental (EIA) como mecanismo para incorporar los aspectos ambientales a la toma de decisiones, modelo que la Unión Europea (UE) incorporó en 1985, y España un año después, al integrarse en ella. La EIA es un procedimiento técnico y administrativo donde se consideran los efectos ambientales de un proyecto, mediante documentos técnicos y con participación pública, permitiendo que se incorporen a la toma de decisiones, actuando como garante un órgano ambiental de las administraciones públicas. Entre los supuestos que deben someterse a EIA según la normativa se cuentan la mayoría de proyectos de infraestructuras de transporte.

Es evidente la relación entre infraestructuras de transporte y cambio climático, por lo que también parece obvia la necesidad de considerar dicha relación en la EIA, para incorporar estos efectos a la toma de decisiones. Sin embargo, la realidad no es esta. Hasta casi el año 2000 no aparecen a nivel mundial los primeros documentos sobre

cambio climático y EIA, y no se le dedica un congreso hasta 2010. En España la práctica en la EIA apunta a una muy escasa consideración en todos los sectores.

De aquí surge el **primer objetivo** de esta tesis doctoral. Numerosas actividades sometidas a EIA tienen una relación importante con el cambio climático, pero la consideración que se hace de ella parece escasa; es preciso contrasta esta idea mediante datos concretos. Esto motiva una primera parte de la tesis, centrada en el **análisis de la consideración del cambio climático en la EIA**, recopilando información del estado de la cuestión a nivel internacional, y realizando un estudio de detalle a nivel nacional.

Esta primera parte corrobora que la consideración del cambio climático en la EIA en España ha sido muy escasa, y llamativamente baja en las infraestructuras lineales de transporte, pese a su evidente contribución y su gran desarrollo en las últimas décadas. Esto lleva a preguntarse por las razones de esta baja consideración. Se ha recomendado obligar a considerar el cambio climático en la normativa de EIA, cosa que hizo España en 2013, pero los países más avanzados en este tema, Canadá y Estados Unidos, carecen de esa obligación, por lo que no parece indispensable. Desde el punto de vista técnico no es un aspecto inabarcable. La escasa atención al cambio climático en la EIA puede deberse a que se ha abordado desde organismos ajenos a ella, y solo en la actualidad sus caminos se encuentran. También existe una falta de conocimiento teórico y práctico de los aspectos concretos que se deben considerar, y de cómo incorporarlos a la EIA.

Aquí surge el **segundo gran objetivo** de esta tesis, aportar conocimiento para incorporar la consideración del cambio climático a la EIA y a la toma de decisiones. Para ello es necesario recopilar el conocimiento teórico y científico actual, a menudo disperso y no relacionado con la EIA, y estructurarlo de forma sistemática, pero además es preciso convertir ese conocimiento teórico en herramientas prácticas, que sirvan para su aplicación concreta en la EIA y en la toma de decisiones. Esta necesidad de conocimiento concreto hace necesario acotar el alcance de la tesis, ya que si se abordase la EIA en su conjunto los resultados serían muy generales, o su desarrollo enorme; la EIA abarca proyectos tan dispares como transporte, minería, obras hidráulicas, actividades ganaderas o industriales, residuos o transformaciones del suelo, con características, planificación, impactos y relación con el cambio climático muy dispares.

La elección de las infraestructuras de transporte se justifica por su importante contribución al cambio climático, y por ser un sector estratégico para lograr las metas comprometidas, donde la reducción de emisiones de GEI que ha tenido lugar en España en los últimos años parece coyuntural, debida a la crisis económica y no estructural, como apunta el crecimiento en el año 2014. Dentro de los transportes, el grupo más importante por su contribución al cambio climático son las carreteras, primer objetivo de la tesis. Los ferrocarriles, con contribución mucho menor, tienen gran relación con las carreteras, ambas infraestructuras lineales con características e impactos comunes, y complementarias por la posibilidad de desplazar viajeros y mercancías de un medio a otro. Es posible analizarlas en conjunto, ampliando el enfoque sin dispersarse en exceso.

Para incorporar el cambio climático a la EIA de infraestructuras lineales de transporte hay que determinar cómo se interrelacionan, lo que da lugar a cinco grandes conceptos, cada uno desarrollado en un capítulo de la tesis.

La primera parte es la **contribución al cambio climático**, asociada sobre todo a la emisión de GEI por el tráfico rodado, el efecto más importante, aunque existen otros efectos negativos como la destrucción de sumideros, o positivos como la reducción de emisiones por trasvase modal de viajeros o mercancías al ferrocarril. Algunas herramientas como la huella de carbono permiten valorar la contribución al cambio climático, pero su aplicación exige un detalle del que no suele disponerse al abordar la EIA. El **objetivo de este capítulo** es analizar sistemáticamente la forma en que las infraestructuras lineales de transporte contribuyen al cambio climático, de forma positiva o negativa, proponer indicadores que permitan incorporar este aspecto a la EIA, y a la toma de decisiones, y demostrar su utilidad mediante casos prácticos.

Si conocer la contribución al cambio climático de las infraestructuras es importante, más aún lo es mitigar esa contribución. A ello se dedica la siguiente parte, centrada en la **mitigación del cambio climático** en sus tres facetas, preventiva, correctiva y compensatoria. La mitigación en el sector del transporte se ha abordado a nivel global, con propuestas de carácter político o estratégico como el fomento del vehículo eléctrico, del transporte público o en general de una movilidad más sostenible. Sin embargo, no se presta atención a las medidas concretas que se pueden aplicar a los proyectos, en el marco de la EIA; aunque la capacidad de mitigación a nivel de proyecto sea mucho más limitada, existe, y se está descuidando. Por ello, el **objetivo de esta parte** es proponer medidas concretas de mitigación frente al cambio climático, que hasta ahora no se están aplicando en la EIA, o han sido meras declaraciones de intenciones. Un aspecto esencial y descuidado es la compensación de la contribución al cambio climático, idea hasta ahora teórica, cuya viabilidad se pretende demostrar mediante un caso práctico, proponiendo además mecanismos de aplicación efectivos.

Las infraestructuras de transporte contribuyen al cambio climático, y a su vez el cambio climático impacta sobre ellas, pudiendo incrementar o reducir la agresividad del clima o inducir nuevos riesgos, que generen daños, acorten su vida útil o afecten a su funcionalidad. Existe información sobre este tema, pero sectorial y dispersa, lo que hace que resulte complejo para consultores y evaluadores conocer estos impactos y su trascendencia. Por ello, el **objetivo de la tercera parte** es analizar los **impactos del cambio climático que afectan a las infraestructuras**, y en qué medida lo hacen, punto de partida esencial para poder comprender la necesidad de medidas de adaptación.

Los sistemas naturales y humanos mantienen un equilibrio, más o menos estable, con las condiciones del medio donde se asientan, están adaptados. Las infraestructuras de transporte se diseñan para perdurar en el tiempo, haciendo frente a unas condiciones del medio normales y excepcionales, con una determinada probabilidad de ocurrencia y margen de garantía; el cambio climático puede variar las condiciones actuales,

aumentando su vulnerabilidad. Por ello, es preciso adoptar **medidas de adaptación**, aspecto abordado en la cuarta parte. Como en el caso anterior, un excesivo enfoque sectorial hace que la adaptación de las infraestructuras sea muy desconocida para los agentes implicados en la EIA, e incluso menospreciada por los promotores. El **objetivo de la tercera parte** es analizar posibles medidas de adaptación, para determinar no solo si son efectivas, sino también si pueden tener impactos ambientales asociados, incluyendo un caso práctico que ponga de relieve la trascendencia que pueden tener.

Los cuatro puntos anteriores, contribución, mitigación, impactos del cambio climático y adaptación, son los pilares tradicionales a la hora de considerar la relación entre cambio climático y cualquier actuación humana, y los únicos enunciados en las directrices sobre cambio climático y EIA existentes. Sin embargo, al avanzar en el desarrollo de esta tesis se ha detectado una carencia en este enfoque, que son los posibles impactos ambientales generados por la adaptación. La visión positiva de la adaptación, como solución a los impactos del cambio climático lleva a obviar posibles impactos secundarios asociados a ella. Por ello, se incluye una quinta parte sobre **impacto ambiental de la adaptación**. El **objetivo de esta parte** es doble. En primer lugar se pretende verificar si realmente los impactos ambientales de la adaptación se están infravalorando. En segundo lugar, se analizan cuáles son esos posibles impactos de la adaptación en las infraestructuras lineales de transporte, y como se pueden mitigar, aspecto novedoso por su escaso tratamiento en general, y nulo en relación a la EIA.

En conclusión, **el objetivo final** de esta tesis es aportar el conocimiento teórico, científico y práctico para lograr una adecuada incorporación del cambio climático a la EIA y a la toma de decisiones, de manera que este aspecto llegue a integrarse de forma efectiva y similar a otros impactos que tradicionalmente ya se tienen en cuenta. Para ello es preciso plantear globalmente los problemas, entender su contexto, relevancia e implicaciones, pero a la vez se debe descender al detalle técnico, en este caso centrado en las infraestructuras lineales de transporte, analizando su problemática concreta, y aportando herramientas y soluciones específicas. Se trata en consecuencia, de un puente entre lo teórico y lo aplicado, en el que ambos conocimientos se complementan y retroalimentan, dándose validez el uno al otro.

La transversalidad de la evaluación ambiental, a caballo entre ciencia, técnica y práctica administrativa, unida al enfoque teórico y aplicado de la tesis, obliga a conjugar diferentes métodos de investigación y análisis. En unos casos los problemas se abordan mediante investigaciones acompañadas de consultas a especialistas; en otros se han elaborado revisiones sistemáticas, donde el análisis de la literatura se enriquece con la experiencia profesional; finalmente, para reforzar la aplicabilidad de la tesis se incorporan casos prácticos, que demuestran la viabilidad de los planteamientos. Todas estas ramas se imbrican para formar un conjunto coherente, que aborda de forma consistente la consideración del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras lineales de transporte.

Publicaciones, comunicaciones en congresos y otras fuentes

Artículos en revistas de impacto derivados de la tesis

Publicados

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016a. Consideration of climate change on environmental impact assessment in Spain. *Environmental Impact Assessment Review* 57: 31–39.

Enríquez de Salamanca Á. 2016. Project splitting in environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal* 34(2): 152–159.

En evaluación

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R, Santos M. Environmental impacts of climate change adaptation. *Environmental Impact Assessment Review* (en revisión).

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. Potential of land use activities to offset road traffic greenhouse gas emissions in Central Spain. *Science of the Total Environment* (en revisión).

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. Towards an integrated environmental compensation scheme in Spain: Linking biodiversity and carbon offsets. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* (en revisión).

Enríquez de Salamanca Á. Environmental impacts of climate change adaptation of road pavements and mitigation options. *International Journal of Pavement Engineering* (en revisión).

Comunicaciones en congresos derivadas de la tesis

Enríquez de Salamanca Á. 2015. Consideración del cambio climático en la evaluación ambiental de infraestructuras. Casos prácticos. En: Casermeiro MA, Vázquez A (Eds.) *Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental. Nuevos retos de la Evaluación Ambiental. Libro de actas (VIII CONEIA)*. Madrid, 11, 12 y 13 de marzo de 2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental, Madrid, pp. 355–363. ISBN 9788449101137.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2015. Evaluación ambiental en proyectos de adaptación al cambio climático en San Vicente y las Granadinas. En: Casermeiro MA, Vázquez A (Eds.) *Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental. Nuevos retos de la Evaluación Ambiental. Libro de actas (VIII CONEIA)*. Madrid, 11, 12 y 13 de marzo de 2015. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental, Madrid, pp. 365–369. ISBN 9788449101137.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016b. El cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras de transporte: contribución, impactos, mitigación y adaptación. *Actas del VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.* Madrid, 2 y 3 de marzo de 2016. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016c. Hacia un esquema integrado de compensación ambiental: la unificación de los bancos de conservación y los mercados de carbono. *13º Congreso Nacional de Medio Ambiente CONAMA 2016.* Madrid, 28 de noviembre a 1 de diciembre de 2016. http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998971791.pdf.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016d. Impacto ambiental de la adaptación al cambio climático. *XI Congreso Internacional de Geomática y Ciencias de la Tierra TOPCART 2016.* Toledo, 26 a 30 de octubre de 2016. Colegio de Ingeniería Geomática y Topográfica.

Publicaciones previas del autor relacionadas con la tesis

Libros

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2010. Evaluación de impacto ambiental de infraestructuras. Redacción y tramitación de documentos. AENOR, Madrid. ISBN 9788481437102.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2009. Manual de gestión y restauración de préstamos y vertederos en obras civiles. CEDEX, Madrid. ISBN 9788477904854.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Rodríguez JJ, Sánchez M, Ruiz S. 2012b. Evaluación, corrección y seguimiento ambiental en el diseño, construcción y explotación de los proyectos de infraestructuras lineales de transporte. CEDEX, Madrid. ISBN 9788477905325.

Artículos en revistas

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á, Varela JM. 2004. Seguimiento de la eficacia de la restauración vegetal de los taludes de autovías. *Ingeniería Civil* 134: 27–36.

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á, García MR, Ruiz S. 2013. Evolución de las medidas compensatorias en los procedimientos de evaluación de impacto ambiental. *Ingeniería Civil* 172: 73–80.

Díaz Sierra R, Enríquez de Salamanca A, Martín Aranda RM, Monreal JI. 2015. La contaminación lumínica. Efectos, retos y soluciones. *100cias@uned* 8: 62–68.

Enríquez de Salamanca, A. 2009. Conservación de los paisajes áridos ibéricos. *Foresta* 46: 52–58.

Enríquez de Salamanca Á. 2011. El ocaso de los glaciares. *Foresta* 53: 46–54.

Enríquez de Salamanca Á. 2014a. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. *Foresta* 60: 82-87.

Enríquez de Salamanca Á. 2014b. Reducción de la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. El caso de San Vicente y las Granadinas. *Foresta* 62: 18–29.

Enríquez de Salamanca Á. 2014d. Los bancos de conservación. *Foresta* 60: 26–35.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Varela JM, Magdaleno F. 2009a. Gestión y restauración de préstamos y vertederos en obras civiles. *Ingeniería Civil* 155: 31-48.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, García MR, Ruiz S. 2014. Medidas compensatorias ligadas a la compra y gestión del territorio. Experiencias y propuestas para su aplicación. *Ingeniería Civil* 173: 23–31.

Actas de congresos

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2004. Determinación de la capacidad de acogida del territorio frente a infraestructuras lineales. En: ICCP (Ed.) *II Congreso Internacional de ingeniería civil, territorio y medio ambiente. Santiago de Compostela, noviembre de 2014*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, pp. 1313–1324.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2011. Procedimientos abreviados. Los límites de la evaluación de impacto ambiental. En: CONEIA (Ed.) *Evaluación de impacto ambiental: responsabilidad, vigilancia, eficacia. Libro de Actas del VI Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (VI CONEIA). Albacete, abril 2011.* Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, pp. 59–66.

Enríquez de Salamanca A, Carrasco MJ. 2013. Evolución de las medidas compensatorias en los procedimientos de evaluación de impacto ambiental. En: Casermeiro MA, Espluga AP (Coord.) *VII Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental: Gestión, Seguimiento, Innovación. Libro de actas (VII CONEIA). Oviedo, marzo 2013*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, pp. 211–224.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, García F, Varela JM. 2004. Seguimiento de la revegetación de taludes en autovías. *Actas del VII Congreso Nacional de Medio Ambiente. Madrid, 22-26 de noviembre de 2004.* Fundación CONAMA.

Fuentes documentales del autor inéditas citadas en la tesis

Cabello L, González R, Kroebel E, Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2016. *Estudio de impacto ambiental. Variante ferroviaria entre La Ola y Sondika*. Esteyco-Euskal Trenbide Sarea. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á. 2014c. *Environmental Management Plans. Disaster Vulnerability Reduction Project. South River. Warrawarrow River. Fenton to Green Hill Road*. INHA-Vigiconsult-Euroconsult-Government of St Vincent and the Grenadines-World Bank. Inédito

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Cebrián A. 2007. *Estudio de impacto ambiental. Estudio informativo. Autovía del Este (A-3). Tramo: Madrid-Arganda del Rey. Plataformas reservadas para el transporte público, vías de servicio y ampliación a tres carriles por calzada*. Vigiconsult-Dirección General de Carreteras. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Cebrián A, Fernández ME. 2009b. *Estudio de impacto ambiental. Estudio Informativo: Tramo La Robla-León de la Carretera N-630, y conexión con la Red de Carreteras al suroeste de León*. Vigiconsult-Dirección General de Carreteras. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Marcos A, Aguilar A. 2011. *Estudio de impacto ambiental. Estudio Informativo: Extensión de la red de cercanías de Madrid hasta Soto del Real*. PROSER-Dirección General de Ferrocarriles. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Cebrián A, Fernández ME. 2012a. *Estudio de impacto ambiental. Estudio informativo. Estudio de alternativas para las Autovías Palencia-Paredes de Nava y Palencia – Carrión de los Condes y Estudio de Viabilidad de la autovía Paredes de Nava-Sahagún, siguiendo los corredores de la CL-613 y CL-615*. Vigiconsult-Provilsa. Inédito.

2 Introducción

Objetivos del capítulo

Para abordar esta tesis doctoral se precisa en primer lugar una introducción de los tres conceptos esenciales que conjuga, cambio climático, infraestructuras lineales de transporte y evaluación de impacto ambiental (EIA), y de su relación.

En primer lugar se incluye una breve introducción al cambio climático. Las fuentes de información son innumerables; para aportar una visión general se han seguido principalmente los informes del IPCC. De forma breve se analiza la variabilidad natural del clima, el efecto invernadero, el concepto de cambio climático, sus causas y efectos, las proyecciones existentes y la contribución al cambio climático de los principales sectores de actividad.

En segundo lugar, se analiza el concepto de infraestructuras de transporte, sus tipologías, planificación (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2010), la influencia en el cambio climático (Enríquez de Salamanca et al. 2016b), y las razones por las que se han seleccionado las infraestructuras lineales de transporte como foco de estudio.

En tercer lugar se define la EIA, su desarrollo histórico, normativa, competencias, procedimientos existentes y aplicación a las infraestructuras lineales de transporte (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2010, Enríquez de Salamanca & Carrasco 2011, Enríquez de Salamanca et al. 2012b, Enríquez de Salamanca 2014a).

Finalmente, se relacionan estos tres conceptos (Enríquez de Salamanca et al. 2016b). Se establece la relación recíproca entre cambio climático e infraestructuras, donde ambos elementos impactan sobre el otro, siendo precisas medidas de mitigación y de adaptación, y se define el papel que debe jugar la EIA para considerar todos estos aspectos en la toma de decisiones.

Publicaciones

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016b. El cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras de transporte: contribución, impactos, mitigación y adaptación. *VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2-3 de marzo de 2016.

Enríquez de Salamanca Á. 2014a. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. *Foresta* 60: 82-87.

Enríquez de Salamanca Á. 2011. El ocaso de los glaciares. *Foresta* 53: 46–54.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Rodríguez JJ, Sánchez M, Ruiz S. 2012b. *Evaluación, corrección y seguimiento ambiental en el diseño, construcción y explotación de los proyectos de infraestructuras lineales de transporte*. CEDEX, Madrid.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2011. Procedimientos abreviados. Los límites de la evaluación de impacto ambiental. En: CONEIA (Ed.) *Evaluación de impacto ambiental: responsabilidad, vigilancia, eficacia. Libro de Actas del VI Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (VI CONEIA). Albacete, abril 2011.* Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, pp. 59–66.

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2010. *Evaluación de impacto ambiental de infraestructuras. Redacción y tramitación de documentos.* AENOR, Madrid.

2.1. El cambio climático

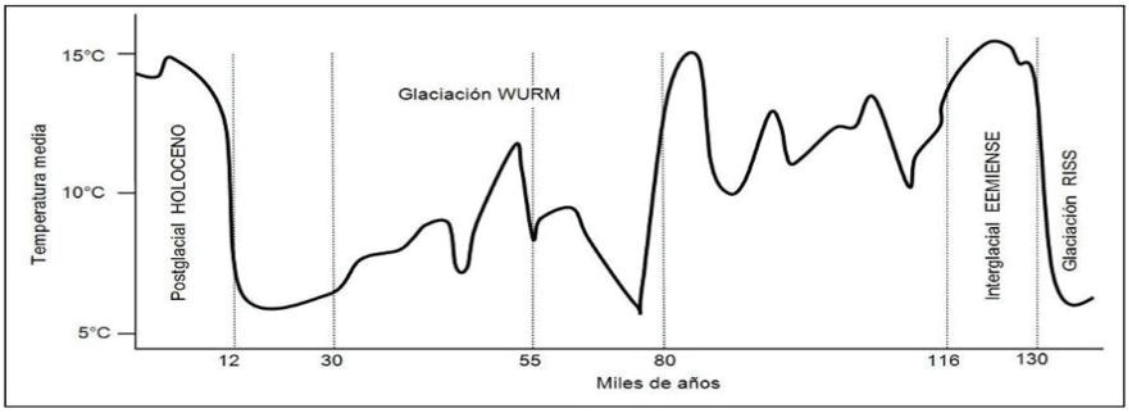
2.1.1. Cambios en el clima del Holoceno y el Antropoceno

El clima ha cambiado mucho a lo largo de las diferentes eras geológicas. A lo largo del Holoceno se suceden etapas glaciales y periglaciales, con oscilaciones apreciables de la temperatura; en el periodo histórico hay etapas cálidas y frías, con variaciones de temperatura menos acusadas; e incluso en el siglo XX hay ciclos cálidos y frescos más sutiles. Sin embargo, a finales del siglo XX la temperatura media comienza a incrementarse de forma anormalmente rápida respecto a las anteriores oscilaciones; es el efecto del cambio climático antropogénico. Los cambios sufridos en los últimos tiempos, no solo en el clima, son tan importantes, que ha llevado a definir una nueva época diferenciada del Holoceno, el Antropoceno.

La última glaciación y el paso al Holoceno

Hace 130 000 años comienza un periodo interglacial cálido, el Eemiense, que marca el final de la glaciación de Riss, donde las temperaturas alcanzan valores similares a los actuales, algo superiores, con un máximo en 125 000 AP (Kukla 2000). El final del Eemiense (116 000 AP) da paso a un periodo frío que se extiende hasta 12 000 AP, conocido como glaciación de Wurm en Europa central, Weichsel en Europa noroccidental y Winsconsin en Norteamérica. En esta fase glacial se producen oscilaciones en las temperaturas (Figura 1), aunque en conjunto es una etapa fría entre el Eemiense y el Holoceno (Uriarte-Cantolla 2003). Hace 19 000 años comienza la deglaciación, con un ascenso del nivel del mar asociado, y se extiende hasta 11 500 AP, cuando se considera que finaliza la glaciación para dar paso al Holoceno, aunque el deshielo se prolonga hasta 8 000 AP (Clark et al. 2009). En este periodo el clima no es constante, existiendo oscilaciones en las que se vuelve más templado o más frío

Figura 1 Oscilación en la temperatura media de la tierra desde la glaciación de Riss hasta el presente



Fuente: Enríquez de Salamanca (2011)

Oscilaciones del clima en el Holoceno

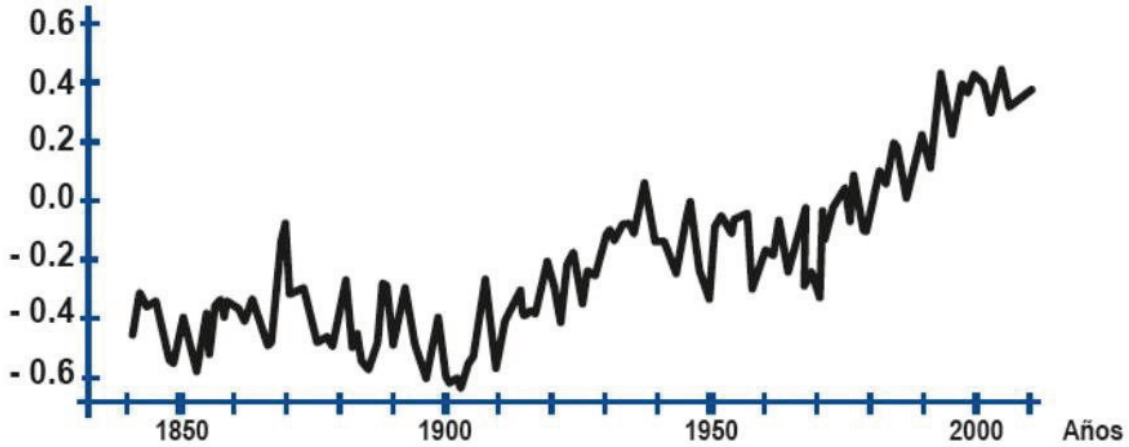
A lo largo del Holoceno la temperatura media de la tierra se ha mantenido alrededor de los 14-15ºC, aunque con oscilaciones. Entre 10 000 y 6 000 AP el clima fue cálido y húmedo, pero hace 8 200 años se produjo una brusca caída de temperaturas, que afectó especialmente a Groenlandia y Europa (Menocal et al. 2000, Barber 1999). Fuera de este episodio, los cambios en el Holoceno medio son poco acusados en Europa, y más notables en regiones tropicales (Uriarte-Cantolla 2003). En la segunda mitad del Holoceno aparecen ciclos de 1 500 años con avance y retroceso de los hielos a la deriva en el Atlántico, y en los glaciares alpinos, por variaciones en la intensidad solar (Bond et al. 2001) o en la circulación termohalina oceánica (Broecker 2001), como lo demuestran los fondos marinos del Atlántico Norte, cuyos sedimentos, acumulados en los últimos 12 000 años, muestras variaciones en los granos sedimentarios procedentes de icebergs fundidos con esa periodicidad (Alley & Menocal 1998).

Entre los siglos XI y XIV se desarrolló el Óptimo Medieval, una etapa cálida donde la temperatura media del Hemisferio Norte fue unos 0,2°C superior a la de los siglos siguientes, aunque inferior a la registrada a mediados del siglo XX (Folland et al. 2001). Al Óptimo Medieval siguió un periodo frío, la Pequeña Edad de Hielo, que se extendió aproximadamente entre 1550 y 1850 en Europa, América del Norte y Asia, con tres mínimos alrededor de 1650, 1770 y 1850, separados por intervalos ligeramente más cálidos. A nivel global la Pequeña Edad de Hielo es un modesto enfriamiento del Hemisferio Norte, de menos de 1°C respecto al siglo XX, aunque en ciertas regiones las condiciones frías fueron considerablemente más pronunciadas (Folland et al. 2001).

El Antropoceno

A lo largo del siglo XX las temperaturas han oscilado ligeramente, pero a partir de 1970 ha comenzado el ciclo más cálido de los últimos siglos (Figura 2).

Figura 2 Anomalías en las temperaturas respecto a 1961-1990



Fuente: OECC (2013)

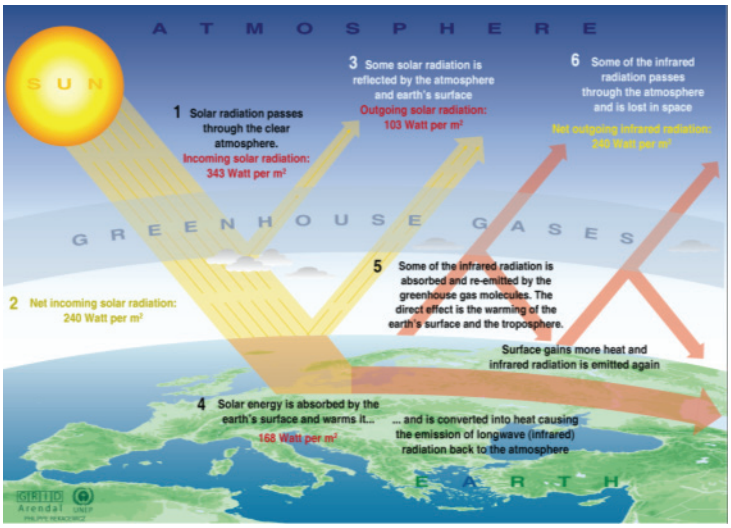
Los cambios en la concentración atmosférica de CO_2, en la presencia de ciertos elementos como radionucleidos, y de capas geológicas diferenciables por la influencia antrópica, han llevado a proponer una época geológica diferenciada del Holoceno, el Antropoceno, término acuñado por Crutzen & Stoermer (2000) y ampliamente aceptado (Crutzen 2002, Zalasiewicz et al. 2008, 2010, 2015, Steffen et al. 2011, Lewis & Maslin 2015, Waters et al. 2016) aunque cuenta con detractores (Walker et al. 2015), quienes consideran que sería un periodo similar al Óptimo Medieval o la Pequeña Edad de Hielo, con sentido histórico pero no geológico.

La fecha de inicio de esta época es controvertida. Crutzen (2002) propuso su inicio a finales del siglo XVIII, coincidiendo con la invención de la máquina de vapor. Zalasiewicz et al. (2010, 2015), con participación de Crutzen, proponen julio de 1945, fecha de la primera prueba de una bomba nuclear, en Nuevo México. Walker et al. (2015) discrepan de esa fecha, y de la diferenciación geológica del Antropoceno. Lewis & Maslin (2015) proponen dos fechas posibles de inicio, 1610 o 1964. En el reciente trabajo colectivo de Waters et al. (2016) proponen una fecha pendiente de fijar situada a mediados del siglo XX.

2.1.2. El efecto invernadero

El sol irradia energía que alcanza la tierra en longitudes de onda cortas, predominantemente en la parte ultravioleta y visible del espectro. Aproximadamente un tercio de la energía solar que llega a la parte superior de la atmósfera terrestre se refleja directamente de vuelta al espacio. Los dos tercios restantes son absorbidos por la superficie terrestre y, en menor medida, por la atmósfera. Para equilibrar la energía entrante la Tierra debe irradiar en promedio la misma cantidad de energía de vuelta al espacio; debido a que es más fría que el Sol, irradia en longitudes de onda más largas, sobre todo en la parte infrarroja del espectro. Gran parte de la radiación térmica emitida por la tierra y el océano es absorbida por la atmósfera, incluyendo las nubes, y emitida de nuevo a la Tierra. Es el efecto invernadero (Solomon et al. 2007, Figura 3), sin el cual la temperatura media en la Tierra sería de -18°C, por lo que hace posible la vida como la conocemos.

Figura 3 El efecto invernadero



Fuente: UNEP/GRID-Arendal (http://www.grida.no)

Se definen GEI como aquellos componentes gaseosos de la atmósfera, naturales o antropógenos, que absorben y reemiten radiación infrarroja (Naciones Unidas 1992). Los gases más abundantes en la atmósfera, nitrógeno (78%) y oxígeno (21%), no ejercen casi efecto invernadero, que proviene de moléculas más complejas y menos comunes. El vapor de agua es el GEI más importante, y el dióxido de carbono (CO_2) el segundo; metano, óxido nitroso, ozono y varios otros gases presentes en la atmósfera en pequeñas cantidades también contribuyen al efecto invernadero. En regiones ecuatoriales húmedas con mucho vapor de agua y un efecto invernadero grande, la adición de una pequeña cantidad de CO_2 o vapor de agua tiene un impacto pequeño en la radiación infrarroja reflejada, pero en regiones polares frías y secas el efecto es mayor, igual que en la atmósfera superior fría y seca, donde un pequeño aumento en vapor de agua tiene más influencia en el efecto invernadero que cerca de la superficie.

2.1.3. Concepto de cambio climático

El clima no ha sido constante a lo largo del tiempo, ni siquiera del Holoceno, pero desde la década de 1950 se está produciendo un calentamiento del sistema climático inequívoco, con cambios que no tienen precedentes en los últimos milenios (Houghton et al. 2001, Solomon et al. 2007, Stocker et al. 2013). La atmósfera y los océanos se han calentado, la cantidad de nieve y hielo ha disminuido, el nivel del mar ha aumentado, y la concentración de GEI se ha incrementado. Se trata de un suceso anómalo que solo puede atribuirse a la acción humana, debido al incremento de GEI por emisiones antropogénicas; el efecto invernadero natural se ha intensificado por acciones como la quema de combustibles fósiles, agricultura, ganadería o tala de bosques. El cambio climático es un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera mundial y que se suma a la variabilidad natural del clima (Naciones Unidas 1992).

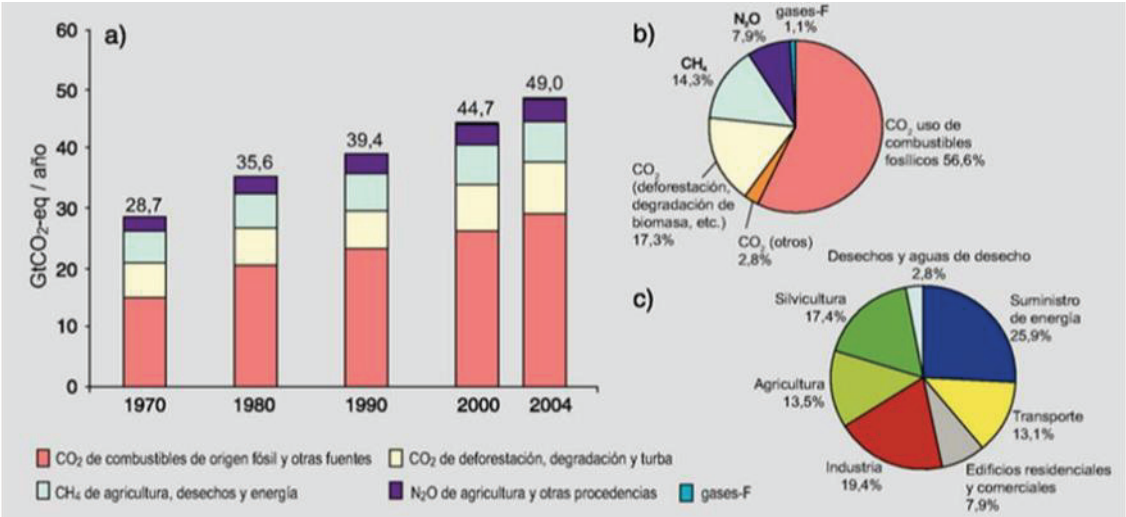
2.1.4. Causas del cambio climático

La variación de las concentraciones de GEI y aerosoles en la atmósfera, y las variaciones de la cubierta terrestre y de la radiación solar, alteran el equilibrio energético del sistema climático, causando el cambio climático (IPCC 2007). El CO_2 es el GEI antropógeno más importante, y sus emisiones anuales aumentaron en torno a un 80% entre 1970 y 2004 (Figura 4).

Las concentraciones atmosféricas mundiales de CO_2, metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) han aumentado notablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750, y son actualmente muy superiores a los valores preindustriales, determinados a partir de núcleos de hielo que abarcan varios milenios; los valores registrados para el CO_2 y el CH_4 en 2005 excedían con mucho el intervalo de los últimos 650 000 años. El aumento de concentración de CO_2 se debe principalmente al uso de combustibles de

fósiles y, en una parte apreciable pero menor a cambios de uso de la tierra. El aumento de concentración de CH_4 se debe predominantemente a la agricultura y la utilización de combustibles de origen fósil, aunque su aumento ha sido menos rápido desde los años 1990. El aumento de la concentración de N_2O procede principalmente de la agricultura.

Figura 4 Emisiones mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004



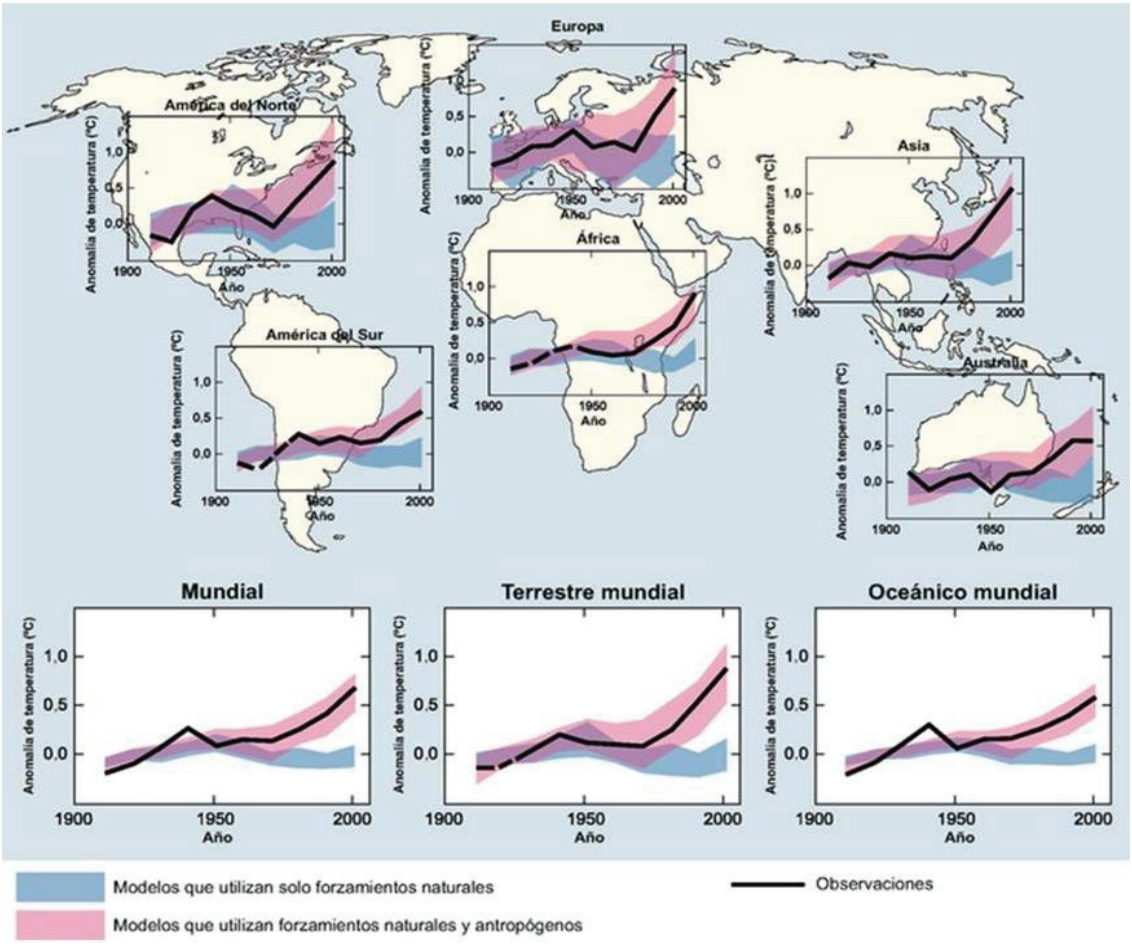
a) Emisiones anuales mundiales de GEI antropógenos entre 1970 y 2004. b) Parte proporcional que representan diferentes GEI antropógenos respecto de las emisiones totales en 2004, en términos de CO_2 equivalente. c) Parte proporcional que representan diferentes sectores en las emisiones totales de GEI antropógenos en 2004, en términos de CO_2 equivalente. Fuente: IPCC (2007).

En consecuencia, el cambio climático es el resultado de desequilibrios en el balance energético de la Tierra, causados por procesos y agentes naturales y antropogénicos. El forzamiento radiativo (FR) cuantifica el cambio en los flujos de energía originados por variaciones en la acción de estos agentes, es decir, el cambio en la radiación entrante o saliente en el sistema climático debido a cambios en la radiación incidente o la concentración de gases activos radiativos. Las características del FR de la era industrial son (OECC 2013, Stocker el al. 2013): (i) el FR antropogénico total es positivo desde 1750 con una ganancia neta de energía por parte del sistema climático. (ii) El factor que contribuye en mayor medida al FR es el aumento en la concentración atmosférica de CO_2 ocurrido a partir de 1750; desde los años 1960 es la variable que ha contribuido en mayor medida al incremento del FR antropogénico. (iii) Los FR debidos a la emisión de aerosoles y sus interacciones con las nubes contribuyen con la mayor incertidumbre a las estimaciones del cambio del balance energético de la Tierra. (iv) Los cambios en el FR asociados a la actividad de los volcanes y la irradiancia solar total contribuyen solo en una pequeña fracción al FR neto durante la era industrial.

2.1.5. Efectos del cambio climático

De acuerdo con el AR4 (Solomon et al. 2007) el efecto neto de las actividades humanas desde 1750 ha sido un aumento de la temperatura, con un paralelismo entre los cambios observados de la temperatura superficial y los modelos del clima que contemplan forzamientos naturales y antropógenos (Figura 5). La mayor parte del aumento de temperatura desde mediados del siglo XX se debe muy probablemente al aumento de concentración de GEI antropógenos. Las influencias humanas no se circunscriben a las temperaturas, abarcando otros aspectos que generan un cambio global: (i) aumento del nivel del mar durante la segunda mitad del siglo XX (muy probable); (ii) alteración de pautas eólicas, afectando el recorrido de las tempestades extratropicales y las pautas de temperatura (probable); (iii) aumento de la temperatura en noches extremadamente cálidas, de noches frías y de días fríos (probable); (iv) intensificación del riesgo de olas de calor, incremento de superficie afectada por la sequía desde los años 70 y mayor frecuencia de precipitaciones intensas (más probable que improbable).

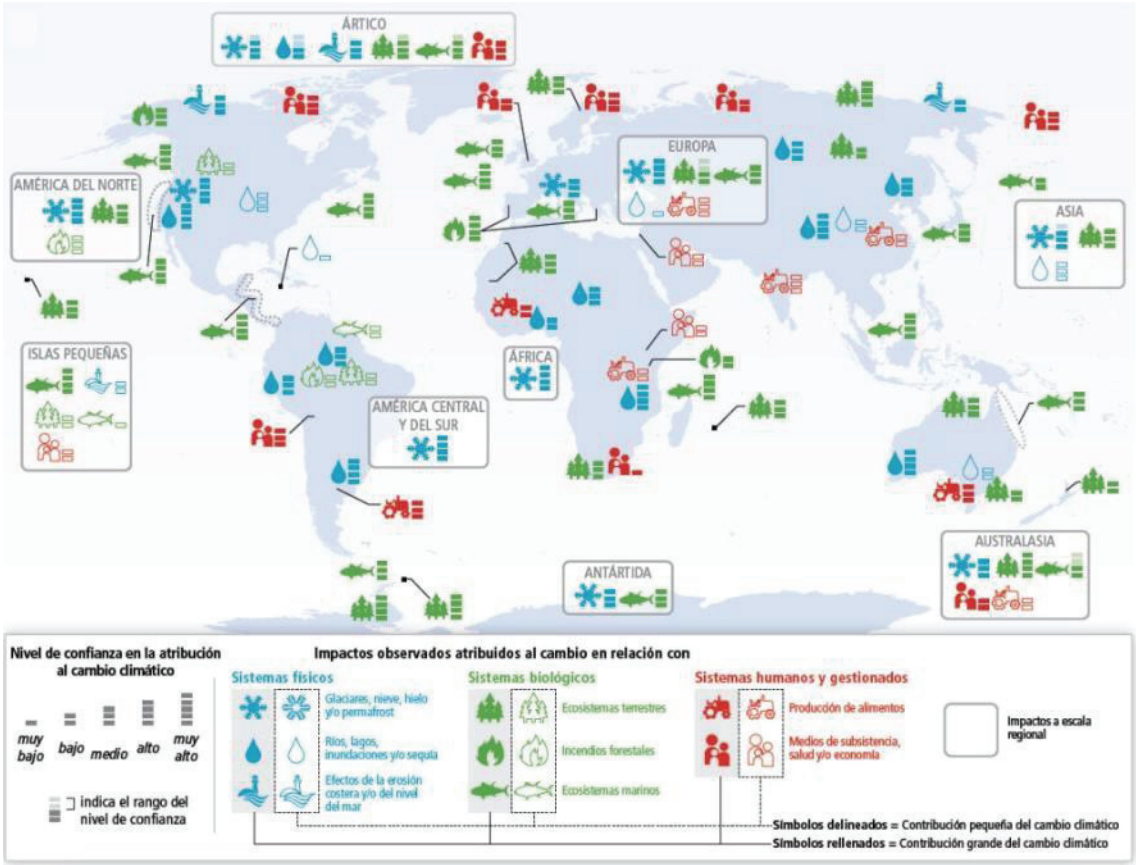
Figura 5 Cambio en la temperatura observado y estimado con forzamientos antropógenos y/o naturales



Fuente: IPCC (2007)

El AR5 (IPCC 2014b) analiza los impactos del cambio climático (Figura 6) destacando que: (i) en los últimos decenios los cambios en el clima han causado impactos en los sistemas naturales y humanos en todos los continentes y océanos; (ii) en muchas regiones, las cambiantes precipitaciones o el derretimiento de nieve y hielo están alterando los sistemas hidrológicos, afectando a los recursos hídricos en cantidad y calidad; (iii) muchas especies terrestres, dulceacuícolas y marinas, han modificado sus áreas de distribución geográfica, actividades estacionales, pautas migratorias, abundancias e interacciones con otras especies en respuesta al cambio climático; (iv) los impactos negativos en el rendimiento de cultivos han sido más comunes que los positivos; (v) la mala salud humana a causa del cambio climático es relativamente pequeña en comparación con otros factores; (vi) las diferencias en vulnerabilidad y exposición se derivan de desigualdades producidas por procesos de desarrollo dispares; (vii) los impactos de fenómenos extremos conexos al clima, como olas de calor, sequías, inundaciones, ciclones e incendios, ponen de relieve la vulnerabilidad y exposición de algunos ecosistemas y muchos sistemas humanos a la actual variabilidad climática; (viii) los peligros conexos al clima agravan otros factores de estrés, a menudo con resultados negativos para los medios de subsistencia, especialmente para personas que viven en la pobreza; (ix) los conflictos violentos hacen que aumente la vulnerabilidad al cambio climático.

Figura 6 Impactos atribuidos al cambio climático basados en estudios realizados desde el AR4.



Fuente: OECC (2014)

2.1.6. Proyecciones y escenarios climáticos

El AR5 (IPCC 2014b) define los escenarios como herramientas para caracterizar las posibles futuras trayectorias socioeconómicas, el cambio climático y sus riesgos, y las implicaciones en las políticas. Define cuatro escenarios de emisión, las Sendas Representativas de Concentración (RCP), identificadas por su FR total (W/m²) para el año 2100 (Figura 7), y que corresponden con un escenario de mitigación con muy bajo FR (RCP2.6), dos escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6) y otro un escenario con emisiones de GEI muy altas (RCP8.5).

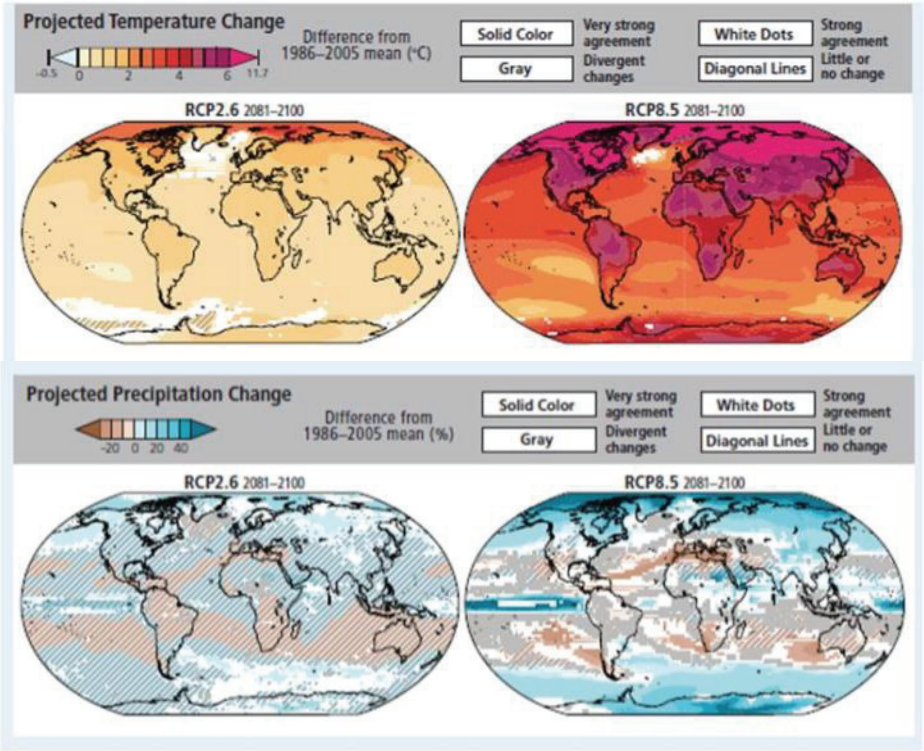
Figura 7 Sendas Representativas de Concentración (RCP)

	FR	Tendencia del FR	[CO_2] en 2100
RCP2.6	2,6 W/m^2	decreciente en 2100	421 ppm
RCP4.5	4,5 W/m^2	estable en 2100	538 ppm
RCP6.0	6,0 W/m^2	creciente	670 ppm
RCP8.5	8,5 W/m^2	creciente	936 ppm

Fuente: OECC (2013)

Los escenarios utilizados en el AR4 (SRES) no contemplaban los efectos de las políticas o acuerdos internacionales tendentes a mitigar las emisiones, representando posibles evoluciones socioeconómicas sin restricciones en las emisiones. Por el contrario, algunos de los RCP contemplan los efectos de las políticas orientadas a limitar el cambio climático en el siglo XXI. El análisis de los cambios observados y los cambios proyectados según los RCP permite hacer proyecciones futuras sobre la posible evolución de la temperatura y precipitación media de la tierra (Figura 8 y Figura 9).

Figura 8 Cambios previstos en la temperatura media anual y la precipitación



Fuente: Field et al. (2014)

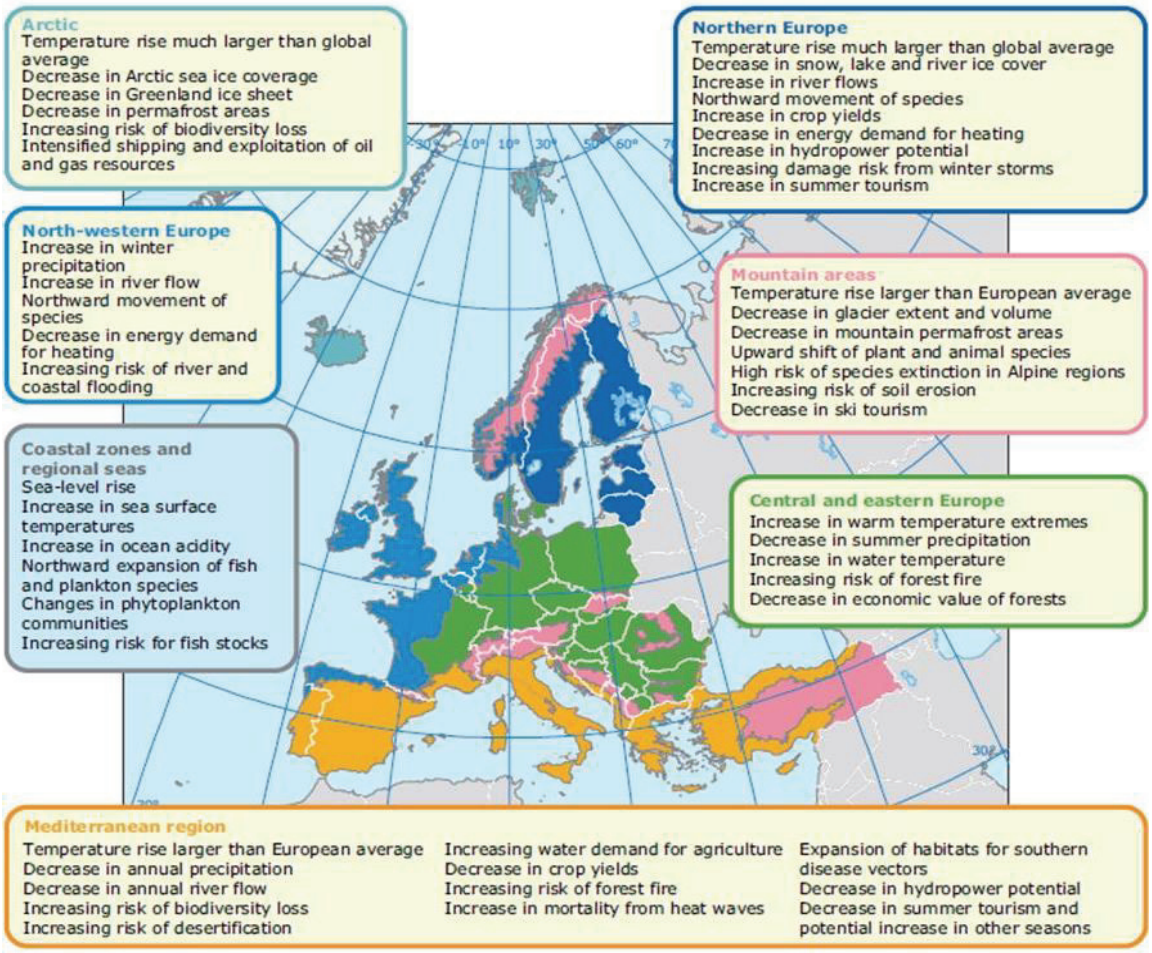
Figura 9 Cambios estimados en las temperatura medias globales para los diferentes RCP

Variable	Escenario	2046-2065 Media	2046-2065 Rango Probable	2081-2100 Media	2081-2100 Rango Probable
Cambio temperatura superficial media (ºC)	RCP2.6	1.0	0.4 - 1.6	1.0	0.3 - 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 - 2.0	1.8	1.1 - 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 - 1.8	2.2	1.4 - 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 - 2.6	3.7	2.6 - 4.8

Fuente: OECC (2013)

Europa se está calentando más rápido que otras partes del mundo, con un incremento medio de la temperatura en la última década de 1,3°C frente a una media mundial de 0,8°C (EC 2013a). Los impactos varían dentro de la Unión Europea, pero todos los Estados Miembros están expuestos (Figura 10). Entre las regiones particularmente vulnerables están la cuenca mediterránea, áreas de montaña, llanuras densamente pobladas, zonas costeras, áreas ultraperiféricas o el ártico.

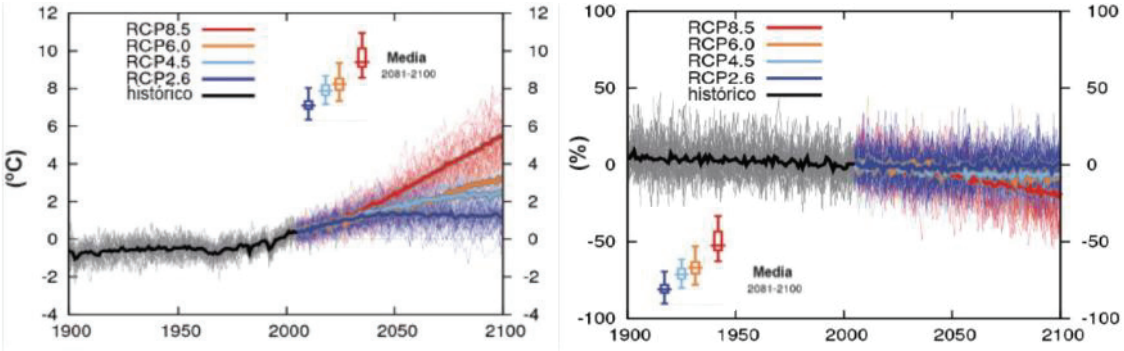
Figura 10 Impactos del cambio climático pasado y proyectados en las regiones europeas



Fuente: EC (2013a)

En la Región Mediterránea (OECC 2013) tendrá lugar (Figura 11 y Figura 12): (i) Un incremento de temperatura superior a la media europea, más pronunciado en los meses estivales que en los invernales; para el escenario RCP8.5 a finales del siglo XXI experimentará incrementos medios de temperatura de 3,8ºC en los meses invernales y 6,0ºC en los estivales. (ii) Una reducción de la precipitación anual en la Península Ibérica, más acusada cuanto más al sur, con una fuerte reducción en los meses estivales; para el escenario RCP8.5 y finales del siglo XXI las reducciones medias de precipitación serán del 12% y 24% en los meses invernales y estivales respectivamente. (iii) Un aumento de extremos relacionados con precipitaciones de origen tormentoso.

Figura 11 Cambio estimado de temperatura y precipitación en la región Mediterránea con distintas RCP



Temperatura media anual Precipitación media anual

Fuente: OECC (2013)

Figura 12 Previsiones de cambio de temperatura y precipitación para la RCP8.5.

		Temperatura (ºC)					Precipitación (%)				
Mes	año	min.	25%	50%	75%	max.	min.	25%	50%	75%	max.
Diciembre Enero Febrero	2035	0.0	0.6	0.9	1.1	1.7	-10	-4	-1	1	8
	2065	0.7	1.8	2.2	2.7	3.1	-24	-9	-4	-2	6
	2100	2.4	3.3	3.8	4.6	5.7	-35	-18	-12	-7	0
Junio Julio Agosto	2035	0.6	1.1	1.4	1.6	2.7	-15	-7	-3	1	8
	2065	2.1	2.6	3.3	3.7	5.6	-31	-18	-12	-7	9
	2100	3.9	4.9	6.0	6.8	9.3	-58	-35	-24	-17	-4
Anual	2035	0.4	1.0	1.1	1.3	2.0	-8	-4	-2	0	5
	2065	1.6	2.3	2.5	3.0	4.1	-23	-11	-7	-5	1
	2100	3.3	4.1	4.5	5.6	6.9	-35	-23	-19	-13	-2

Los cambios están referidos al periodo 1986-2005. La tabla muestra el intervalo de incertidumbre mediante los percentiles de 25%, 50%, 75%, el valor máximo y mínimo de los 39 modelos utilizados. Se utilizan celdas coloreadas en el caso de la precipitación para indicar los resultados más robustos.

Fuente: OECC (2013)

Los impactos asociados a los cambios climáticos previstos en la región mediterránea son (Tabla 1):

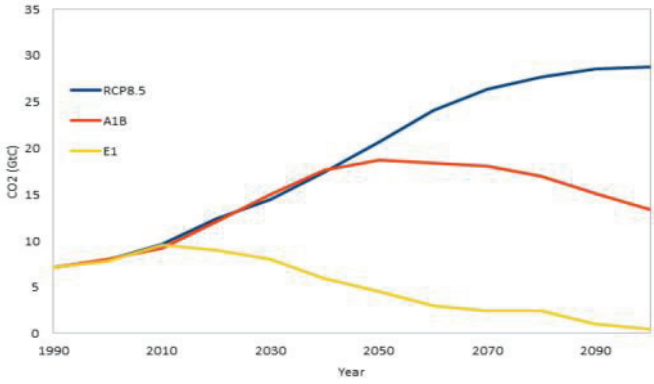
Tabla 1 Impactos del cambio climático en la región mediterránea

Reducción	Incremento
Reducción en los caudales anuales de los ríos Reducción en las cosechas agrícolas Reducción en el potencial hidroeléctrico Reducción del turismo de verano	Incremento del riesgo de pérdida de biodiversidad Incremento del riesgo de desertificación Incremento de demanda de agua en agricultura Incremento en el riesgo de incendios forestales Incremento de mortalidad por olas de calor Incremento de expansión de vectores de enfermedades Potencial incremento de turismo fuera del verano

Fuente: Elaborado a partir de datos de EC (2013a)

La Comisión Europea ha promovido un proyecto de investigación sobre los impactos del cambio climático en Europa denominado PESETA *(Projection of Economic impacts of climate change in Sectors of the European Union based on boTtom-up Analysis)*, encaminado a proporcionar apoyo orientado a la política de la UE en el proceso de toma de decisiones desarrollando respuestas basadas en la ciencia a los desafíos de política que tienen una dimensión tanto socio-económica, así como una científico/tecnológica. En la actualidad se ha desarrollado una segunda fase, PESETA II (Ciscar et al. 2014). En este estudio se plantean tres escenarios, RCP8.5, A1B y E1 (Figura 13), de interés para diferentes estudios sobre impactos climáticos y adaptación.

Figura 13 Escenarios estudiados en el proyecto PESETA II



Fuente: Ciscar et al. (2014)

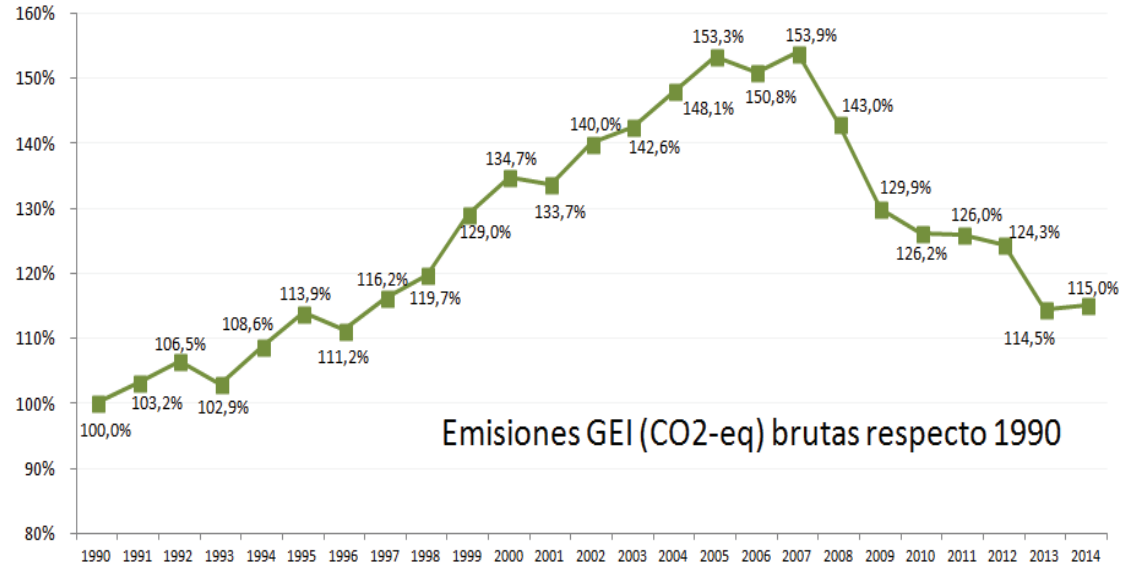
2.1.7. Contribución al cambio climático de las actividades humanas

Existen numerosas actividades que contribuyen a la emisión de GEI, y en menor medida a su absorción. El IPCC propone su agrupación en categorías para la inventariación, diferenciado energía, procesos industriales, agricultura, usos del suelo, cambios de usos del suelo y silvicultura, residuos y otros usos (MAPAMA 2016a).

Estas actividades se dividen en sectores sometidos a comercio de derechos de emisión o Sectores ETS (*European Trading Scheme*), que en España son los incluidos en la Ley 1/2005 (BOE 2005), especialmente actividades industriales y aviación civil, y sectores difusos, no sometidos a comercio de derechos de emisión, que son los no incluidos en la Ley 1/2005. Según el Plan Nacional de Asignación (BOE 2006b) estos últimos sectores son el transporte, residencial, comercial e institucional (R&C&I), agrario, residuos, gases fluorados y actividades industriales no cubiertas por el ETS por no está tipológicamente incluidas o no superar los umbrales establecidos.

De acuerdo con la base de datos EDGAR de la UE (EU 2016), las emisiones mundiales de GEI fueron de 35 669 108 kt CO_2-eq, correspondiendo el 9,6% a la Unión Europea. Las emisiones de España supusieron el 0,7% mundial, y el 7,1% de la UE. De acuerdo con el inventario de GEI de 2014, España (Tabla 2) emitió 328 925 kt CO_2-eq sin contar el sector LULUCF (uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y selvicultura) y 297 425 kt CO_2-eq incluyéndolo (MAPAMA 2016a, 2016b). Las emisiones brutas suponen un incremento del 15% respecto a 1990, y por primera vez desde 2007 se registra un incremento interanual del 0,45% respecto a 2013 (Figura 14).

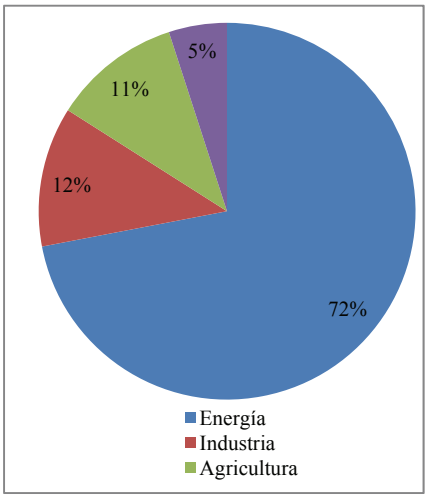
Figura 14 Emisiones brutas de GEI en España 1990-2014



Fuente: MAPAMA (2016a)

Los sectores ETS fueron responsables de un 38% de las emisiones mientras que los difusos emitieron el 62%. Un 72% de emisiones se originaron en el procesado de energía (Figura 15), y dentro de este grupo, la generación de electricidad supuso un 23% del total, mientras que el transporte generó un 24% de las emisiones. Las emisiones derivadas de las actividades agrícolas supusieron un 11%, mientras que los procesos industriales generaron un 12% de las emisiones globales. Los residuos se situaron en cuarto lugar con un 5% de las emisiones. Por tipos de GEI emitidos, el dominante fue el CO_2 (78%), seguido del metano (12%), N_2O (7%) y gases fluorados (3%).

Figura 15 Emisiones de GEI en 2014



Fuente: Basado en MAPAMA (2016a)

Tabla 2 Inventario de emisiones de GEI en España para 2014

Sector	Emisiones (kt CO_2-eq)	
1. Energía		**238 091,85**
A. Actividades de combustión	233 126,98	
1. Industria de la energía	75 726,05	
2. Combustión estacionaria en la industria	40 403,50	
3. Transporte	79 878,60	
4. Otros sectores	37 118,82	
B. Emisiones fugitivas de los combustibles	4 964,88	
1. Combustibles sólidos	267,81	
2. Petróleo y gas natural	4 697,07	
2. Procesos Industriales uso de otros productos		**37 742,38**
A. Productos minerales	11 727,95	
B. Industria química	4 205,79	
C. Producción metalúrgica	3 390,09	
D. Consumo no energético de combustibles y usos de disolventes	922,63	
F. Consumo de gases fluorados	16 899,59	
G. Otras fuentes de emisión de procesos industriales	596,33	
3. Agricultura		**37 405,85**
A. Fermentación entérica	11 703,75	
B. Gestión del estiércol	10 180,92	
C. Cultivo de arroz	519,50	
D. Suelos agrícolas	13 678,21	
F. Quema en campo de residuos agrícolas	729,04	
G. Enmiendas calizas	37,91	
H. Aplicación de urea	556,52	
4. Usos de la tierra, cambio de uso de la tierra y selvicultura (LULUCF)		**-31 501,00**
A. Emisiones	3 014,00	
B. Absorciones	-34 515,00	
5. Residuos		**15 686,18**
A. Depósito en vertederos en residuos sólidos	13 067,46	
B. Tratamiento de aguas residuales	758,19	
C. Incineración y quema en espacio abierto de residuos sólidos	10,05	
D. Tratamiento y eliminación de aguas residuales	1 849,68	
E. Otros-Extendido de lodos	0,80	
Total Emisión Bruta		**328 926,27**
Total Emisión descontando el sector LULUCF		**297 425,27**

Fuente: MAPAMA (2016b)

2.2. Las infraestructuras lineales de transporte

2.2.1. Concepto de infraestructuras de transporte

Definición de infraestructuras de transporte

El concepto "infraestructura" es amplio, ya que se refiere a elementos o servicios necesarios para la creación y funcionamiento de una organización concreta. En general las infraestructuras se asocian con construcciones o equipamientos para la gestión de alguna actividad, hablándose de infraestructuras de transporte, de saneamiento, sanitarias, educativas, de comunicaciones, etc. Sin embargo, dentro del ámbito de la evaluación ambiental, se asocia infraestructuras con las de transporte, como se pone de manifiesto en los supuestos sometidos a EIA (véase 2.3.5).

Las infraestructuras de transporte se agrupan en cuatro categorías, carreteras, ferrocarriles, puertos y aeropuertos. Las dos primeras son infraestructuras terrestres, ligadas al terreno, mientras que las dos segundas no, al ser el medio de transporte el agua o el aire. Las infraestructuras terrestres tienen unos trazados lineales a lo largo del territorio, formando una malla que pone en contacto diferentes puntos; por ello, al conjunto de carreteras y ferrocarriles se le denomina infraestructuras lineales de transporte. Su construcción es muy similar, difiriendo en la fase de funcionamiento, en especial en el tipo de circulaciones. Esa similitud se traduce también en impactos ambientales muy similares en la construcción y explotación.

Características de las infraestructuras de transporte

Desde un punto de vista medioambiental, los principales impactos asociados a las infraestructuras de transporte son diferentes según su tipología.

La aviación es un sector ETS según la Ley 1/2005 (BOE 2005) excepto los vuelos oficiales, militares, de salvamento, de lucha contra incendios, de entrenamiento, de investigación, con origen y destino en el mismo aeródromo, con aeronaves ligeras, en rutas ultraperiféricas, con capacidad inferior a 30 000 asientos anuales o con baja frecuencia. Los aeropuertos ocupan extensiones importantes de territorio, pero localizadas y claramente delimitadas. Aparte de los impactos asociados a la ocupación de terrenos y la construcción de accesos, su principal problema acostumbra a ser el ruido asociado a las operaciones de aproximación, aterrizaje y despegue.

La navegación en España es casi exclusivamente marítima, y en gran medida internacional y centrada en mercancías. La navegación internacional queda fuera de la contabilidad nacional de emisiones de GEI. Los puertos son elementos localizados y extensos, ubicados en un medio sensible, el litoral. Sus principales problemas suelen ser la afección al medio marino y la dinámica litoral por la construcción de muelles y espigones, y los riesgos de contaminación de las aguas por la operación de los barcos.

La construcción de infraestructuras lineales de transporte implica la formación de plataformas estrechas y largas que cruzan el territorio, por las que posteriormente circularán vehículos o trenes. La construcción de esas plataformas obliga a realizar movimientos de tierras, a cruzar otros elementos lineales como cauces o caminos, y fragmenta el territorio. Además, el tráfico rodado o ferroviario genera problemas de ruido a lo largo de los trazados, y acrecienta la fragmentación y el efecto barrera.

En consecuencia, puertos y aeropuertos son elementos localizados, más o menos extensos, con impactos importantes centrados en el entorno de esa ubicación, y un tráfico internacional cuya contribución al cambio climático supera el ámbito nacional donde se ubica la infraestructura. Por el contrario, carreteras y ferrocarriles son elementos de menor ocupación puntual pero extensa longitudinalmente, con impactos distribuidos a lo largo del trazado, cuya intensidad depende de la sensibilidad del medio.

Desde un punto de vista funcional, el principal medio de transporte nacional, tanto de mercancías como de viajeros, es el tráfico rodado, asociado a las carreteras. El ferrocarril tiene un peso creciente en el transporte de viajeros, en corto recorrido (cercanías) y alta velocidad, mientras decae en largo recorrido convencional y no acaba de crecer en mercancías. El transporte aéreo y marítimo nacional tiene ambos usos, pasajeros y mercancías, dominando el primero en el aéreo y el segundo en el marítimo.

En cuanto a los tráficos, en las infraestructuras lineales de transporte están perfectamente canalizados, siguiendo las carreteras o ferrocarriles, y puede conocerse fácilmente su frecuencia e intensidad, mediante datos de frecuencias ferroviarias o estaciones de aforo de tráfico. El tráfico aéreo y marítimo (el transporte fluvial es despreciable en España) no está canalizado de forma tan estricta; existen pasillos aéreos y de navegación, pero no físicamente delimitados.

2.2.2. Infraestructuras de transporte y cambio climático

A nivel mundial el sector de transporte emitió en 2010 un total de 7,0 $GtCO_2$-eq, el 23% de las emisiones de GEI relacionadas con la energía (Sims et al. 2014). Pese a las políticas adoptadas y la mayor eficiencia de los vehículos, las emisiones de GEI del sector continúan al alza, ya que el crecimiento continuo de la demanda de transporte de viajeros y mercancías compensa todas las medidas de mitigación. Como consecuencia, la reducción de emisiones de GEI del transporte representa un gran desafío.

En España, de acuerdo con el inventario de GEI de 2014 (MAPAMA 2016b), el sector del transporte emitió 79 879 kt CO_2-eq, que supone el 24% del total nacional (Tabla 3). La mayor contribución, el 95%, corresponde al transporte por carretera, por lo que desde el punto de vista de la consideración del cambio climático es sin duda el sector más importante, además de uno de los más problemáticos de controlar. En este sector el 98,9% de las emisiones de GEI corresponden a CO_2, con proporciones inferiores de N_2O (1%) y CH_4 (0,1%).

Tabla 3 Emisiones de GEI en España, totales y en el sector del transporte en 2014

Sector	Emisiones de GEI (kt CO_2-eq)	Porcentaje	
		Respecto al total	Respecto al transporte
Total nacional	328 926	100,00%	-
Sector del transporte	79 879	24,28%	100,00%
Aviación civil (nacional)	2 672	0,81%	3,35%
Transporte por carretera	75 652	23,00%	94,71%
Ferrocarriles	245	0,07%	0,31%
Navegación (nacional)	1 011	0,31%	1,27%
Otros transportes	299	0,09%	0,37%

Fuente: Elaborado a partir de datos de MAPAMA (2016b)

Los ferrocarriles, aunque con un peso muy inferior en cuanto a contribución al cambio climático, están muy ligados a las carreteras en lo referente a diseño, construcción y funcionamiento, formando con ellas el grupo de las infraestructuras lineales de transporte. Además, esa similitud hace mucho más fácil el transbordo modal, tanto de pasajeros como de mercancías, de la carretera al ferrocarril, que podría permitir rebajar la contribución al cambio climático.

Las diferencias entre los cuatro grandes grupos de infraestructuras de transporte, sobre todo en su operación, hacen preciso acotar el ámbito de estudio, para evitar una excesiva dispersión. Desde el punto de vista climático el sector más relevante es el tráfico rodado, al que por analogía y complementariedad se puede incorporar el ferroviario, ámbito establecido en la tesis, las infraestructuras lineales de transporte.

2.2.3. Planificación de las infraestructuras lineales de transporte

En Carrasco & Enríquez de Salamanca (2010) se analiza en detalle el proceso de planificación de las infraestructuras de transporte, y la integración en este proceso de la evaluación de impacto ambiental. Desde que se gesta una idea acerca de un determinado modelo en materia de infraestructuras, hasta que se materializa en obras concretas, existe un proceso que comprende el planteamiento de políticas, su concreción en planes y programas, la realización de estudios de viabilidad y la redacción de proyectos, y que concluye con la construcción y puesta en funcionamiento de infraestructuras concretas.

En este proceso las ideas generales se materializan en planes que plasman directrices y líneas básicas de actuación. Los planes definen actuaciones amplias, de forma genérica, ofreciendo una imagen de conjunto de una determinada política o idea. Las actuaciones contenidas en el plan se pueden concretar en programas, y estos a su vez en proyectos, entendidos en sentido amplio. De acuerdo con la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, los planes y programas de infraestructuras deben someterse a evaluación ambiental estratégica (EAE), y los proyectos a EIA.

El término proyecto, en el ámbito de la EIA, difiere del concepto de proyecto en el ámbito de la ingeniería, lo que puede llevar a ciertas confusiones. La Real Academia de la Lengua define proyecto como “designio o pensamiento de ejecutar algo” y también como “conjunto de escritos, cálculos y dibujos que se hacen para dar idea de cómo ha de ser y lo que ha de costar una obra de arquitectura o de ingeniería”.

En la EIA el concepto de proyecto se refiere a la primera de estas definiciones, a la idea o intención de ejecutar algo, mientras que en el campo de la ingeniería, y en la planificación de infraestructuras, el proyecto se ajusta a la segunda definición, a un documento técnico concreto. En adelante, al hablar de EIA de proyectos se entiende referido al concepto propio de la EA; de hecho, el “proyecto” sometido a EIA en las infraestructuras de transporte no suele ser un proyecto en el sentido de la ingeniería.

El proyecto, como idea de una actuación, atraviesa distintas fases de planificación, reguladas en la normativa sectorial. Se avanza desde una definición a escaso nivel de detalle hasta la concreción de todas las unidades de obra necesarias para acometer las obras. Los documentos más frecuentes en la planificación (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2010, Tabla 4) de infraestructuras lineales de transporte son:

Tabla 4 Documentos de planificación de infraestructuras de transporte e integración en la EIA

Fase	Alcance	Integración en la EIA
Estudios previos	Buscar soluciones a gran escala. Estudios preliminares, entre planes y proyectos	A menudo sin suficiente detalle para que puedan someterse a EIA.
Estudios informativos	Analizar alternativas desde distintas perspectivas (funcional, territorial, ambiental, financiera) y seleccionar la más adecuada.	Fase ideal para la EIA, con suficiente detalle para evaluar impactos, pero con alternativas diferentes que permitan su comparación.
Anteproyectos	Estudiar con detalle las soluciones óptimas.	La EIA en esta fase tiene sentido en actuaciones menores, sin alternativas o con diferencias menores (p.e. ampliaciones)
Proyectos básicos o de trazado	Desarrollar una alternativa concreta, en especial trazado y los bienes afectados	Fase tardía para la EIA, ya que solo existe una alternativa, la desarrollada en el proyecto.
Proyectos de construcción	Desarrollo completo de la alternativa seleccionada. Es el documento técnico para la licitación y construcción de la infraestructura.	Posterior a la EIA. Debe incorporar las condiciones establecidas en el EsIA y la DIA

Fuente: Elaboración propia, en base a información de Carrasco & Enríquez de Salamanca (2010)

2.3. La evaluación de impacto ambiental

2.3.1. Concepto de EIA

La evaluación de impacto ambiental es el procedimiento técnico, jurídico y administrativo reglado e instrumental de la autorización, destinado a determinar los efectos de un proyecto o actuación sobre el medio ambiente, y su viabilidad ambiental, y a considerar la componente ambiental en la toma de decisiones, según un esquema legalmente establecido, y dirigido por las Administraciones públicas, que implica la elaboración de una serie de documentos técnicos, la participación pública, la información oficial y el pronunciamiento del órgano ambiental de la Administración competente (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2010).

Sus características son: (i) es un procedimiento administrativo reglado, con una normativa específica; (ii) es un procedimiento instrumental de la autorización; es necesario para autorizar el proyecto, pero no es la autorización en sí misma; (iii) es un procedimiento dirigido por las Administraciones públicas; (iv) exige la elaboración de documentos técnicos, preliminares o definitivos, centrados en la evaluación de los impactos ambientales del proyecto; (v) exige la participación pública.

2.3.2. Origen y desarrollo de la EIA

La historia de la EIA en España se revisa en varios libros y artículos, aunque la mayoría de ellos han quedado desfasados por las sucesivas modificaciones legislativas. Algunas referencias útiles son Nogueira (2009), Carrasco & Enríquez de Salamanca (2010), Lozano et al. (2012), Enríquez de Salamanca (2014a) o Burzaco (2014).

Desde la Revolución Industrial, y a lo largo del siglo XX, se produjo un rápido desarrollo tecnológico y económico, que llevó aparejada una creciente degradación del medio ambiente. En la segunda mitad de ese siglo la preocupación por la degradación ambiental, y por las consecuencias sobre el planeta del modelo económico y productivo, llevaron a una toma de conciencia sobre la problemática ambiental por parte de los países más desarrollados, que se tradujo en conferencias, acuerdos y normas. En 1969 la *National Environmental Policy Act* (NEPA) de Estados Unidos, crea el procedimiento de EIA, que obliga a integrar las variables ambientales en la toma de decisiones mediante la consideración de los impactos ambientales y del análisis de alternativas.

En Europa, los programas de acción de las Comunidades Europeas desde 1973 subrayaron que la política de medio ambiente debía evitar los daños en lugar de combatirlos posteriormente, destacando la necesidad de tener en cuenta las repercusiones sobre el medio ambiente de los procesos de planificación y decisión, preveyendo procedimientos. Esto dio lugar a la Directiva 85/337/CEE, de 27 junio 1985, del Consejo, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente, primera Directiva de EIA.

En 1986 España se incorporó a las Comunidades Europeas, pasando a ser de obligado cumplimiento su normativa, entre ella la de EIA; hasta ese momento España carecía de normativa al respecto. La trasposición de la Directiva se hizo mediante el Real Decreto Legislativo 1302/1986 de EIA y dos años después se aprobó su reglamento (Real Decreto 1131/1988). Los supuestos sometidos a EIA se ampliaron por disposiciones sectoriales, como la Ley 4/1989 de conservación de los espacios naturales y de la flora y fauna silvestres, el Real Decreto 1997/1995 por el que se establecen medidas para contribuir a garantizar la biodiversidad mediante la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres o la Ley 54/1997 del sector eléctrico.

La Directiva 97/11/CE modificó la anterior Directiva 85/337/CEE, para clarificar, completar y mejorar el procedimiento, garantizar que la EIA fuera anterior a la autorización de los proyectos y completar la lista de proyectos que debían someterse a EIA. Esta Directiva se incorporó al derecho español por el Real Decreto-ley 9/2000, tramitado como Proyecto de Ley, y finalmente por la Ley 6/2001 (BOE 2001a).

En los siguientes años varias normas modificaron la EIA, como la Ley 62/2003 de medidas fiscales, administrativas y del orden social, la Directiva 2003/35/CE por la que se establecen medidas para la participación del público en determinados planes y programas relacionados con el medio ambiente o la Ley 27/2006 por la que se regulan

los derechos de acceso a la información, de participación pública y de acceso a la justicia en materia de medio ambiente o la Ley 9/2006 sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente. Además, la Sentencia del Tribunal de Justicia europeo de 16 de marzo de 2006 declaró que España no había adaptado de forma completa algunos artículos de la Directiva 85/337/CEE. Estas modificaciones llevaron a redactar un nuevo texto legal, el Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de EIA de proyectos, de nuevo con cambios puntuales por la Ley 6/2010. La Directiva 2011/92/UE de EIA derogó las anteriores y propuso cambios en el procedimiento.

La aplicación de la EIA a nivel internacional puso de relieve su alcance limitado, al aplicarse en fases tardías (proyectos), donde la posibilidad de plantear alternativas era limitada. Surgió así la propuesta de extender la evaluación a políticas, planes y programas, lo que se denominó evaluación ambiental estratégica (EAE). La Directiva 2001/42/CE, de 27 de junio, sobre evaluación de las repercusiones de determinados planes y programas en el medio ambiente incorporó a la normativa comunitaria la EAE. España fue lenta en su trasposición, demorándose cinco años hasta la Ley 9/2006 sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente.

Hasta 2013 existía una doble normativa, de EIA (Real Decreto Legislativo 1/2008) y de EAE (Ley 9/2006). La Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental unifica en una sola norma EAE y EIA, establece un esquema similar para ambos procedimientos y los regula de manera exhaustiva para que las comunidades autónomas los adopten sin más modificaciones que las estrictamente necesarias y para evitar un desarrollo reglamentario. Se pretende así tener una legislación homogénea en todo el territorio nacional, que permita a los promotores conocer de antemano las exigencias legales de carácter medioambiental requeridas para la tramitación de un plan, un programa o un proyecto, con independencia del lugar donde pretenda desarrollarlo. Con posterioridad se ha aprobado una nueva Directiva de EIA (2014/52/UE); aunque la Ley 21/2013 se anticipaba en algunos aspectos, deberá adecuarse antes de 2017.

2.3.3. Competencias en la EIA

Competencias normativas

La Constitución Española establece que las comunidades autónomas podrán asumir competencias en la gestión en materia de protección del medio ambiente (artículo 148), mientras que el Estado tiene competencia exclusiva en la legislación básica sobre protección del medio ambiente (artículo 149), aunque las comunidades autónomas pueden establecer normas adicionales de protección. A su vez, el Tratado de Funcionamiento de la Unión Europea (UE) recoge entre las competencias compartidas entre la UE y los Estados miembros (artículo 4) el medio ambiente.

Este marco establece una estructura jerárquica en la normativa de EA, Unión Europea → Administración General del Estado → Comunidades Autónomas, donde cada nivel debe cumplir las disposiciones superiores, pero puede establecer un mayor grado de protección, su normativa puede ser más extensa en requisitos y supuestos. En conclusión, la normativa de la UE en materia de EA es de obligado cumplimiento en España, siendo responsabilidad del Estado su trasposición como normativa básica, que debe ser cumplida, y puede ser desarrollada por las comunidades autónomas.

Competencias ejecutivas

El marco competencial señalado para la normativa no tiene equivalencia en cuanto a los procedimientos administrativos de EA (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2010, Enríquez de Salamanca 2014a). En primer lugar, la UE no tiene competencias ejecutivas, que son exclusivas de los Estados miembros. Dentro de cada Estado las competencias ejecutivas se establecen de acuerdo con su organización administrativa. En el caso de la EA, las competencias en España son compartidas entre el Estado y las Comunidades Autónomas, sin solaparse ni existir un principio de prevalencia; cada Administración tiene competencias en función de las autoridades implicadas en el procedimiento. La Administración General del Estado es competente en la EA de los proyectos que deban ser autorizados o aprobados por ella, y las comunidades autónomas en el resto de los casos. En ocasiones existe delegación de competencias en otros órganos, como Diputaciones Forales o Delegaciones Territoriales.

2.3.4. Procedimientos de evaluación ambiental

De acuerdo con la Ley 21/2013, actualmente existen cuatro procedimientos de EA, dos de EAE para planes y programas, y dos de EIA para proyectos, en ambos casos un procedimiento ordinario y otro simplificado, con diferentes etapas (Tabla 5).

Tabla 5 Procedimientos de evaluación ambiental en España y etapas

	Ordinaria	**Simplificada**
EAE	Solicitud de inicio Elaboración de documento inicial estratégico Consultas previas y determinación del alcance Elaboración del estudio ambiental estratégico Información pública y consultas Análisis técnico del expediente Declaración ambiental estratégica.	Solicitud de inicio Elaboración del documento ambiental estratégico Consultas sobre la necesidad de EAE (screening) Informe ambiental estratégico (determina si es precisa o no EAE ordinaria).
EIA	Consultas previas (scoping) -Voluntario Solicitud de inicio Análisis técnico del expediente Declaración de impacto ambiental	Solicitud de inicio Elaboración del documento ambiental Consultas sobre la necesidad de EIA (screening) Informe de impacto ambiental (determina si es precisa o no EIA ordinaria)

Fuente: Elaboración propia de acuerdo con la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental (BOE 2013).

Un cambio significativo de la Ley 21/2013 ha sido convertir la fase de consultas previas (*scoping*) del la EIA en voluntaria, cuando hasta entonces había sido obligatoria (Enríquez de Salamanca 2014a). Hasta 2013 los procedimientos simplificados de EIA diferían entre las comunidades autónomas, con alcances y etapas procedimentales muy dispares (Enríquez de Salamanca & Carrasco 2011). La Ley 21/2013 unifica esta figura, que pasa a ser lo que anteriormente de denominaba consulta caso por caso (*screening*).

2.3.5. La EIA de infraestructuras lineales de transporte

De acuerdo con la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental, están sometidos a EIA los siguientes proyectos de infraestructuras lineales de transporte, sea por sus características o por su ubicación u ocupación (Tabla 6):

Tabla 6 Infraestructuras lineales de transportes sometidas a EIA en España

Procedimiento	Supuestos
EIA ordinaria (Anexo I)	Grupo 6. Proyectos de infraestructuras a) Carreteras 1. Construcción de autopistas y autovías. 2. Construcción de una nueva carretera de cuatro carriles o más, o realineamiento y/o ensanche de una carretera existente de dos carriles o menos con objeto de conseguir cuatro carriles o más, cuando tal nueva carretera o el tramo de carretera realineado y/o ensanchado alcance o supere los 10 km en una longitud continua. b) Ferrocarriles 1. Construcción de líneas de ferrocarril para tráfico de largo recorrido. 2. Ampliación del número de vías de una línea de ferrocarril existente en una longitud continuada de más de 10 km. Grupo 9. Otros proyectos a) Los siguientes proyectos cuando se desarrollen en Espacios Naturales Protegidos, Red Natura 2000 y Áreas protegidas por instrumentos internacionales, según la regulación de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad:... 16. Construcción de autopistas, autovías y carreteras convencionales de nuevo trazado. b) Cualquier proyecto que suponga un cambio de uso del suelo en una superficie igual o superior a 100 ha.
EIA simplificada (Anexo II)	Grupo 7. Proyectos de infraestructuras c) Construcción de vías ferroviarias y de instalaciones de transbordo intermodal y de terminales intermodales de mercancías (proyectos no incluidos en el anexo I). f) Tranvías, metros aéreos y subterráneos, líneas suspendidas o líneas similares de un determinado tipo, que sirvan exclusiva o principalmente para el transporte de pasajeros. i) Construcción de variantes de población y carreteras convencionales no incluidas en el anexo I. j) Modificación del trazado de una vía de ferrocarril existente en una longitud de más de 10 km. Grupo 9. Otros proyectos. m) Cualquier proyecto que suponga un cambio de uso del suelo en una superficie igual o superior a 50 ha. Grupo 10. Los siguientes proyectos que se desarrollen en Espacios Naturales Protegidos, Red Natura 2000 y Áreas protegidas por instrumentos internacionales, según la regulación de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. c) Cualquier proyecto no contemplado en el presente anexo II que suponga un cambio de uso del suelo en una superficie igual o superior a 10 ha.

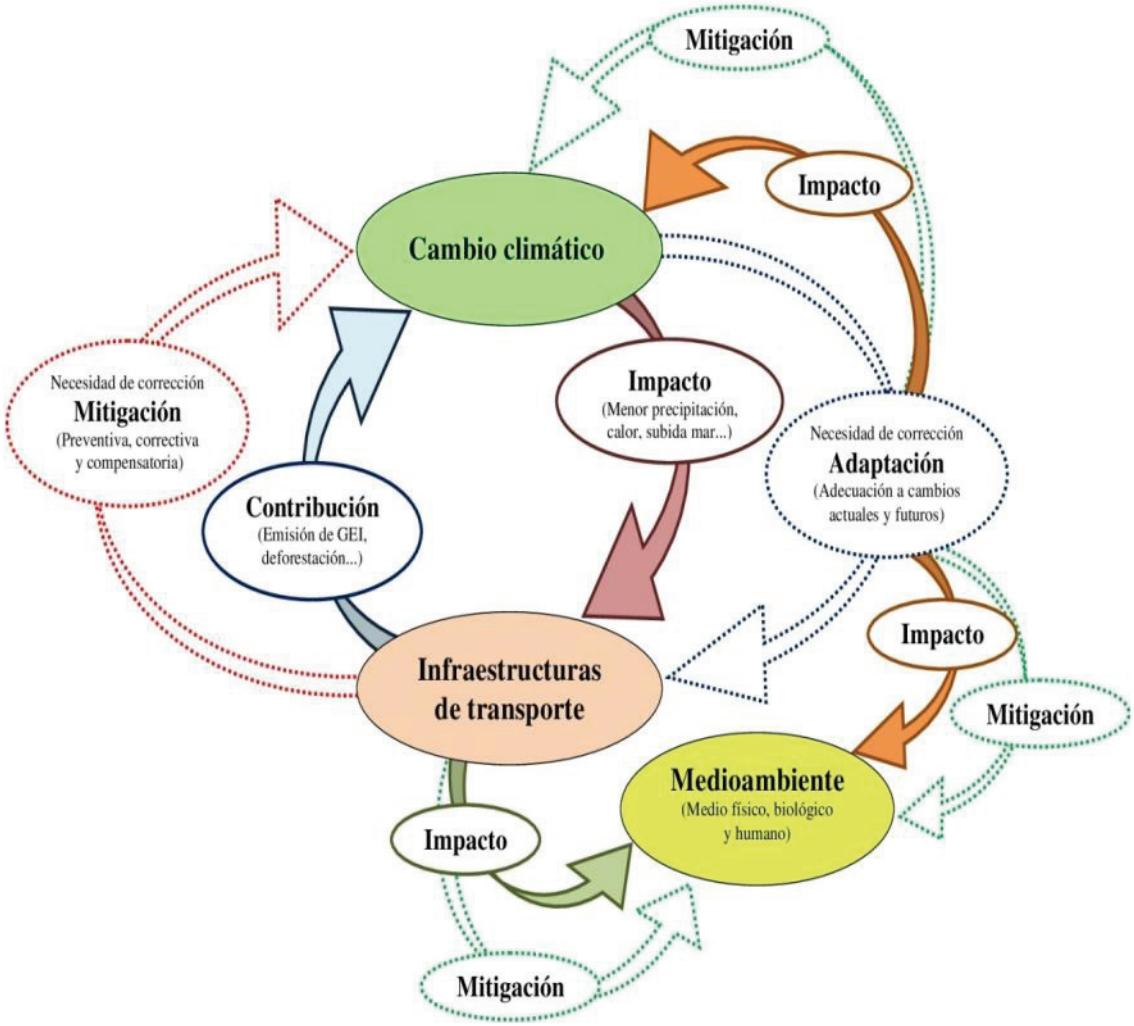
Fuente: Elaborado a partir de datos de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental (BOE 2013)

2.4. Infraestructuras de transporte, cambio climático y EIA

Las infraestructuras lineales de transporte y el cambio climático tienen una relación recíproca, siendo ambos factores causantes y receptores de impactos. Las infraestructuras contribuyen al cambio climático, sobre todo por las emisiones de GEI del tráfico, pero a su vez, el cambio climático genera nuevos escenarios que pueden afectar a las infraestructuras. Ambos aspectos, infraestructuras y clima, interactúan entre sí comportándose como acción causante de impactos y como factor que los soporta. Esto da lugar a su vez a una doble necesidad de medidas, de mitigación para paliar los impactos de las infraestructuras sobre el cambio climático, y de adaptación, para paliar los efectos del cambio climático en las infraestructuras.

Surgen así dos grandes enfoques, la contribución al cambio climático y su mitigación por una parte, y los impactos del cambio climático y la adaptación a ellos por otra, a lo que se podrían sumar los impactos de la propia adaptación (Figura 16).

Figura 16 Relación entre infraestructuras de transporte y cambio climático



Fuente: Elaboración propia

La mitigación y la adaptación han sido vistas como "imágenes especulares" (Yohe 2001) o sustituibles (Buob & Stephan 2011). Esto llevó a que las políticas climáticas se centraran en la mitigación (Biesbroek et al. 2010), ya que la adaptación era vista como un sustituto "perverso" de la mitigación, al evitar la prevención, en lugar de un elemento central del problema global (Adger et al. 2005a, Klein 2011, Hallegatte 2011), que se utilizaba porque sus beneficios eran locales y tangibles, frente a los beneficios globales pero menos tangibles de la mitigación (Wilbanks et al. 2007, Klein 2011).

Sin embargo, hay realidades que no se pueden ignorar, como que el clima está cambiando, y va a seguir haciéndolo en mayor o menor medida, y que hay regiones que sufren ya sus efectos, requiriendo actuaciones (Pielke et al. 2007, Klein 2011). Actualmente, tanto la mitigación como la adaptación son ampliamente aceptadas como acciones interrelacionadas para abordar el cambio climático, con muchas posibilidades de combinación (Klein et al. 2005, Warren et al. 2012).

Si se profundiza más, se detecta que las medidas de adaptación, que resuelven los impactos del cambio climático, a su vez pueden producir nuevos impactos ambientales, sobre la biodiversidad, el medio humano o incluso contribuir al cambio climático.

Se parte por tanto de cinco aspectos esenciales que deben ser considerados al estudiar la relación entre infraestructura de transporte y cambio climático: (i) la forma en que contribuyen las infraestructuras al cambio climático; (ii) las medidas que se pueden abordar para mitigar esa contribución; (iii) la forma en que el cambio climático incide sobre las infraestructuras; (iv) las medidas de adaptación para minimizar los efectos negativos del cambio climático; y (v) los impactos ambientales que se pueden derivar de esas medidas de adaptación.

Hasta la década de 1970 los aspectos ambientales no entraban de forma sistemática en la toma de decisiones sobre nuevos proyectos y desarrollos. El establecimiento de la EIA, como herramienta para incorporar esos aspectos ambientales al proceso de decisión, se ha ido extendiendo a la mayor parte de países del mundo, y es en la actualidad uno de los instrumentos clave en la protección del medio ambiente. Sin embargo, el cambio climático, pese a ser un problema ambiental de primer orden, no ha llegado a la EIA hasta hace apenas unos años. El primer antecedente es un borrador de directrices sobre cambio climático y EIA elaborado en Estados Unidos en 1997, que no llego a aprobarse. Canadá, país pionero en la materia, aprobó una breve guía en 2003, y la UE otra guía excesivamente generalista una década después. Solo a partir de 2010 el cambio climático comienza a incluirse en los congresos sobre EIA. Esta falta de relación puede deberse a un desarrollo de la ciencia y política del cambio climático alejada del ámbito de la EIA, y a su elevada incertidumbre inicial. Christopher (2008) considera probable que gran parte de la resistencia al uso de la EIA como medio para hacer frente al cambio climático sea un "choque de lo nuevo". Ha sido preciso que ambas disciplinas tuvieran madurez para que se entendiera la necesidad de integrarlas.

Las infraestructuras lineales de transporte, y sobre todo las carreteras, son un sector esencial en cuanto a su contribución al cambio climático, exigiendo un adecuado estudio de su contribución, así como el planteamiento de medidas de mitigación, para cumplir con las metas sobre cambio climático asumidas por España, y de adaptación para garantizar el futuro servicio de estas infraestructuras.

La EIA es un procedimiento conocido y solvente para incorporar los aspectos ambientales a la toma de decisiones, y entre ellos los referidos al cambio climático, y la práctica totalidad de infraestructuras lineales de transporte están obligadas a someterse a él, de acuerdo con la normativa. Es necesario superar las carencias pasadas, y afrontar en el futuro la incorporación de los cinco aspectos esenciales, contribución al cambio climático, mitigación, impactos del cambio climático, adaptación e impactos de la adaptación dentro de la EIA, no solo de forma simbólica, sino una de manera efectiva, para que pueda ser tenido en cuenta en la toma de decisiones.

3 Consideración del cambio climático en la evaluación de impacto ambiental

Objetivos del capítulo

El primer paso para abordar la consideración del cambio climático en la EIA es analizar el estado de la cuestión, a nivel global, abarcando todos los tipos de proyectos sometidos a este procedimiento, para determinar su grado de integración, y la situación concreta de las infraestructuras de transporte con respecto a otros sectores.

En una primera parte de este capítulo se analiza la consideración del cambio climático en la EIA a nivel internacional, consultando literatura académica y gris (claramente dominante en la materia) de todos aquellos países y regiones que están prestando alguna atención a este tema, y sobre todo de los más avanzados como Canadá, Estados Unidos y, a cierta distancia, la Unión Europea. Este análisis, esencial como aproximación al problema de estudio, es extenso, por lo que se ha incluido como un anexo (Anexo 1), dejando en el capítulo un resumen de los aspectos más relevantes.

Establecido el marco internacional, el siguiente objetivo es determinar, con un mayor grado de detalle, la consideración del cambio climático en la evaluación ambiental en España, aspecto no tratado hasta el momento. Para ello se analizan, por medio de las declaraciones de impacto ambiental, todos los procedimientos de EIA llevados a cabo por la Administración General del Estado desde el inicio de su aplicación, en 1989, hasta finales del año 2014. Este análisis permite determinar el grado de consideración que ha tenido el cambio climático en la EIA, que es muy escaso, sobre todo en las infraestructuras lineales de transporte pese al enorme desarrollo que han tenido las carreteras y ferrocarriles en estos casi tres decenios.

Los resultados de esta investigación, tanto las conclusiones a nivel internacional como la situación concreta de España, se han publicado en la revista *Environmental Impact Assessment Review* (Enríquez de Salamanca et al. 2016a).

El capítulo concluye con una discusión global y conclusiones sobre la consideración del cambio climático en la EIA, y las posibilidades de actuación para mejorar la situación actual.

Publicaciones

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016a. Consideration of climate change on environmental impact assessment in Spain. *Environmental Impact Assessment Review* 57: 31–39.

3.1. Consideraciones generales

El cambio climático es un problema global sobre el que existe una certeza científica creciente, gracias a una comprensión de sus causas, impactos y consecuencias cada vez más precisa. Muchos planes sometidos a EAE y proyectos sometidos a EIA están relacionados con el cambio climático, contribuyendo o viéndose afectados por él.

La EA, como herramienta para incorporar las consideraciones ambientales en la toma de decisiones, tiene un gran potencial para analizar la influencia de los planes y proyectos sobre el cambio climático, y viceversa, como los posibles escenarios derivados del cambio climático pueden afectar a estos planes y proyectos.

La conciencia sobre la necesidad de incorporar el cambio climático a la EIA es bastante reciente. A lo largo de la década de 1990 se fue aceptando cada vez más la importancia de considerar las implicaciones del cambio climático en los proyectos, con diferentes enfoques para la integración de estas consideraciones en la EIA (Craik 2010).

En la actualidad los aspectos relacionados con el cambio climático reciben una creciente atención, aunque pocos países tienen aún una experiencia relevante en su incorporación a la evaluación ambiental.

Una muestra de este creciente interés es el Simposio sobre Cambio Climático y Evaluación de Impacto celebrado en 2010 por la Asociación Internacional de Impacto Ambiental (IAIA), momento a partir del cual, el cambio climático ha sido un tema recurrente en muchos congresos y conferencias sobre EIA.

Sin embargo, a pesar de este creciente, y reciente, interés por la incorporación del cambio climático a la EIA, los estudios sobre cómo se está haciendo en la práctica son escasos, limitados a unos pocos países, entre los que no se cuenta España. Además, aunque han ido apareciendo progresivamente guías y directrices sobre esta materia, en general son documentos muy genéricos, que se limitan a establecer condiciones generales, como la necesidad incluir en la EIA tanto la contribución al cambio climático y la mitigación como los impactos del cambio climático en los proyectos y la adaptación.

Cualquier esfuerzo para analizar y comprender la consideración del cambio climático en la EIA debe pasar necesariamente por un análisis del estado de la cuestión, primero a nivel internacional, centrado sobre todo en los países más avanzados en la materia, y luego a nivel nacional, considerando los distintos sectores productivos, y prestando especial atención a las infraestructuras de transporte.

3.2. Análisis de la situación internacional

El análisis completo de la situación internacional, debido a su extensión, se incluye en el Anexo 1 de esta tesis. Actualmente están recibiendo una creciente atención los aspectos del cambio climático en la EA, pero pocos países tienen una experiencia significativa. Algunos países han avanzado significativamente en los últimos años (Tabla 7), siendo Canadá posiblemente el más puntero (Agrawala et al. 2010).

Tabla 7 Principales guías sobre cambio climático y evaluación ambiental

País		Organismo responsable de la guía	Referencia a las guías
Canadá		*Canadian Environmental Assessment Agency*	CEAA (2003)
Estados Unidos		*Council on Environmental Quality*	CEQ (2010)
Unión Europea		Comisión Europea	EC (2013c, d)
Australia	Australia Occidental	*Environmental Protection Authority*	EPA (2010)
	Territorio del Norte	*Northern Territory Government*	NT (2009)
Caribe y el Pacífico Sur		CARICOM - SPREP	CARICOM-SPREP (2004)

Fuente: Elaboración propia

La Agencia Canadiense de Medio Ambiente (CEAA) tiene una guía de integración del cambio climático en la EIA (CEAA 2003), basada en un informe previo (Lee 2001), pero la normativa de EIA (CEAA 2012) no incluye requerimientos específicos. Tras analizar la efectividad de las EIA realizadas por la CEAA, Hazell (2010) concluye que falla la adecuada consideración de las emisiones de GEI. Stinson (2010) recomienda mejorar y promover el uso de esa guía, proponer umbrales de significancia y cambios legislativos, y considera que la EIA de proyectos es más apropiada para determinar la adaptación que para reducir emisiones de GEI. Ohsawa & Duinker (2014) analizan la guía de la CEAA, citada en más de la mitad de estudios examinados, concluyendo que la evaluación de emisiones de GEI y la propuesta de medidas de mitigación en la EIA son prácticas bien establecidas en Canadá.

En Estados Unidos el Consejo de Calidad Ambiental (CEQ) elaboró un borrador de directrices en 1997, actualizado en 2010 (CEQ 1997, 2010), sobre consideración de los efectos del cambio climático de acuerdo con la NEPA, que aunque no son vinculantes están siendo consideradas por las Agencias Federales (Woolsey 2012), aunque los impactos evaluados y la metodología varían mucho entre ellas. Las directrices proponen analizar las emisiones directas e indirectas de GEI cuando se prevea superar 25 000 t CO_2-eq año, o menos en proyectos de larga duración; no implica que ese sea el umbral de impactos significativos, sino un indicador de cuando hacer un análisis detallado. Pyke & Batten (2008) sugieren que el análisis de los efectos de los proyectos sobre el calentamiento global debería ser un parte obligatoria en toda EIA desarrollada de acuerdo la NEPA, que proporciona mecanismos y autoridad para su inclusión sin necesidad de indicarlo expresamente. Smith (2010) indica que las

emisiones de GEI son precisamente el tipo de impacto acumulativo que exige analizar la NEPA. Desde 2007 Massachusetts comenzó a requerir que los proyectos cuantificasen las emisiones de GEI e identificasen medidas de mitigación, y California reconoció que el cambio climático debía tenerse en cuenta en la EA (Pyke & Batten 2008).

Los Libros Verde y Blanco de adaptación al cambio climático en Europa (EC 2007, 2009) proponen su incorporación a las Directivas de EIA y EAE, lo que ya se ha hecho con la primera pero aún no en la de EAE. La Comisión Europea ha publicado dos guías sobre integración del cambio climático y biodiversidad en la EIA y la EAE (EC 2013c, 2013d). La Agencia Medioambiental del Reino Unido tiene guías sobre cambio climático, planificación y EAE (EA 2008, 2011) y el Instituto de Gestión y Evaluación Ambiental (IEMA) documentos sobre cambio climático y EA (IEMA 2010a, 2010b).

En Reino Unido, Hamada (2008) señalaba que aunque se tenía en cuenta el cambio climático en la EIA no influía en la toma de decisiones, porque solo se incluían observaciones generales. Yi & Hacking (2012) analizaron la consideración del cambio climático en proyectos de desarrollo urbano, concluyendo que no se abordaba adecuadamente, carecía de rigor científico y fallaba en la evaluación de emisiones de GEI e impactos del cambio climático. Hands & Hudson (2016) señalan la escasa atención a mitigación y adaptación en la EIA de proyectos de transporte, y recomiendan elaborar directrices, un cambio de comportamiento de los profesionales de la EIA y una consideración más holística de las cuestiones relacionadas con el cambio climático.

En Alemania la consideración del cambio climático es habitual en la EAE pero menos en la EIA (Dr. Ritter, com. pers.). Helbron et al. (2011) sugieren indicadores para incluir el cambio climático en la planificación territorial y Wende et al. (2012) analizan la consideración de los impactos del cambio climático en la EAE de planes de uso del territorio en Sajonia y el Este de Inglaterra. En Dinamarca, Larsen (2014) analiza proyectos de energías renovables y destaca el énfasis en los impactos positivos, y la casi nula consideración de la adaptación. En Austria y Alemania, Jiricka et al. (2016) concluyen que los impactos del cambio climático y la adaptación tienen muy poca consideración. La Comisión Holandesa para la Evaluación Ambiental (NCEA) establece que se debe prestar atención a la mitigación en actuaciones que contribuyan significativamente a las emisiones de GEI (Draaijers & van der Velden 2009).

En Australia Occidental la guía para elaborar EsIA incluye las emisiones de GEI como factor a evaluar, para su minimización y compensación (EPA 2010). Sok (2014) destaca que el principal aspecto analizado en este territorio son las emisiones de GEI, de manera discrecional y con diferentes criterios, y propone directrices y formación junto a un mayor uso de la EAE para considerar el cambio climático. El Territorio de la Capital Australiana (ACT 2012) exige evaluar los impactos del cambio climático en las propuestas políticas. El Gobierno del Territorio del Norte tienen una guía (NT 2009) dedicada a la consideración de las emisiones de GEI y el cambio climático en la EIA.

En China la integración del cambio climático se hace principalmente en la EAE, y presenta problemas por la falta de regulaciones, estándares, criterios y experiencia (Chang & Wu 2013). El tema que más atención recibe es el consumo de energía y las emisiones de GEI. Li et al. (2013) proponen mecanismos para considerar el cambio climático en la EAE y Deng & Wang (2014) reclaman indicadores con el mismo propósito. En Corea del Sur la evaluación de las emisiones de GEI en los EsIA no es un requisito legal, pero el comité de *scoping* puede decidir su inclusión (Yi & Hacking 2011). En Camboya el cambio climático se ha considerado en algunos EsIA, pero generalmente solo se menciona, sin un mayor análisis (Sok 2014).

Kamau & Mwaura (2013) estudian la consideración de la adaptación en los EsIA en Kenia y concluyen que son débiles en escenarios predictivos y posibles impactos. Gilder et al. (2011) indican que la mitigación y adaptación en Sudáfrica se han tenido en cuenta en algunos procedimientos de EIA, y recomienda su exigencia en la legislación; existió una enmienda en 2008 pero no se incluyó en la ley de EIA de 2010.

Los lineamientos de la UICN para la aplicación de la EAE en Centroamérica (UICN 2007) incluyen recomendaciones para la consideración del cambio climático. La Comunidad del Caribe (CARICOM) y el Programa Regional de Medioambiente del Pacífico Sur (SPREP) tienen una guía de integración de la adaptación al cambio climático en la EIA en el Caribe y el Pacífico Sur (CARICOM-SPREP 2004) que propone incluir el cambio climático en la definición de la EIA, aporta criterios para la identificación de impactos significativos y directrices para la preparación de los EsIA.

Sok et al. (2011) estudian la incorporación del cambio climático en la EIA en sus diferentes fases (*screening*, *scoping*, participación pública, evaluación y aprobación y ejecución y seguimiento) a través una encuesta a profesionales de distintos países. En todos los casos se apunta como prioritaria la necesidad de regulaciones y directrices.

Watkins & Durning (2012) analizan 25 EsIA de Reino Unido, Estados Unidos, Canadá, Australia, Nueva Zelanda, Egipto, Hong Kong, India, Rusia, Georgia y Mauricio, de diferentes tipos de actuaciones, concluyendo que la terminología usada para describir las emisiones de GEI varía mucho, creando confusión y haciendo muy difíciles las comparaciones y los análisis de impactos acumulativos.

3.3. Análisis de la situación en España

3.3.1. Consideración del cambio climático en la normativa de EIA

Las primeras normas de EIA de la UE y España, la Directiva 85/337/CEE y el Real Decreto Legislativo 1302/1986, indicaban que la EIA debía identificar, describir y evaluar adecuadamente los efectos directos e indirectos de los proyectos sobre diferentes factores, entre ellos el clima, requisito que se ha mantenido en las posteriores

normas de EIA. El cambio climático estaba, por tanto, implícitamente incluido entre los factores ambientales a considerar, sin necesidad de indicarse específicamente.

La Ley 21/2013 de EA da un paso más, e incluye la obligación de considerar el cambio climático en la EA, anticipándose unos meses a la Directiva 2014/52/UE, que recoge el mismo requisito. La inclusión de esta obligatoriedad refuerza la necesidad de analizar y evaluar los efectos sobre el cambio climático, pero en realidad no era un paso imprescindible; los impactos asociados al cambio climático merece consideración en la EA, esté o no indicado de forma expresa en la normativa.

Una diferencia entre la Directiva comunitaria y la Ley española es que en la primera la consideración del cambio climático es solo obligatoria en la EIA y en España lo es tanto en la EIA como en la EAE. En la actualidad España tiene una de las leyes de EA más avanzadas del mundo en cuando a consideración del cambio climático, aunque esto no es acorde con la experiencia en la materia, como se discute posteriormente.

La Ley 21/2013 se anticipa a la Directiva 2014/52/UE en la inclusión del cambio climático; como señala en su preámbulo, la Ley introduce la obligación de tener en consideración el cambio climático aunque las directivas comunitarias no obligan a ello, pero con la previsión de que en breve será un mandato comunitario. Los apartados concretos donde la Ley 21/2013 se refiere al cambio climático son (Tabla 8):

Tabla 8 Referencias al cambio climático en la Ley 21/2013de evaluación ambiental

Artículo	Materia	Contenido
18	Solicitud de inicio EAE ordinaria	*"Los potenciales impactos ambientales tomando en **consideración el cambio climático**"*
29	Solicitud de inicio EAE simplificada	*"...las medidas previstas para prevenir, reducir y, en la medida de lo posible, corregir cualquier efecto negativo relevante en el medio ambiente de la aplicación del plan o programa, tomando en **consideración el cambio climático**".*
24	Análisis técnico del expediente de EAE	*"...el órgano ambiental realizará un análisis técnico del expediente, y un análisis de los impactos significativos de la aplicación del plan o programa en el medio ambiente, que tomará en **consideración el cambio climático**".*
35	Contenido del EsIA	*"...evaluación y, si procede, cuantificación de los efectos previsibles directos o indirectos, acumulativos y sinérgicos del proyecto sobre... **el cambio climático**...".*
40	Análisis técnico del expediente de EIA	*"...se analizará, en particular, cómo se ha tenido en consideración el resultado del trámite de información pública, de las consultas a las Administraciones públicas afectadas y a las personas interesadas y, en su caso, el resultado de las consultas transfronterizas. Asimismo, se tendrá en **consideración el cambio climático**".*
45	Solicitud de inicio EIA simplificada	*"Una evaluación de los efectos previsibles directos o indirectos, acumulativos y sinérgicos del proyecto sobre... **el cambio climático**"*
Anejo IV	Contenido del estudio ambiental estratégico	*"Las características medioambientales de las zonas que puedan verse afectadas de manera significativa y su evolución teniendo en cuenta el **cambio climático** esperado en el plazo de vigencia del plan o programa;...", "Los probables efectos significativos en el medio ambiente, incluidos aspectos como... su incidencia en el **cambio climático**, en particular una evaluación adecuada de la huella de carbono asociada al plan o programa,... y la interrelación entre estos factores. Estos efectos deben comprender los efectos secundarios, acumulativos, sinérgicos, a corto, medio y largo plazo, permanentes y temporales, positivos y negativos;...", "Las medidas previstas para prevenir, reducir y, en la medida de lo posible, compensar cualquier efecto negativo importante en el medio ambiente de la aplicación del plan o programa, incluyendo aquellas para mitigar su incidencia sobre el **cambio climático** y permitir su adaptación al mismo".*

Fuente: Elaborado a partir de datos de la Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental (BOE 2013)

3.3.2. Consideración del cambio climático en los procedimientos de EIA

3.3.2.1. Objetivos

España es uno de los países más avanzados en cuando a la incorporación a su normativa de la obligatoriedad de considerar el cambio climático en la EA, por delante incluso de la UE o de países con larga experiencia en la materia como Canadá o Estados Unidos, que no lo han incorporado como exigencia legal. Sin embargo, esta avanzada situación normativa española no tiene un reflejo en la práctica de la EA.

Para determinar la consideración del cambio climático en la EIA en España se ha realizado un análisis de todas las declaraciones de impacto ambiental (DIA) emitidas por la Administración General del Estado, quien tiene la experiencia más prolongada en el tiempo en EIA, y que además es competente en las principales infraestructuras y los proyectos de mayor envergadura realizados en el país. Estos resultados han sido publicados en Enríquez de Salamanca et al. (2016a).

3.3.2.2. Metodología

El estudio se basa en el análisis de todas las DIA emitidas por la Administración General del Estado desde el inicio del procedimiento de EIA en España –la primera DIA, referida a una autovía, se publicó en 1989– hasta finales del año 2014. Esta metodología ha sido utilizada anteriormente en España en investigaciones sobre EIA, referidas a compensación ambiental (Villarroya & Puig 2010, 2013, Carrasco et al. 2013, Enríquez de Salamanca & Carrasco 2013), impacto social (Pardo 1994), presas (Pizarro & Soca 2001), desalinizadoras (Fuentes-Bargues 2014) o medidas correctoras en carreteras (Gómez 2007, Aizpurúa 2010).

La DIA es el documento público por el cual el órgano ambiental detalla los trámites administrativos seguidos dentro del procedimiento de EIA, los principales impactos identificados y las medidas de mitigación propuestas, así como, en su caso, las condiciones de aplicación al proyecto. Aparte del EsIA es el principal documento sobre la EIA, con carácter vinculante, y el único público.

Aunque la estructura de las DIA ha variado a lo largo de los años, hay aspectos esenciales que no se han modificado: la descripción del procedimiento, los impactos ambientales considerados, las medidas de mitigación, las opiniones o alegaciones recibidas en los periodos de consultas previas e información pública y las condiciones al proyecto, sean de diseño o medidas de mitigación (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2010, Villarroya & Puig 2013, Fuentes-Bargues 2014).

El análisis de las DIA es menos exhaustivo que el de los EsIA, pero aún así permite conocer los impactos más significativos de los proyectos y cómo han sido considerados. Existe la posibilidad de que algún impacto analizado en los EsIA no se

cite en la DIA; se asume, como los autores anteriormente citados, que el grado de imprecisión es muy bajo e inevitable, y que no invalida las conclusiones del estudio, pese al el riesgo de que algunos impactos queden infrarrepresentados.

Al ser resoluciones públicas, es posible acceder a las DIA del Estado, a diferencia de los EsIA, cuya consulta una vez pasado el periodo de información pública es muy difícil, si no imposible. Esta metodología permite analizar un gran número de casos (1 713). Además, las DIA incluyen información sobre el procedimiento de EIA que no figuran en el EsIA, como las opiniones y alegaciones realizadas en las fases de consultas previas e información pública, así como las respuestas dadas por el promotor.

De entre todas las DIA analizadas, se han seleccionado aquellas que incluyen alguna referencia al cambio climático, en cualquier etapa de la EIA, y hecha por cualquier agente, aunque no estén incluidas en el EsIA. Se han utilizado palabras clave para detectar referencias en las búsquedas, como "clima", "cambio climático", "efecto invernadero", "gases de efecto invernadero", "gases", "CO_2", "carbono", "emisiones" o "calentamiento".

Para aquellas DIA que contienen alguna referencia al cambio climático se ha recopilado información sobre: (i) resolución de aprobación (título, fecha y BOE); (ii) Promotor, detallando si es público o privado; (iii) Tipo de proyecto; (iv) Tipo de consideración del cambio climático, citado o evaluado; (v) Tipo de impactos: contribución o efectos del cambio climático sobre el proyecto; (vi) Agentes que citan el cambio climático (promotor, órgano ambiental, ONG, etc.); (vii) Medidas o condiciones establecidas en la DIA en relación al cambio climático.

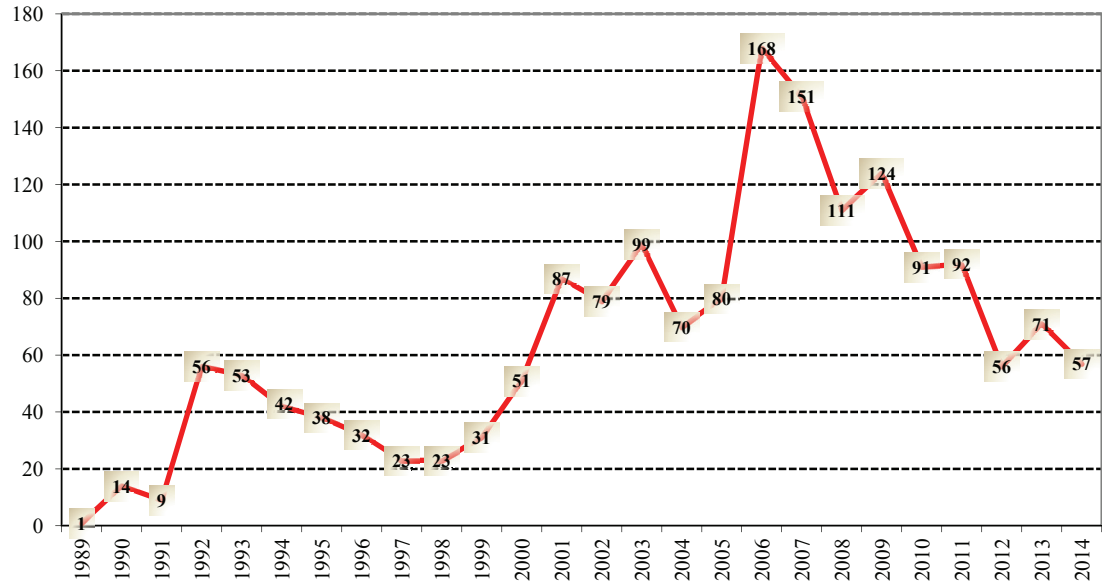
Desafortunadamente, no son aplicables metodologías de otros estudios consultados sobre consideración del cambio climático, por la disparidad de información disponible. Por ejemplo, la *Columbia Law School* preparó una base de datos sobre impactos relacionados con el cambio climático basada en 227 EsIA entre 2009 y 2011 (Woolsey 2012), usando para ello las categoría establecidas por Gerrard (2008), pero apenas dos de ellas son aplicables al caso español. Como señala posteriormente, en más de la mitad de los casos el cambio climático únicamente se cita, y en el resto a menudo hay una simple cuantificación de emisiones de CO_2, no utilizada para nada en la EIA.

3.3.2.3. Resultados

Evolución de los procedimientos de EIA

Un primer resultado es la evolución global del número de procedimientos de EIA en España desde su inicio en 1989 hasta finales de 2014 (Figura 17).

Figura 17 Número de DIA del Estado publicadas entre 1989 y 2014



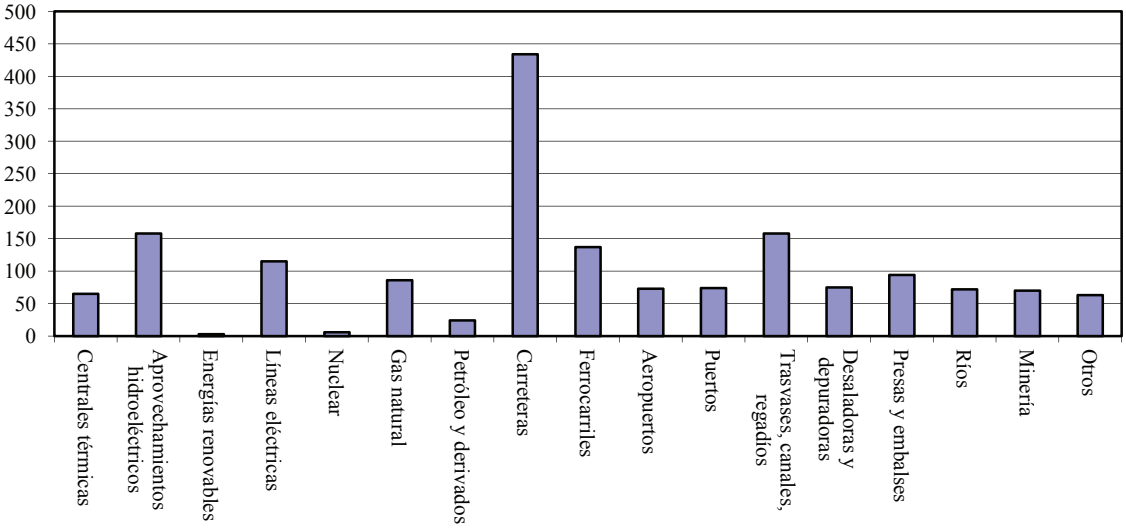
Fuente: Elaboración propia

La primera DIA elaborada en España se publicó en 1989. En 1990 y 1991 se resuelven pocos procedimientos, produciéndose un incremento en 1992, al que sigue un declive hasta 1998. A partir de 1999 comienza un fuerte crecimiento, que se mantiene hasta 2006, con declives en 2002 y 2004, año de esplendor económico en España. En 2007 comienza la crisis económica y, en paralelo, se desploma el número de DIA, ya que muchos proyectos sometidos a EIA implican inversiones del Estado, que se recortan drásticamente. Las DIA tienen caducidad y si no existen recursos financieros para acometer las obras, no tiene sentido someter los proyectos a EIA. La caída de DIA hasta 2014 ha sido mantenida, pasando a niveles similares a la década de 1990.

Entre los grupos de proyectos evaluados dominan las infraestructuras de transporte (43%), algo lógico ya que son competencia del Estado la Red de Carreteras del Estado, los ferrocarriles de largo recorrido, la mayoría de aeropuertos y los puertos. Sigue en importancia la gestión del agua, en su mayor parte también competencia del Estado. Los proyectos energéticos suponen algo más de la cuarta parte. La minería es competencia de las Comunidades Autónomas, pero el Estado mantiene competencias en ciertos casos, lo que justifica un 4% de las DIA. Dentro del grupo "otros proyectos" se incluyen actuaciones en la costa o proyectos que no entran en las categorías anteriores.

Por tipos de proyecto (Figura 18) dominan las carreteras (25%) seguidas de trasvases, canales y regadíos y aprovechamientos hidroeléctricos (16% en ambos casos), ferrocarriles (14%) y distribución de energía, líneas eléctricas y subestaciones (12%).

Figura 18 Declaraciones de impacto ambiental (DIA) por tipo de proyecto entre 1989 y 2014

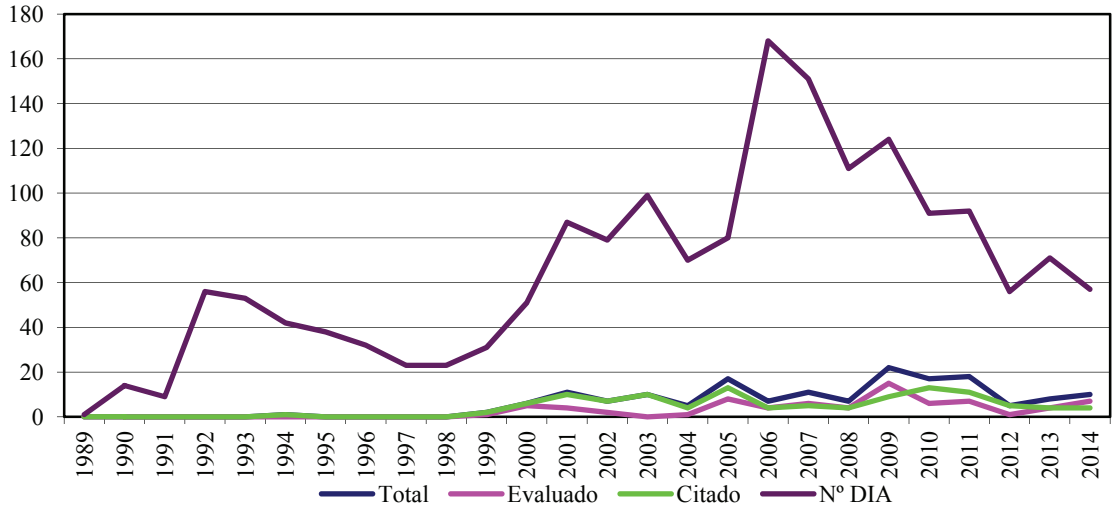


Fuente: Elaboración propia

Tipo de consideración del cambio climático

En un primer periodo, entre 1989 y 1998, las DIA no contienen ninguna referencia al cambio climático, con excepción de una central eléctrica de 1994. En 1999 aparecen más referencias, pero sin una tendencia clara (Figura 19). Las mayores tasas de consideración se dan en 2005, 2000 y 2010 en valor relativo, o en 2009, 2005 y 2010 en valor absoluto. Los cambios temporales en la consideración del cambio climático están más relacionados con el tipo de proyectos dominante cada año, especialmente el número de centrales térmicas evaluadas. No se detecta una tendencia que pueda asociarse a una mejora progresiva en la calidad de los estudios.

Figura 19 Tipo de consideración del cambio climático (numero de DIA por año)

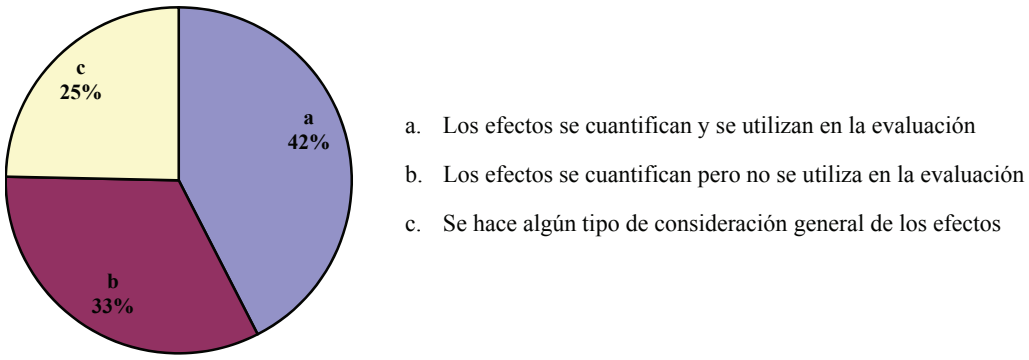


Fuente: Adaptado de Enríquez de Salamanca et al. (2016a)

De media el cambio climático se considera en el 14% de los casos. Hay diferentes maneras de considerar el cambio climático en los procedimientos de EIA, pero principalmente se utiliza simplemente como argumento para defender o atacar el proyecto, y pocas veces se tiene en cuenta en la EIA. Se han establecido dos tipos de consideración del cambio climático, evaluado o citado.

- **Se evalúan los efectos asociados al cambio climático.** Se considera que entra en esta categoría cuando a lo largo del procedimiento de EIA se han cuantificado o se han evaluado de alguna forma los efectos del cambio climático, sea la contribución o los impactos del cambio climático en el proyecto. Se establece tres subcategorías (Figura 20):

Figura 20 Forma de evaluación de los efectos asociados al cambio climático



Fuente: Adaptado de Enríquez de Salamanca et al. (2016a)

a) Los efectos se cuantifican y se utilizan en la evaluación. Los efectos son cuantificados, casi siempre por medio de las emisiones de GEI (particularmente CO_2), y se usan a menudo para comparar alternativas.

b) Los efectos se cuantifican pero no se utiliza en la evaluación. Los proyectos de esta categoría suelen incluir el cálculo de las emisiones de CO_2 pero no se utilizan para nada en la EIA.

c) Se hace algún tipo de consideración general de los efectos. En estas DIA se incluyen breves referencias al cambio climático, aunque ni tan vagas como en los casos en que se considera solo citado.

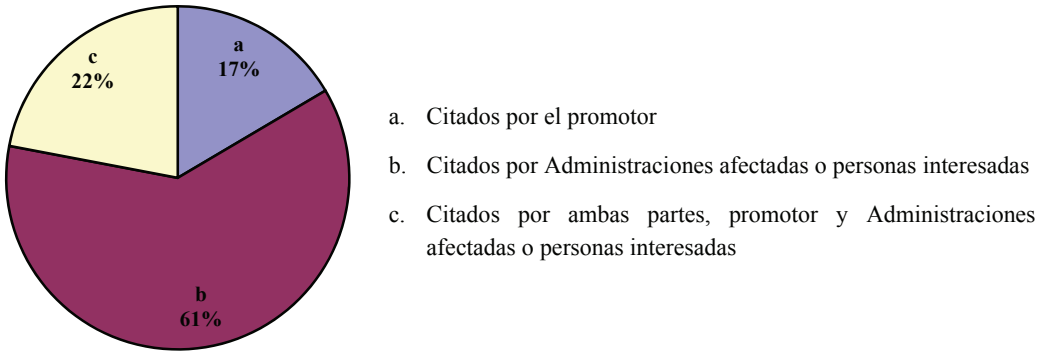
- **Se citan los efectos asociados al cambio climático, pero no se evalúan.** Se incluyen en esta categoría los casos en los que algún agente hace referencia al cambio climático durante el procedimiento de EIA, pero no hay una verdadera evaluación. No es una verdadera consideración del cambio climático, sino una simple preocupación o uso, a menudo tendencioso, por algún agente. Se proponen tres subcategorías según el agente que cita el cambio climático (Figura 21).

a) Citado por el promotor. El promotor suele citar el cambio climático como justificación del proyecto, en el EsIA o como respuesta a las consultas previas o la información pública. Es muy frecuente en aprovechamientos hidroeléctricos, donde el promotor alude a las ventajas de esta fuente de energía en referencia al cambio climático para justificar el proyecto.

b) Citado por otros agentes. Algún agente, diferente del promotor, cita el cambio climático en las consultas previas o la información pública. A menudo esos agentes son ONG ambientales oponiéndose al proyecto, o administraciones públicas indicando que se debería considerar la contribución al cambio climático en el EsIA. En la mayoría se trata de centrales térmicas, con fuerte rechazo social, y en menor medida en carreteras.

c) Citado por ambas partes. Es frecuente que el promotor y otras partes entre en una "batalla" dialéctica en el procedimiento de EIA, el primero para justificar los efectos positivos del proyecto en referencia al cambio climático, y las segundas (en general ONG ambientales) para mostrar su desacuerdo. También en este caso dominan las centrales térmicas.

Figura 21 Forma en que se citan los efectos asociados al cambio climático



Fuente: Adaptado de Enríquez de Salamanca et al. (2016a)

Tipo de impactos relacionados con el cambio climático

En función del tipo de impactos sobre el cambio climático considerados han sido definidas dos categorías:

- Contribución al cambio climático. Representan el 95% del total. El principal efecto evaluado o citado es la contribución al cambio climático derivado de las emisiones de GEI (generalmente CO_2).
- Efectos del cambio climático en el proyecto. Solo en un 5% de caso hay referencias a estos efectos. Un único proyecto, una presa, hace una verdadera evaluación, analizando los cambios en las aportaciones de agua en la cuenca asociados al cambio climático. En el resto de casos solo se cita la influencia.

Consideración del cambio climático por tipo de proyecto

Se han clasificado los proyectos en grupos y subgrupos, calculando el grado de consideración del cambio climático como la ratio entre el número de DIA donde se ha tenido en cuenta con respecto al total de proyectos sometidos a EIA (Tabla 9).

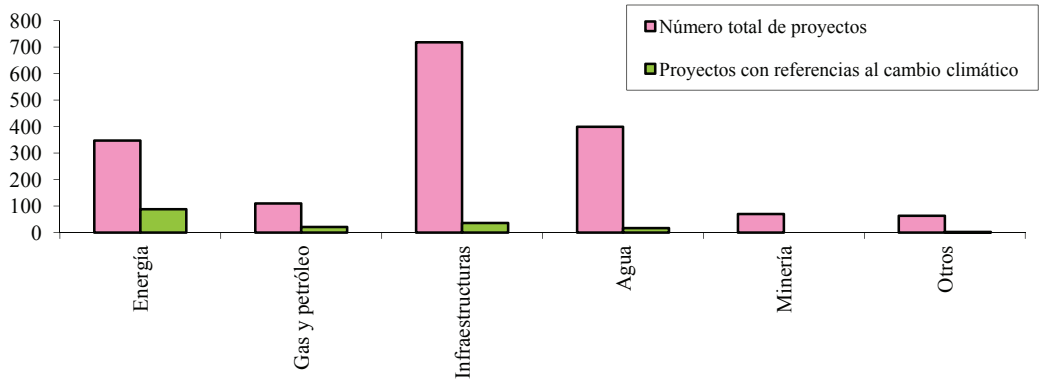
Tabla 9 Proyectos sometidos a EIA y grado y tipo de consideración del cambio climático

Tipo de proyecto (Grupo / **Subgrupo**)	Proyectos sometidos a EIA		DIA con referencias al cambio climático										
			Total			Cambio climático evaluado				Cambio climático citado			
	No.	%	No.	%		No.	%			No.	%		
				Abs[1]	Rel[2]		Abs[1]	Rel[2]	Rel[3]		Abs[1]	Rel[2]	Rel[3]
1. Generación y transporte de energía	**349**	**20,4**	**88**	**7,5**	**25,2**	**38**	**3,2**	**10,9**	**43,2**	**50**	**4,3**	**14,3**	**56,8**
a. Centrales térmicas	66	3,9	56	4,8	84,8	23	2,0	34,8	41,1	33	2,8	50,0	58,9
b. Hidroeléctricas	159	9,3	10	0,9	6,3	0	0,0	0,0	0,0	10	0,9	6,3	100,0
c. Energías renovables	3	0,2	2	0,2	66,7	0	0,0	0,0	0,0	2	0,2	66,7	100,0
d. Líneas eléctricas y subestaciones	115	6,7	20	1,7	17,4	15	1,3	13,0	75,0	5	0,4	4,3	25,0
e. Energía nuclear	6	0,3	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
2. Petróleo y gas	**110**	**6,4**	**21**	**1,8**	**19,1**	**13**	**1,1**	**11,8**	**61,9**	**8**	**0,7**	**7,3**	**38,1**
a. Gas natural (extracción, almacenamiento,transporte)	86	5,0	15	1,3	17,4	7	0,6	8,1	46,7	8	0,7	9,3	53,3
b. Petróleo y derivados (refinerías, almacenes)	24	1,4	6	0,5	25,0	6	0,5	25,0	100,0	0	0,0	0,0	0,0
3. Infraestructuras de transporte	**719**	**41,9**	**36**	**3,0**	**5,0**	**15**	**1,3**	**2,1**	**41,7**	**21**	**1,8**	**2,9**	**58,3**
a. Carreteras	434	25,3	12	1,0	2,8	1	0,1	0,2	8,3	11	0,9	2,5	91,7
b. Ferrocarriles	137	8,0	2	0,2	1,5	1	0,1	0,7	50,0	1	0,1	0,7	50,0
c. Aeropuertos, aeródromos y helipuertos	74	4,3	18	1,5	24,3	11	0,9	14,9	61,1	7	0,6	9,5	38,9
d. Puertos	74	4,3	4	0,3	5,4	2	0,2	2,7	50,0	2	0,2	2,7	50,0
4. Gestión del agua	**402**	**23,5**	**17**	**1,5**	**4,2**	**6**	**0,5**	**1,5**	**35,3**	**11**	**0,9**	**2,7**	**64,7**
a. Trasvases, canales, regadíos	159	9,3	7	0,6	4,4	2	0,2	1,3	28,6	5	0,4	3,1	71,4
b. Desalinizadoras y depuradoras	75	4,4	7	0,6	9,3	3	0,2	4,0	42,9	4	0,3	5,3	57,1
c. Presas y embalses	94	5,5	3	0,3	3,2	1	0,1	1,1	33,3	2	0,2	2,1	66,7
d. Ríos	74	4,3	0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,0	0,0
5. Minería	**70**	**4,1**	**0**	**0,0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**	**0**	**0,0**	**0,0**	**0,0**
6. Otros proyectos	**63**	**3,7**	**2**	**0,2**	**3,2**	**1**	**0,1**	**1,6**	**50,0**	**1**	**0,1**	**1,6**	**50,0**
Total	**1 713**	**100**	**164**	**14,0**	**14,0**	**73**	**6,2**	**27,9**	**44,5**	**91**	**7,8**	**28,8**	**55,5**

Abs[1]: Nº DIA / Total DIA. Rel[2]: Nº DIA / Nº Proyectos sometidos a EIA. Rel[3]: Nº DIA / Nº DIA con referencias al cambio climático. Fuente: Adaptado de Enríquez de Salamanca et al. (2016a)

Considerando los tipos de proyectos, el máximo nivel de consideración corresponde a la generación y transporte de energía, seguidos de los relacionados con petróleo y gas. Las infraestructuras de transporte tienen un bajo nivel de consideración, a pesar de ser un sector muy relacionado con el cambio climático. No hay ninguna consideración del cambio climático en DIA de minería, y es escaso en el resto de proyectos (Figura 22).

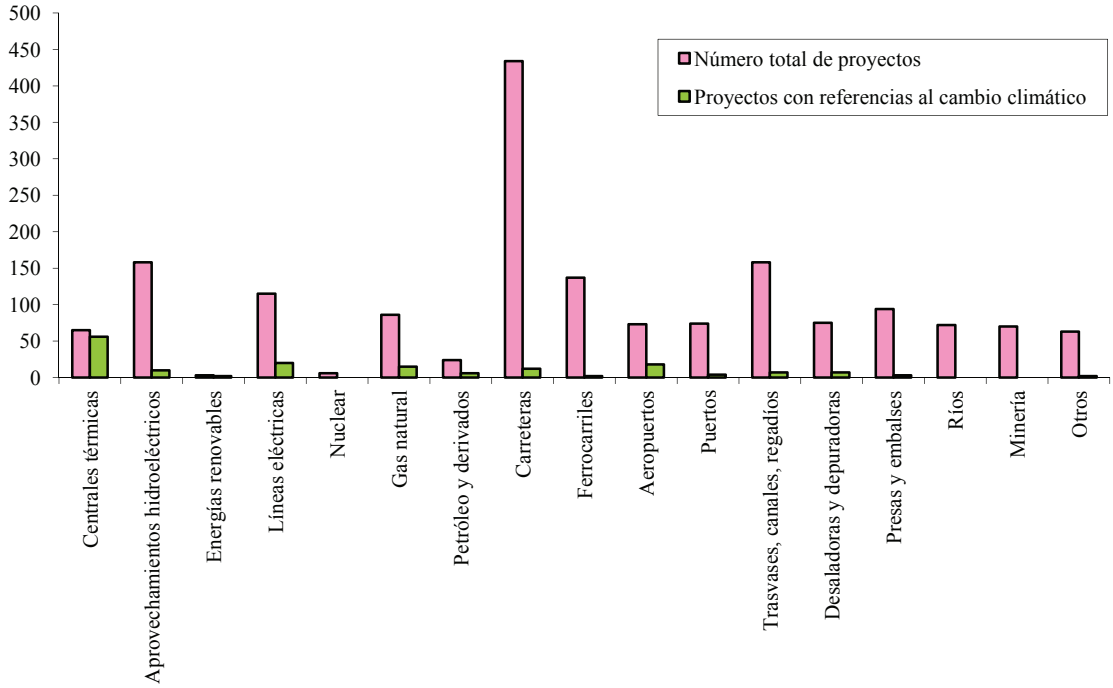
Figura 22 Grado de consideración del cambio climático por grupo de proyecto



Fuente: Elaboración propia

A nivel de subgrupos la máxima consideración se da en centrales térmicas, y es también elevado en las energías renovables, aunque generalmente como justificación de la idoneidad de los proyectos. Menor tasa de consideración tienen los proyectos relacionados con petróleo, aeropuertos, líneas eléctricas y gas, y aún menores en desalinización, depuradoras, aprovechamiento hidroeléctrico, puertos, trasvases, canales y regadíos, presas y embalses, carreteras y ferrocarriles. No hay ninguna consideración en proyectos de energía nuclear, minería o actuaciones en ríos (Figura 23).

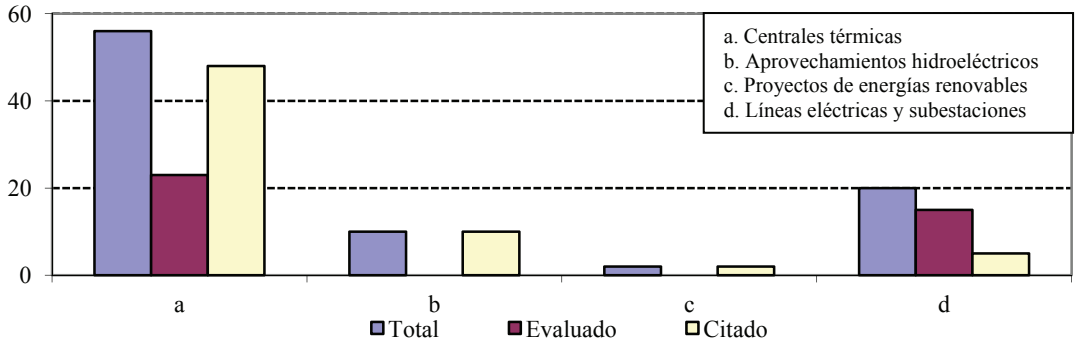
Figura 23 Grado de consideración del cambio climático por grupo de proyecto



Fuente: Elaboración propia

- **Generación y transporte de energía.** Una cuarta parte de las DIA incluyen referencias al cambio climático (Figura 24).

Figura 24 Consideración del cambio climático en la producción y transporte de energía



Fuente: Elaboración propia

a) Centrales térmicas. Prácticamente todas son centrales de ciclo combinado. Suponen un tercio de casos en los que se ha considerado el cambio climático, pero solo el 4% de proyectos sometidos a EIA. Provocan rechazo social por sus emisiones de contaminantes y GEI comparadas con energías renovables. Los promotores a menudo calculan las emisiones de contaminantes y CO_2 y las comparan con otros tipos de centrales, pero de forma sesgada al hacerlo con tecnologías más contaminantes y no con renovables. Con frecuencia ONG y municipios afectados aluden a la contribución al cambio climático, y el promotor responde destacando sus ventajas frente al carbón o gasoil.

b) Hidroeléctricas. El cambio climático se cita en una minoría de casos, principalmente por el promotor para justificar el proyecto. Con frecuencia estos proyectos han tenido DIA negativas debido a sus impactos sobre los ríos, por lo que el cambio climático se convierte en un argumento favorable para los promotores, siempre privados, para defender los proyectos. Las ONG ambientales suelen considerar insuficiente esta justificación.

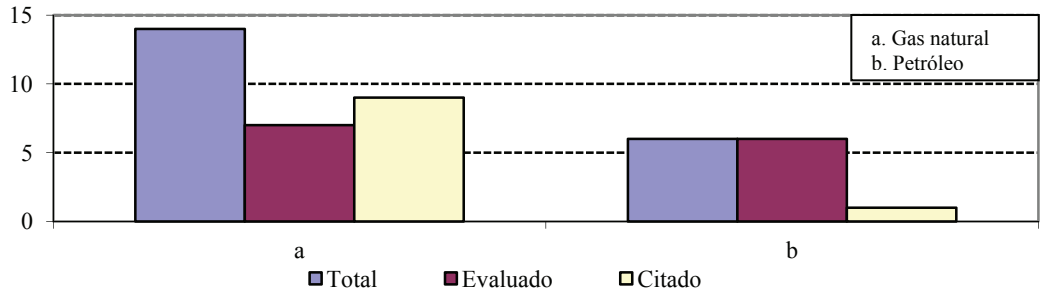
c) Energías renovables. Solo se han evaluado tres proyectos, y en dos de ellos el promotor cita el cambio climático como justificación. Aunque los parques eólicos y granjas solares han proliferado en España en las últimas décadas, en casi todos los casos la EIA es competencia autonómica, y no del Estado.

d) Líneas eléctricas y subestaciones. Menos de la quinta parte de casos consideran el cambio climático, que suele limitarse a citar la potencial emisión de SF_6, un GEI, durante el mantenimiento de los transformadores. En algunos casos las ONG argumentan que las líneas eléctricas contribuyen indirectamente al cambio climático al dar servicio a las centrales eléctricas.

e) Energía nuclear. Todos los proyectos son mejoras de centrales, sin ninguno de nueva construcción. Ninguna DIA tiene referencias al cambio climático.

- **Petróleo y gas.** Un 20% de DIA tiene referencias al cambio climático (Figura 25).

Figura 25 Consideración del cambio climático en proyectos de petróleo y gas



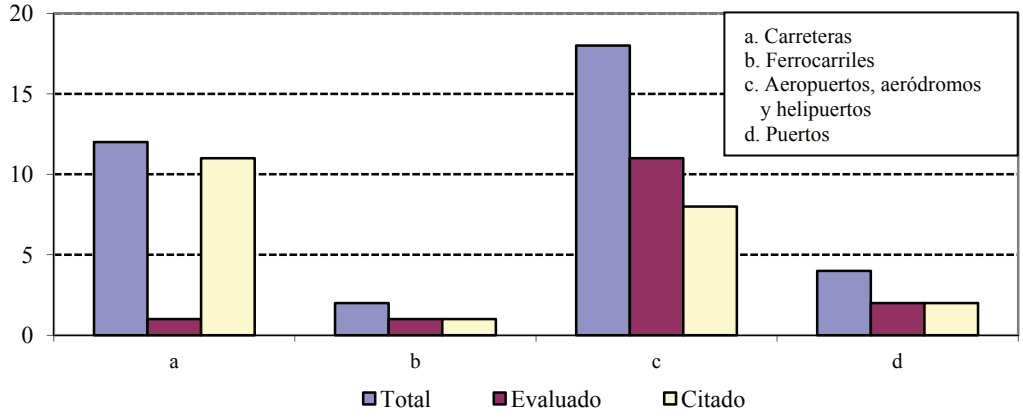
Fuente: Elaboración propia

a) Gas natural. Se incluyen proyectos de extracción, almacenamiento profundo o transporte (gasoductos) de gas natural así como estaciones de compresión y plantas de regasificación; menos de la quinta parte tiene referencias al cambio climático, y solo en la mitad de casos se evalúa. Las ONG ambientales citan a menudo la contribución al cambio climático para criticar estos proyectos.

b) Petróleo y derivados. Se incluyen proyectos de refinerías y de almacenamiento de productos derivados del petróleo (gasóleo). Una cuarta parte de los proyectos tiene referencias al cambio climático, en todos los casos una cuantificación de la contribución.

- **Infraestructuras de transporte.** Son los proyectos más habitualmente sometidos a EIA en el periodo estudiado, porque la Administración General del Estado es responsable de la Red de Carreteras del Estado, la mayor del país, la inmensa mayoría de ferrocarriles, los puertos y casi todos los aeropuertos. El cambio climático solo se considera en una minoría de casos, apenas el 5% (Figura 26).

Figura 26 Consideración del cambio climático en proyectos de infraestructuras de transporte



Fuente: Elaboración propia

a) Carreteras. Menos del 3% de DIA incluyen referencias al cambio climático, casi siempre argumentos en contra de la carretera. Solo el proyecto más reciente de los analizados incluye una evaluación de la contribución a cambio climático, mediante el cálculo de las emisiones de GEI en la construcción.

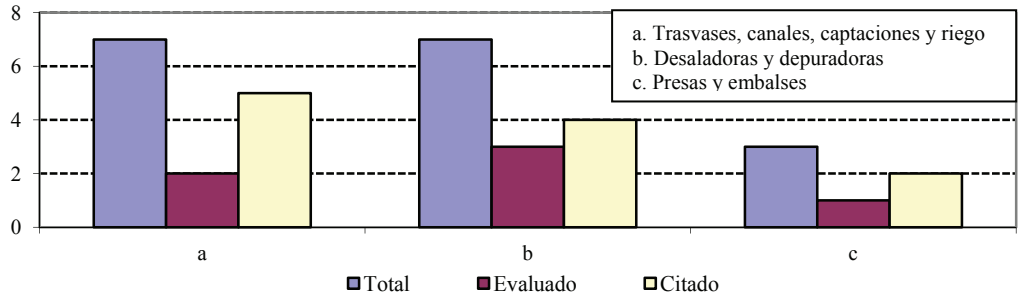
b) Ferrocarriles. También en este subgrupo la consideración del cambio climático es mínima, a pesar de que, por ejemplo, toda la red española de alta velocidad se ha desarrollado y evaluado durante el periodo analizado. Solo un proyecto (Cuadro 3, Anexo 2) incluye una verdadera evaluación, cuantificando la reducción de emisiones de CO_2 en cada alternativa como resultado de la captación de usuarios del vehículo privado.

c) Aeropuertos, aeródromos y helipuertos. La cuarta parte de los casos incluye referencias al cambio climático, la mayoría cálculos de las emisiones de CO_2, pero que no tienen ninguna utilidad en la evaluación.

d) Puertos. La consideración del cambio climático es escasa en este subgrupo. En la mitad de casos se evalúa, someramente, y en la otra mitad solo se cita.

- **Gestión del agua.** Solo un 4% de DIA tiene referencias al cambio climático. Dos tercios de los casos donde se citan posibles impactos del cambio climático sobre los proyectos están en este grupo (Figura 27).

Figura 27 Consideración del cambio climático en proyectos de gestión del agua



Fuente: Elaboración propia

a) Trasvases, canales, regadíos y captaciones. Hay una amplia gama de proyectos en esta categoría, principalmente regadíos y trasvases. Solo el 4,4% de casos incluyen referencias al cambio climático, casi siempre una simple cita.

b) Desalinizadoras y depuradoras. Cerca de la décima parte de las DIA, generalmente de desalinizadoras, tiene referencias al cambio climático, la mitad de veces evaluado y la otra mitad citado. En dos casos se utiliza como justificación para la compra de electricidad en lugar de la construcción de una central, pero sin ningún cálculo ni comparación de alternativas.

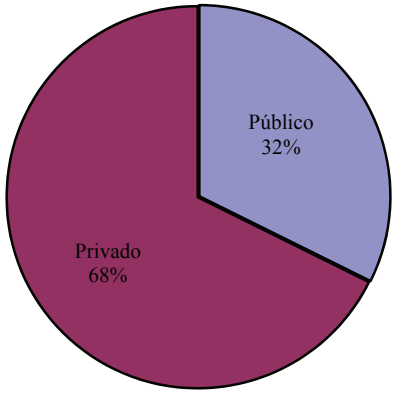
c) Presas y embalses. Solo tres de casi cien DIA tiene referencias al cambio climático, y en dos es una simple cita.

- **Minería.** Es generalmente competencia autonómica, excepto en casos especiales donde la autorización depende del Estado. Por eso, no hay muchos proyectos evaluados, de los cuales ninguno incluye referencias al cambio climático.
- **Otros proyectos.** Los proyectos de este grupo no se pueden encuadrar en las anteriores categorías. Dos DIA tienen referencias al cambio climático, una restauración ambiental donde se cita, y una cinta transportadora de materiales de excavación donde se analiza la contribución al cambio climático de las opciones.

Consideración del cambio climático según la naturaleza del promotor

De todas las DIA donde existe alguna consideración del cambio climático un tercio tienen promotores públicos y el resto privados (Figura 28). Este resultado no implica una mayor concienciación por parte de los promotores privados, sino que se debe a la relación entre tipo de proyecto y naturaleza jurídica del promotor. Los promotores públicos son responsables de la inmensa mayoría de infraestructuras de transporte y los proyectos de gestión del agua, mientras que los privados son mayoritariamente los responsables de los proyectos de producción y transporte de energía, petróleo y gas. En consecuencia, no es posible comparar el grado de consideración del cambio climático entre promotores públicos y privados para un mismo tipo de proyecto.

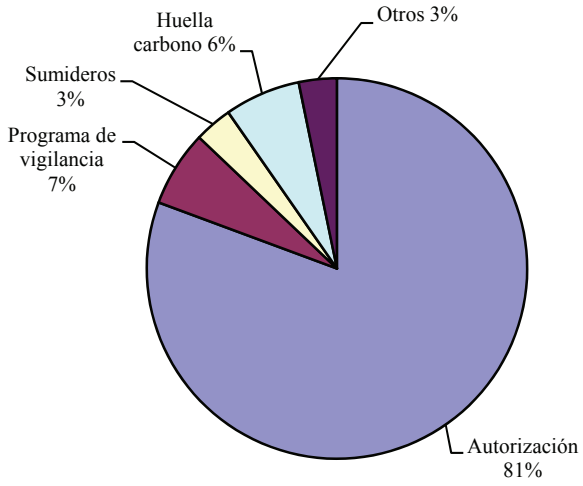
Figura 28 Consideración del cambio climático según el promotor



Fuente: Elaboración propia

Exigencia de medidas concretas en la DIA

Figura 29 Medidas exigidas en las DIA en relación al cambio climático



Fuente: Elaboración propia

Las DIA que incluyen condiciones relacionadas con el cambio climático suponen menos de la quinta parte (Figura 29). En muchos casos la medida requerida es una autorización para las emisiones de GEI emitida por la comunidad autónoma de acuerdo con la normativa de derechos de emisión. Realmente es una obligación legal para las centrales térmicas e instalaciones de gas, y por ello, aunque se incluya en la DIA no es una medida de

mitigación. En dos casos se pide cuantificar las emisiones de CO_2 en el programa de vigilancia ambiental, en otro calcular la huella de carbono del proyecto después de su EIA y en una más se proponen condiciones técnicas. Un caso interesante es una extracción y transporte de gas natural, que propone una compensación equivalente a las emisiones previstas de CO_2 por reforestación para crear sumideros de carbono. En otros dos proyectos se piden medidas compensatorias por emisiones de CO_2 (sumideros) durante la EIA, pero finalmente no quedan recogidas en la DIA como obligación.

3.3.2.4. Análisis de resultados

Después de analizar todas las DIA de proyectos sometidos a EIA por la Administración General de Estado hasta final de 2014, se detecta que solo un 14% incluyen referencias al cambio climático, y en más de la mitad de los casos únicamente se cita, por el promotor para defender el proyecto, por otros agentes para criticarlo o para pedir su consideración, o por ambas partes con propósitos opuestos. Prácticamente todos estos proyectos son anteriores a la Ley 21/2013, lo que demuestra que no era imprescindible incluir la obligación de considerar el cambio climático en la normativa de EIA. Lo más frecuente en la evaluación es que se cuantifiquen las emisiones de CO_2, sin que se usen para nada en más de la mitad de los casos. La consideración de los impactos del cambio climático sobre los proyectos es insignificante, un 5% de los casos.

El análisis por tipo de proyectos muestra solo una elevada consideración del cambio climático en centrales térmicas, porque están sujetas a permisos de emisión de GEI. Aún así, menos de la mitad de los casos incluyen una verdadera evaluación. Otros proyectos con emisiones de GEI significativas, como las infraestructuras de transporte, tienen niveles de consideración sorprendentemente bajos. De los proyectos de carreteras sometidos a EIA solo en un caso hay una verdadera evaluación de la contribución al cambio climático. La situación es similar en los ferrocarriles, aunque toda la red de alta velocidad se ha desarrollado en este periodo, y la red de cercanías ha crecido. Solo los aeropuertos tienen una mayor tasa de consideración, pero en casi todos los casos solo se hace una cuantificación de las emisiones de CO_2, que no se utiliza para evaluar impactos, comparar alternativas o proponer medidas de mitigación. Estos resultados son opuestos a los de Hamada (2008) para el Reino Unido, donde detecta una mayor consideración del cambio climático en los estudios de impacto ambiental de carreteras e infraestructuras de transporte en general frente a otros proyectos.

La escasa consideración del cambio climático no puede atribuirse a dificultades técnicas. Existen metodologías y herramientas para calcular la contribución al cambio climático para muchos tipos de proyectos, en especial para infraestructuras de transporte, algunos desarrollados en España (García-Montero et al. 2010, OCCC 2012, CEDEX 2013, IDAE 2013, EEA 2015b), que son particularmente sencillos de aplicar en el caso de carreteras. Además, en la planificación de carreteras se hacen estudios de tráfico, que son la base para el cálculo de las emisiones de GEI.

3.4. Discusión y conclusiones

Cada vez existe una mayor conciencia sobre la necesidad de incorporar el cambio climático a la EIA, sobre todo a partir de la última década. Sin embargo, en la práctica los resultados son aún escasos. Son pocos los países que en la actualidad están integrando de forma adecuada todos los aspectos del cambio climático en la EIA, contribución e impactos del clima, y mitigación y adaptación, y en muchos casos esa integración es generalista, o no influye en la toma de decisiones.

Para lograr una efectiva integración del cambio climático en la EIA se han propuesto a nivel internacional varias líneas de actuación. La primera es incluirlo como obligación expresa en la normativa de EIA. En España esa obligación legal se ha incorporado a partir de la Ley 21/2013, y en la UE en la Directiva 2014/52/UE. No obstante, esa obligación legal no era indispensable, ya que desde la primera normativa española y comunitaria de EIA se recogía la necesidad de considerar los efectos sobre el clima en sentido amplio, y además el cambio climático es una evidente impacto significativo, por lo que debe considerarse en la EIA; así lo demuestran además los EsIA anteriores a 2013 donde se ha considerado el cambio climático.

Los dos países más avanzados del mundo en cuanto a consideración del cambio climático en la EIA, Canadá y Estados Unidos, no tienen incorporada esa obligación legal a su normativa. En Estados Unidos varios autores ha destacado que el cambio climático debe considerarse necesariamente de acuerdo con la NEPA, sin necesidad de que se indique expresamente (Smith 2010, Pyke & Batten 2008). En Canadá su normativa de EIA (CEAA 2012) no incluye requerimientos específicos para considerar el cambio climático, pese a disponer de directrices al respecto.

Baker & Wood (1999) concluyen que la legislación parece tener una influencia beneficiosa en la calidad de los estudios de impacto ambiental en Dinamarca, Grecia o Portugal, pero no en España. De acuerdo con Pölönen et al. (2010), la legislación comunitaria y las directrices de EIA (en especial en Finlandia) proporcionan un buen marco para la evaluación ambiental, y no entorpecen sino que catalizan el uso de este instrumento. Sandham et al. (2013) indican que el énfasis en las reformas legales en Sudáfrica en especial, y en cualquier parte del mundo en general, como base para mejorar la calidad de la EIA se ha exagerado, y no produce EsIA de mejor calidad.

En conclusión, incluir la consideración del cambio climático en la normativa de EIA no es estrictamente necesario, pero si deseable. Un requerimiento explícito puede ayudar a prevenir situaciones sorprendentes como la escasa consideración del cambio climático en la EIA de infraestructuras de transporte en España; de hecho, el mayor grado de consideración en la EIA de centrales térmicas se debe a que están sujetas a permisos de emisión de GEI por normativa. Incluso con referencias explícitas en la normativa de EIA, es posible que los efectos del cambio climático no influyan en la

toma de decisiones, como señala Hamada (2008) para el Reino Unido, que se consideren poco importantes, se evalúen de forma pobre o inadecuada, sea tendenciosa, enfatizando impactos positivos o se solucione con una simple cita o alusión, como se ha señalado para España. Además el valor de las reformas legales como medio para mejorar la EIA está sobrevalorado (Sandham et al. 2013).

Una solución recurrente es desarrollar guías o directrices, señalada por Lee & Colley (1992) y Yi & Hacking (2012) para el Reino Unido, Alonso et al. (1996) para España, Tekelemichael (1997) para Etiopía, Kibbassa (1997) para Tanzania, Morrison-Saunders et al. (2001) para Australia Occidental, Kabir & Momtaz (2012) para Bangladesh o Mounir (2015) para Níger, o con carácter general por Sok et al. (2011) y Sok (2014) como resultado de una encuesta a profesionales de diferentes países, o Zhang et al. (2013) tras revisar treinta y tres artículos de revistas científicas.

Actualmente hay directrices específicas sobre cambio climático y evaluación ambiental en algunos países o regiones, como Canadá (CEAA 2003), Estados Unidos (CEQ 2010) o la UE (EC 2013a, 2013b). Las directrices canadienses son las más conocidas, con un nivel de eficacia satisfactorio según Ohsawa & Duinker (2014), seguidas de las estadounidenses, mientras que las europeas son más reciente y, al menos en España, no ha tenido mucho impacto.

Pese a su interés, las guías existentes a nivel mundial son directrices generales, que destacan los grandes aspectos a considerar (contribución, mitigación, impactos y adaptación) pero aportan muy poca información sobre cómo hacerlo, y sobre cuáles son los impactos más habituales y las medidas de mitigación y adaptación aplicables. De hecho, aún con directrices, la consideración del cambio climático se hace de forma dispar y sin criterios comunes, como ocurre en Estados Unidos (Woolsey 2012). En la UE, las directrices además se refieren en conjunto a la consideración del cambio y la biodiversidad en la EIA o EAE en general, por lo que su grado de detalle es mínimo. Además, tienen carencias notables, como no considerar los posibles impactos ambientales derivados de la mitigación y la adaptación.

Las directrices son interesantes para establecer criterios comunes, como los grandes aspectos a considerar o cuando deben analizarse en detalle (si se opta por establecer umbrales), pero son insuficientes por sí mismas, precisando guías sectoriales detalladas sobre consideración del cambio climático en la EIA, similares en alcance a esta tesis doctoral para el caso de las infraestructuras lineales de transporte.

Una discusión habitual es si el cambio climático debe ser considerado en la EIA o en la EAE. Hay una clara tendencia a incorporar el cambio climático en la EAE, porque muchas actuaciones de reducción de la contribución son estratégicas, como la distribución modal de los transportes. Pero esta tendencia tan deseable no debe llevar a excluir el cambio climático de la EIA, donde también tiene un papel importante. Mientras que en la EAE las decisiones son estratégicas, en la EIA la consideración del

cambio climático es útil para comparar alternativas (constructivas, de diseño o funcionales), adaptar los proyectos o designar medidas de compensación.

Se ha planteado como una limitación a la hora de considerar el cambio climático en la EIA la ausencia de umbrales de significación, lo que lleva a que se infravalore la contribución al cambio climático de proyectos individuales, lo que es un error, ya que las emisiones de GEI son claros impactos acumulativos (Smith 2010). Las directrices de Estados Unidos (CEQ 2010) fijan un valor de 25 000 t CO_2-eq por año, o inferior para proyectos a largo plazo; aunque el valor concreto puede ser discutible es una referencia útil. Por ejemplo, este nivel se alcanza en una carretera de 50 km con 10 000 vehículos al día, o de 100 km y 5 000 vehículos al día, sin tener en cuenta que son proyectos a largo plazo que podrían considerarse incluso con intensidades de tráfico menores. La mayoría de autovías sometidas a EIA en España entrarían en este escenario, aunque prácticamente ninguna ha considerado el cambio climático.

Pero más allá de la bondad de uno u otro valor, los umbrales para la consideración del cambio climático son estrictamente necesarios; la contribución y los impactos de este factor en los proyectos deberían ser considerados en todos los casos, para determinar si son o no significativos, como en el caso de otros impactos como por ejemplo sobre la biodiversidad. En cualquier caso, los umbrales podrían marcar la obligatoriedad de compensar las emisiones de GEI o la necesidad de someterse a normas sobre derechos de emisiones.

Finalmente, la mayor conciencia sobre la problemática del cambio climático, y el establecimiento de directrices, está llevando a avances en la consideración de la contribución al cambio climático. Sin embargo, la consideración de la mitigación y la adaptación es muy reducida.

En conclusión, la consideración del cambio climático en la EIA ha sido muy escasa en todo el mundo hasta hace pocos años. Para solucionarlo, se han incluido requisitos específicos en la normativa y se han desarrollado directrices. En España la consideración del cambio climático ha sido muy escasa, y sorprendentemente baja en infraestructuras de transporte, pese a su destacable contribución al cambio climático. La Ley 21/2013 incluye la exigencia legal de considerar el cambio climático en la EIA, y hay directrices al respecto de la UE. Sin embargo, no parece que hasta el momento haya ayudado mucho. Sería precisa una mayor difusión de esas directrices (empezando por traducirlas al español) y completarlas con guías sectoriales detalladas donde se detalle a evaluadores, promotores y consultores como de debe considerar cada uno de los elementos que componen la relación entre cambio climático y actuaciones humanas.

4 Contribución al cambio climático de las infraestructuras lineales de transporte

Objetivos del capítulo

La relación entre infraestructuras de transporte y cambio climático se asocia a la emisión de GEI del tráfico rodado, que monopoliza la cuestión. La relación causa-efecto entre consumo de carburantes y emisión de GEI es evidente y preocupante, ya que un 23% de esas emisiones en España proceden del transporte por carretera. No obstante, hay otros aspectos que deben considerarse en la EIA, como la destrucción de sumideros o el impacto positivo por cambio modal (Enríquez de Salamanca et al. 2016b).

El primer paso para considerar la contribución al cambio climático de una infraestructura de transporte pasa por conocer su huella de carbono, tanto en la fase de construcción, como en la explotación y el mantenimiento. Existen metodologías para realizar estos cálculos, pero exigen un conocimiento detallado del proyecto, cosa que no ocurre en la EIA, ya que al desarrollarse en etapas previas de la planificación el nivel de detalle es limitado; aunque existen ejemplos que abordan la huella de carbono de casos concretos, se hace en base a proyectos de construcción detallados, y esos métodos no se está aplicando a la EIA por faltar de datos. Por ello, en este capítulo se propone un conjunto de nuevos indicadores, basados en las metodologías de cálculo de la huella de carbono pero especialmente pensados para la EIA, aplicables al nivel de detalle e información que previsiblemente se tendrá al realizar un estudio de impacto ambiental.

En la fase de construcción se proponen indicadores para determinar la huella de carbono, considerando tanto la emisión de GEI, en base a las principales unidades de obra de la infraestructura, como la destrucción de sumideros, considerando la pérdida de stock de carbono y de capacidad secuestro. Para demostrar su utilidad se han aplicado al estudio de una autovía en Palencia (Enríquez de Salamanca et al. 2012a).

En la fase de construcción se producen los mayores impactos, al concentrarse la emisión de GEI del tráfico. También para esta fase se proponen indicadores para el cálculo de la contribución al cambio climático adaptados a la EIA, y se demuestra cómo se pueden incorporar a la toma de decisiones, incluyendo un caso práctico de una autovía en León, basado en un estudio del autor (Enríquez de Salamanca et al. 2009b) y presentado en el VIII Congreso Nacional de EIA (Enríquez de Salamanca 2015).

El impacto de las infraestructuras sobre el cambio climático es generalmente negativo, pero puede ser también positivo, como ocurre en muchos ferrocarriles. Existe una percepción muy positiva del transporte ferroviario, pero intuitiva, que precisa ser valorada. Por una parte es un transporte más eficiente, que puede reducir la contribución global al cambio climático. En este sentido se ha incluido un caso práctico de un ferrocarril en Madrid, basado en un estudio del autor (Enríquez de Salamanca et al. 2011) y presentado en el VIII Congreso Nacional de EIA (Enríquez de Salamanca 2015); se trata del único caso en España donde se ha considerado el cambio climático en la EIA de un ferrocarril hasta la fecha. Por otra parte, algunos factores, poco

considerados pueden incidir negativamente en la contribución al cambio climático de los ferrocarriles, como el grado de utilización o la ubicación de las estaciones respecto a los cascos urbanos, como ocurre en las líneas de alta velocidad, por ejemplo.

Una vez analizada la forma en que las infraestructuras de transporte contribuyen al cambio climático y como puede considerarse en la EIA, se analizan los principales retos que se plantean para lograrlo, como el umbral de consideración de las emisiones de GEI, la integración en la toma de decisiones o los impactos acumulativos. Un tema muy importante es la infravaloración de los impactos debido al fraccionamiento de los proyectos, aspecto que se ha analizado específicamente, y se ha publicado en la revista *Impact Assessment and Project Appraisal* (Enríquez de Salamanca 2016).

El capítulo concluye con una discusión sobre los aspectos abordados, y unas conclusiones generales sobre la consideración de la contribución al cambio climático de las infraestructuras lineales de transporte en la EIA.

Publicaciones

Enríquez de Salamanca Á. 2016. Project splitting in environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal* 34(2): 152–159.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016b. El cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras de transporte: contribución, impactos, mitigación y adaptación. *VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2-3 de marzo de 2016.

Enríquez de Salamanca Á. 2015. Consideración del cambio climático en la evaluación ambiental de infraestructuras. Casos prácticos. En: Casermeiro MA, Vázquez A (Eds.) *Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental. Nuevos retos de la Evaluación Ambiental. Madrid, 11, 12 y 13 de marzo de 2015. Libro de actas (VIII CONEIA).* Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental, Madrid, pp. 355–363.

Otras fuentes del autor

Cabello L, González R, Kroebel E, Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2016. *Estudio de impacto ambiental. Variante ferroviaria entre La Ola y Sondika*. Esteyco-Euskal Trenbide Sarea. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Cebrián A, Fernández ME. 2012. *Estudio de impacto ambiental. Estudio informativo. Estudio de alternativas para las Autovías Palencia-Paredes de Nava y Palencia – Carrión de los Condes y Estudio de Viabilidad de la autovía Paredes de Nava-Sahagún, siguiendo los corredores de la CL-613 y CL-615*. Vigiconsult-Provilsa. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Marcos A, Aguilar A. 2011. *Estudio de impacto ambiental. Estudio Informativo: Extensión de la red de cercanías de Madrid hasta Soto del Real*. PROSER-Dirección General de Ferrocarriles. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Cebrián A, Fernández ME. 2009. *Estudio de impacto ambiental. Estudio Informativo: Tramo La Robla-León de la Carretera N-630, y conexión con la Red de Carreteras al suroeste de León*. Vigiconsult-Dirección General de Carreteras. Inédito.

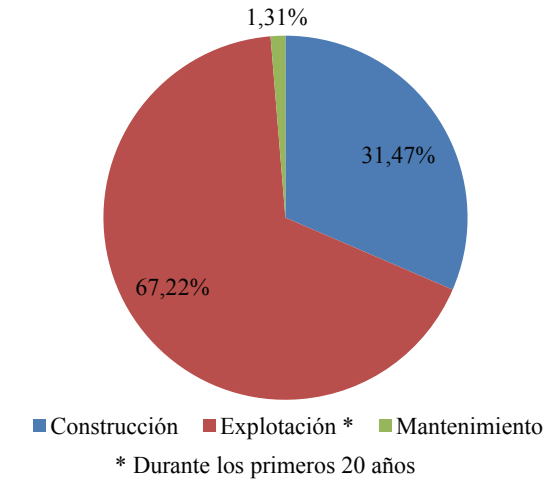
4.1. Consideraciones generales

El aspecto más importante en la relación entre infraestructuras de transporte y cambio climático es su contribución, la responsabilidad del transporte en el cambio climático, sobre todo por emisión de GEI y, en menor medida, por destrucción de sumideros. Esa contribución se produce en todas las fases de vida de la infraestructura, tanto la construcción como la explotación y mantenimiento, aunque con una diferente intensidad, pudiendo determinarse mediante el cálculo de la huella de carbono.

4.1.1. Contribución al cambio climático en la vida útil de las infraestructuras

La contribución al cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte se asocia fundamentalmente a la emisión de GEI en la fase de explotación, sobre todo del tráfico rodado en las carreteras, que es sin lugar a dudas el efecto más importante. Sin embargo esa contribución al cambio climático se produce en tres momentos, con una importancia diferente (Figura 30), como se observa en los resultados de Berzosa (2013), y también con una responsabilidad que varía según las fases.

Figura 30 Emisiones de GEI en una carretera



* Durante los primeros 20 años

Fuente: Elaborado con datos de Berzosa (2013)

- **Construcción de las infraestructuras**. En esta fase se generan emisiones directas de GEI asociadas a los procesos constructivos (consumo de energía en instalaciones de obra y de carburantes por la maquinaria), emisiones indirectas asociadas al empleo de materiales (tanto derivadas de su fabricación como de su transporte a obra), así como una pérdida de stock de carbono y de potencial de secuestro como consecuencia de la destrucción de vegetación. Estos impactos se concentran en un periodo concreto, la fase de obras, y son responsabilidad del promotor de las mismas, del organismo que decide construir la infraestructura.
- **Explotación de las infraestructuras**. En la fase de explotación las emisiones de GEI están asociadas a la circulación de vehículos, tráfico rodado en carreteras y trenes en el caso de ferrocarriles. Son la fuente de GEI más importante en las infraestructuras, por su cantidad y duración, ya que son emisiones a largo plazo, durante toda la vida útil de la obra. La responsabilidad en la emisión varía, ya que en las carreteras es directamente de los usuarios, quienes emiten al circular, mientras que en los ferrocarriles sería del transportista, aunque pueda repercutirlas a los usuarios.

- **Mantenimiento de las infraestructuras**. En esta fase las emisiones de GEI están asociadas a los trabajos de mantenimiento en las infraestructuras (refuerzo de firmes, mantenimiento de instalaciones, señalización, electrificación, marcas viales,…) así como a su operación. Son cuantificables, y en general poco importantes salvo casos como la iluminación o ventilación, y son responsabilidad del gestor de la infraestructura o de las autoridades de control del tráfico.

4.1.2. Herramientas para el cálculo de la contribución al cambio climático

La herramienta básica para cuantificar las emisiones de GEI en la construcción, explotación y mantenimiento de las infraestructuras de transporte, como de cualquier otra actividad, es el cálculo de la huella de carbono, aplicada de forma independiente o como parte de un análisis del ciclo de vida más extenso. Existen experiencias de cálculo de la huella de carbono en infraestructuras, en todas o algunas de sus fases, así como de materiales empleados en su construcción (Tabla 10). Los cálculos en la fase de explotación generalmente consideran un cierto periodo de tiempo, que suele ser el año horizonte, 20 años desde la puesta en servicio en el caso de las carreteras (BOE 2016b).

Tabla 10 Estudios sobre huella de carbono y análisis de ciclo de vida en carreteras y ferrocarriles

Materia	**Referencias**
Carreteras	Stripple (2001), Treloar et al. (2004), Sampedro (2011), Milachowski et al. (2011), Berzosa (2013), Huang et al. (2013), Miliutenko et al. (2014), Huang et al. (2015), Fernández-Sánchez et al. (2015), Hanson & Noland (2015), Keijzer et al. (2015).
Ferrocarriles	Vandanjon et al. (2012), Banar & Özdemir (2015), Matute & Chester (2015), Yue et al. (2015).
Materiales para carreteras	Vandenberghe & Berthet (2005), Huang et al. (2009), White et al. (2010), Gschösser et al. (2012), Keijzer et al. (2015).

Fuente: Elaboración propia

Una herramienta interesante para el cálculo de la huella de carbono asociada a la construcción es hueCO_2 (Tecniberia 2015), que por medio de una hoja de cálculo o programa de presupuestos (Excel o Presto respectivamente), asigna a cada máquina o equipo empleado en las obras, y a algunos materiales, un factor de emisión de CO_2; aprovechando el presupuesto del proyecto se puede hacer de forma automática el cálculo de la huella de carbono asociada a la construcción.

Los ejemplos y herramientas anteriores exigen un detallado conocimiento de la actuación, no disponible al acometer la EIA, realizada en etapas de planificación con un nivel de definición moderado. Por ello, el cálculo de la huella de carbono se aplica actualmente sobre todo en fases posteriores a la EIA, en proyectos constructivos o actuaciones en funcionamiento, siendo útiles para conocer su contribución al cambio climático pero no para la comparación de alternativas; una muestra de ello es que hasta

el momento solo se han utilizado en un proyecto de carretera sometido a EIA por el Estado (BOE 2014b, Enríquez de Salamanca et al. 2016a).

El nivel de precisión del cálculo de la huella de carbono debe ser acorde con el detalle del proyecto. La falta de definición de un proyecto al someterse a EIA no puede ser excusa para no considerar su contribución al cambio climático; se deben adecuar los métodos a las necesidades, en este caso de la EIA. En esta tesis se proponen indicadores para evaluar la contribución al cambio climático en la EIA, diseñados para su aplicación con los datos previsiblemente disponibles, que permiten un cálculo simplificado de la huella de carbono, pero suficientemente robusto para la toma de decisiones.

En la fase de construcción se plantean dos grupos de indicadores; en el Cuadro 1 y el Anexo 2 se incluye un ejemplo de su aplicación, referido a una autovía en Palencia. El primer grupo de indicadores se refiere a las emisiones directas asociadas a las obras, y comprende 8 indicadores para carreteras y otros tantos para ferrocarriles (7 comunes y 1 específico para cada tipo de infraestructura) que consideran los aspectos esenciales de la obra: movimiento y transporte de tierras, estructuras, obras de drenaje y pasos inferiores y plataforma. Para su cálculo se consideran las estimaciones medias de estas macrounidades de obra aplicadas a la planificación de infraestructuras, estableciendo un factor de emisión para cada indicador. Con su aplicación se obtiene un valor simplificado de la huella de carbono en la construcción, pero que recoge las obras más importantes en cuanto a la emisión de GEI, y por lo tanto permite comparaciones robustas entre alternativas, desde luego más precisas que las realizadas para muchos otros impactos ambientales. El segundo grupo se refiere a la destrucción de sumideros, comprendiendo dos, uno referido a la pérdida de stock de carbono, y el segundo a la pérdida de capacidad de secuestro. Estos aspectos a menudo se ignoran en el cálculo de la huella de carbono, pero pueden llegar a ser muy notables.

En la fase de explotación de carreteras y ferrocarriles, los métodos de cálculo se basan o bien en el tráfico real, en infraestructuras existentes (caso aplicado a los inventarios de GEI) o bien a las previsiones de tráfico existentes. Sin embargo, se detectan importantes carencias en su aplicación, que pueden aportar resultados erróneos y llevar a una toma de decisiones mal fundamentada. El punto de partida es disponer de una prognosis del tráfico, rodado o ferroviario, para un determinado periodo de tiempo, que habitualmente es, como se ha señalado, el año horizonte, 20 años después de la puesta en servicio. Pero un cálculo adecuado exige hacer también una previsión de las emisiones unitarias de los vehículos en ese periodo, aspecto a menudo descuidado. Por ello, como primer paso se ha calculado esa previsión de emisiones unitarias hasta el máximo año horizonte posible en la actualidad, para el cual que se disponen de estimaciones fiables de emisiones, que es 2050.

En las carreteras se ha detectado una tendencia a simplificar el cálculo de las emisiones de GEI, centrándose en el tráfico que circula por ellas. Esto se debe precisamente a la comentada aplicación de la huella de carbono en fases tardías,

proyectos constructivos o carreteras operativas. Sin embargo, esta información es incompleta, y no es válida para la EIA. Es preciso considerar no solo el tráfico de la nueva carretera sino también la influencia en las carreteras existentes (cuanto tráfico capta y cuanto induce) y además compararlo con la situación sin proyecto. Aunque en general suele producirse un incremento global de emisiones por captación de tráfico, en algunos casos pueden reducirse si se acortan los recorridos; valorar solo las emisiones generadas por la nueva carretera arrojaría un impacto negativo, pero compararlo con la situación sin proyecto daría un impacto positivo, un resultado radicalmente opuesto. Por lo tanto, en la fase de explotación de carreteras esta tesis aporta por una parte herramientas para la realización de estimaciones de emisiones a medio y largo plazo, y por otra expone la metodología de cálculo adecuada para una adecuada evaluación del impacto ambiental asociado a la contribución al cambio climático. En el Cuadro 2 y el Anexo 2 se incluye un ejemplo de su aplicación, referido a una autovía en León.

Los ferrocarriles se consideran un medio de transporte más limpio y eficiente que las carreteras, y se da por sentado que su impacto sobre el cambio climático es positivo, sin prestar mayor atención a su análisis. Es posible aplicar métodos análogos a las carreteras, basados en el consumo de energía o gasoil de las circulaciones y en los recorridos. Sin embargo, en la práctica estos indicadores son poco útiles, siendo más efectivos otros como la ratio de emisiones por viajero, una medida de eficiencia, o el cálculo de los cambios en la emisión de GEI por trasvase modal. En el Cuadro 3 y el Anexo 2 se incluye un ejemplo de la aplicación de indicadores de contribución al cambio climático referidos a un ferrocarril en Madrid. Se debe tener en cuenta que tanto si generan impactos que de forma global son negativos como si son positivos, en ambos casos debería evaluarse y considerarse en la EIA y en la toma de decisiones.

La fase de mantenimiento presenta grandes incertidumbres a la hora de realizar cálculos anticipados de emisiones de GEI, y más aún en la EIA. Sin embargo, analizando los trabajos existentes, realizados para actuaciones detalladas o en servicio, es posible establecer indicadores basados en un porcentaje sobre las emisiones de GEI de la fase de construcción, especialmente útiles en ferrocarriles, o las emisiones anuales de GEI en la explotación, más adecuados para carreteras.

4.2. Contribución al cambio climático durante la construcción

4.2.1. Emisiones de GEI durante la construcción

Las dos principales causas de contribución al cambio climático en la construcción de infraestructuras son las emisiones de GEI asociadas a las obras, derivadas de la maquinaria y el empleo de materiales, y la destrucción de sumideros de carbono; aunque el impacto más evidente es la emisión de GEI, la destrucción de sumideros se concentra en esta fase, y puede ser importante en ciertos casos.

La contribución al cambio climático en la construcción debe manejarse con cautela en la EIA, ya que donde se concentrarán los mayores problemas es en la fase de explotación; una alternativa puede presentar menor emisión de GEI en su construcción, pero implicar mayores emisiones durante su vida útil. Por ello, la huella de carbono en la construcción debe manejarse de forma conjunta a la resultante en la explotación, aunque puede ser útil por separado cuando la explotación de las alternativas es similar, variando solo la ejecución (características, materiales, métodos del trabajo…).

4.2.1.1. Tipos de emisiones de GEI

En la fase de construcción se producen dos tipos de emisiones de GEI, directas e indirectas. Las emisiones directas proceden de las actividades desarrolladas en la obra que conllevan un consumo de energía o combustible. La principal fuente es la maquinaria, con un papel secundario de las instalaciones, salvo casos especiales como fábricas de dovelas, hormigones o plantas asfálticas. Las emisiones indirectas son aquellas inducidas por las obras, aunque no generadas directamente, por ejemplo:

- Fabricación de materiales empleados en las obras (piezas prefabricadas, señalización, superestructura, raíles, elementos de seguridad, pinturas…).
- Excavación en canteras y préstamos o depósitos en vertederos.
- Transporte de materiales. El transporte de tierras suele incluirse como parte de la obra, pero la mayoría de materiales se abonan a pie de obra, incluyendo el transporte en su precio. Estas partidas pueden ser considerables, por ejemplo cuando hay un elevado volumen de hormigones procedentes de planta.
- Desplazamientos de trabajadores inducidos por las obras, tanto para acceder a los puestos de trabajo como para la gestión y ejecución.
- Electricidad adquirida. Incluye los GEI emitidos en la generación de electricidad que se produce fuera del lugar, y que es utilizada en la obra (Gerrard 2008).

Un cálculo detallado de la huella de carbono debe contemplar tanto las emisiones directas como las indirectas. Sin embargo, el nivel de detalle de la EIA limita a menudo su conocimiento, en especial de las segundas. Aún así, hay aspectos esenciales que si es posible determinar, como las emisiones asociadas al transporte de tierras o al empleo de materiales esenciales como hormigones, firmes o para la superestructura ferroviaria.

4.2.1.2. Evaluación de las emisiones de GEI en la construcción

Como se ha expuesto en el apartado introductorio (véase 4.1.2), la evaluación de la contribución al cambio climático en la fase de construcción debe basarse en el cálculo de la huella de carbono, pero adaptada al nivel de detalle disponible en la EIA, para lo cual se han propuesto una serie de indicadores; cuanto mayor sea el número de ellos incluidos, más precisa será la evaluación de la contribución al cambio climático.

Establecimiento de indicadores

El primer paso para definir indicadores para el cálculo de la huella de carbono en la fase de construcción es establecer cuáles son las grandes actuaciones (o macrounidades de obra como se denominan en ingeniería civil) asociadas a la ejecución de las obras. En función de ellas, se han definido 9 indicadores, 7 comunes a carreteras y ferrocarriles, y uno específico para cada tipo de infraestructura (Tabla 11). Estos indicadores comprenden las actuaciones más importantes por su contribución al cambio climático en la fase de obras, por lo que con su cálculo es posible una evaluación adecuada de la huella de carbono, y una comparación de alternativas.

Tabla 11 Indicadores para el cálculo de la emisión de GEI en la construcción de infraestructuras

Indicador	Definición	Unidad	Aplicación
E_{des}	Emisión de GEI en excavación de desmontes	kg CO_2/m^3	Carreteras y ferrocarriles
E_{tun}	Emisión de GEI en excavación de túneles	kg CO_2/m^3	Carreteras y ferrocarriles
E_{ter}	Emisión de GEI en formación de terraplenes o aportes	kg CO_2/m^3	Carreteras y ferrocarriles
E_{tra}	Emisión de GEI en transporte de tierras	kg CO_2/m^3/km	Carreteras y ferrocarriles
E_{est}	Emisión de GEI en estructuras de hormigón armado	kg CO_2/m^2	Carreteras y ferrocarriles
E_{dre}	Emisión de GEI en obras de drenaje transversal	kg CO_2/m	Carreteras y ferrocarriles
E_{inf}	Emisión de GEI en pasos inferiores	kg CO_2/m	Carreteras y ferrocarriles
E_{fir}	Emisión de GEI en firmes bituminosos	kg CO_2/m^2	Carreteras
E_{via}	Emisión de GEI en la superestructura (balasto+vías)	kg CO_2/m	Ferrocarriles

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis de cálculo y determinación de emisiones básicas

Para cada uno de los indicadores se establece en primer lugar la maquinaria y materiales precisos para su ejecución. Para ello se emplean las bases de precios de la Dirección General de Carreteras y ADIF (MFOM 2016, ADIF 2011), de forma directa o combinando diferentes precios básicos. A cada máquina, equipo o material se le aplica un factor de emisión de CO_2, según los valores aportados por hueCO_2 (Tecniberia 2015). Con ambos valores se obtiene un factor de emisión por indicador (Tabla 12).

En algunos indicadores es preciso definir una "obra tipo", la más habitual en cada caso, para la cual se determinará el indicador. Aunque con ello se asume un margen de error, lo habitual es que estas obras no estén definidas al someter el proyecto a EIA; además, el margen de error derivado de ignorar estas actuaciones sería mucho mayor. Para obras de drenaje se ha considerado como obra tipo un tubo de hormigón pretensado prefabricado de 1,80 m de diámetro; para pasos inferiores se ha considerado como obra media un marco de hormigón de 3,5 x 3,5 m, valor medio entre los marcos mínimos empleados de 2 x 2 m y los pasos de caminos normales de 5 x 5 m; para los firmes de carreteras se considera un paquete de 25 cm de zahorra y sobre ellos 25 cm de mezcla bituminosa; finalmente, en vías ferroviarias se considera un paquete de balasto, traviesas y vías, sin considerar la electrificación, que puede existir o no.

Tabla 12 Factores de emisión para indicadores de la emisión de GEI en la fase de construcción

Indicador	Desglose				Valor
	Descripción	Rendimiento[1]	Emisión[2]	Subtotal	
E_{des} - Excavación en desmontes	Excavadora cadenas 45 t	0,0043 h	74,13 kg CO_2/h	0,32	1,51 kg CO_2/m³
	Tractor cadenas 138 kW	0,0014 h	64,49 kg CO_2/h	0,09	
	Camión 258 kW	0,0150 h	73,64 kg CO_2/h	1,10	
E_{tun} - Excavación en túneles	Retrocargadora 60 kW	0,0830 h	24,71 kg CO_2/h	2,05	32,09 kg CO_2/m³
	Retroexcavadora 7 t	0,0730 h	24,59 kg CO_2/h	1,79	
	Camión 258 kW	0,1370 h	73,64 kg CO_2/h	10,09	
	Maquinaria auxiliar túneles	0,1500 h	40,00 kg CO_2/h	6,00	
	Grupo electrógeno 500 KVA	0,1500 h	81,05 kg CO_2/h	12,16	
E_{ter} - Formación de terraplenes o aportes	Tractor cadenas 138 kW	0,0027 h	64,49 kg CO_2/h	0,17	0,56 kg CO_2/m³
	Motoniveladora 104 kW	0,0027 h	29,53 kg CO_2/h	0,08	
	Compactador 16 t	0,0054 h	33,49 kg CO_2/h	0,18	
	Camión cisterna 8000 l	0,0009 h	46,77 kg CO_2/h	0,04	
	Agua	0,2500 m³	0,32 kg CO_2/m³	0,08	
E_{tra} - Transporte de tierras	Camión 400 HP, 32 t	0,0021 h	88,21 kg CO_2/h	0,19	0,19 kg CO_2/m³-km
E_{est} - Estructura de hormigón armado	Hormigón armado HA-80	2,5000 m³	400,09 kgCO_2/m³	1000,23	1513,71 kg CO_2/m²
	Equipo vibrado hormigón	0,8075 h	15,16 kg CO_2/h	12,24	
	Grupo electrógeno 4,9 kW	0,8075 h	18,04 kg CO_2/h	14,57	
	Bomba hormigón 60 m³/h	0,2700 h	53,40 kg CO_2/h	14,42	
	Camión 199 kW	0,2500 h	29,03 kg CO_2/h	7,26	
	Acero barras	0,2500 t	1860,00 kg CO_2/t	465,00	
E_{dre} - Obras de drenaje transversal	Grúa 30 t	0,1880 h	53,40 kg CO_2/h	10,04	731,80 kg CO_2/m
	Tubo hormigón 1800 mm	1,0000 m	664,92 kg CO_2/m	664,92	
	Hormigón HNE-20	0,2060 m³	235,00 kg CO_2/m³	48,41	
	Grupo electrógeno 4,9 kW	0,3750 h	18,04 kg CO_2/h	6,76	
	Vibrador hormigón	0,3750 h	4,45 kg CO_2/h	1,67	
E_{inf} - Pasos inferiores	Grúa 300 t	0,8000 h	120,15 kg CO_2/h	96,12	2352,91 kgCO_2/m
	Marco c	1,0000 m	2125,00 kg CO_2/m	2125,00	
	Hormigón HNE-20	0,5550 m³	235,00 kg CO_2/m³	130,43	
	Áridos	0,3700 t	3,70 kg CO_2/t	1,37	
E_{fir} - Firmes bituminosos	Motoniveladora 104 kW	0,0045 h	29,53 kg CO_2/h	0,13	28,86 kg CO_2/m²
	Compactador 20 t	0,0165 h	96,37 kg CO_2/h	1,59	
	Camión cisterna 8000 l	0,0045 h	46,77 kg CO_2/h	0,21	
	Cargadora ruedas 125 kW	0,0060 h	20,02 kg CO_2/h	0,12	
	Planta asfáltica 160 t/h	0,0060 h	2558,21 kg CO_2/h	15,35	
	Camión 199 kW	0,0505 h	29,03 kg CO_2/h	1,47	
	Extendedora asfáltica 125 kW	0,0060 h	30,46 kg CO_2/h	0,18	
	Emulsión bituminosa	0,0255 t	203,75 kg CO_2/t	5,20	
	Áridos	0,4465 t	3,70 kg CO_2/t	1,65	
	Zahorra artificial	0,2625 m³	11,20 kg CO_2/m³	2,94	
	Agua	0,0500 m³	0,32 kg CO_2/m³	0,02	
$E_{vía}$ - Vía (balasto, traviesas y raíles)	Pala cargadora 275 kW	0,0750 h	59,34 kg CO_2/h	4,45	501,37 kg CO_2/m
	Camión 274 kW	0,4267 h	73,64 kg CO_2/h	31,42	
	Extendedora áridos	0,0375 h	49,42 kg CO_2/h	1,85	
	Grúa 12 t	0,5367 h	45,73 kg CO_2/h	24,54	
	Estabilizadora	0,0200 h	159,38 kg CO_2/h	3,19	
	Maquinaria montaje vía	0,6800 h	150,00 kg CO_2/h	102,00	
	Carril	111,2400 kg	2,34 kg CO_2/kg	260,30	
	Traviesa hormigón	0,2230 m³	244,00 kg CO_2/m³	54,41	

Fuentes: Elaboración propia. [1] Según MFOM (2016) excepto el último indicador, según ADIF (2011); [2] Tecniberia (2015).

Establecimiento de indicadores parciales

Una vez conocidas las emisiones básicas, se definen los indicadores para calcular la huella de carbono, y con ello la contribución al cambio climático en la fase de construcción, adaptados al nivel de detalle de la EIA. Para cada indicador se establece una fórmula de cálculo, incorporando el factor de emisión como término fijo, y quedando en función de una serie de variables (una o varias por indicador, que deberán incluirse para el cálculo, siempre por medio de valores medios (Tabla 13).

Tabla 13 Indicadores simplificados de contribución al cambio climático en la construcción

Indicador	Parámetros
$E_{des} = \frac{1{,}51 \cdot V_{des}}{1000}$	E_{des} = Emisiones en desmontes (t CO_2) V_{des} = Volumen de excavación en desmonte (m³)
$E_{tun} = \frac{32{,}09 \cdot V_{tun}}{1000}$	E_{des} = Emisiones en túneles (t CO_2) V_{tun} = Volumen de excavación en túnel (m³)
$E_{ter} = \frac{0{,}56 \cdot V_{ter}}{1000}$	E_{ter} = Emisiones de terraplenes o acopios (t CO_2) V_{ter} = Volumen de terraplén o aporte (m³)
$E_{tra} = \frac{0{,}19 \cdot [(V_{pre} \cdot D_{pre}) + (V_{ver} \cdot D_{ver})]}{1000}$	E_{tra} = Emisiones por transporte de tierras (t CO_2) V_{pre} = Volumen procedente de préstamos (m³) V_{ver} = Volumen destinado a vertedero (m³) D_{pre} = Distancia media a los préstamos (km) D_{ver} = Distancia media a los vertederos (km)
$E_{est} = \frac{1523{,}71 \cdot \sum(L_{est\,x} \cdot A_{est})}{1000}$	E_{est} = Emisiones por estructuras de hormigón (t CO_2) $L_{est\,x}$ = Longitud de la estructura x (m) A_{est} = Ancho medio de la estructura (m): - Autovía/autopista 3 carriles sentido 26 m - Autovía/autopista 2 carriles sentido 20 m - Carretera 1 carril sentido 10 m - Línea ferroviaria doble 14 m - Línea ferroviaria simple 8 m
$E_{dre} = \frac{731{,}80 \cdot \sum(L_{dre\,x})}{1000}$ ó $E_{dre} = \frac{731{,}80 \cdot N_{dre} \cdot L_{tipo}}{1000}$	E_{dre} = Emisiones por obras de drenaje (t CO_2) $L_{dre\,x}$ = Longitud de la obras de drenaje x (m) Si no se tienen datos concretos de cada drenaje, entonces: N_{dre} = Número de obras de drenaje L_{tipo} = Longitud tipo de drenaje o paso inferior (m): - Autovía/autopista 3 carriles sentido 50 m - Autovía/autopista 2 carriles sentido 40 m - Carretera 1 carril sentido 20 m - Línea ferroviaria doble 25 m - Línea ferroviaria simple 20 m
$E_{inf} = \frac{2352{,}91 \cdot \sum(L_{inf\,x})}{1000}$ ó $E_{inf} = \frac{2352{,}91 \cdot N_{inf} \cdot L_{tipo}}{1000}$	E_{inf} = Emisiones por pasos inferiores (t CO_2) $L_{inf\,x}$ = Longitud del paso inferior x (m) Si no se tienen datos concretos de cada paso, entonces: N_{inf} = Número de pasos inferior L_{tipo} = Longitud tipo drenaje o paso inferior (m). Ver anterior
$E_{fir} = \frac{28{,}86 \cdot L_{car} \cdot A_{tipo}}{1000}$	E_{fir} = Emisiones por firmes asfálticos (t CO_2) L_{car} = Longitud de carretera (m) A_{tipo} = Anchura tipo de firme de la carretera (m): - Autovía/autopista 3 carriles sentido 27 m - Autovía/autopista 2 carriles sentido 20 m - Carretera 1 carril sentido 10 m
$E_{via} = \frac{501{,}37 \cdot \sum(N_{vías} \cdot L_{vía})}{1000}$	E_{via} = Emisiones por vías y superestructura (t CO_2) N_{vias} = Número de vías en la sección (simple, doble,...) L_{via} = Longitud de vía en la sección (m)

Fuente: Elaboración propia

Indicador global de la emisión de GEI en la fase de construcción

El indicador global de la emisión de GEI en la fase de construcción se obtiene mediante la suma de los indicadores parciales, según el tipo de infraestructura:

- Para carreteras:

$$EC_{carretera} = E_{des} + E_{tun} + E_{ter} + E_{tra} + E_{est} + E_{dre} + E_{inf} + E_{fir}$$

- Para ferrocarriles:

$$EC_{ferrocarril} = E_{des} + E_{tun} + E_{ter} + E_{tra} + E_{est} + E_{dre} + E_{inf} + E_{via}$$

Estos indicadores deben calcularse para cada una de las alternativas, de manera que sea posible su comparación. Dependiendo de la metodología aplicada al EsIA, podrá incorporarse directamente a la comparación de alternativas, o transformarse a otra escala de medición respetando la proporcionalidad de los resultados.

4.2.2. Destrucción de sumideros durante la construcción

La construcción de infraestructuras lineales de transporte implica una ocupación de terrenos, temporal o permanente y, salvo suelos desnudos, infraestructuras o zonas urbanizadas, la destrucción de la cubierta vegetal existente.

Existe una contribución al cambio climático derivada de la destrucción de esa cubierta vegetal a consecuencia de los desbroces. Toda cubierta vegetal tiene una capacidad de absorción de CO_2 atmosférico, fijándolo como carbono, es decir, actúa como un sumidero, que almacena carbono.

Dependiendo del tipo de vegetación afectada, de si es herbácea o leñosa, de su edad, densidad características y superficie afectada, y de la reversibilidad y recuperabilidad del efecto, se producirá una contribución por dos razones, la eliminación del stock de carbono almacenado y la pérdida de sumideros, es decir, de su capacidad de secuestro a lo largo del tiempo.

4.2.2.1. Eliminación del stock de carbono almacenado en la vegetación

Los vegetales absorben CO_2 mediante la fotosíntesis, y lo fijan en sus tejidos mediante el crecimiento. A su vez, al morir esos tejidos se descomponen en el suelo, liberándose CO_2 por el proceso de respiración del suelo, más intenso cuanto mayor sea el aporte de carbono y el crecimiento de la vegetación (Schlesinger & Andrews 2000).

La construcción de infraestructuras de transporte implica la eliminación de la vegetación existente en las zonas de ocupación, temporal o permanente (Tabla 31). Como norma general la vegetación desbrozada carece de aprovechamiento comercial,

procediéndose a su eliminación o desecho. Ese proceso acelera la descomposición de la materia orgánica, por ejemplo si se procede a su trituración, o incluso da lugar a una liberación rápida de CO_2 si se procede a una eliminación por quema. Solo se evita este proceso cuando el carbono permanece fijado en productos persistentes, como la madera, algo que no es habitual en el desbroce salvo que se afecten bosques con un potencial aprovechamiento de la madera apeada.

La destrucción de la vegetación implica la eliminación del stock de carbono que acumula y, salvo el caso citado de un aprovechamiento duradero de la madera (muebles o construcción por ejemplo), una liberación progresiva de CO_2 a corto o a lo sumo medio plazo, salvo la fracción de carbono que pudiera ser fijada por otros organismos.

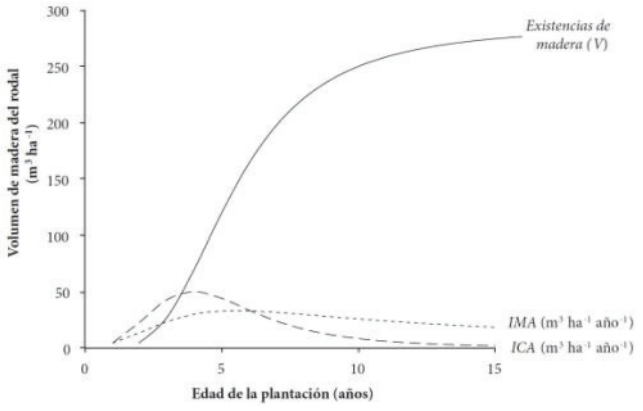
La incidencia de este efecto está directamente relacionada con el stock de carbono destruido, que es a su vez función del tipo de vegetación, siendo mínimo en formaciones herbáceas ralas y máximo en bosques maduros. Como ejemplo, Muñoz-Rojas et al. (2011) aportan valores de densidad de carbono para Andalucía de 3,04 t/ha en pastizales, 8,22 t/ha en dehesas, 17,74 t/ha en matorrales, 28,24 t/ha en bosques de frondosas o 59,48 t/ha en bosques de coníferas.

4.2.2.2. Pérdida de sumideros

La destrucción de la vegetación supone la pérdida de su capacidad de absorber CO_2 y fijarlo en forma de carbono, reduciendo así la concentración atmosférica. En función del potencial de absorción (determinado por el tipo de vegetación y su edad) el impacto será mayor o menor. En este caso es un impacto permanente y a largo plazo, ya que se elimina la capacidad de absorción de forma permanente de la vegetación desbrozada (se produce un "secuestro cesante").

El stock y el secuestro de carbono difieren; los bosques maduros, con árboles de gran edad, almacenan grandes stocks de carbono, pero su crecimiento es con frecuencia moderado, por lo que la tasa de secuestro puede ser poco intensa. Los bosques jóvenes, por el contrario, tienen menor stock pero crecimiento más vigoroso, y por ello mayor tasa de secuestro. La reducción del crecimiento con la edad se observa en cualquier curva de crecimiento (Figura 31).

Figura 31 Existencias en madera y crecimiento en función de la edad



V: volumen de madera (m³); IMA: incremento medio anual (m³ ha^{-1} $año^{-1}$); ICA: incremento corriente anual (m³ ha^{-1} $año^{-1}$). Datos para *Gmelina arborea*. Fuente: Martínez-Zurimendi et al. (2015).

En consecuencia, además de valorar la pérdida de stock por la eliminación de la vegetación, es preciso valorar la pérdida de su capacidad de secuestro de carbono, como se indicó anteriormente un "secuestro cesante", o pérdida de secuestro permanente, que puede llegar a ser muy superior al propio stock destruido, sobre todo en formaciones arbustivas o bosques jóvenes, sin un elevado stock almacenado.

Existe un número creciente de trabajos donde se valora el potencial de fijación de carbono de la vegetación en España, tanto de los bosques como de los matorrales, que sirven de base para determinar la pérdida tanto de carbono fijado (stock) como de capacidad de absorción. Algunos ejemplos son Montero et al. (2005), Agudo et al. (2007), CITAA (2008), Alías et al. (2009) o Muñoz-Rojas et al. (2011).

4.2.2.3. Evaluación de la destrucción de sumideros en la construcción

Establecimiento de indicadores

En la fase de construcción se puede afectar vegetación en diferentes zonas, como áreas ocupadas por la plataforma y sus márgenes, zonas de instalaciones auxiliares, préstamos, vertederos, acopios, estaciones, áreas de servicio, subestaciones o accesos. Para cada zona de afección se debe valorar dos efectos, la pérdida de stock de carbono y la pérdida de secuestro, lo que da lugar a dos indicadores (Tabla 14).

Tabla 14 Indicadores para el cálculo de la afección a sumideros en la construcción de infraestructuras

Indicador	Definición	Unidad	Aplicación
$ST_{CO2\ perdido}$	Emisión de CO_2 equivalente al stock de C perdido	t CO_2	Carreteras y ferrocarriles
$SQ_{CO2\ perdido}$	Emisión de CO_2 equivalente al secuestro de C perdido	t CO_2	Ferrocarriles

Fuente: Elaboración propia

Hipótesis de cálculo

La pérdida de stock de carbono es permanente y se produce en el momento de destruir la vegetación, aunque su transformación a CO_2 puede ser gradual; se asume que los restos de vegetación eliminada se habrán transformado a lo largo del periodo de referencia, que será como mínimo el año horizonte para el cual se diseña la infraestructura, que en carreteras son 20 años tras la puesta en servicio (BOE 2016b).

La pérdida de secuestro es permanente pero no instantánea, extendiéndose toda la vida que hubiera podido tener la vegetación destruida. El periodo de estudio puede ser todo lo extenso que se considere oportuno, pero como mínimo debería ser el citado año horizonte, 20 años.

Establecimiento de indicadores parciales

Para cada indicador se establece una fórmula de cálculo. En ambos casos un factor de entrada es la superficie de vegetación afectada por cada tipo de formación vegetal, dato que se debe manejar en un EsIA para determinar la afección a este factor de medio. En cada caso es preciso recurrir a bibliografía específica para determinar el stock de carbono y el secuestro de cada tipo de formación, que como se ha señalado anteriormente está disponible. El factor de conversión entre carbono destruido y CO_2 emitido es una constante. Finalmente, en el caso del secuestro entra como parámetro el tiempo considerado, en años (Tabla 15).

Tabla 15 Indicadores de stock y secuestro de carbono perdido en las obras

Indicador	Parámetros	Fuentes documentales
$ST_{CO_2\ perdido} = \sum S_{va} \cdot ST_{Cva} \cdot f_{C-CO_2}$	$ST_{CO2\ perdido}$ = Emisión de CO_2 equivalente al stock (t CO_2)	Resultado
	S_{va} = Superficie de afección por tipos de vegetación (ha)	Mapas de vegetación, planos proyecto
	ST_{Cva} = Stock carbono de la vegetación (t C/ha)	Bibliografía según tipo de vegetación
	f_{C-CO2} = factor de equivalencia 3,67 t CO_2 / t C	Constante
$SQ_{CO_2\ perdido} = \sum S_{va} \cdot SQ_{Cva} \cdot T \cdot f_{C-CO_2}$	$SQ_{CO2\ perdido}$ = Emisión de CO_2 equivalente al secuestro (t CO_2)	Resultado
	S_{va} = Superficie de afección por tipos de vegetación (ha)	Mapas de vegetación, planos proyecto
	SQ_{Cva} = Secuestro de carbono de la vegetación (t C/ha/año)	Bibliografía según tipo de vegetación
	T = Tiempo de estudio (años). Al menos 20 años	Constante
	f_{C-CO2} = factor de equivalencia 3,67 t CO_2 / t C	Constante

Fuente: Elaboración propia

Indicador global de la destrucción de sumideros en la fase de construcción

El indicador global de la destrucción de sumideros, es decir el balance global de CO_2 perdido en sumideros en la construcción (BC_{CO_2}) se obtiene sumando los dos indicadores parciales:

$$BC_{CO_2} = ST_{CO_2\ perdido} + SQ_{CO_2\ perdido}$$

4.2.3. Contribución global al cambio climático durante la construcción

Para el cálculo de la contribución global al cambio climático de una infraestructura de transporte en la fase de construcción ($CC_{construcción}$) es preciso considerar los dos aspectos analizados, emisiones de GEI y destrucción de sumideros. El valor, por tanto, será la suma de ambos indicadores globales:

$$CC_{construcción} = EC_{carretera\ o\ ferrocarril} + BC_{CO_2}$$

Estos cálculos deben hacerse para todas las alternativas, permitiendo su comparación. En el Cuadro 1 y el Anexo 2 se incluye un ejemplo del cálculo de estos indicadores para diferentes alternativas de una carretera en Palencia.

Cuadro 1. Evaluación de la contribución al cambio climático en la construcción de la Autovía Palencia - Paredes de Nava - Carrión de los Condes

Este caso práctico se incluye en el Anexo 2. Se analiza la contribución al cambio climático derivada de la construcción de una autovía entre Palencia, Paredes de Nava y Carrión de los Condes utilizando los indicadores descritos en este apartado. Se plantean diferentes alternativas, que implican el desdoblamiento de la carretera actual o la construcción de una o dos nuevas autovías.

A partir de los datos básicos del proyecto se calculan las emisiones de GEI asociadas a la construcción de las diferentes alternativas:

Indicador de impacto		Alternativas (t CO_2)			
		0 Mejorada	1	2	3
E_{des}	Emisiones por excavación en desmontes	798	2 238	1 880	1 860
E_{ter}	Emisiones por formación de terraplenes	1 186	3 401	2 674	2 426
E_{tra}	Emisiones por transporte de tierras	7 298	20 750	16 527	15 231
E_{est}	Emisiones por construcción de estructuras	4 882	23 342	19 656	15 460
E_{inf}	Emisiones por construcción de pasos inferiores	776	2 741	2 176	1 718
E_{fir}	Emisiones por construcción de firmes	10 909	31 773	25 028	25 045
EC	**Emisiones simplificadas en la construcción**	**25 849**	**84 245**	**67 941**	**61 739**

En función de la afección a la vegetación de cada alternativa se calculan las emisiones de GEI asociadas a la destrucción de sumideros de carbono, tanto por pérdida de stock como por pérdida de capacidad de secuestro:

Indicador	Alternativa			
	0Mejorada	1	2	3
Stock perdido - $ST_{CO2perdido}$ (t CO_2)	9,44	346,91	302,57	197,86
Secuestro perdido - $SQ_{CO2perdido}$ (t CO_2)	186,18	1 078,37	854,49	636,77
Balance global CO_2 - B_{CO2} (t CO_2)	**195,62**	**1 425,27**	**1 157,05**	**834,63**

La contribución total al cambio climático estará determinada por la emisión de GEI durante las obras y por la contribución derivada de la destrucción de sumideros:

Nº orden	Alternativa	Emisiones en la construcción EC (t CO_2)	Balance de CO_2 de sumideros B_{CO2} (t CO_2)	Contribución global $CC_{const.}$ (t CO_2)	Diferencia con la anterior	Diferencia con la mejor
1	0 Mejorada	25 849	196	26 045	0%	0%
2	3	61 739	835	62 574	140%	140%
3	2	67 941	1 157	69 098	10%	165%
4	1	84 245	1 425	85 670	24%	229%

La alternativa 0 Mejorada, que se limita a mejorar las actuales carreteras, es notablemente mejor que cualquiera de las restantes por su contribución al cambio climático en la fase de construcción, por lo que es claramente la preferible desde este punto de vista. En el extremo opuesto, la alternativa 1, construir dos autovías, es claramente desfavorable, y solo debería adoptarse si las otras opciones no son viables funcionalmente. Las alternativas 2 y 3 son similares, pero más favorable la segunda.

4.3. Contribución al cambio climático durante la explotación

La fase de construcción de carreteras y ferrocarriles resulta muy similar en cuanto a sus impactos en general, y a la contribución al cambio climático en concreto, y por ello se ha analizado de forma conjunta. Sin embargo, en la explotación existen notables diferencias entre ambos tipos de infraestructuras, asociadas a la diferencia de vehículos circulantes, tráfico rodado o trenes, siendo preciso un análisis diferenciado.

4.3.1. Emisiones de GEI en la explotación de carreteras

4.3.1.1. Datos básicos para el cálculo de emisiones de GEI en la explotación

En la fase de explotación de una carretera, excluyendo la conservación y mantenimiento analizados posteriormente, la contribución al cambio climático se debe a la circulación de tráfico rodado, y en concreto a las emisiones de GEI que emiten los vehículos al desplazarse. En consecuencia, no es la infraestructura quien contribuye al cambio climático, sino sus usuarios. Varios factores determinan las emisiones de GEI: (i) el trazado; (ii) el tráfico, tanto en cantidad como en composición; (iii) la eficiencia de los vehículos, sus emisiones; (iv) el periodo de tiempo estudiado. A continuación se analizan estos aspectos esenciales para el cálculo de las emisiones de GEI.

Trazado de la carretera

Hay tres aspectos principales de una carretera que influyen en el consumo de carburantes, y por tanto en la emisión de GEI:

- **Longitud.** A igualdad de otros factores, cuanto más largo sea un recorrido mayor consumo de carburante y mayores emisiones de GEI. En consecuencia, es el primer aspecto a considerar para comparar alternativas.
- **Rampa.** La pendiente tiene una influencia directa en el consumo de carburantes, más acusada en vehículos pesados. Con carácter general los incrementos de consumo por la pendiente en un sentido se compensan con las reducciones en el sentido contrario, pero si existe un desequilibrio en el tráfico por sentidos puede ser preciso analizar en detalle esta influencia. CEDEX (2013) propone factores de corrección por pendiente (F_{pte}) para vehículos ligeros y pesados:

  · Ligeros: $F_{pte\text{-}ligeros} = 0{,}1437 \cdot P + 0{,}9995$

  · Camiones rígidos: $F_{pte\text{-}camiones\ rígidos} = 0{,}0137 \cdot P^2 + 0{,}2463 \cdot P + 1$

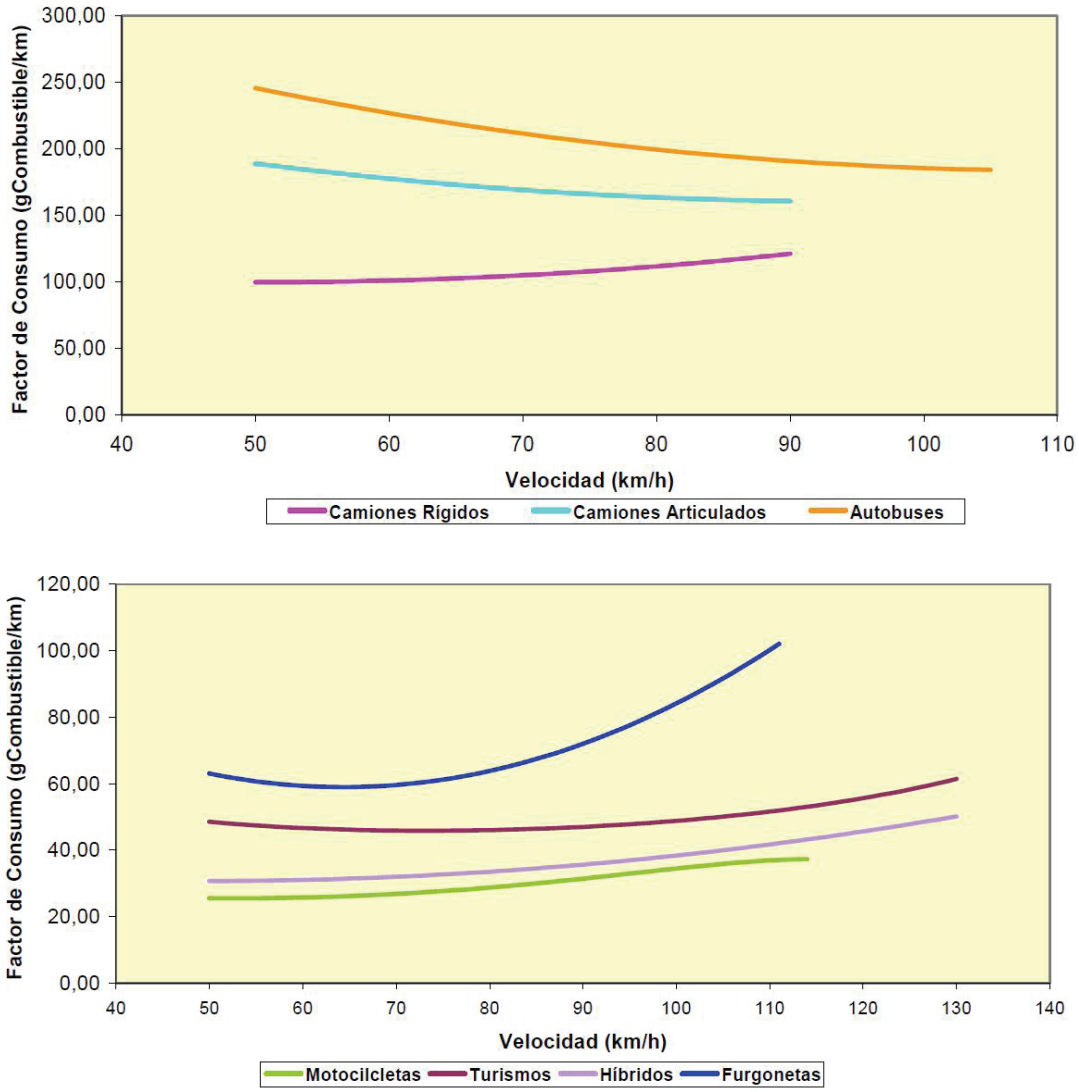
  · Camiones articulados: $F_{pte\text{-}\ camiones\ articulados} = 0{,}0272 \cdot P^2 + 0{,}3288 \cdot P + 1$

  · Autobuses: $F_{pte\text{-}autobuses} = 0{,}0219 \cdot P^2 + 0{,}2964 \cdot P + 1$

  En todos los casos P en la pendiente expresada en % y con signo (+ ó –).

- **Velocidad de circulación.** El consumo de combustible varía con la velocidad de circulación (Figura 32). Cuando la velocidad pueda ser un factor relevante, es posible aplicar un coeficiente de corrección global a las emisiones en función de la velocidad de diseño o la velocidad esperada de circulación.

Figura 32 Factor de consumo de cada categoría de vehículo pesado en función de la velocidad



Arriba: Vehículos ligeros. Debajo: Vehículos pesados. Fuente: CEDEX (2013)

Periodo de referencia

Las emisiones de GEI en la explotación de una carretera se producen a lo largo de toda su vida útil, desde la puesta en servicio hasta el abandono, un concepto más teórico que real, ya que en realidad pocas carreteras se abandonan, más allá de antiguos trazados que quedan sin servicio, quedando al menos como vías de servicio con menor tráfico del original. En consecuencia, el primer paso para el cálculo de las emisiones de GEI de una carretera es determinar un periodo de cálculo. No existen reglas al respecto,

pero es lógico utilizar al menos el año horizonte, 20 años después de la puesta en servicio, empleado en las prognosis de tráfico. Es posible emplear mayores plazos, asumiendo que cuanto mayor sea el periodo más grande será la incertidumbre. Teniendo en cuenta la información disponible en la actualidad, el año horizonte máximo que se podría considerar es 2050, fecha hasta la cual hay previsiones de posibles factores de emisión (Enríquez de Salamanca et al. 2016b).

Tráfico

Tipos de tráfico captados por las carreteras

Una etapa esencial en la planificación de carreteras es determinar su tráfico, que condiciona el tipo de vía (convencional o de alta capacidad), las condiciones de diseño, los firmes o las posibilidades de gestión (como concesiones), entre otros aspectos. Cuando se mejora una carretera se parte de datos conocidos de tráfico, que podrá incrementarse por crecimiento vegetativo y captación a consecuencia de la mejora. En carreteras de nuevo trazado es preciso hacer hipótesis de captación de tráfico. El tráfico es una herramienta esencial, con la que debe contarse al someter un proyecto a EIA. Un aspecto importante para evaluar las emisiones del tráfico es considerar su procedencia, ya que pueden deberse a un tráfico nuevo o ya existente (Tabla 16).

Tabla 16 Tipos de tráfico en una carretera nueva o mejorada

Origen del trafico	Descripción	Influencia del proyecto en la emisión de GEI
Tráfico circulante por la misma vía	En el caso de mejoras de carreteras existentes, tráfico existente en la situación preoperacional en la misma vía, y que se mantendrá	No influye significativamente ya que mantiene el tráfico, aunque pueden variar los consumos
Tráfico circulante por otras vías	Tráfico que circula por otras carreteras, y que pasará a circular por la nueva carretera, o la carretera mejorada, al tener mejores condiciones de circulación (seguridad, velocidad, distancia...)	Se produce una captación de tráfico en la nueva carretera y una reducción en otras. Varían la longitud de recorridos y consumos
Tráfico inducido	Tráfico no existente con anterioridad, y que se induce como consecuencia de la nueva carretera, al mejorar la accesibilidad, acortar tiempos de viaje o mejorar la seguridad.	Nuevo tráfico asociado al proyecto, y por tanto emisiones inducidas por la carretera, que no se producirían sin su construcción

Fuente: Elaboración propia

La construcción o mejora de una carretera implica la canalización de tráfico existente y la inducción de nuevo. El tráfico existente seguirá el mismo itinerario que en la situación preoperacional si se mantiene el trazado (ampliación o mejora), o uno diferente, más largo o más corto. Considerando solo el tráfico canalizado el proyecto puede suponer un incremento o reducción de emisiones de GEI, en función de si el nuevo itinerario supone mayor o menor longitud de desplazamientos. Por ejemplo, el

futuro túnel bajo el río Guadalquivir en la carretera SE-40 (circunvalación de Sevilla), evitará el actual recorrido de decenas de kilómetros, para conectar ambas orillas.

La carretera también puede inducir movimientos que no existían anteriormente, en cuyo caso contribuirá más al cambio climático. Por ejemplo, la mejora de accesibilidad a una determinada comarca puede incrementar los desplazamientos comerciales o turísticos. Los casos más evidentes se dan en regiones remotas; como ejemplos, las carreteras de acceso al Oriente ecuatoriano o el eje multimodal de Amazonas entre Brasil y Perú inducen un tráfico que no existía hasta el momento. A menor escala, este proceso se da de forma sistemática al mejorar la accesibilidad y acortar los tiempos de viaje, induciendo nuevos movimientos antes inexistentes; de hecho, es una de las razones por las que se asocian infraestructuras de transporte y desarrollo económico.

Evolución del tráfico

La evolución del tráfico en España ha sido muy variable, lo que ha llevado a distorsiones entre las previsiones y la situación real. Entre finales de las décadas de 1980 y 1990 se produjo un fuerte crecimiento del tráfico, lo que llevó a que algunas autovías de grandes entornos metropolitanos (como Madrid y Barcelona) quedasen pequeñas poco tiempo después de su construcción, o que las previsiones de tráfico se vieran desbordadas por la situación real (como la M-40 en Madrid). Como consecuencia, desde finales de la década de 1990 hasta prácticamente 2008, los estudios de tráfico pasaron a hacer previsiones más generosas, con hipótesis de crecimiento bajo (1,5%), medio (2,5%) o alto (3,5%), siendo raro considerar la inferior. Muchos de estos estudios sobrevaloraron sus estimaciones, al no prever la influencia de la crisis económica; todas las hipótesis planteadas estaban muy por encima de la realidad, que ha sido una caída del tráfico en lugar del crecimiento previsto.

Como ejemplo, los estudios de tráfico realizados entre 1996 y 1999 preveían en Madrid un colapso de las carreteras nacionales radiales para 2017; como consecuencia se planificaron, y unos años después de ejecutaron, varias autopistas radiales de peaje. Pero la evolución no fue la esperada; el tráfico ha decrecido y las nacionales no están colapsadas. Como consecuencia las autopistas radiales, concesiones de peaje dependientes del tráfico, entraron en concurso de acreedores.

Para evitar que se produjeran nuevamente estas distorsiones, a partir de 2010 la Orden FOM/3317/2010 (BOE 2010) del Ministerio de Fomento estableció unos valores fijos de crecimiento del tráfico para la planificación de carreteras, muy moderados (inferiores a las hipótesis bajas de crecimiento utilizadas hasta entonces), del 1,08% entre 2010 y 2012, el 1,12% entre 2013 y 2016 y el 1,44% a partir de 2017. Aunque estos valores pretenden evitar la fuerte distorsión de las previsiones antes de la crisis, implican un elevado grado de incertidumbre a medio y largo plazo. Sin embargo, las previsiones económicas no apuntan a medio plazo a un fuerte periodo expansivo como el ocurrido en los años 2000, antes de la crisis; por el contrario, se apunta a una lenta

recuperación, amenazada constantemente por una nueva crisis, que no parece que pueda generar crecimientos súbitos del tráfico. En consecuencia, parece razonable adoptar los valores de la Orden FOM/3317/2010, a medio y largo plazo, con las reservas comentadas sobre su incertidumbre.

Emisiones del tráfico

Factor de emisión del tráfico

Un aspecto esencial para determinar las emisiones de GEI del tráfico rodado es establecer las emisiones unitarias de los vehículos, en concreto las tasas de emisión por kilómetro (g CO_2/km). La tasa de emisión es variable a lo largo del tiempo, estando relacionada especialmente con la tecnología aplicada a los motores, cada vez más eficiente. En consecuencia, es función de las tecnologías aplicadas en cada momento, y de la antigüedad del parque móvil de vehículos. Cuando se hacen previsiones a largo plazo sobre las emisiones de una carretera es preciso hacer en primer lugar una prognosis de los factores de emisión para cada año. Para ello, es preciso partir de varias fuentes de información y establecer algunas hipótesis para poder realizar una previsión de la posible evolución de los factores de emisión de los vehículos ligeros y pesados:

- Emisiones medias de los vehículos nuevos vendidos en la UE (g CO_2/km) declaradas por los fabricantes (EEA 2014a, 2015a). La UE establece un límite de emisión de 130 g/km para 2015, 95 g/km para 2021 y recomienda 70 g/km para 2025. Un posible objetivo para 2050 (propuesto en Alemania para 2040) es 35 g/km (Stiller et al. 2009, Garbe et al. 2011). En teoría los objetivos de 2015 ya se han cumplido y los de 2021 son asumibles, aunque la realidad es diferente.
- Emisiones medias medidas condiciones reales de conducción en carretera. Hay una desfase entre las medidas de laboratorio y las reales, que se está incrementando, desde el 7,25% en 2001 al 29,93% en 2013 (Mock et al. 2014, Figura 33), aspecto evidenciado también para otros contaminantes (Kumar et. al 2016). Se asume al hacer las proyecciones que el desfase de 2013 es inaceptable, y que en 2050 se habrá vuelto a un desfase residual del 7,25%.

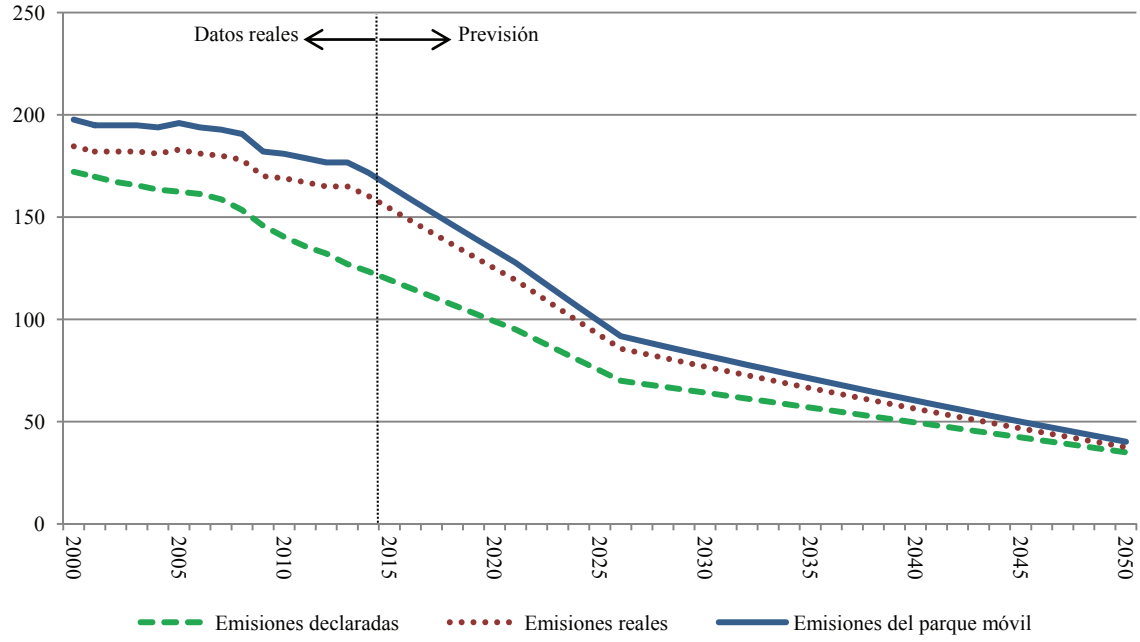
Figura 33 Diferencia entre emisiones declaradas y reales en vehículos nuevos en la UE

Fuente: Mock et al. (2014)

- Emisiones medias del parque móvil. Los datos anteriores se refieren a vehículos nuevos, pero el parque móvil tiene diferentes edades. Empleando datos de 2012, últimos disponibles, de número de vehículos por fecha de matriculación (DGT 2015) se calculan las emisiones medias del parque móvil, 176,68 g/km, y se asume que la diferencia con los vehículos nuevos, un 7,1% más, es constante.
- Emisiones medidas de los vehículos pesados. Las emisiones en vehículos pesados dependen del tipo y peso. Empleando los datos de 2014 de número de autobuses y camiones por peso máximo admitido (DGT 2015) y las tasas de emisión de CO_2 de acuerdo con el peso (Hill et al. 2015) se obtienen el factor medio de emisión de los vehículos pesados, 505 g/km, que equivale a 3,16 vehículos ligeros.

Partiendo de estas hipótesis, se puede realizar una estimación de la evolución de los factores de emisión desde la actualidad hasta el año 2050, máximo horizonte para el que se cuenta con algún tipo de expectativa o previsión (Figura 34).

Figura 34 Emisión de CO_2 (g/km) en vehículos. Datos reales (2000-2014) y previsión (2015-2050)



Fuente: Enríquez de Salamanca et al. (2016b)

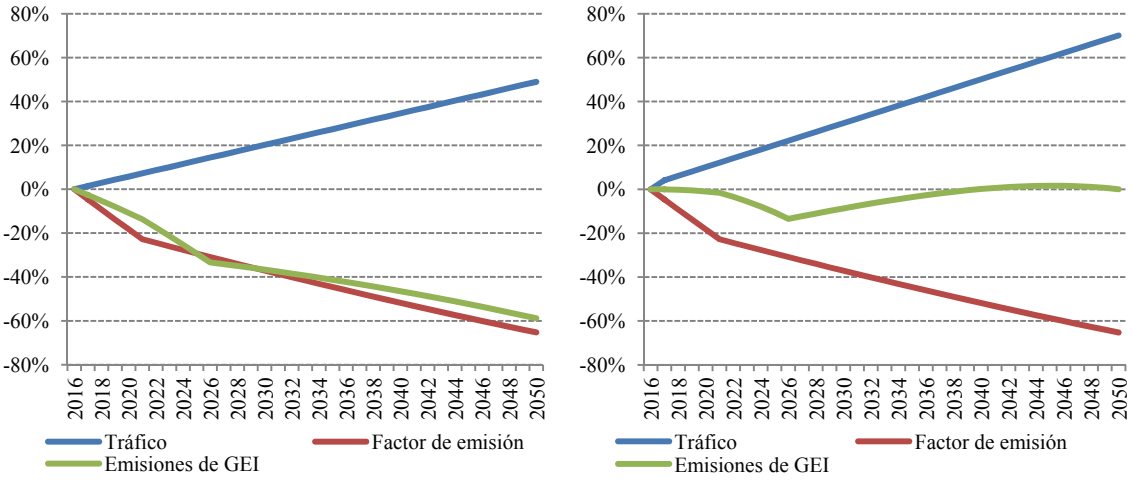
La previsión es una reducción de las emisiones gradual hasta 2050, debido por una parte al incremento progresivo de la eficiencia energética de los vehículos, el creciente uso de biocombustibles y el incremento del parque móvil de vehículos eléctricos y de hidrógeno. Asimismo, y aunque resulta muy especulativo, se ha considerado, como se señaló, una reducción de la brecha entre las emisiones declaradas de los vehículos y las reales, volviendo a la situación del años 2001. El cumplimiento de esta previsión depende principalmente de varios factores:

- La voluntad política de la UE para exigir el cumplimiento de límites cada vez más estrictos, y la aplicación de normas de evaluación que limiten la distorsión entre los estudios de laboratorio y la situación real. Estas exigencias pueden forzar en mayor o menor medida a los fabricantes a mejorar la eficiencia de sus vehículos.
- El apoyo institucional a los biocombustibles, y el grado de exigencia de su utilización, directa (modelo de Suecia) o mezclados con otros carburantes.
- La apuesta por los vehículos eléctricos y de hidrógeno por parte de los gobiernos y su apoyo, no solo en la investigación y fabricación, sino sobre todo en el desarrollo de redes de abastecimiento los suficientemente amplias como para permitir el uso de estos vehículos en condiciones normales de circulación.
- La evolución de la economía, que condiciona la compra de vehículos nuevos, y la antigüedad del parque móvil, mayor en épocas recesivas que en las expansivas.

Hipótesis de evolución de las emisiones de GEI

Estableciendo una hipótesis de evolución desde 2016 hasta 2050 del tráfico y los factores de emisión reales, se puede establecer también una evolución previsible de las emisiones de GEI. Partiendo a los factores de emisión estimados, para un crecimiento anual del tráfico del 1,44% (Orden FOM/3317/2010), las emisiones se reducirían un 59% en 2050 con respecto a 2016 (Figura 35a). Sin embargo, para un crecimiento del 4,12% las emisiones de 2050 igualarían a las de 2016 (Figura 35b). En consecuencia, la evolución futura está condicionada por el tráfico, que es un variable de muy difícil predicción a largo plazo, aunque parece probable que se produzca una ligera reducción, ya que no es previsible alcanzar un 4% de media anual de incremento.

Figura 35 Estimación de evolución del tráfico, factor de emisión y emisiones globales de 2016 a 2050



a. Hipótesis de crecimiento del tráfico del 1,44% anual

b. Hipótesis de crecimiento del tráfico del 4,02% anual

Fuente: Enríquez de Salamanca et al. (2016b)

4.3.1.2. Evaluación de las emisiones de GEI en la construcción

Cálculo de emisiones de GEI en la carretera estudiada

Una vez establecido el periodo de referencia, y partiendo de la previsión de tráfico y la estimación de factores de emisión, el cálculo de las emisiones se puede hacer de forma simplificada de acuerdo con la siguiente expresión:

$$E_{NCx} = \sum \frac{\{(IMD_{Lxi} \cdot FE_{Lx}) + (IMD_{Pxi} \cdot FE_{Px})\} \cdot D_{año} \cdot L_i}{1000000}$$

donde:
- E_{NCx} Emisiones de CO_2 en producidas en la nueva carretera en el año x (t CO_2)
- IMD_{Lxi} Intensidad media diaria de vehículos ligeros en el tramo i durante el año x (vehículos/día) que es:

$$IMD_{Li} = IMD_{total} \cdot \%Ligeros$$

- IMD_{Pxi} Intensidad media diaria de vehículos pesados en el tramo i en el año x (vehículos/día) que es:

$$IMD_{Pi} = IMD_{total} \cdot \%Pesados$$

- FE_L Factor de emisión de CO_2 en vehículos ligeros en el año x (g/km).
- FE_P Factor de emisión de CO_2 en vehículos pesados en el año x (g/km).
- $D_{Año}$ Días al año, 365 en normales y 366 en bisiestos (365,25 días/año).
- L_i Longitud del tramo i (km)

Otra forma más simplificada es establecer la equivalencia entre la emisión de un vehículo ligero y uno pesado, como ha expuesto calcular los factores de emisión, que sería de 3,16 vehículos ligeros por vehículo pesado, y transformar el tráfico de pesados en ligeros equivalentes, usando un solo factor de emisión, de vehículos ligeros.

$$E_{NCx} = \sum \frac{\{(IMD_{Lxi} + 3{,}16 \cdot IMD_{Pxi}) \cdot FE_{Lx}\} \cdot D_{año} \cdot L_i}{1000000}$$

Considerando los diferentes tramos en que se subdivida la carretera por su tráfico, se obtienen las emisiones globales para la carretera o red de carreteras.

A estos valores básicos se pueden aplicar dos factores de corrección, cuando se considere necesario:

- Factor de corrección por la pendiente (F_{pte}). Es importante su aplicación cuando la rampa de la rasante sea acusada (mayor del 4%) y exista una desigualdad en el tráfico entre sentidos. En el resto de casos, y a efectos de una evaluación simplificada como corresponde a la EIA, se puede considerar que el incremento de consumo en un sentido se compensa con la reducción en el contrario.
- Factor de corrección por velocidad (F_{vel}). La aplicación de este factor de corrección es especialmente interesante cuando se planteen varias alternativas con diferente velocidad de diseño. Por ejemplo, en la Autovía Medinaceli-Soria se plantearon tres alternativas, cuyas diferencias de trazado se basaban en la velocidad de diseño, 80, 100 o 120 km/h.

Cálculo de emisiones del tráfico residual

Para evaluar la contribución al cambio climático de una nueva carretera, o la modificación de una existente, es preciso considerar no solo las emisiones asociadas al tráfico que circulará por ella, sino también la evolución del tráfico comarcal. Las emisiones globales de GEI serán las debidas al tráfico captado por la nueva carretera y el remanente en las carreteras existentes. Aunque el tráfico de una nueva carretera pueda ser similar en todas las alternativas, la influencia global puede variar (Enríquez de Salamanca 2016). Esta parte de los estudios de tráfico se ha subestimado con frecuencia, al centrarse el énfasis en justificar un tráfico suficiente para la nueva carretera, sin valorar la influencia en la red existente, algo ciertamente complejo. Sin embargo, si no se incorpora a los cálculos, la toma de decisiones puede ser inadecuada.

Cálculo de emisiones en la alternativa 0

La EIA se basa en predecir los nuevos impactos generados por la ejecución y explotación de un determinado proyecto, en este caso una carretera. Para determinar la contribución al cambio climático asociada a la construcción de una carretera durante un determinado periodo es preciso establecer como referencia la contribución que se produciría si no se ejecutase el proyecto, la denominada alternativa 0 o de no actuación, y que puede derivarse de una sola carretera o de varias, que canalizan el tráfico local y de largo recorrido en la situación sin proyecto.

Cálculo de emisiones inducidas por la construcción de una carretera

El impacto inducido por una nueva carretera será la diferencia entre la situación sin proyecto y la situación con proyecto, es decir la diferencia entre las emisiones de GEI de la nueva carretera y el tráfico residual frente a las emisiones en la alternativa 0.

$$E_{IPx} = E_{NCx} + E_{TRx} - E_{A0x}$$

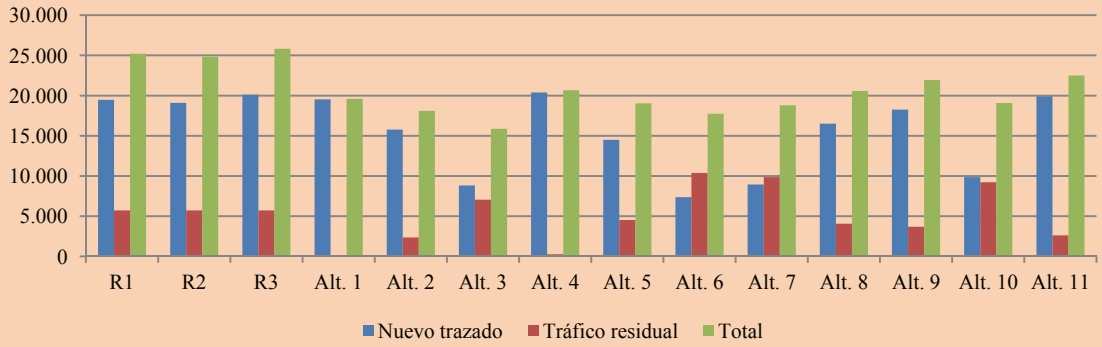
donde:
- E_{IPx} Emisiones inducidas por el proyecto en el año x
- E_{NCx} Emisiones producidas en la nueva carretera en el año x
- E_{TRx} Emisiones del tráfico residual no captado por la carretera en el año x
- E_{A0x} Emisiones producidas en la alternativa 0, sin proyecto, en el año x

Cuando se construyen carreteras de mejores prestaciones suele existir un tráfico inducido, y en consecuencia se produce un incremento de las emisiones de GEI, pero no siempre es así. En ocasiones una nueva carretera supone una reducción en la distancia de transporte, por ejemplo por prever un puente o túnel que acorte el recorrido. En estos casos la nueva carretera puede dar lugar a una reducción de emisiones respecto a la situación preoperacional. El resultado global de esta ecuación permite evaluar la contribución neta de la carretera al cambio climático, y determinar su impacto real. En la siguiente página se recoge un ejemplo de consideración en la EIA de las emisiones generadas en la explotación de distintas alternativas de una autovía.

Cuadro 2. Evaluación de la contribución al cambio climático en la explotación de la Autovía León - La Robla y la Ronda Noroeste de León

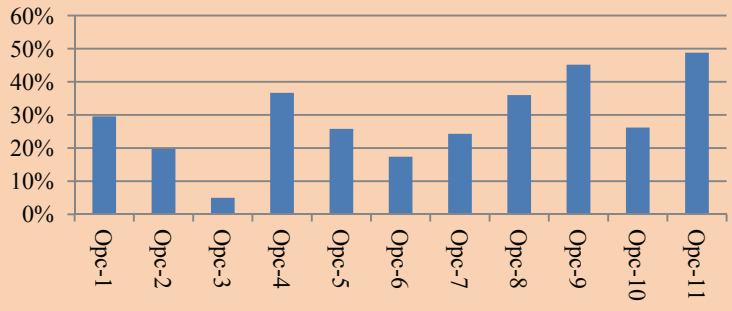
Este caso se desarrolla en el Anexo 2 y se ha presentado en el VIII Congreso Nacional de Evaluación Ambiental (Enríquez de Salamanca 2015). Se analiza la contribución al cambio climático derivada de la explotación de dos nuevas autovías asociadas entre sí, utilizando los indicadores detallados en este apartado. La primera autovía comunicaría León y La Robla, con once alternativas, y la segunda es una ronda de circunvalación de León por el Noroeste, con tres alternativas.

En primer lugar se analizan las emisiones de GEI de los nuevos trazados en función de su longitud y tráfico, y a continuación las derivadas del tráfico residual que se mantienen por la actual red de carreteras. Las emisiones globales de cada alternativa son la suma de ambas emisiones, nuevo trazado y tráfico residual:



Para evaluar la influencia de las alternativas estudiadas se calcula el incremento de emisiones de CO_2, es decir, las generadas en la autovía y el tráfico residual con respecto a la situación futura si no se construyese la autovía y la Ronda.

Opción	Incremento en las emisiones de CO_2
Opc-1	29,6%
Opc-2	19,8%
Opc-3	5,0%
Opc-4	36,7%
Opc-5	25,8%
Opc-6	17,4%
Opc-7	24,3%
Opc-8	36,0%
Opc-9	45,2%
Opc-10	26,2%
Opc-11	48,8%



Aunque la contribución al cambio climático no sea el factor condicionante en la selección de alternativas puede tenerse en cuenta en la valoración global de sus impactos. Existe una diferencia apreciable en el incremento de emisiones de CO_2 entre las alternativas, siendo mínimo en la opción 3, que aprovecha la N-630 en la parte norte y finaliza en la Ronda Noroeste, y máximo en la opción 11, que no aprovecha el corredor de la N-630 en la zona norte pero entra en León por esa carretera. En la Ronda se prevén incrementos de emisiones muy similares en las tres opciones.

4.3.2. Emisiones de GEI en la explotación de ferrocarriles

4.3.2.1. Medición de las emisiones de GEI en ferrocarriles

La contribución al cambio climático en ferrocarriles no es un impacto tan relevante como en las carreteras, por su mayor eficiencia, y porque la mayoría del tráfico captado, tanto pasajeros como mercancías, proviene de medios de transporte más contaminantes como la carretera o el avión. Por ello, en la EIA la contribución al cambio climático en un proyecto ferroviario, a menudo un impacto positivo) no tiene la misma trascendencia que en una carretera, aunque puede ser interesante en el análisis de alternativas, e incluso en la toma de decisiones sobre la viabilidad de la actuación.

Emisiones brutas de GEI

En los ferrocarriles, la contribución al cambio climático está determinada por el consumo energético, el origen de la energía y la longitud de los trazados. El consumo energético de una circulación para un determinado recorrido se puede calcular de acuerdo a la siguiente expresión simplificada (García & Martín 2009):

$$E_{Final} = E_{ra} + E_{fr} + E_{aux}$$

donde: E_{ra} - Energía empleada para vencer la resistencia al avance, que se compone de:
- Resistencia mecánica, incluyendo las de las curvas
- Resistencia a la entrada de aire en el tren
- Resistencia aerodinámica al avance (presión y fricción)

E_{fr} - Energía disipada o regenerada en el freno, usado para:
- Decelerar el tren (en una parada o en un punto de reducción de velocidad).
- No rebasar la velocidad máxima en una pendiente muy pronunciada

E_{aux} - Energía empleada para alimentar los servicios auxiliares:
- Auxiliares técnicos (compresores, ventiladores de motores, etc.)
- Auxiliares de confort en trenes de viajeros (climatización, iluminación, etc.)
- Auxiliares en trenes de mercancías para el acondicionamiento de la carga (frigoríficos).

Las emisiones de CO_2 dependen del origen de la energía. Si se conocen las circulaciones de una línea en un periodo de tiempo, dato básico del proyecto, es posible calcular las emisiones brutas de GEI, en función de la tipología y frecuencia de trenes, el consumo energético y la longitud de trazado. La conversión del consumo energético a emisiones de CO_2 se hace con coeficientes de paso para diferentes fuentes de energía primaria o con las emisiones equivalentes de CO_2 por litro de gasoil (Tabla 17).

Tabla 17 Coeficientes de paso de la energía a emisiones de CO_2

Fuente de energía		**Coeficiente de paso**
Energía eléctrica convencional	Peninsular	649 g CO_2/kWh e [(1)]
	Extra-peninsular (Baleares, Canarias, Ceuta, Melilla)	981 g CO_2/kWh e [(1)]
Gasoil		2 660 g CO_2/l [(2)]

Fuentes: [(1)] IDAE (2014); [(2)] EPA (2005)

Los ferrocarriles propulsados por gasoil son poco eficientes en comparación con los eléctricos, pero en España siguen existiendo muchos tramos ferroviarios sin electrificar, que obligan al empleo de estas circulaciones. Si el tráfico alcanza una cierta intensidad, la opción más lógica es optar por la electrificación de la vía. En ferrocarriles eléctricos un aspecto que condiciona mucho su eficiencia en referencia a la contribución al cambio climático es el origen de la electricidad. Este aspecto sobrepasa el ámbito de la EIA, que no puede entrar en definir el origen de la electricidad que consumirá un ferrocarril a lo largo de su vida útil, pero puede tener importancia a la hora de definir las ratios de emisión por viajero o incluso la idoneidad del propio transporte.

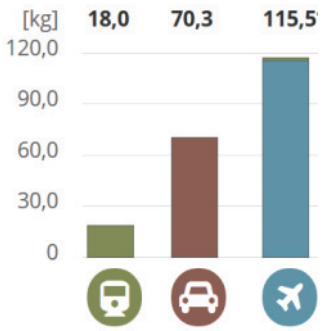
Como ejemplos, en Noruega la electricidad se considera una opción beneficiosa ambientalmente porque proviene principalmente de centrales hidroeléctricas (Singh et al. 2015), muy favorables en referencia al cambio climático (aunque no respecto a la hidrología o la biodiversidad). En China, por el contrario, se consideran significativos los impactos de la operación de los trenes de alta velocidad porque el mix energético del país está fuertemente dominado por las centrales de generación de carbón (Yue et al. 2016), lo que supone una importante emisión de CO_2 y SO_2 en las producción. García & Martín (2012) analizan el consumo y origen de la energía en los ferrocarriles españoles.

Emisiones relativas

En general, las emisiones brutas del ferrocarril son de escasa utilidad en la EIA si no se relaciona con las emisiones reducidas en otros medios de transporte como consecuencia de su captación por el ferrocarril. Una herramienta útil en la evaluación de la contribución al cambio climático en ferrocarriles es la ratio de emisiones de CO_2 por viajero o por unidad de carga, que dependerá de las emisiones brutas y del nivel de ocupación o carga. Aunque esta ratio puede ser empleada en la EIA, resulta de especial utilidad en la EAE, a la hora de evaluar ambientalmente las distintas alternativas modales de transporte.

Por ejemplo, una circulación de alta velocidad entre Madrid y Barcelona tiene una contribución bruta al cambio climático, pero si implica una reducción de trayectos aéreos a consecuencia de un trasvase modal, la contribución neta será favorable, reduciéndose las emisiones. Calculado con la herramienta Ecopassenger (UIC 2016) las emisiones por viajero entre Madrid y Barcelona (Figura 36), se obtienen unos valores en el transporte por carretera 4 veces superiores al ferrocarril, y 8 veces en el avión.

Figura 36 Emisiones por viajero de Madrid a Barcelona



Fuente: Calculado con Ecopassenger (UIC 2016)

Las emisiones de GEI del ferrocarril son sustancialmente menores que las de otros medios de transporte; aunque el 8% del transporte mundial se hace por este medio, solo produce el 3,6% de GEI. Además, entre 1975 y 2012 se han reducido las emisiones un 62% en viajeros y un 46% en mercancías, mientras que en el conjunto del sector del transporte crecieron más de un 50% (Renfe 2015).

El ferrocarril es un medio de transporte eficiente, pero si la línea es deficitaria el consumo energético no se justifica ambientalmente, aunque pueda serlo socialmente. El grado de utilización del ferrocarril es un dato básico de proyecto para determinar su rentabilidad. Conocido el consumo energético y el grado de utilización, es posible establecer una ratio de consumo por viajero, útil para comparar alternativas (Tabla 18). Este indicador es importante para detectar alternativas deficitarias, donde la ratio de emisiones por viajero se dispara, pudiendo superar a otros medios de transporte. En esos casos, la construcción del ferrocarril no se justificaría por su eficiencia energética o emisiones de GEI, aunque pudiera asumirse por razones de accesibilidad o vertebración territorial. En el transporte de mercancías la eficiencia se puede calcular de forma análoga, con una ratio de emisiones por unidad de carga, generalmente toneladas.

Tabla 18 Emisiones por viajero en las principales rutas ferroviarias españolas en 2014

Tipo de recorrido	Tipo de circulación	Origen	Destino	kg CO_2/viajero
Larga distancia	Alta velocidad	Madrid	Barcelona	7,819
		Madrid	Sevilla	5,590
		Madrid	Valencia	5,521
		Madrid	Málaga	5,964
		Madrid	Zaragoza	3,599
		Madrid	Córdoba	4,459
		Barcelona	Zaragoza	3,540
		Madrid	Valladolid	3,291
		Madrid	Tarragona	6,020
	Convencional	Barcelona	Valencia	3,148
		Madrid	Pamplona	5,355
		Madrid	Murcia	11,770
		Barcelona	Alicante	4,743
		Madrid	Asturias	5,861
		Madrid	León	3,420
		Madrid	Cádiz	5,667
		Madrid	Granada	6,965
Media distancia	Alta velocidad	Madrid	Toledo	0,886
		Madrid	Ciudad Real	2,128
		Sevilla	Córdoba	2,335
		Madrid	Segovia	0,666
		Madrid	Valladolid	1,770
		Barcelona	Lleida	2,335
		Madrid	Puertollano	2,601
		Sevilla	Málaga	5,207
		Barcelona	Girona	0,960
		Barcelona	Tarragona	1,974
		A Coruña	Santiago	2,292
		Girona	Figueres	0,491
	Convencional	Barcelona	Reus	1,148
		Barcelona	Torredembarra	1,317
		Madrid	Ávila	4,468
		Madrid	Salamanca	7,002
		Sevilla	Jerez de la Frontera	1,019

Fuente: García et al. (2015)

4.3.2.2. Evaluación de la reducción de emisiones por cambio modal de transporte

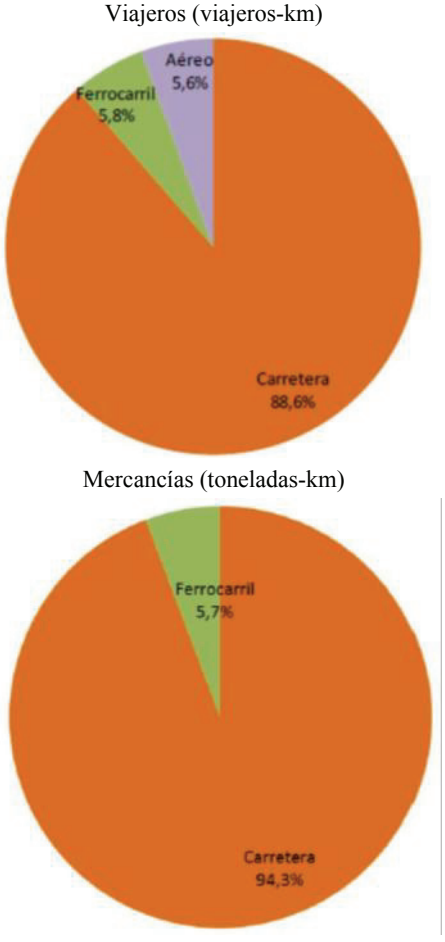
El ferrocarril es un transporte más eficiente en cuanto a emisión de GEI por viajero, con valores inferiores al avión o la carretera. En consecuencia, la captación de viajeros de otros modos de transporte hacia el ferrocarril implica una reducción en las emisiones de GEI, siempre que se reduzca la circulación en el transporte detraído.

En el transporte aéreo se produce una competencia entre modos de transporte colectivo. Inicialmente la distribución modal de viajeros puede llevar a una menor utilización de ambos transportes, pero a medio plazo la oferta se ajusta a la demanda, y los viajeros que capta el ferrocarril se traducen en una reducción de la cantidad de vuelos, y con ello de las emisiones; es un proceso complejo influenciado por razones operativas y comerciales. Esto ha ocurrido por ejemplo en los trayectos Madrid-Sevilla o Madrid-Barcelona con la puesta en servicio de las líneas de alta velocidad; en el segundo caso la puesta en servicio es más reciente, y aún está en fase de ajuste, pero en el primero hay un evidente éxito comercial del AVE a Sevilla frente al avión.

En la captación de usuarios de vehículo privado hacia el ferrocarril la relación causa-efecto es directa, ya que al utilizar el ferrocarril dejan de emplear su vehículo privado. Cuantificando las emisiones que dejarán de producir los vehículos privados al pasar sus usuarios a utilizar el ferrocarril, se cuantifica la reducción de emisiones por cambio modal. Un ejemplo se recoge en el Cuadro 3 y el Anexo 2. De forma análoga, puede hacerse un estudio comparativo de las emisiones del transporte de mercancías por ferrocarril y otros medios de transporte.

Pese al potencial de reducción de emisiones de GEI mediante trasvase modal al ferrocarril, tanto en el transporte de viajeros como de mercancías, la dominancia de la carretera sigue siendo clara; los datos de 2013 (MFOM 2015a) arrojan para la carretera una cuota modal de tráfico de viajeros del 88,6% y de mercancías del 94,3%, frente a un 5,8% y 5,7% respectivamente del ferrocarril (Figura 37), por lo que aún queda un largo camino por recorrer en cuando al fomento del ferrocarril.

Figura 37 Cuotas modales de transporte de viajeros y mercancías en 2013



Fuente: MFOM (2015a)

Cuadro 3. Evaluación de la contribución al cambio climático en la explotación de la prolongación del ferrocarril de Cercanías a Soto del Real

Este caso se desarrolla en el Anexo 2 y se ha presentado en el VIII Congreso Nacional de Evaluación Ambiental (Enríquez de Salamanca 2015). Se analiza la reducción en la contribución al cambio climático por la captación de usuarios de vehículo privado en diferentes alternativas del ferrocarril de cercanías entre Colmenar Viejo y Soto del Real (Madrid). Las alternativas son similares en trazado, variando el número de vías y estaciones y la forma de explotación y frecuencia de trenes.

Combinando las opciones de explotación, vía única o doble, una o dos estaciones y explotación conjunta con la actual línea de cercanías o independiente, se seleccionan cuatro alternativas, en las que varía la frecuencia de paso de trenes y el tiempo de recorrido, lo que da lugar a una mayor o menor captación de usuarios de vehículo privado que actualmente se desplazan una parte a Colmenar Viejo, donde aparcan y cogen el tren, y otras a Madrid. Una vez establecido el origen y destino de los usuarios captados, y conocida la distancia media de los desplazamientos, se puede determinar la reducción de km recorridos en vehículo privado por cada alternativa. Con este valor, y considerando el factor medio de emisión de CO_2 en los vehículos ligeros, se transforman los km de viaje eliminados en emisiones de CO_2.

	Reducción de emisiones de CO_2 de vehículos privados		
	Alternativa	**Reducción de recorridos**	**Reducción de emisiones**
1a	Explotación conjunta con la línea C4B Estaciones: Soto Norte y Soto Sur Vía doble en todo el recorrido Frecuencia: hora punta 9-14 m; hora valle 20-23 m Tiempo de recorrido: 13 m 40 s	64 085 km/día	10,25 t de CO_2/día
1b	Explotación conjunta con la línea C4B Estaciones: Soto Norte únicamente Vía doble en todo el recorrido Frecuencia: hora punta 9-14 m; hora valle 20-23 m Tiempo de recorrido: 11 m 31 s	49 925 km/día	7,99 t de CO_2/día
2c	Explotación conjunta con la línea C4B Estaciones: Soto Norte y Soto Sur Vía doble a Soto Sur y única hasta Soto Norte Frecuencia: hora punta 22-28 m; hora valle 39-42 m Tiempo de recorrido: 13 m 40 s	21 845 km/día	3,50 t de CO_2/día
3b	Lanzaderas independientes de la línea C4B Estaciones: Soto Norte y Soto Sur Vía doble a Soto Sur y única hasta Soto Norte Frecuencia: hora punta 22-28 m; hora valle 39-42 m Tiempo de recorrido: 12 m 19 s	21 845 km/día	3,50 t de CO_2/día

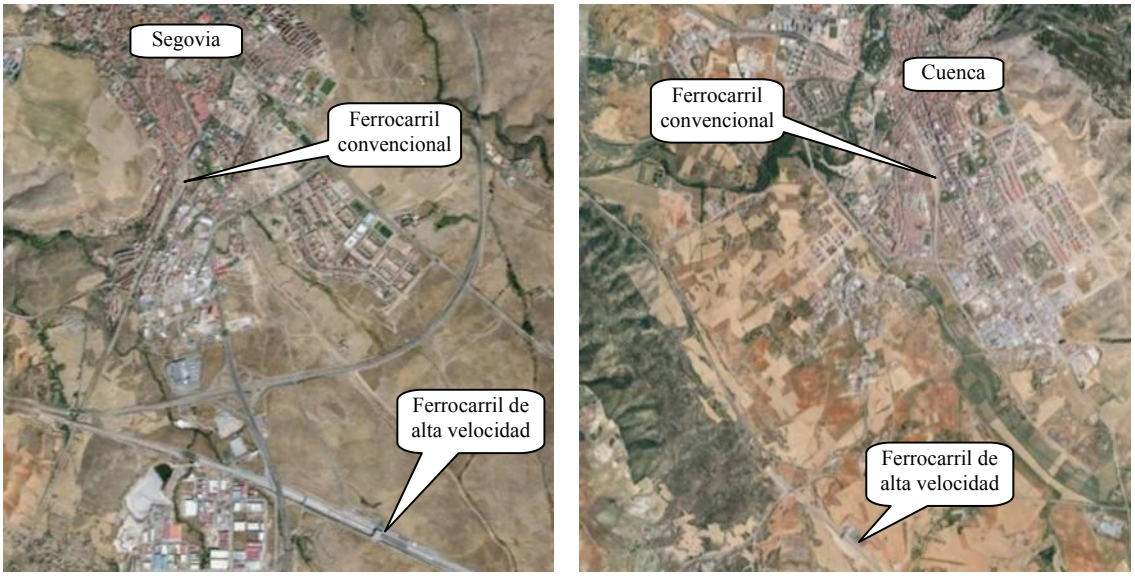
Se identifica un impacto positivo por reducción de emisiones de CO_2 por captación de usuarios de vehículo privado, de entre 3,50 y 10,25 t CO_2/día. Estos resultados se incorporan a la valoración de las alternativas. Aunque no es un criterio determinante ni el único empleado, se suma al resto de efectos para proponer la mejor alternativa, que de hecho es la que logra mayor reducción de emisiones de CO_2.

4.3.2.3. Evaluación de emisiones asociadas a la ubicación de las estaciones

Puede ser relevante en la EIA el cálculo de las emisiones de GEI asociadas a diferentes alternativas de ubicación de estaciones. Aparte de los efectos ambientales derivados de las propias ubicaciones, la distancia a los núcleos de población a que dan servicio, y los modos de transporte utilizados para acceder a ellas condicionan las emisiones de GEI, que puede diferir entre opciones. Este aspecto es relevante cuando se plantean alternativas de ubicación de estaciones urbanas y extraurbanas.

Las estaciones son el punto de acceso al ferrocarril, y los usuarios deben acceder a ella desde sus ubicaciones físicas (vivienda, trabajo, turismo...) para tomar el tren. En función de la distancia de la estación a esas ubicaciones y de las alternativas de movilidad (a pie, autobús, metro, coche,...) se inducen unos desplazamientos, que puede contribuir al cambio climático. Hay casos significativos como algunas estaciones asociadas a la alta velocidad en España, fuera de cascos urbanos en lugar de en su interior como las antiguas (Figura 38), o en Francia, como las estaciones de TGV de Amiens, conocida como *gare de betterades* o estación de las remolachas por estar rodeada de estos cultivos, Metz-Nancy, Oyonnax o Aix-en-Provence (MFOM 2014).

Figura 38 Localización de estaciones de ferrocarril en Segovia y Cuenca



Fuente: Elaboración propia. Ortofoto Iberpix (http://www.ign.es)

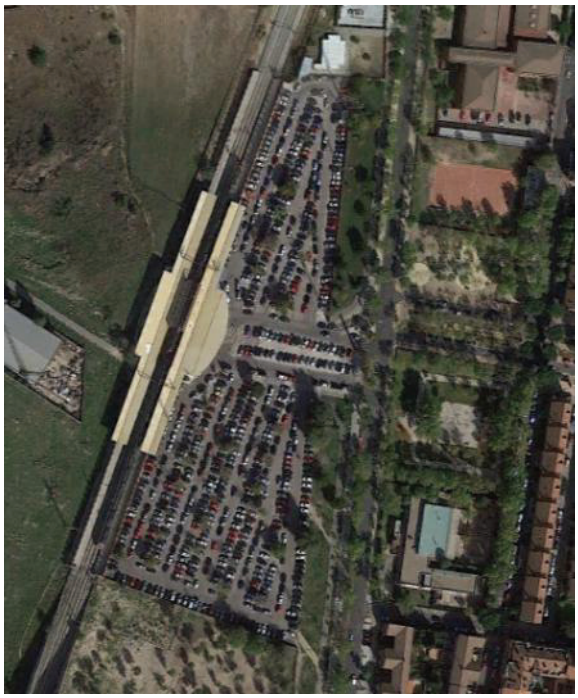
La construcción de estaciones ferroviarias fuera de cascos urbanos tiene ventajas importantes. Se facilita la ejecución, más compleja en zonas urbanas; además, las estaciones urbanas suelen requerir obras más intensivas, como túneles, cubiertas, protecciones acústicas y pasos superiores o inferiores para garantizar la permeabilidad, lo que supone mayores emisiones de GEI en las obras. También la ubicación de las estaciones influye en los tiempos de recorrido, sobre todo en alta velocidad, ya que se debe circular a baja velocidad en el tramo urbano, algo que no ocurre en las estaciones periféricas. Por eso, salvo grandes ciudades, tienden a evitarse las estaciones urbanas.

Pese a las ventajas constructivas y de ahorro de tiempo en largos recorridos, las estaciones periféricas pueden tener inconvenientes en la explotación, al afectar a la utilización del ferrocarril por su distancia al centro urbano, obligando a los usuarios a realizar un desplazamiento, a veces de varios kilómetros, para acceder al ferrocarril. Ese desplazamiento se suma al propio trayecto ferroviario, alargando el tiempo total de viaje. En largos recorridos la influencia no es crítica, pero en cortos y medios si, pudiendo llevar a una pérdida de competitividad del transporte ferroviario frente a otros modos, como el vehículo privado. No es una decisión sencilla, ya que favorecer los desplazamientos cortos y medios con estaciones céntricas puede penalizar los tiempos totales de viaje en largo recorrido, haciendo que el tren sea menos competitivo frente a otros modos de transporte como el avión. Dependiendo del tipo de desplazamiento preferente y la población servida por cada estación, la decisión puede ser una u otra.

Aparte de la influencia en el uso del ferrocarril, y en el potencial trasvase modal de usuarios de otros modos de transporte más contaminantes, es importante considerar las emisiones de GEI inducidas por la ubicación de las estaciones. Las estaciones periféricas precisan un desplazamiento no peatonal hasta ellas, con las consiguientes emisiones de GEI, que deben considerarse en el cómputo total por viajero.

No obstante, el impacto de las estaciones depende de la estructura residencial del territorio, y el tipo de movilidad, de largo o corto recorrido. Las estaciones urbanas con escaso aparcamiento (o de pago) favorecen solo al usuario del casco urbano, mientras que estaciones alejadas con amplias zonas de aparcamiento captan más usuarios de vehículo privado, sobre todo en ferrocarriles de cercanías y cuando existen zonas residenciales mal comunicadas. Este modelo de estaciones con amplias zona de aparcamiento resulta efectivo para captar usuarios de vehículo privado para que no accedan a los centros urbanos. En la aglomeración de Madrid se comprueba el intenso uso de los aparcamiento de estaciones de cercanías en ciudades periféricas como Getafe (Figura 39) o Las Rozas, cuando son amplios y gratuitos. Este uso se ve reforzado cuando el estacionamiento en la ciudad es escaso y caro (p.e. Estocolmo) o existen peajes urbanos, en el centro (p.e. Londres) o para acceder a la ciudad (p.e. Bergen).

Figura 39 Estación de cercanías y aparcamiento



Getafe-Las Margaritas (Madrid) . Fuente: Elaboración propia. Ortofoto Iberpix (http://www.ign.es)

4.4. Contribución al cambio climático durante el mantenimiento y operación

El mantenimiento y operación son parte de la explotación de las infraestructuras, pero se tratan en un apartado independiente por el origen diferente de los impactos generados en estas operaciones y su responsabilidad. Dentro de este grupo se pueden diferenciar las operaciones de mantenimiento y reposición de la operación de las infraestructuras. Todas estas actuaciones llevan implícitas emisiones de GEI, si bien en el cómputo global suponen poco más de 1% del total (Berzosa 2013).

4.4.1. Mantenimiento, conservación y reposición

4.4.1.1. Operaciones periódicas de mantenimiento

Durante la explotación de las infraestructuras de transportes es necesario realizar operaciones periódicas de mantenimiento para garantizar el adecuado funcionamiento, las condiciones de seguridad y la limpieza (Tabla 19). Estas labores de mantenimiento periódico son responsabilidad del titular de la infraestructura, quien las realiza directamente con medio propios o por medio de una contrata. Su frecuencia e importancia depende del tipo de infraestructura, siendo especialmente intensas en carreteras de alta capacidad o de elevado tráfico y en líneas ferroviarias de alta velocidad o con elevada frecuencia de paso de circulaciones.

Tabla 19 Operaciones periódicas de mantenimiento

Carreteras	**Ferrocarriles**
Limpieza de plataformas (barredoras)	Mantenimiento de superestructura y electrificación
Limpieza de márgenes (retirada de residuos)	Mantenimiento de transformadores
Extensión de fundentes en épocas de riesgo de nevadas	Revisión de señalización y elementos de seguridad
Revisión de la señalización luminosa e iluminación	Mantenimiento de carriles
Comunes	
Limpieza de obras de drenaje longitudinal y transversal (tierras, residuos sólidos y basuras, restos vegetales...)	
Siegas, desbroces, podas y recogida de residuos vegetales.	
Aplicación de herbicidas.	
Reparación de elementos dañados o deteriorados (biondas, barreras, señalización, marcas viales, etc.)	
Reparación de cerramientos	
Riegos para mantenimiento de plantaciones y reposiciones de marras	

Fuente: Elaboración propia

4.4.1.2. Operaciones de conservación y reposición

Las diferentes partes de una infraestructura tienen una determinada vida útil, tras la cual deben ser reparadas o sustituida. Los casos más habituales en carreteras son:

- Reposición de la capa de rodadura. La vida útil del firme depende de su tipo y tráfico. En firmes asfálticos se debe reponer la capa de rodadura cada 5 a 15 años. El cambio climático puede acelerar la degradación de firmes y acortar este plazo.
- Repintado de marcas viales, que pierden reflectancia por el uso y envejecimiento.
- Sustitución de elementos afectados por la corrosión (señales, luminarias, biondas).

Los impactos asociados a la conservación y reposición de estos elementos están muy relacionados con los generados en la fase de construcción. Es posible considerarlos en la EIA calculando las emisiones asociadas de forma análoga a la ejecución de esas unidades de obra en la fase de construcción, y de acuerdo con las previsiones de vida útil de los distintos elementos que se haga en la planificación.

4.4.2. Operación de las infraestructuras

4.4.2.1. Iluminación

Existen tramos de las infraestructuras que precisan iluminación en periodo nocturno, lo que implica un consumo energético, y en consecuencia una contribución al cambio climático derivada de la emisión de GEI en la generación de energía. Los ferrocarriles no precisan iluminación de la infraestructura para la circulación, limitándose a estaciones o tramos conflictivos por seguridad vial como los pasos a nivel. Sin embargo las carreteras si precisan la iluminación de ciertos tramos por razones de seguridad, aspecto que está profusamente regulado. Un estudio sobre huella de carbono en la construcción y mantenimiento de las carreteras en Holanda (Keijzer et al. 2015) destaca entre las fuentes que contribuyen significativamente la iluminación.

El Ministerio de Fomento cuenta con recomendaciones para la iluminación de carreteras y túneles desde 1999, donde se establecían criterios para diseñar y proyectar la iluminación de las carreteras y túneles. Desde entonces se han dictado numerosas normas y recomendaciones de aplicación a la iluminación de carreteras (Tabla 20). La instrucción técnica EA-01 (BOE 2008b) define las "instalaciones de alumbrado vial funcional", que con independencia del tipo de lámpara, pavimento y características o geometría de la instalación, deberán cumplir unos requisitos mínimos de eficiencia energética.

De acuerdo con la instrucción EA-02, los niveles de iluminación requeridos por las vías dependen de múltiples factores como el tipo de vía, la complejidad de su trazado, la intensidad y sistema de control del tráfico o la separación entre carriles destinados a distintos tipos de usuarios. En función de estos criterios, las vías de circulación se clasifican en varios grupos o situaciones de proyecto, asignándose a cada uno de ellos unos requisitos fotométricos que tienen en cuenta las necesidades visuales de los usuarios y aspectos medioambientales de las vías.

Tabla 20 Normas de aplicación a la iluminación de carreteras

Norma	Descripción	Aplicación
CIE 140: 2000	Cálculos para la iluminación de vías públicas.	Cielo abierto
CIE 154: 2003	Informe técnico. El mantenimiento de sistemas de iluminación exterior.	Cielo abierto
CIE 88:2004	Guía para el alumbrado de túneles de carretera y pasos inferiores.	Túneles
UNE-EN 13201-2:2004	Iluminación de carreteras. Parte 2: Requisitos de prestaciones.	Cielo abierto
UNE-EN 13201-3:2004	Iluminación de carreteras. Parte 3: Cálculo de prestaciones.	Cielo abierto
UNE-EN 13201-4:2005	Iluminación de carreteras. Parte 4: Métodos de medida de las prestaciones de iluminación.	Cielo abierto
RD 635/2006	Real Decreto 635/2006, de 26 de mayo, sobre requisitos mínimos de seguridad en los túneles de carreteras del Estado.	Túneles
UNE-CR 14380:2007 IN	UNE-CR 14380:2007 IN Aplicaciones de iluminación. Alumbrado de túneles.	Túneles
RD 1890/2008	Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07. EA-01 Eficiencia Energética EA-02 Niveles de iluminación EA-03 Resplandor luminoso nocturno y luz intrusa o molesta. EA-04 Componentes de las instalaciones EA-05 Documentación técnica, verificaciones e inspecciones EA-06 Mantenimiento de la eficiencia energética de las instalaciones EA-07 Mediciones luminotécnicas en las instalaciones de alumbrado	Cielo abierto y túneles
CIE 189: 2010	Criterios de calidad de los cálculos de iluminación de túneles	Túneles
CIE 115:2010	CIE 115:2010 Alumbrado de carreteras para tráfico de vehículos y peatones.	Cielo abierto

Fuente: Elaboración propia

Para adaptarse a los cambios producidos desde 1999, en especial el creciente número de túneles en la Red Carreteras del Estado, la aparición de la tecnología LED para la iluminación y la modificación de la estructura tarifaria y el incremento del coste de la energía al Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento elaboró diversas instrucciones, y finalmente se emitió la Orden Circular 36/2015 de 24 de febrero, sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. Esta Orden es un documento exhaustivo publicado en dos tomos, el primero referido a iluminación de carreteras a cielo abierto y el segundo a túneles (MFOM 2015b, 2015c).

Con respecto a la EIA, es posible conocer los tramos de una carretera que precisarán iluminación y las características de ésta de acuerdo con la Orden Circular 36/2015, y en función de ello calcular el consumo de energía de las diferentes alternativas. Conocido el consumo energético para un determinado periodo de tiempo (anual o hasta el año horizonte) se pueden calcular las emisiones de CO_2 en función de los coeficientes de paso a energía primaria anteriormente indicados (Tabla 17).

4.4.2.2. Instalaciones operativas con suministro eléctrico

Además de la iluminación, las infraestructuras de transporte precisan energía eléctrica para el funcionamiento de otros equipamientos e instalaciones, como la señalización, balizas de control, equipos de seguimiento o cámaras (Tabla 21).

Tabla 21 Instalaciones operativas con suministro eléctrico

Carreteras	Ferrocarriles
Instalaciones de extracción de aire en túneles	Señales luminosas y mecánicas
Instalaciones de bombeo para drenaje	Accionamientos electromecánicos de agujas
Señalización variable, de curvas o de puntos peligrosos	Pasos nivel. Señalización y operación
Semáforos	Sistemas electrónicos de detección de tren
Cámaras de control y circuitos cerrados de TV	Comprobadores eléctricos de posición de espadines
Radares	Sistemas de de bloqueo automáticos de trenes
Estaciones de aforo de tráfico	Puestos de radio y repetidores
	Puestos de control

Fuente: Elaboración propia

En carreteras estas fuentes de consumo corresponden a distintos titulares, lo que no tiene repercusiones a efectos de su contabilidad y consideración en la EIA, pero si en caso de plantearse su compensación, ya que las responsabilidades difieren. Instalaciones como la ventilación de túneles o bombeos son parte de la propia infraestructura, gestionadas por el titular de la carretera. Las señalización variable, cámaras de control, circuitos de TV y radares, asociados al control del tráfico y seguridad vial, dependen de la Dirección General de Tráfico o de organismos autonómicos equivalentes. La señalización de puntos peligrosos, semáforos y estaciones de aforo de tráfico son competencia del titular de la infraestructura. De todas estas fuentes solo tienen un consumo apreciable las instalaciones de ventilación y bombeo.

Los ferrocarriles tienen instalaciones de control y seguridad mucho más importantes a lo largo de toda la línea, con una fuerte dependencia de la electricidad para su funcionamiento. Sin embargo, su consumo es muy limitado en comparación con el de las propias circulaciones ferroviarias, que es la fuente principal de consumo. Por ello, no resultan muy significativas a efectos de la EIA.

4.4.2.3. Estaciones

La contribución al consumo energético de la infraestructura ferroviaria por las estaciones, y con ello a las emisiones globales de GEI, dependerá de la importancia que tengan, y del número de ellas que se planteen en un trazado. En estudios generales, por ejemplo estudios informativos y EsIA de grandes líneas ferroviarias, no suele existir suficiente detalle para valorar la contribución al cambio climático de estos elementos, siendo posible a lo sumo una estimación en función del número de estaciones.

Sin embargo, en estudios y proyectos más concretos si puede ser un factor a considerar. Por ejemplo, en el EsIA de la variante ferroviaria entre La Ola y Sondika (Bizkaia) se plantean dos alternativas para la nueva estación soterrada de Sondika, con un andén central o dos laterales, existiendo diferencias en cuanto a accesos y ascensores necesarios entre ellas, además de en la funcionalidad y comodidad para el transbordo (Cabello et al. 2016). En casos concretos como éste si es posible considerar, entre otros factores, el consumo energético y emisiones de GEI asociadas a la operación.

4.4.3. Evaluación de la emisión de GEI en el mantenimiento y operación

La contribución al cambio climático asociada al mantenimiento y operación de las infraestructuras lineales de transporte es un impacto que se produce en la explotación, tras la puesta en servicio, y sobre el que se dispone de poca información a la hora de afrontar la EIA. Cuando existen fuentes de elevado consumo, como la iluminación de carreteras o la ventilación de túneles, es recomendable calcular las emisiones de estas instalaciones, en función de su cantidad, ubicación y potencia, aunque sea de forma estimada, ya que puede ser notable, y diferir de forma importante entre alternativas.

Para el resto de operaciones, una solución para la EIA es relacionarlas con operaciones cuyas emisiones sean conocidas, como la construcción o explotación. En carreteras, como se señaló (Berzosa 2012, Figura 30) la emisión de GEI durante 20 años corresponde en un 31,47% a la construcción, un 67,22% a la explotación y un 1,31% al mantenimiento. Siguiendo la proporción explotación-mantenimiento, ya que ambas operaciones se desarrollan en paralelo, la emisión global de GEI en la fase de mantenimiento de carreteras puede estimarse en un 1,95% de las emisiones en la explotación. Para los ferrocarriles no se cuenta con datos precisos, y además las emisiones en la explotación difieren de las carreteras, aunque no así las derivadas de la construcción. Por eso, siguiendo las anteriores proporciones puede usarse una ratio de emisión del 0,21% de las emisiones de GEI de la construcción cada año. Como consecuencia, pueden establecer dos indicadores de cálculo, uno para carreteras y otro para ferrocarriles, basados en estas relaciones (Tabla 22).

Tabla 22 Indicadores para el cálculo de las emisiones de GEI en el mantenimiento de infraestructuras

Indicador	Definición	Unidad	Cálculo
$ECM_{carreteras}$	Emisión de CO_2 en la conservación y mantenimiento de carreteras	t CO_2	$ECM_{carreteras} = 0{,}0195 \cdot E_{NCx} \cdot T$ E_{NCx} = Emisiones de la nueva carretera en el año x (4.3.1.2) T = Tiempo de estudio (años). Al menos 20 años
$ECM_{ferrocarriles}$	Emisión de CO_2 en la conservación y mantenimiento de ferrocarriles	t CO_2	$ECM_{ferrocarriles} = 0{,}0021 \cdot CC_{construcción} \cdot T$ $CC_{construcción}$ = Emisiones en la fase de construcción (4.2.3) T = Tiempo de estudio (años). Al menos 20 años

Fuente: Elaboración propia

4.5. Retos en la consideración de la contribución al cambio climático

A lo largo de este capítulo se han analizado las causas de contribución al cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte, y se han propuesto métodos para su evaluación en incorporación a la EIA. Pero la efectividad de estas propuestas depende de algunos aspectos más generales que trascienden al esfuerzo de consultores y evaluadores. En primer lugar, el establecimiento de umbrales para comenzar a considerar la contribución al cambio climático, como se ha propuesto en Estados Unidos, puede llevar a que no se consideren en muchos casos. En segundo lugar, la falta de análisis de impactos acumulativos puede generar una infravaloración de estos impactos. También la fragmentación de proyectos puede dar lugar a que se evite la EIA, o se haga de forma inadecuada. Finalmente, la evaluación de la contribución al cambio climático puede resultar muy poco útil si no se incorpora a la toma de decisiones.

4.5.1. Umbral de consideración de las emisiones de GEI

Las infraestructuras lineales de transporte son proyectos a largo plazo, con importantes emisiones de GEI, sobre todo en las carreteras. Al ser un impacto acumulativo y significativo debería considerarse en la EIA en todos los casos (como marca la Ley 21/2013 y la Directiva de EIA), y no solo cuando su magnitud sea muy grande. Por ello, no resulta recomendable establecer umbrales de consideración.

Todo proyecto de carretera sometido a EIA, con independencia de su longitud, debería incluir el cálculo de las emisiones de GEI hasta el año horizonte de todas sus alternativas. Para el caso de los ferrocarriles, partiendo de su mayor eficiencia, los estudios deberían centrarse en la efectividad de las alternativas, bien en cuanto a la emisión de GEI por viajero o en cuanto a la captación o trasvase modal de usuarios, también con independencia del volumen global de emisiones.

4.5.2. Evaluación de impactos acumulativos sobre el cambio climático

La contribución al cambio climático es un impacto acumulativo, con muchas actuaciones con contribución individual escasa, pero un resultado global trascendental. La EIA se centra en analizar "efectos significativos" sobre el medio ambiente, un concepto ambiguo pero clave en la EIA (Lawrence 2007, Briggs & Hudson 2013, Jones & Morrison-Saunders 2016). Esta ambigüedad ha permitido a menudo recurrir a que los impactos no eran significativos para evitar su consideración. En el caso del cambio climático considerar los impactos no significativos, de forma abierta o por omisión, ha sido una excusa para dejarlos fuera de la EIA, la toma de decisiones y la aplicación de medidas de mitigación. Smith (2010) considera que es precisamente el tipo de impacto acumulativo que debe ser considerado en la EIA, y señala diferentes excusas para no considerarlo como que es demasiado especulativo, que el proyecto es sólo una pequeña

parte del problema, que no puede resolver el problema global o que los efectos no se manifiestan en la zona de actuación. Una solución adoptada en Estados Unidos es adoptar un umbral de consideración, que no parece la mejor opción.

La consideración del impacto acumulado de las emisiones de un determinado modo de transporte, y la comparación de la contribución al cambio climático de las distintas opciones modales o combinaciones encaja mucho mejor en la EAE, donde se pueden barajar escenarios mucho más generales y globales de movilidad. Sin embargo el que la EAE sea un herramienta potente para la toma de decisiones estratégicas sobre modos de transporte no debe llevar a considerar la EIA inútil en este sentido.

En primer lugar, con frecuencia no existe EAE, no ha considerado el cambio climático o la consideración es muy general. En estos casos, la EIA es el primer momento en que se tiene en cuenta el cambio climático. En segundo lugar, aunque exista una EAE que haya considerado el cambio climático, el nivel de detalle será escaso, y difícilmente permitirá conocer la contribución concreta de un determinado proyecto. Además, esa contribución concreta puede permitir diferenciar entre alternativas, e influir en la toma de decisiones. Por último es en la fase de EIA donde se puede diseñar la mitigación y compensación de la contribución al cambio climático.

El hecho de que cada proyecto se evalúe de forma independiente no impide la consideración de los impactos acumulativos. Therivel & Ross (2007) analizan el empleo de la "evaluación de efectos acumulativos" (CEA - *Cumulative effects assessment*) como una parte integral de la EIA y la EAE, que permite ligar las diferentes escalas de la evaluación ambiental, considerando como un receptor se ve afectado por la totalidad de planes, proyectos o actividades en lugar de por un solo plan o proyecto. En este caso el receptor sería el calentamiento global, caso concreto citado por estos autores.

4.5.3. Problemas asociados al fraccionamiento de proyectos

Este tema se ha abordado en Enríquez de Salamanca (2016). El fraccionamiento de proyectos no se incluye entre las principales preocupaciones, debilidades o amenazas de la EIA (Pinho et al. 2010, Bond & Pope 2012, Morgan 2012), y por ello no ha recibido mucha atención en la literatura científica, o incluso se considera que es una cosa del pasado (Jiricka & Pröbstl 2009). Sin embargo, es una práctica mucho más común de lo reconocido, en España, y probablemente a nivel internacional.

El término más ampliamente usado es *salami-slicing*, muy gráfico, y que se define como la práctica de dividir un proyecto en varios que individualmente no excedan los umbrales de la EIA, o no tengan efectos significativos en una análisis caso por caso, y en consecuencia no requieran EIA, pero que si podrían ser significativos si se toman en consideración en conjunto (EC 2003); la práctica de dividir proyectos en dos o más partes que no requieran EIA, y por lo tanto el proyecto global no se evalúe (EC 2009b); la práctica de obtener permiso para un proyecto que está bajo los umbrales de la EIA y

posteriormente se expanda por encima de esos límites (EC 2009b); o la división artificial de un proyecto en partes para facilitar la aprobación, obteniendo autorización para la parte menos cuestionable ambientalmente y haciendo así que el desarrollo del resto del proyecto sea un hecho consumado (J&E 2006, 2013).

El fraccionamiento de proyectos es reconocido en muchos Estados Miembros de la UE, pero solo unos pocos han tomado medidas concretas para evitarlo, principalmente centradas en el *salami-slicing* (EC 2003, 2009c, IMPEL 2012). No obstante, pese a que prácticamente solo se presta atención al *salami-slicing*, es una visión parcial del problema, existiendo dos tipos de fraccionamiento de proyectos, en partes homogéneas o heterogéneas (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2010). En el fraccionamiento homogéneo, el proyecto se divide en partes similares pero menores, precisamente el *salami-slicing* (p.e. dividir un tramo de carretera en proyectos menores), mientras que en el fraccionamiento homogéneo proyectos con diferentes actuaciones se separan por actividades (p.e. separar la plataforma ferroviaria de la electrificación). También existe un fraccionamiento en etapas, para proyectos desarrollados en fases, que puede ser a su vez homogéneo o heterogéneo.

El fraccionamiento de los proyectos puede llevar a que se evite la EIA, o a procedimientos de EIA parciales, sin una evaluación global de los impactos. Es una práctica difícil de detectar cuando las partes en que se ha divido un proyecto no se someten conjuntamente a EIA. Aunque los mayores esfuerzos se han centrado en la EIA, es un problema más complejo, con diferentes tipos de fraccionamiento y razones.

Entre las medidas para evitar el fraccionamiento de proyectos están el fortalecimiento de la EAE, mayor concienciación e implicación del órgano sustantivo, prohibiciones específicas en la normativa, el uso de análisis caso por caso mejor que umbrales para decidir cuando un proyecto se somete a EIA (Cornaro et al. 2005, EC 2009c, Pinho et al. 2010, Lund-Iversen & Mete 2013), el mantener la fase de *scoping* obligatoria y evitar que se excluyan partes de los proyectos durante los procedimientos de EIA (Enríquez de Salamanca 2016). Una herramienta intermedia entre la EAE y la EIA empleada en algunos países como Estados Unidos, Australia, Canadá, Reino Unido o China es la evaluación en etapas (Kreske 1996, EPA 2009, Xu et al. 2013, Kostka & Zischke 2015), que consiste en realizar dos o más rondas de evaluación ambiental en lugar de un simple EsIA para un proyecto (PB Americas & Perkins Coie 2009).

En referencia al cambio climático, el fraccionamiento de proyectos afecta notablemente a la EIA. Un análisis fragmentado de las emisiones de GEI lleva a infravalorar los impactos de proyectos individuales, no aplicando en consecuencia medidas de mitigación. También el fraccionamiento impide la definición de verdaderas alternativas, que a menudo quedan limitadas a opciones dentro de pequeñas secciones de trazado, sin una visión amplia (J&E 2012), lo que limita las posibilidades de la EIA. Incorporar la consideración del cambio climático con independencia de la magnitud del proyecto ayudaría a superar la escasa consideración actual de este aspecto.

4.5.4. Integración del cambio climático en la toma de decisiones

Hasta finales de 2014, y considerando los proyectos sometidos a EIA por la Administración General del Estado (Enríquez de Salamanca et al. 2016a), en las carreteras no se había tenido en cuenta la contribución al cambio climático durante la explotación en ningún caso y solo en uno en la fase de construcción, y en ferrocarriles solo se ha considerado en un caso (Enríquez de Salamanca 2015). En consecuencia, la consideración actual de la contribución al cambio climático de las infraestructuras lineales de transporte en la EIA es casi anecdótica, quedando una gran labor por hacer.

Pero no basta con calcular las emisiones de GEI e incorporarlas a los EsIA, cosa que ya se hace con frecuencia, por ejemplo en proyectos de aeropuertos, sin que sirva para nada. El verdadero reto es incorporar la consideración del cambio climático en la EIA, y en la toma de decisiones. De hecho, como se comento, Hamada (2008) señalaba que en el Reino Unido sí se consideran las cuestiones relativas al cambio climático en la EIA, pero no influía en la toma de decisiones. Aportar datos o cálculos no es una verdadera consideración de la contribución al cambio climático. Esa información debe ser útil para comparar alternativas, aunque no sea decisoria, y también debe ser la base para establecer medidas de mitigación, preventiva o compensatoria, algo que hasta el momento no se está haciendo.

4.6. Discusión y conclusiones

El primer paso para considerar la contribución al cambio climático de una infraestructura de transporte es conocer su huella de carbono, tanto en la fase de construcción, como en la explotación y el mantenimiento. Existen experiencias prácticas de cálculo de la huella de carbono, más o menos completas, aplicadas a proyectos concretos (p.e. Stripple 2001, Treloar et al. 2004, Sampedro 2011, Milachowski et al. 2011, Berzosa 2013, Huang et al. 2013, Miliutenko et al. 2014, Huang et al. 2015, Fernández-Sánchez et al. 2015, Hanson & Noland 2015 o Keijzer et al. 2015 en carreteras, y Vandanjon et al. 2012, Banar & Özdemir 2015, Matute & Chester 2015 o Yue et al. 2015 en ferrocarriles). Sin embargo, esta metodología no se está aplicando a la EIA, ya que para realizar los cálculos se precisa un conocimiento detallado del proyecto, del que no se dispone al realizar la evaluación. Es necesario, por tanto, adaptar las metodologías de cálculo de la carbono al nivel de detalle de la EIA.

La construcción de las infraestructuras de transporte implica una contribución al cambio climático por las emisiones de GEI asociadas a la obras, tanto por el empleo de maquinaria como por el consumo de materiales y energía. Aunque el nivel de detalle sobre la actuación disponible al hacer la EIA sea limitado, hay ciertos datos que suelen conocerse, como la longitud y sección del trazado, una aproximación a los movimientos de tierras y una estimación de obras de drenaje, pasos y estructuras, en función de la red

hidrográfica y la red de caminos e infraestructuras. Aplicando factores de emisión tipo a estos elementos principales, que se proponen en este capítulo, es posible hacer una estimación bastante ajustada sobre las emisiones de GEI en esta fase; por supuesto, si existe más información será posible aplicar modelos de cálculo de la huella de carbono más exhaustivos, aunque no suele ser habitual.

Además, en la fase de construcción se produce una destrucción de sumideros de carbono a consecuencia de los desbroces, lo que implica la eliminación del stock de carbono acumulado en la vegetación eliminada, y la pérdida de su capacidad de secuestro, un aspecto ampliamente ignorado. Cualquier EsIA debería cuantificar la afección a la vegetación, para valorar los impactos sobre ella, por lo que es un dato disponible; si a esa información le aplicamos valores de stock de carbono y secuestro por tipo de vegetación, se puede calcular la contribución al cambio climático asociada.

En la fase de explotación, la contribución al cambio climático difiere entre carreteras y ferrocarriles. En las carreteras se produce una contribución asociada a las emisiones de GEI del tráfico rodado, cuya responsabilidad es del usuario de la vía. Esta contribución es la principal causa de que las carreteras sean responsables del 95% de las emisiones de GEI en el sector del transporte, y del 23% del total nacional. Además, para un periodo de 20 años, el año horizonte de diseño de la carretera, suponen las dos terceras partes de las emisiones de GEI (considerando construcción, explotación y mantenimiento), porcentaje que crece rápidamente al alargar el plazo considerado.

El cálculo de las emisiones de GEI en la explotación de carreteras se basa en la previsión de tráfico en los nuevos trazados y el tráfico residual que se mantendrá en las carreteras existentes, para un periodo de tiempo que debe ser al menos el año horizonte, aplicando a esos datos un factor de emisión de CO_2 de los vehículos estimado para cada año según la evolución previsible. Estos resultados deben, además, compararse con la alternativa 0, o de no actuación, para determinar la contribución neta. Los datos de tráfico son básicos para el diseño del proyecto, su tasa de evolución está regulada por normativa y la previsión de factores de emisión se ha calculado en este capítulo.

En los ferrocarriles la contribución global al total de emisiones de GEI es mucho menor. En este caso se trata de un transporte colectivo, donde la responsabilidad final de las emisiones es del transportista, aunque pueda repercutírsela al usuario. Siempre que el ferrocarril tenga un grado de utilización razonable, que no sea deficitario, las emisiones de GEI por usuario son muy inferiores al transporte por carretera, tanto en viajeros como en mercancías. El consumo bruto de energía del ferrocarril es un indicador de escaso interés; es mucho más interesante la ratio de energía por usuario o tonelada de mercancía, que relaciona consumo y utilización. Otro aspecto de interés es valorar la captación de usuarios de otros modos de transporte más contaminantes, como el avión o el vehículo privado, determinando así la reducción de emisiones de GEI por cambio modal de transporte. La información básica para estos estudios es conocer el número y tipo de circulaciones, y la demanda de usuarios o mercancías prevista, y su

origen, todos ellos datos básicos para poder diseñar el proyecto, y que por lo tanto debería existir, con más o menos detalle.

En la operación y mantenimiento de las infraestructuras hay diversas operaciones que generan emisiones de GEI, siendo las más destacables la iluminación de carreteras y la ventilación de túneles. Esta contribución es más dispersa y compleja de calcular, aunque menos importante que la derivada de la construcción o explotación (Berzosa 2013), pudiendo determinarse como un porcentaje, del 0,21% anual sobre el total de emisiones de GEI en la construcción, o del 1,95% de las emisiones anuales en la explotación en carreteras.

Como se ha expuesto hasta aquí, existen herramientas y metodologías que permiten evaluar la contribución al cambio climático en la construcción, explotación y mantenimiento de infraestructuras de transporte, que además son aplicables al nivel de detalle e información disponibles en la EIA. Sin embargo, la práctica demuestra una mínima consideración real de esta contribución en la EIA. En algunos tipos de proyectos, como los aeropuertos, se realizan habitualmente cálculos de emisiones de GEI, que luego no tienen ninguna utilidad en la EIA; un dato más recogido en el EsIA. En carreteras y ferrocarriles, ni siquiera eso; entre 1989 y 2014 solo una carretera sometida a EIA por el Estado calculó la emisión de GEI en la construcción (ninguna en la explotación) y un ferrocarril la influencia sobre la emisión de GEI en la explotación, caso que se recoge en este capítulo.

En el anterior capítulo ya se analizó el grado de integración del cambio climático en la EIA, y se aportaron motivos que pueden justificar su baja consideración. No tiene sentido ahondar en las carencias del pasado, que deben servir como llamada de atención para evitar que sigan repitiéndose en el futuro.

Como se demuestra en este capítulo, existen herramientas capaces de evaluar y valorar la contribución al cambio climático en carreteras y ferrocarriles; no solo se aportan esas herramientas, sino que también se incluyen casos prácticos donde se demuestra su viabilidad y efectividad. Lo importante es en adelante se utilicen estas herramientas, u otras similares con los mismos objetivos, y que la contribución al cambio climático se incorpore a la EIA, no como un adorno, sino como un criterio más de selección de alternativas, integrándose así en la toma de decisiones.

Para que esto ocurra, la consideración del cambio climático en la EIA debe ser sistemática, como así marca la Ley 21/2013, y no a partir de unos umbrales de significancia, que puede utilizarse como excusa para no considerar estos impactos, bien porque sean demasiado elevados, bien porque se recurra a la fragmentación de los proyectos para evitarlos (Enríquez de Salamanca 2016). Este capítulo ofrece análisis, conocimiento y herramientas para considerar la contribución al cambio climático en la EIA y en la toma de decisiones; queda pendiente que todos los agentes implicados en la EIA tomen conciencia del problema, y trabajen por su inclusión en este procedimiento.

5 Mitigación del cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte

Objetivos del capítulo

La contribución al cambio climático en infraestructuras de transporte se asocia a la emisión de GEI por el tráfico, la causa principal, y su mitigación a reducir esa emisión, por mayor eficiencia de los vehículos o menor tráfico; una simplificación que ha llevado a no proponer medidas en la EIA ya que excedían su ámbito de aplicación. Sin embargo, existen posibilidades concretas de mitigación a nivel de proyecto, y por tanto que pueden incorporarse en la EIA. El objetivo de este capítulo es realizar una propuesta sistemática de estas medidas de mitigación, actualmente inexistente.

En primer lugar se debe establecer los tipos de mitigación, preventiva, correctiva y compensatoria. Es una diferenciación esencial, ya que no es aplicable cualquiera de las opciones de forma indiferente, existiendo una jerarquía de la mitigación (Enríquez de Salamanca et al. 2009a, 2012, 2014, Enríquez de Salamanca & Carrasco 2009).

El principal tipo de mitigación frente al cambio climático es la prevención. En la fase de diseño tiene enormes posibilidades, a menudo ignoradas, mediante decisiones sobre la geometría de los trazados, soluciones constructivas o materiales. Un diseño acorde con la capacidad de acogida del territorio (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2004) permite minimizar la destrucción de sumideros. En la explotación es posible reducir las emisiones de GEI mediante la gestión de tráficos, rodado o ferroviario. También es posible la prevención en las labores de conservación y mantenimiento.

La mitigación correctiva es escasa en este campo porque una vez emitidos los GEI no hay corrección posible. Sin embargo, es posible corregir los daños a los sumideros mediante revegetación (Enríquez de Salamanca et al. 2004, Carrasco et al. 2004).

La mitigación compensatoria, pese a su potencial, tiene una escasa aplicación (Carrasco et al. 2013, Enríquez de Salamanca et al. 2014). La compensación frente al cambio climático busca reducir la concentración de GEI en la atmósfera mediante secuestro o captura, o la compensación de sumideros destruidos, aspectos no aplicados a las infraestructuras de transporte ni en general a ningún proyecto sometido a EIA. Para demostrar su viabilidad se ha desarrollado un caso práctico donde se diseña la compensación de las emisiones de GEI generadas en una red de carreteras (Segovia), demostrando que es factible; el artículo resultante está en proceso de evaluación en la revista *Science of the Total Environment.*

Un problema de la compensación es la falta de mecanismos efectivos de aplicación (Enríquez de Salamanca et al. 2014). Es importante analizar las herramientas disponibles, como bancos de conservación (Enríquez de Salamanca 2014d) y mercados de carbono, cuyas posibilidades de funcionamiento conjunto se han analizado; el resultado se ha presentado al Congreso Nacional de Medio Ambiente (Enríquez de Salamanca et al. 2016c) y está en evaluación en la revista *Journal of Environmental Assessment Policy and Management*.

Tras analizar las posibilidades de mitigación del cambio climático en las infraestructuras, se analizan los principales retos para su incorporación tanto a la EIA como a las infraestructuras ya existentes, y las posibilidades de financiación.

El capítulo finaliza con una discusión y conclusiones sobre el estado de la cuestión, valorando las opciones de mitigación y sus posibilidades de aplicación, y las razones que han llevado a su escasa consideración en la EIA hasta el momento.

Publicaciones

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. Potential of land use activities to offset road traffic greenhouse gas emissions in Central Spain. *Science of the Total Environment* **(en revisión)**.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. Towards an integrated environmental compensation scheme in Spain: Linking biodiversity and carbon offsets. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* **(en revisión)**.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016b. El cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras de transporte: contribución, impactos, mitigación y adaptación. *Actas del VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.* Madrid, 2 y 3 de marzo de 2016. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016c. Hacia un esquema integrado de compensación ambiental: la unificación de los bancos de conservación y los mercados de carbono. *13º Congreso Nacional de Medio Ambiente CONAMA 2016.* Madrid, 28 de noviembre a 1 de diciembre de 2016. http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998971791.pdf.

Enríquez de Salamanca Á. 2014d. Los bancos de conservación. *Foresta* 60: 26–35.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, García MR, Ruiz S. 2014. Medidas compensatorias ligadas a la compra y gestión del territorio. Experiencias y propuestas para su aplicación. *Ingeniería Civil* 173: 23–31.

Enríquez de Salamanca A, Carrasco MJ. 2013. Evolución de las medidas compensatorias en los procedimientos de evaluación de impacto ambiental. En: Casermeiro MA, Espluga AP (Coord.) *VII Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental: Gestión, Seguimiento, Innovación. Libro de actas (VII CONEIA). Oviedo, marzo 2013*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid, pp. 211–224.

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á, García MR, Ruiz S. 2013. Evolución de las medidas compensatorias en los procedimientos de evaluación de impacto ambiental. *Ingeniería Civil* 172: 73–80.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Rodríguez JJ, Sánchez M, Ruiz S. 2012. *Evaluación, corrección y seguimiento ambiental en el diseño, construcción y explotación de los proyectos de infraestructuras lineales de transporte*. CEDEX, Madrid.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2009. *Manual de gestión y restauración de préstamos y vertederos en obras civiles.* CEDEX, Madrid. 387 págs.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Varela JM, Magdaleno F. 2009a. Gestión y restauración de préstamos y vertederos en obras civiles. *Ingeniería Civil* 155: 31-48.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, García F, Varela JM. 2004. Seguimiento de la revegetación de taludes en autovías. *Actas del VII Congreso Nacional de Medio Ambiente. Madrid, 22-26 de noviembre de 2004.* Fundación CONAMA.

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2004. Determinación de la capacidad de acogida del territorio frente a infraestructuras lineales. En: ICCP (Ed.) *II Congreso Internacional de ingeniería civil, territorio y medio ambiente. Santiago de Compostela, noviembre de 2014*. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Madrid, pp. 1313–1324.

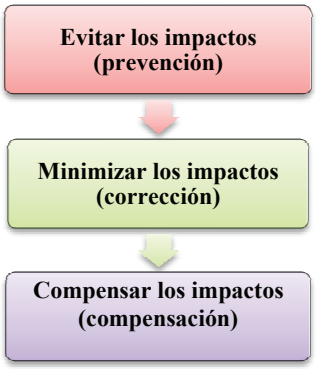
Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á, Varela JM. 2004. Seguimiento de la eficacia de la restauración vegetal de los taludes de autovías. *Ingeniería Civil* 134: 27-36.

5.1. Consideraciones generales

Existen diferencias de interpretación del término mitigación entre países europeos, donde abarca las medidas de prevención y corrección, y Estados Unidos donde incluye también la compensación, visión dominante en el ámbito del cambio climático, y por ello adoptada en este trabajo.

Al analizarse los impactos sobre la biodiversidad, y las medidas de mitigación aplicables, es habitual referirse a la jerarquía de la mitigación, concepto que rara vez se aplica sin embargo al cambio climático. Esta jerarquía establece un orden de prioridad al aplicar las medidas de mitigación, para primero evitar los impactos, luego minimizarlos y finalmente compensar los impactos inevitables (Figura 40).

Figura 40 Jerarquía de la mitigación



Fuente: Elaboración propia

Esta jerarquía da lugar a tres tipos de medidas de mitigación, que deben aplicarse siguiendo esa jerarquía descendente, que son:

- **Mitigación preventiva** (o medidas preventivas o protectoras), cuyo objetivo es evitar los impactos antes de que se produzcan. En el caso del cambio climático principalmente se busca evitar o reducir las emisiones de GEI o bien evitar la destrucción de sumideros de carbono. Por su tipología es el tipo de mitigación más deseable, ya que evita la generación de impactos, en lugar de actuar para corregir los daños causados.
- **Mitigación correctiva** (o medidas correctoras), cuyo objetivo es corregir, en la situación ideal, o de forma más realista paliar, atenuar o minimizar impactos que se producirán de forma cierta e inevitable. En el caso del cambio climático este tipo de mitigación es muy limitada, ya que una vez se han emitido los GEI no hay corrección posible. Su aplicación se centra en la recuperación de sumideros vivos afectados por la construcción de las infraestructuras.
- **Mitigación compensatoria** (o medidas compensatorias), cuyo objetivo es la creación de nuevos valores o la adopción de medidas ambientales positivas para un recurso que compensen o equilibren una pérdida inevitable de ese recurso. En el caso del cambio climático, se pueden compensar la emisión de GEI con actuaciones en otras zonas conducentes a reducir su concentración en la atmósfera o evitar su incremento, y se puede compensar la pérdida irremediable de sumideros con la creación de otros nuevos.

5.2. Mitigación preventiva

5.2.1. Concepto y aplicación a la EIA

La mitigación preventiva comprende aquellas medidas destinadas a evitar la ocurrencia de impactos ambientales, que en el caso del cambio climático son la emisión de GEI o la destrucción de sumideros. Su característica principal es ser medidas anticipatorias, antes de que se produzca el impacto, en lugar de medidas responsivas como las correctoras o compensatorias, que se aplican cuando ya existe el impacto.

La prevención para evitar la emisión de GEI, es la línea de actuación preferente frente al cambio climático, en la que deben centrarse los mayores esfuerzos. Las principales medidas propuestas por el IPCC para el transporte (Sims et al. 2014) son cambios comportamentales, como evitar viajes innecesarios o conducir de forma más eficiente, desplazamiento hacia modos de transporte más eficientes (del vehículo privado al transporte público, caminar o bicicleta), mejorar el rendimiento de aviones, trenes, barcos y vehículos y emplear combustibles bajos en carbono.

En España se han propuesto como medidas de mitigación mejorar el transporte ferroviario de mercancías, promover las infraestructuras ferroviarias y las autopistas del mar, conexiones intermodales, transporte público, movilidad no motorizada, mayor eficiencia energética de los vehículos, uso de diesel (criticado sin embargo por sus emisiones de partículas), gas natural o propano en lugar de gasolina, impuestos en los combustibles, políticas que incluyan reducciones de GEI, movilidad sostenible en la planificación urbana, mayor ocupación de los vehículos o criterios ambientales y tasas en la gestión del aparcamiento urbano (MMA 2007, MAGRAMA 2015b).

Estas medidas preventivas pueden agruparse en función de su relación con la EA:

- **Mitigación preventiva ajena a la EA**. Medidas que trascienden a la EA, y por ello no pueden incorporarse de forma concreta a ella, aunque si puedan citarse o recomendarse. Son ejemplos: la eficiencia energética de los vehículos, los tipos de combustibles utilizados, la implantación de puntos de recarga de combustibles específicos (biocombustibles, electricidad o hidrógeno), la mayor ocupación de los vehículos (aunque podría fomentarse mediante el diseño de carriles para vehículos de alta ocupación), las medidas de gestión en carreteras, la aplicación de tasas e impuestos para penalizar modos de transporte o carburantes, o la aplicación de subsidios con el fin opuesto,
- **Mitigación preventiva propia de la EAE**. Medidas propias de la planificación estratégica, como planificación urbana, movilidad sostenible, conexiones modales, modos de transportes de bajo impacto climático y transporte público, o diseño y extensión de las redes de transportes.

- **Mitigación preventiva propia de la EIA.** Medidas propias del diseño de los proyectos, y de la EIA. Se detecta una ausencia de medidas de mitigación propias de esta fase en documentos de referencia como los citados anteriormente (Sims et al. 2014, MMA 2007, MAGRAMA 2015b). Se desarrollan en este capítulo.

Centrándose en la EIA, las medidas de mitigación preventiva se pueden aplicar en tres fases diferentes de una infraestructura, diseño, construcción y explotación. La mayoría de medidas preventiva se deberían adoptar en el diseño, como la selección de ubicaciones, geometría de los trazados, tipologías, materiales o deforestación evitada (Enríquez de Salamanca et al. 2016b). En la fase de construcción influyen especialmente la maquinaria y métodos de trabajo empleados, así como la organización del trabajo y rutas de transporte. Existe también un grupo de medidas de prevención relacionadas con la explotación de las infraestructuras, que a menudo sobrepasan el ámbito de la EIA, al poder decidirse con posterioridad a la evaluación, pero que en ocasiones pueden incorporarse a la toma de decisiones, teniendo cierta transcendencia.

5.2.2. Mitigación preventiva en el diseño

5.2.2.1. Aspectos asociados a la geometría de los trazados

El diseño de los trazados tendrá repercusiones en las emisiones de GEI durante su explotación. Aunque influyen muchos factores ambientales y sociales, a igualdad de impactos en otros aspectos se deben primar los recorridos más cortos, tanto en carreteras como en ferrocarriles. No obstante esto dependerá de un gran número de factores como el relieve, las limitaciones físicas o geotécnicas, los valores ambientales del territorio o la población a que se deba dar servicio.

Si las condiciones de trazado son similares en las opciones, cuanto más largas sean mayor inversión precisan, por lo que no es previsible que se adopten opciones más largas de forma injustificada. Si las condiciones no son iguales, una opción más larga puede tener ventajas económicas, por ejemplo si precisa menos estructuras o túneles.

En el caso de las carreteras, cuanto menores sean las pendiente de los trazados menor será el consumo de combustible de los vehículos que circulen por ellos, pero de igual manera, cuanto mejor sea el trazado mayor será la velocidad media de circulación, influyendo también en el consumo. No obstante, en esto influyen muchos otros aspectos como el relieve y los valores ambientales del territorio.

Sampedro et al. (2009) analizan las emisiones generadas en un tramo de autovía con diferentes soluciones geométricas, referidas a la rasante, la sección de la carretera o la velocidad de diseño (Tabla 23), detectando diferencias apreciables en la emisión de CO_2. Las variaciones de rasante pueden traer consigo aumentos muy significativos de las emisiones de CO2, ya que en vehículos pesados y autobuses dependen en gran medida de la inclinación de la rasante, no sólo de la velocidad.

Tabla 23 Análisis comparativo de emisiones para diferentes soluciones de trazado en una autovía

		EMISIONES (Kg)				
		CO	HC	NO_x	PM	CO_2
Solución 0	NO HACER NADA	417.182,00	17.544,66	68.215,73	2.311,22	19.779.927,96
Solución 1	VARIACIÓN RASANTE (ONDULADO-inclinación media=2,3%)	415.325,41	17.475,07	93.027,40	2.323,71	24.389.884,50
Solución 2	VARIACIÓN RASANTE (MONTAÑOSO-inclinación media=5%)	403.826,64	17.075,40	105.481,74	2.188,89	29.263.050,78
Solución 3	VARIACIÓN ANCHURA DE CALZADA (reducción de 80 cm en calzada y 60 cm en despejes laterales)	415.199,87	17.464,32	66.524,99	2.280,68	19.778.128,74
Solución 4	VARIACIÓN Nº CARRILES POR SENTIDO (de 3 a 2)	404.956,81	17.050,24	55.644,22	2.101,39	19.761.331,23
Solución 5	VARIACIÓN VELOCIDAD DE DISEÑO (de 120 a 110)	410.267,36	17.250,09	61.655,39	2.195,59	19.772.073,23

Fuente: Sampedro et al. (2009)

También en el caso de los ferrocarriles el trazado condiciona la velocidad, y con ello los tiempos de desplazamiento, factor esencial para su competitividad, sobre todo en ferrocarriles de cercanías, donde se compite entre modos de transporte por minutos o a lo sumo decenas de minutos de ahorro en tiempo de desplazamiento.

5.2.2.2. Selección de tipologías y soluciones constructivas

Diferentes tipologías constructivas para una misma actuación pueden tener repercusiones importantes en cuanto a las emisiones de GEI en la construcción. En la toma de decisiones, se debería considerar las emisiones de GEI de las alternativas dentro de los aspectos que influyan en la toma de decisiones. Algunos ejemplos son:

- **Tipología de túneles.** La construcción de tramos subterráneos puede hacerse mediante excavación en mina o mediante falsos túneles. La decisión suele estar condicionada por aspectos geotécnicos, ambientales, urbanísticos o económicos, pero también podría incorporarse a la toma de decisiones las emisiones de GEI de cada alternativa constructiva.
- **Tipologías de viaductos.** El tipo de viaductos, tanto su diseño como su forma de ejecución, suele estar condicionada por aspectos hidrológicos, ambientales, funcionales y económicos. Según la tipología variará el tipo y cantidad de materiales utilizados y la forma de ejecución, y con ello las emisiones de GEI.
- **Tipologías de muros y defensas.** La construcción de muros de retención dependerá sobre todo de aspectos geotécnicos, funcionales y de seguridad, así como económicos. Sin embargo, dependiendo de la tipología (hormigón in situ, prefabricados, gaviones, escolleras, bloques, muros verdes...) pueden variar notablemente las emisiones de GEI.

- **Tipología de secciones.** Una sección de una infraestructura, tanto si discurre en terraplén como en desmonte, puede diseñarse con taludes o bien emplearse muros, para reducir la ocupación o el volumen de tierras excavadas o aportadas. Ambas opciones tienen una influencia directa en las emisiones asociadas.
- **Tipología de enlaces.** El diseño de enlaces está determinado sobre todo por la funcionalidad, la disponibilidad de terrenos y los costes. Pero las soluciones constructivas, con uno o varios niveles, y mayor o menor longitud de estructuras, tiene repercusiones en las emisiones de GEI. En general, cuanto mayor sea la complejidad del enlace y las estructuras previstas, mayores serán las emisiones.

5.2.2.3. Selección de materiales en la fase de diseño

La decisión del empleo de unos u otros materiales puede tomarse en la fase de diseño o en la propia ejecución, dependiendo, del material concreto de que se trate. Se pueden adoptar medidas de mitigación en el diseño de las infraestructuras considerando las emisiones de GEI de los materiales constructivos, de manera que a igualdad de operatividad o funcionalidad, se primen los materiales de menor impacto.

Algunos ejemplos de decisiones sobre materiales constructivos en la fase de diseño que pueden tener repercusiones sobre las emisiones de GEI son:

- **Tipo de firme en las carreteras.** La elección del tipo de firme (aglomerado convencional, microaglomerado, drenante, hormigón...) tiene una repercusión evidente en las emisiones de GEI, así como en la adaptación al cambio climático, al ser más o menos resistente a la influencia climática (véase 5.2.2). Numerosos trabajos analizan el ciclo de vida de los pavimentos (p.e. Huang et al. 2009, White et al. 2010, Gschösser et al. 2012, Keijzer et al. 2015). Para los Países Bajos, Keijzer et al. (2015) plantean la sustitución de pavimentos de ladrillo, con un consumo de energía muy superior a otros tipos, por bloques de hormigón. En pavimentos bituminosos, el uso de asfaltos de baja energía y la aplicación de rejuvenecedores tienen los mayores potenciales de reducción (Keijzer et al. 2015). Es también muy interesante el uso de neumáticos fuera de uso (NFU), comentado posteriormente (Tabla 24 y Tabla 25). También es posible emplear pavimentos con menor rozamiento que reducen el consumo de carburante (PIARC 2012).
- **Tipo de plataforma ferroviaria.** La capa superficial de las plataformas ferroviarias está formada principalmente por balasto, pero en ferrocarriles urbanos y periurbanos (cercanías, metro, metro ligero, tranvías) existen otras opciones constructivas como raíles sobre losas de hormigón, embutidos en las calles (en pavimentos asfálticos) o incluso plataformas revegetadas con césped (en tranvías, metros y metros ligeros en superficie). Sin duda, las opciones revegetadas tienen grandes ventajas en cuanto a su balance de GEI, aunque es preciso valorar el consumo de agua en un país deficitario como España.

- **Tipos de traviesas.** En la actualidad las traviesas son de hormigón pero aún existen tramos ferroviarios con traviesas de madera. Su sustitución por traviesas de hormigón es deseable para aumentar la durabilidad y resiliencia al cambio climático (DCCEE 2011), pero no tanto por sus emisiones de GEI.

5.2.2.4. Selección de ubicaciones

Como se señaló anteriormente (véase 4.3.2), las alternativas de ubicación de las estaciones de ferrocarril y el tipo de transporte para acceder a ellas influyen en las emisiones de GEI derivadas del acceso y en la efectividad del modo de transporte, su aceptación social y uso. Una adecuada consideración de estos aspectos en el diseño puede contribuir a una mitigación de las emisiones de GEI durante la explotación.

En las carreteras esta influencia es mucho menor, al no depender de puntos concretos de conexión al transporte como son las estaciones de ferrocarril. Sin embargo, la ubicación de enlaces en autovías y autopistas, por ejemplo, puede prolongar o acortar los desplazamientos para acceder a estas carreteras desde la comarca atravesada.

5.2.2.5. Optimización de la efectividad del transporte

En el caso del transporte ferroviario, cuanto mayor sea la captación de viajeros mayor será la reducción del uso de otros modos de transporte con mayores emisiones, lo que induce una reducción en las emisiones globales. El diseño de los trazados, en especial su longitud, geometría y puntos conectados determinan la velocidad de circulación y tiempos de viaje, y la población alcanzada, por lo que condicionan la captación de viajeros y la efectividad del transporte.

Con carácter general, cuando más corto sea un recorrido ferroviario y menos paradas tenga, más rápido será el transporte, y más competitivo con respecto a otros modos de transporte. Sin embargo, ambos factores, longitud y paradas, puede reducir el número de puntos servidos, y con ello la población potencial usuaria.

A la inversa, recorridos largos y con muchas paradas captan mucha población potencial, pero a costa de un transporte lento y poco competitivo en tiempo con otros modos. Un caso claro en este sentido son las redes de ferrocarril de cercanías, como por ejemplo la de Madrid, donde el factor esencial de diseño es dar servicio a ciertos nodos esenciales, que condicionan totalmente el trazado.

5.2.2.6. Deforestación evitada

La construcción de infraestructuras lineales de transporte implica una ocupación de terrenos, temporal o permanente y, salvo suelos desnudos, infraestructuras o zonas urbanizadas, la destrucción de la cubierta vegetal existente. Cuando menor sea la

afección a sumideros de carbono de una alternativa, menor será su contribución al cambio climático.

La minimización de la afección a la vegetación es una medida preventiva esencial que debe adoptarse desde las primeras fases de diseño de la infraestructura. Desde el punto de vista del cambio climático, lo deseable es afectar lo menos posible a comunidades vegetales con alto stock de carbono y capacidad de secuestro. No obstante, las decisiones no deben basarse solo en este criterio, debiendo incorporarse la consideración de la biodiversidad, ya que no existe una relación directa entre stock/secuestro y valor ecológico de la vegetación.

Como ejemplo, las choperas de producción de *Populus x canadensis* o los eucaliptares tienen una capacidad de secuestro muy superior a los bosques espontáneos, por su mayor crecimiento, pero su naturalidad y valor ecológico son muy inferiores.

Numerosos autores han puesto de manifiesto el riesgo sobre la biodiversidad de maximizar la producción de créditos de carbono (Matthews et al. 2002, Caparrós & Jacquemont 2003, Pielke et al. 2003, Canadell & Raupach 2008, O'Connor 2008, Hall et al. 2012, Pawson et al. 2013, Xiong et al. 2014), aspecto que sería aplicable también a este supuesto.

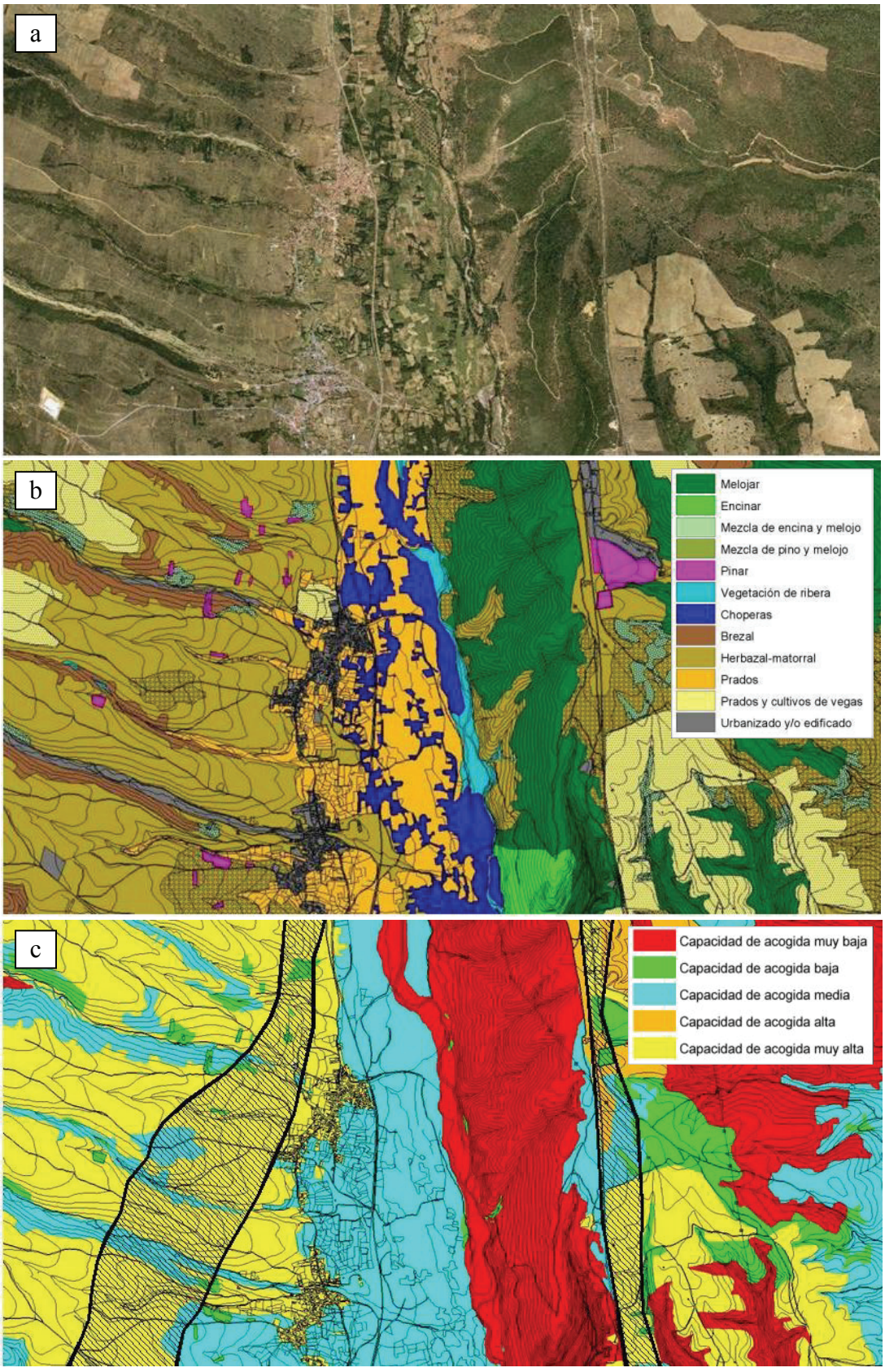
En consecuencia, de debe buscar minimizar la afección a la vegetación, como marca la buena práctica en la EIA y en el diseño con criterios ambientales, pero con una visión donde prime el criterio de la biodiversidad y la naturalidad frente al mero almacenamiento de carbono.

Para lograr un diseño adecuado minimizando la afección a la vegetación es necesario disponer desde el inicio de la planificación de cartografía de vegetación detallada, elaborada en las etapas previas a la EIA, de manera que el planteamiento inicial de corredores y posterior de alternativas concretas se haga teniendo en cuenta las posibles afecciones.

En la actualidad los estudios informativos de grandes carreteras y líneas ferroviarias siguen una planificación en fases, donde en una primera etapa se valora la capacidad de acogida del territorio desde diferentes puntos de vista, buscando los corredores más idóneos (Figura 41), como se analiza en Carrasco & Enríquez de Salamanca (2004). Esta fase previa a la EIA era la base para la elaboración del documento inicial de proyecto, con el que realizar la fase de *scoping*, y dar inicio al procedimiento reglado de EIA. Sin embargo, la eliminación de la obligatoriedad de la fase de scoping en la Ley 21/2013 de EIA (BOE 2013) podría afectar al futuro desarrollo de estos estudios informativos, al pasar a ser voluntario el *scoping*.

En proyectos de menor entidad a menudo no se cuenta con esa fase previa, por lo que la EIA actúa de forma más reactiva, valorando los impactos que se producirán sobre el medio, con escasa capacidad anticipatoria como sería deseable, para evitar los impactos antes de que se produzcan.

Figura 41 Planteamiento de corredores para una carretera según la capacidad de acogida del territorio



a) Ortofoto; b) Cartografía temática; c) Capacidad de acogida y corredores. Fuente: Enríquez de Salamanca et al. (2009b)

5.2.2.7. Movilidad inducida y accesibilidad

En las carreteras es lógico buscar las alternativas que más tráfico capten, ya que es ese su objetivo, pero esa captación debería traducirse en una reducción del tráfico en otras rutas; es decir, la nueva carretera, sobre todo si tiene mejores prestaciones, debería captar el tráfico de otras carreteras de menor calidad. Las diferencias en la captación de tráfico están muy relacionadas con el trazado, la distancia a núcleos urbanos o la existencia o no de enlaces, pudiendo diferir notablemente entre alternativas.

La elección del tipo de carretera también condicionará el tipo de tráfico y desplazamientos. Las carreteras convencionales dan total accesibilidad al tener incorporaciones directas, pero son más lentas y peligrosas. Las autovías dan también buena accesibilidad, con gran número de enlaces. Las autopistas cuentan con un menor número de enlaces, y están enfocadas a captar tráfico de largo recorrido, no local.

En el caso de los ferrocarriles, los convencionales tienen más paradas, y dan servicio a áreas territoriales amplias, aunque no necesariamente muy pobladas, a costa de ser más lentos. Los ferrocarriles de alta velocidad solo paran en puntos estratégicos, dando escaso servicio a las comarcas atravesadas pero mejorando mucho los tiempos de desplazamiento entre nodos estratégicos.

Estas características de accesibilidad hacen que, por ejemplo, las líneas de alta velocidad y autopistas despierten mucho más rechazo social en las comarcas atravesadas que las líneas ferroviarias convencionales o las autovías.

5.2.2.8. Diseño de plataformas reservadas

Una medida muy deseable en carreteras de acceso a grandes ciudades es la construcción de plataformas reservadas, destinadas a transporte público, y en ocasiones a vehículos de alta ocupación. Estas plataformas de uso restringido tienen un menor tráfico que el resto de la carretera, y por ello menores congestiones en hora punta, lo que hace que sea más fluida la circulación, más cortos los tiempos de desplazamiento y con ello más eficiente el transporte público o en vehículos con alta ocupación.

La decisión de construir plataformas reservadas en una carretera a menudo es estratégica, anterior a la EIA. Por lo general son actuaciones diseñadas en carreteras ya existentes, y que se desarrollan mediante proyectos específicos, más que alternativas en el diseño de una carretera. Sin embargo, en el proceso de planificación en detalle, y en la EIA, se pueden plantear diferentes alternativas operativas, que influyan en su diseño, sobre todo en cuanto al tipo de usuarios autorizados:

- Plataformas reservadas únicamente al transporte público. Es el caso de los carriles bus o bus-taxi de las ciudades, así como de tranvías en algunos lugares. No obstante, este tipo es también aplicable a las carreteras. Un ejemplo son las plataformas previstas para la autovía A-3 entre Madrid y Arganda del Rey,

sometidas a EIA pero que no han llegado a construirse (Enríquez de Salamanca et al. 2007).

- Plataformas bus-VAO (vehículos de alta ocupación). Un ejemplo es la existente en la autovía A-6 entre Madrid y Las Rozas, una obra pionera en España dentro de esta tipología (Figura 42).

Figura 42 Carril central Bus-VAO en la autovía A-6, entre Madrid y Las Rozas

Fuente: Elaboración propia. Ortofoto Iberpix (http://www.ign.es)

Las plataformas reservadas pueden ser reversibles, con sentido de circulación variable según las horas del día, o fijas, con un único sentido de circulación. La decisión de construir uno u otro tipo depende de la temporalidad y sentido de las congestiones. En carreteras con congestiones marcadas en el tiempo y en el sentido de circulación, habitualmente de entrada a la ciudad a primera hora de la mañana y de salida por la tarde, es posible construir calzadas reversibles, como es el caso de la A-6 en Madrid. Sin embargo, cuando no hay una temporalidad marcada, y las congestiones se repiten a lo largo del día y en ambos sentidos, las calzadas reversibles no son operativas, siendo precisos dos carriles reservados, uno por cada sentido, como ocurre en la A-3.

Otra decisión susceptible de generar diferentes alternativas operativas es el tipo de tráfico aceptado en la plataforma reservada, si será un carril bus o bus-VAO, y en el segundo caso cuándo se considera que una calzada es un VAO (cuál debe ser la ocupación de los vehículos). Volviendo a los dos ejemplos citados, la A-6 es un carril bus-VAO, mientras que las plataformas reservadas propuestas para la A-3 serían solo bus. Esta decisión depende del tráfico captado en cada opción, y la capacidad de la plataforma reservada (uno o más carriles).

Con respecto al concepto de VAO, existe cierta discrepancia entre si debe considerarse de alta ocupación los vehículos con más de dos o más de tres pasajeros. En el caso de la A-6 el tráfico captado con vehículos de tres o más pasajeros era muy reducido, por lo que se optó por considerar VAO a los vehículos con dos o más pasajeros, pero esta decisión puede variar según los casos concretos.

La toma de decisiones de este tipo está determinada por su funcionalidad, y los tráficos captados. Sería deseable incorporar también la consideración de la contribución al cambio climático en cada una de las alternativas operativas, según tipo de plataforma y tráficos captado, ya que en cuanto al trazado suelen ser prácticamente coincidentes.

5.2.3. Mitigación preventiva en la construcción

Las decisiones más importantes en referencia a la mitigación del cambio climático deben tomarse en la fase de diseño (trazado, elementos constructivos, tipologías, materiales...). Sin embargo, durante la propia ejecución de las obras hay algunas medidas que puede contribuir a reducir la huella de carbono durante la construcción.

5.2.3.1. Selección de materiales en la fase de construcción

Empleo de materiales reciclados

Las características esenciales de los materiales empleados en la obra vendrán definidos en el pliego de prescripciones técnicas del proyecto, por lo que durante la obra el margen de maniobra para su elección es limitado. Sin embargo, dentro de las condiciones establecidas, el contratista tiene un margen de maniobra para seleccionar tipos concretos. Es especialmente interesante la posibilidad de emplear materiales reciclados, aspecto que puede venir o no definido en el proyecto.

Los resultados de Gschösser et al (2012) demuestran que el empleo de materiales reciclados en lugar de recursos primarios reduce mucho el impacto ambiental de la fabricación de materiales para carreteras. Existen diversos materiales reciclados que se están empleando en la actualidad en carreteras, como neumáticos fuera de uso (NFU), áridos reciclados procedentes de residuos de construcción y demolición (RCD), residuos de firmes, cenizas de biomasa o escorias de centrales térmicas (Tabla 24).

Posiblemente el material reciclado que más interés ha despertado son los NFU, por ser una eliminación un problema ambiental de primera magnitud. La posibilidad de emplear NFU en mezclas bituminosas para firmes se comenzó a estudiar a mediados del siglo XX. En España se generan más de 300 000 toneladas al año de NFU, sin contar el stock histórico, estimado en más de tres millones de toneladas (Querol 2013). Para solucionar este problema en 2001 se aprobó el "Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, 2001-2006" (BOE 2001b).

Tabla 24 Materiales reciclados utilizados en la construcción de carreteras

Material	Uso	Referencias
Neumáticos fuera de uso (NFU)	Mezclas bituminosas	CEDEX (2007), FER (2013), Bermejo et al. (2014), López et al. (2010), Fenix (2011), Rodríguez (2013), Grau et al. (2013), Querol (2013), Pérez & Colás (2013), Expósito (2013)
Plástico reciclado	Mezclas bituminosas	Rodríguez (2013)
Áridos reciclados de RCD	Hormigón para carreteras, áridos para construcción	Bolla et al. (2010), Salas et al. (2013), Rodríguez (2013)
Residuo de mezclas bituminosas	Construcción y conservación de firmes	Potti & Peña (2013), Rodríguez (2013),
Cenizas de biomasa	Estabilización de suelos para terraplenes	Ramírez & García (2013), Rodríguez et al. 2015
Escorias de acería y centrales térmicas	Material de relleno de carreteras, áridos	Vega et al. (2008), Fenix (2011), Almazán (2013) Ramírez & García (2013), Rodríguez (2013)

Fuente: Elaboración propia

En el ámbito de las carreteras, se ha aprobado sucesivas órdenes circulares sobre el uso de NFU en las mezclas bituminosas (Tabla 25). En 2007 se publicó un primer manual sobre el uso de NFU en mezclas asfálticas (CEDEX 2007), existiendo algunos documentos posteriores de interés (FER 2013, Bermejo et al. 2014).

Tabla 25 Órdenes circulares sobre uso de NFU en mezclas bituminosas

Orden	Descripción
Orden Circular 5bis/2002	Condiciones para la adición de polvo de neumáticos usados en las mezclas bituminosas
Orden Circular 21/2007	Uso y especificaciones que deben cumplir los ligantes y mezclas bituminosas que incorporen caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU)
Orden Circular 21bis/2009	Betunes mejorados y betunes modificados de alta viscosidad con caucho procedente de neumáticos fuera de uso (NFU) y criterios a tener en cuenta para su fabricación in situ y almacenamiento en obra

Fuente: Elaboración propia

Desde las primeras experiencias en España, a mediados de los 2000, se ha publicado numerosos artículos que demuestran la viabilidad e incluso idoneidad de la adición de polvo de NFU a los firmes asfálticos (López et al. 2010, Grau et al. 2013, Querol 2013, Pérez & Colás 2013, Expósito 2013). Además de permitir una salida a un residuo de compleja eliminación o reciclaje, tiene ventajas (Graus et al. 2013) como: (i) reciclar NFU sin penalizar las prestaciones de los firmes; (ii) disminuir el ruido del tráfico; (iii) aumentar la resistencia al deslizamiento; (iv) mantener la tonalidad negra del firme durante más tiempo, mejorando el contraste de color con las marcas viales horizontales.

Desde el punto de vista del cambio climático, el empleo de NFU supone un ahorro de emisiones frente a la producción de nuevos materiales, y evitar la generación de GEI que podría llevar aparejada la eliminación de esos neumáticos.

Empleo de materiales de bajo impacto

Cada vez existe un mayor conocimiento sobre el ciclo de vida de los materiales, lo que permite una selección más adecuada ambientalmente. Por ejemplo, Vandenberghe & Berthet (2005) analizan el ciclo de vida de pinturas acrílicas para marcas viales.

Es una buena práctica ambiental, que debería generalizarse, verificar la huella de carbono de los distintos productos a la hora de decidir cuales se emplearán. Este aspecto debería integrarse los Sistemas de Gestión Ambiental (SGA) que la práctica totalidad de empresas constructoras tienen implantados, pero su voluntariedad, y el hecho de poder estar en juego importantes diferencias económicas entre proveedores o tipos de materiales, hacen que la efectividad de esta opción sea muy moderada.

La Ley de Contratos del Sector Público (BOE 2011a) contempla la posibilidad de incluir entre los criterios de valoración de las ofertas los materiales: "*Contratos cuya ejecución pueda tener un impacto significativo en el medio ambiente, en cuya adjudicación se valorarán condiciones ambientales mensurables, tales como el menor impacto ambiental, el ahorro y el uso eficiente del agua y la energía y de los materiales, el coste ambiental del ciclo de vida, los procedimientos y métodos de producción ecológicos, la generación y gestión de residuos o el uso de materiales reciclados o reutilizados o de materiales ecológicos".*

En consecuencia, es posible fomentar el uso de materiales con una menor huella de carbono incluyéndolo como criterio valorable en las licitaciones.

Selección de lugares de procedencia de los materiales

El contratista, durante la ejecución de las obras, tiene una amplia libertad para la elección de proveedores y lugares de procedencia. Quitando algunos materiales como las tierras, cuyo transporte se considera dentro de los proyectos al ser una unidad de obra esencial, la mayoría de materiales se pagan a pie de obra, es decir, el precio del material incluye el transporte desde el lugar de producción y distribución hasta la obra.

Como es lógico, el criterio que prima en la elección de proveedores es el coste de los materiales puestos en obra, más que el lugar de procedencia. Sin embargo, el transporte de los materiales puede hacer que su huella de carbono difiera mucho, dependiendo de si la procedencia es próxima o no.

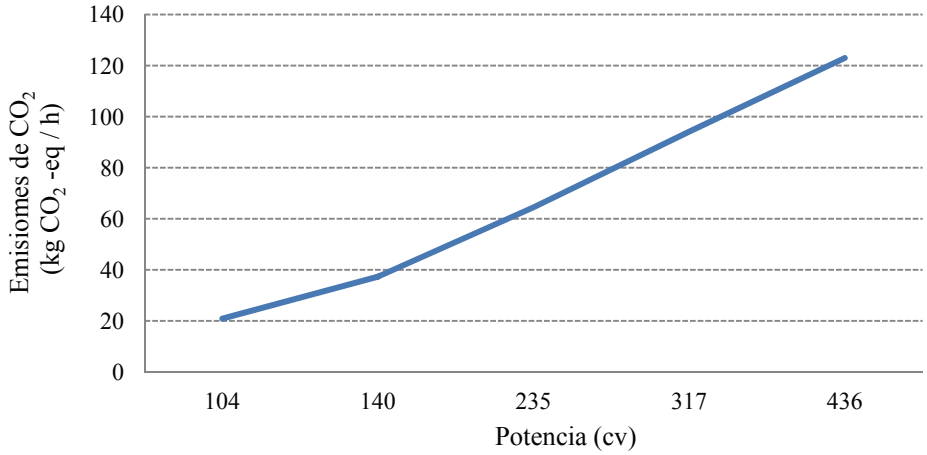
En este sentido, son aplicables las consideraciones hechas en el apartado anterior, sobre la conveniencia de considerar la huella de carbono, en este caso asociada al transporte, su integración en los SGA y su valoración en las licitaciones.

5.2.3.2. Selección de maquinaria

En la construcción de las infraestructuras se debería emplear la maquinaria más eficiente posible para reducir las emisiones de GEI. Aunque está determinado por el diseño del proyecto, que hará necesario un determinado tipo de maquinaria, hay decisiones en la obra que también tienen influencia, como la selección de maquinaria moderna y en buen estado de mantenimiento, para minimizar sus emisiones, o la adecuación de la maquinaria seleccionada al tipo de obras que debe realizar.

Cada tipo de trabajo tienen unas necesidades concretas de maquinaria, en cuando a tipología, prestaciones y potencia. Emplear maquinaria pesada para obras menores supone gastos innecesarios de carburantes y en consecuencia emisiones de GEI. Cuanto mayor es la potencia mayores son las emisiones, por lo que el empleo de maquinaria con potencia excesiva para los trabajos que se pretende realizar da lugar a emisiones de GEI superiores a las necesarias. Como ejemplo, en la Figura 43 se observa el incremento de emisiones de GEI con la potencia para tractores de cadenas.

Figura 43 Emisiones de CO_2 en tractores de cadenas según su potencia



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Tecniberia (2015)

5.2.3.3. Organización del trabajo

Otro aspecto importante en las obras es establecer métodos de trabajo lo más eficientes posibles para reducir las emisiones de GEI, lo que no solo supone una mitigación del cambio climático, sino que también da lugar a ahorros de tiempo y combustibles en la ejecución, con el consiguiente ahorro económico. Entre las medidas de optimización en obra con repercusión en las emisiones de GEI se puede señalar:

- Organización de las rutas de movimiento de maquinaria en las obras, buscando la mayor eficiencia. En especial, son importantes los desplazamientos para el transporte de tierras entre zonas de excavación, aporte, acopio o depósito.

- Accesos provisionales a las obras, o a determinadas actuaciones (pilas de viaductos, bocas de túneles,...), buscando la menor longitud y mayor efectividad.
- Ubicación de parques de maquinaria, buscando, además de minimizar la afección ambiental, la mayor operatividad y menores tiempos de desplazamiento.
- Desvíos provisionales de caminos y carreteras afectados temporalmente por obras.

5.2.4. Mitigación preventiva en la explotación

En la fase de explotación, centrada en la circulación de tráfico rodado o ferroviario, de forma análoga a como se ha analizado en el capítulo dedicado a la contribución al cambio climático, las posibilidades de mitigación se limitan a medidas de gestión de esos tráficos, que den lugar a escenarios con menores emisiones. El mayor potencial de reducción de emisiones en esta fase estaría asociado a la mejora en la eficiencia energética de los vehículos y el uso de combustibles limpios, pero estas medidas sobrepasan el ámbito de la EIA (5.2.1).

5.2.4.1. Reducción de la movilidad y mejora de eficiencia

Singh et al. (2015) analizan los itinerarios para lograr una reducción de las emisiones de GEI en el sector del transporte en Noruega, considerando tres enfoques, la introducción de vehículos eléctricos en un 39%, la reducción de la movilidad (25% menos de viajes en coche o kilómetros recorridos en 2020) o una combinación de los anteriores (15% de vehículos eléctricos y 19% de reducción de la movilidad). En los tres casos se logra reducir las emisiones de GEI un 25%, cumpliendo los objetivos establecidos para el país en 2020.

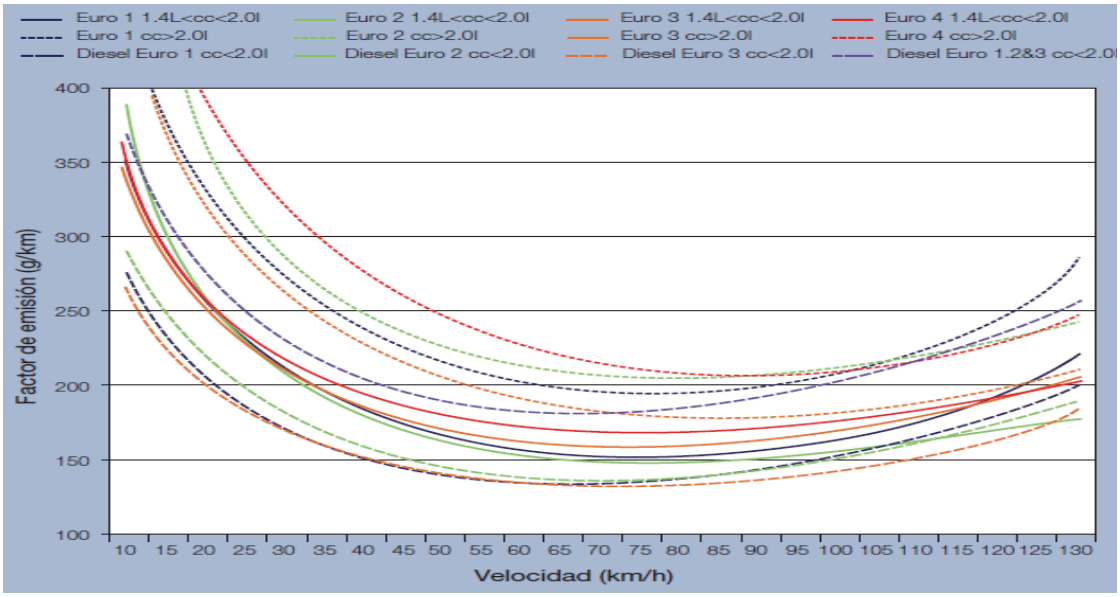
Como se ha señalado, el fomento del vehículo eléctrico es una decisión estratégica a nivel país. También la reducción en la movilidad es una decisión estratégica (trasvases modales de transporte, distribución de centros de trabajo, planificación urbanística...). No obstante, en este último caso en el diseño y selección de alternativas se pueden primar aquellas que minimicen las emisiones y/o kilómetros recorridos.

5.2.4.2. Medidas de regulación y control del tráfico rodado

Reducción de la velocidad de la carretera

Existen diversos estudios que analizan la relación de las emisiones de GEI con la velocidad (Figura 44, Tabla 26) y las reducciones derivadas de una disminución en la velocidad de circulación en las carreteras o en tipos concretos de vehículos (Carsten & Tate 2000, T&E 2005, ERC 2006, Barth & Boriboonsomsin 2009, ITT 2009, Rodt et al. 2010, Den Boer et al. 2010). Estos estudios muestran reducciones que oscilan entre el 10 y el 23% en las emisiones de CO_2 con reducciones de 10 a 20 km/h en la velocidad.

Figura 44 Relación entre velocidad y factor de emisión de CO_2



Fuente: ITT (2009)

Tabla 26 Emisiones de CO_2 en furgonetas según la velocidad de circulación

Límite de velocidad	Factor de emisión de CO_2 (g/km)	Emisión relativa frente a la ausencia de límite de velocidad
Ninguno (125 km/h)	228	100%
120 km/h	221	97%
110 km/h	204	89%
100 km/h	192	84%

Fuente: Den Boer (2010)

Otra ventaja asociada a la reducción de la velocidad en carreteras, aparte de disminuir las emisiones de CO_2, es reducir la necesidad, o el atractivo de los vehículos de alta potencia. A pesar de la creciente eficacia energética de los motores y de los vehículos, los datos de la UE-15 (Kågeson 2005) apuntan desde los años 1990 a un incremento progresivo en la potencia y cilindrada de los coches y en su peso (Figura 25), lo que implica mayores consumos para su funcionamiento. El uso de vehículos más ligeros y de menor potencia permitiría lograr unas menores ratios de emisión.

Tabla 27 Evolución de las características de los vehículos en la UE-15

Factor		1990	1995	2000	2003
Potencia media		61 kW	64 kW	72 kW	79 kW
Cilindrada		1 591 cm³	1 657 cm³	1 703 cm³	1 743 cm³
Vehículos 4x4		2,6%	2,9%	4,5%	6,3%
Vehículos diesel		13,8%	22,0%	32,1%	43,7%
Peso en servicio	< 1 000 kg	10,9%	2,9%	-	1,1%
	1 000 - 1 299 kg	41,1%	31,2%	-	12,2%
	1 300 - 1 499 kg	40,2%	33,1%	-	27,0%
	1 500 - 1 699 kg	5,6%	27,0%	-	34,0%
	> 1 700 kg	2,4%	5,8%	-	16,1%

Fuente: Kågeson 2005

Como consecuencia, reducir la velocidad de circulación en las carreteras daría lugar a una reducción en las emisiones de CO_2, siendo una clara medida de mitigación preventiva. Diversos países han adoptado medidas de control de la velocidad, como los Países Bajos, Francia, Suecia, Finlandia, Alemania, Dinamarca, Reino Unido, Australia o Estados Unidos (ITT 2009). En Rotterdam por ejemplo la reducción de la velocidad en autovías a 80 km/h permitió un mejor aprovechamiento de la vía, y pese a un incremento de tráfico del 3% se redujo la congestión en 2 km y su duración en 30 minutos (T&E 2005). Diversos países de la UE han decidido rebajar la velocidad en los camiones, y se considera recomendable aplicar también limitaciones a las furgonetas.

En España, Barcelona ha sido pionera en la aplicación de un sistema de velocidad variable en los accesos a la ciudad, que se analiza en ITT (2009). Los limites variables de velocidad se basan por ejemplo en la hora del día o la estación del año, mientras que los limites dinámicos tienen en cuenta las condiciones del trafico, meteorológicas o ambientales (como la contaminación) en tiempo real. Este estudio señala la necesidad de diseñar las vías de manera que se induzca a los conductores a elegir la velocidad adecuada para recorrerlas. No es eficiente diseñar vías de altas prestaciones para velocidades altas y, posteriormente, utilizarla a velocidades bajas.

La gestión dinámica de la velocidad permite conseguir una disminución de la velocidad media, y con ello de las emisiones. En los casos de Barcelona y Madrid se ha utilizado cuando los niveles de contaminación en las ciudades eran elevados, pero también podrían estudiarse su aplicación para reducir la emisión de CO_2.

Restricciones al tráfico rodado

Un grupo de medidas más drástico que la reducción de la velocidad es el establecimiento de restricciones al tráfico rodado, destinadas a reducir de manera forzosa la circulación. Estas medidas suelen estar asociadas a episodios agudos de contaminación atmosférica, pero reducen de forma análoga las emisiones de GEI.

Li & Jones (2015) analizan distintos escenarios de restricción al tráfico de vehículos privados en Pekín, ciudad con severos problemas de contaminación, y su influencia en las emisiones de CO_2. Un ejemplo de medida restrictiva para el tráfico, aplicada en varias ocasiones en la ciudad de Madrid, es la prohibición de aparcamiento en las zonas de estacionamiento regulado, que ocupan prácticamente toda la almendra central de la ciudad. Esa restricción da lugar a una fuerte reducción en la entrada de vehículos en la ciudad, al no poder aparcar, salvo en parkings. El establecimiento de zonas de estacionamiento regulado es ya una medida que ayuda a reducir el tráfico en la ciudad y en sus accesos, y con ello las emisiones de contaminantes.

Un último ejemplo de restricción es la peatonalización de áreas urbanas, que no solo evita el tráfico rodado en esas vías, sino que pone trabas a la circulación de los vehículos en la ciudad, desincentivando su empleo.

Peajes disuasorios

Una posible medida de reducción del tráfico es el establecimiento de peajes. No se incluye en el anterior grupo, las restricciones al tráfico, ya que en realidad no se restringe el paso de los vehículos, sino que se grava mediante un peaje, que puede tener un planteamiento de base diverso.

Lo más habitual es que los peajes se asocien a concesiones administrativas para la construcción y explotación de carreteras, sobre todo autopistas. El peaje, pagado por el usuario que quiera utilizar la carretera, cubre los costes de construcción, mantenimiento y operación, y el beneficio de la empresa concesionaria, todo ello durante un periodo de tiempo establecido. En Noruega existen caminos de acceso a atracciones turísticas, muchos de ellos particulares, donde se establece también un peaje por su uso.

Existen otras modalidades de peaje, que pueden estar enfocadas a objetivos ambientales, como la reducción de las congestiones o la mejora de la calidad del aire (Wen & Englese 2016), actuando como un impuesto pigouviano que grava el acceso a una zona o la utilización de una carretera, de manera que se desincentive. Ejemplos de este tipo de peajes son la tasa de acceso al centro de Londres, o la tasa de acceso a Bergen, en Noruega. Wen & Englese (2016) analizan las posibilidades de minimizar las emisiones de CO_2 en una zona de Inglaterra aplicando diferentes hipótesis de peaje.

Un ejemplo de gestión de peajes es la autopista Lyndon B. Johnson (*LBJ Expressway*) situada al norte de Dallas (Texas). En esta autopista se establecen carriles de peaje exprés (*managed lanes*) en los cuales la tarifa del peaje se ajusta en tiempo real, cambiando constantemente en función de la media de velocidad o el número de vehículos que quieren utilizar esos carriles. De esa manera, al incrementarse el tráfico sube el precio, lo que desincentiva el uso, ayudando a rebajar el tráfico de los carriles exprés, y manteniendo así la fluidez en la circulación. Los conductores pueden optar por usar los carriles de peaje pagando, o circular por los carriles generales de la autovía. (Ferrovial 2016). Este modelo está centrado en garantizar la fluidez de circulación, al menos en los carriles de peaje, y no en aspectos ambientales, pero la idea de penalizar los momentos de mayor intensidad circulatoria es realmente interesante, y sería aplicable a modelos de gestión del tráfico metropolitano en horas punta.

El uso de peajes tiene una importante influencia nacional, social y política. Por ejemplo, la red de carreteras de alta capacidad de Francia está dominada por autopistas de peaje; en Alemania no hay peajes; en Suiza o Eslovenia se paga una tasa fija, semanal, mensual o anual al entrar en el país; en España dominan las autovías sin peaje, aunque con algunas autopistas de peaje. Esa situación hace, por ejemplo, que resulte socialmente más fácil implantar un peaje en Francia que en España. De hecho, la concentración de peajes en el entorno de Barcelona, llevó a una campaña de insumisión al pago por parte de los usuarios, lo que muestra su escasa aceptación.

Políticamente son discutidos por considerarse discriminatorios, favorecer a las clases más pudientes, o incluso ser una doble imposición. No obstante, muchas de estas críticas se asociación a concesiones administrativas (autopistas de peaje). Más allá de estas discusiones el establecimiento de peajes que actúen como impuesto pigouviano para frenar la emisión de contaminantes parece razonable, y una aplicación del principio de "quien contamina paga", que está en la base de la normativa ambiental de la UE.

5.2.4.3. Medidas de regulación del tráfico ferroviario

De manera análoga a las carreteras, en los ferrocarriles es posible una regulación del tráfico de circulaciones, con importantes repercusiones sobre el cambio climático. En este caso las posibilidades es actuar sobre el número de circulación, para incrementarlas o reducirlas, o sobre la tipología de esas circulaciones.

Modificación del número de circulaciones

La contribución principal al cambio climático en los ferrocarriles está asociada al consumo energético de las circulaciones. Por eso, una modificación en su número, para ampliarlo o reducirlo, tiene una traducción directa en las emisiones de GEI. Sin embargo, depende del potencial de captación de viajeros del tren, por lo que no siempre una reducción de circulaciones implica una menor contribución al cambio climático.

La reducción del número de circulaciones es una medida lógica, y que de hecho se está adoptando de manera creciente, cuando la tasa de ocupación, número de usuarios por circulación, es baja. Es una decisión compleja, ya que si se considera únicamente la tasa de ocupación buena parte de la red ferroviaria podría quedar sin servicio. Pero, a la inversa, mantener elevadas frecuencias en líneas deficitarias implica un gasto energético y unas emisiones de GEI difícilmente justificables. Se debe por tanto buscar un adecuado equilibrio entre frecuencia de paso, que haga del tren una alternativa real de transporte, y racionalidad de frecuencias en función de la demanda de la línea. En la toma de decisiones, con un fuerte componente social, territorial e incluso político, también es posible incorporar como indicador la contribución al cambio climático de las distintas opciones modales, como un aspecto más (Tabla 28).

Tabla 28 Evaluación de opciones de transporte según contribución al cambio climático

Problema	Opciones	Evaluación
N usuarios al día hacen un mismo desplazamiento entre los puntos A y B	Opción 1. Ferrocarril	Número de circulaciones al día entre A y B, que está predeterminado, tenga o no viajeros.
	Opción 2. Autobús	Número de autobuses al día entre A y B que está predeterminado, tenga o no viajeros.
	Opción 3. Vehículo privado	Número de coches al día entre A y B que se ajusta al número de usuarios (se puede considerar una ocupación media de 1,2 pasajeros/coche)

Fuente: Elaboración propia

En general, el ferrocarril es un modo de transporte eficiente, siempre que alcance una cierta tasa de ocupación. Si el número de usuarios se reduce, pero la frecuencia de circulaciones se mantiene, las emisiones relativas por viajero suben enormemente. Lo mismo ocurre con el transporte en autobús, aunque es mucho más flexible a la hora de ajustar horarios y frecuencias. Por último, el vehículo privado es más contaminante, pero tiene la ventaja de ajustarse estrictamente al número de usuarios; si no hay usuarios, no hay desplazamientos en coche. Por ello, con demandas muy bajas de viajeros puede ser incluso preferible al tren desde un punto de vista de sus emisiones.

No siempre la reducción de circulaciones ferroviarias es una medida adecuada para reducir la contribución al cambio climático. Al contrario, en aglomeraciones urbanas es recomendable aumentar la frecuencia de trenes en horas punta, lo que incrementa las emisiones brutas generadas por el ferrocarril, pero reduce mucho más las emisiones de otros modos de transporte, sobre todo del vehículo privado, por trasvase modal de usuarios, que con menores frecuencias de trenes, o con tasas excesivas de ocupación (aglomeraciones de pasajeros) no lo utilizarían.

Esto mismo ocurre en periodos vacacionales, cuando se incrementa el número de trenes en días y horas punta para aumentar la oferta de plazas y con ello la competitividad del ferrocarril frente a otros modos de transporte, sobre todo cuando son previsibles fuertes retenciones de tráfico.

Modificación del tipo de circulaciones

Igual que se actúa sobre la frecuencia de los trenes, para ampliarla o reducirla, se puede actuar sobre la composición de las circulaciones, de manera que tengan una mayor o menor capacidad. La capacidad de los diferentes tipos de circulaciones varía según el modelo (Tabla 29), lo que permite adaptar la oferta a la demanda.

Tabla 29 Capacidad de circulaciones de cercanías y medio recorrido de Renfe

Grupo	Tipo de tren	Pasajeros	Imágenes
Cercanías	S-446	759	
	S-447	661-702	
	S-450	1 844	
	S-451	908	
Civia	S-462 (2 coches)	414	
	S-463 (3 coches)	607	
	S-464 (4 coches)	832	
	S-465 (5 coches)	997	
Media distancia	S-448	238	
	S-449	260	
	S-470	80	
	S-592	200	
	S-594	126-630	
	S-598	188-564	
	S-599	185	

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Renfe (http://www.renfe.com)

En las líneas con alta utilización o en horas punta, cuando pueden estar saturadas de circulaciones, el empleo de trenes de mayor capacidad o circulaciones con mayor número de coches permite incrementar la capacidad de transporte sin aumentar la frecuencia de trenes. Por el contrario, las líneas deficitarias pueden servirse mediante trenes de menor capacidad o circulaciones con menos coches, lo que reduce el consumo energético, aunque no de forma proporcional a los viajeros; los trenes con mayor capacidad son más eficientes. Sin embargo, es una medida menos traumática que la eliminación de frecuencias.

Modificación del número de paradas

Un último aspecto que puede influir notablemente en la utilización del tren, tanto positiva como negativamente, es el número de paradas que realice en su recorrido. En cada circulación es posible establecer las estaciones en que se parará, que puede ser todas o solo una parte de las existentes a lo largo del itinerario. Parar en una estación permite el acceso de viajeros, su subida o bajada, lo que incrementa el número de usuarios potenciales, pero también incrementa el tiempo total de viaje, lo que penaliza la efectividad del transporte y hace que sea menos competitivo frente a otros modos.

Dependiendo del tipo de usuarios y el recorrido se pueden adoptar unas u otras decisiones: en cercanías los trenes paran en todas las estaciones; en medio recorrido en estaciones locales y regionales importantes; en largo recorrido en estaciones de interés regional; y en alta velocidad en estaciones de interés nacional.

La decisión de que paradas se deben hacer es muy flexible, con la adecuada información a los usuarios, por lo que para una misma línea ferroviaria se pueden plantear diferentes hipótesis de explotación, variando el número de puntos de acceso, cantidad potencial de viajeros y tiempos de recorrido solo con incluir o quitar ciertas paradas, en todas o parte de las circulaciones. Por ejemplo, las circulaciones de alta velocidad entre Madrid y Sevilla pueden parar o no en Puertollano, lo que aumenta la captación de viajeros, pero alarga el trayecto entre 5 y 10 minutos.

5.2.5. Mitigación preventiva en el mantenimiento y operación

Se ha mantenido el mismo criterio adoptado en el análisis de la contribución al cambio climático, separando el mantenimiento y operación de las infraestructuras de la explotación, entendida como la circulación de tráfico rodado o ferroviario. En esta fase una importante medida de mitigación es modificar los sistemas de iluminación. El cambio en el origen de la energía tiene también una gran trascendencia, pero supera el ámbito de la EIA. En función de los materiales empleados, las labores de reposición serán más o menos frecuentes. Finalmente, se pueden lograr menores emisiones de GEI con una mayor eficiencia en los trabajos de mantenimiento.

5.2.5.1. Cambios en la iluminación

La iluminación de las carreteras es una importante fuente de consumo de energía, y en consecuencia de emisión de GEI, durante la operación de las carreteras. La densidad de alumbrado y el grado de iluminación están establecidos por normativa específica de carreteras (Tabla 20), con muy poco margen para su modificación. Si es importante que cualquier revisión de la normativa de iluminación de carreteras incorpore, junto a los aspectos de seguridad vial, la consideración de la contaminación lumínica (Díaz Sierra et al. 2015) y de las emisiones de GEI generadas.

Una medida de mitigación muy efectiva, que no precisa modificar el número de puntos de luz existentes, es la sustitución de las actuales lámparas por otras nuevas con tecnología LED. En los Países Bajos se ha construido la primera autopista del mundo iluminada mediante LED en lugar de iluminación convencional, lo que supone, según la Autoridad Nacional de Carreteras *(Rijkswater-staat)* una reducción del 40% en el consumo de energía y emisiones de CO_2 (Keijzer et al. 2015).

5.2.5.2. Cambios en el origen de la energía

Como se indicó anteriormente (véase 5.2.1), esta medida sobrepasa el ámbito de la EIA, no siendo en general posible su consideración dentro de este procedimiento. Sin embargo, se cita en este apartado por la enorme relevancia que tiene para la explotación y operación de las infraestructuras el origen de la energía eléctrica, en especial para líneas ferroviarias electrificadas, y la posibilidad de modificar enormemente las emisiones de GEI durante la explotación y operación simplemente con una variación en la composición del mix energético utilizado en su abastecimiento.

Ya se comentó anteriormente (véase 4.3.2) la influencia del origen de la energía en la sostenibilidad de los transportes, con los ejemplos de Noruega, con predominio hidroeléctrico (Singh et al. 2015) y China con fuerte peso del carbón (Yue et al. 2016), que penaliza la sostenibilidad de los ferrocarriles.

Tanto la iluminación de carreteras como la circulación de ferrocarriles eléctricos generan importantes consumos eléctricos, que son perfectamente conocidos y distribuidos de forma fija y constante a lo largo del tiempo, variando únicamente en lo referente a circulaciones ferroviarias no regulares. Por lo tanto, es posible conocer cuanta energía demandan las carreteras y ferrocarriles a lo largo de cada hora del día y cada día del año, lo que permitiría asignar fuentes constantes de producción, primando las menos contaminantes en cuanto a su producción de GEI.

La gestión del mix eléctrico es muy compleja, pero en los planes estratégicos de energía, tanto de producción como distribución, sería interesante asociar a estas infraestructuras, y sobre todo a los ferrocarriles, fuentes poco contaminantes.

5.2.5.3. Frecuencia y eficiencia del mantenimiento

Gran parte de las operaciones de mantenimiento se repiten periódicamente, con una frecuencia establecida, como son el barrido de firmes, revisión de sistemas de seguridad, limpieza de drenaje longitudinal y transversal, podas, siegas, etc. Son aspectos que sobrepasan la EIA, pero sobre los cabe hacer algunas observaciones.

El criterio que prima en estas operaciones es la seguridad, vial o ferroviaria, que en ningún caso se debe ver comprometida, y en ocasiones otros aspectos que pueden ser ambientales, de prevención de incendios o estéticos, por ejemplo. Aunque sea un criterio secundario, se debe considerar que desde un punto de vista de emisiones es deseable minimizar el empleo de maquinaria. Así, la limpieza manual de cunetas y márgenes no tiene ninguna limitación en cuanto a su frecuencia, pero el empleo de barredoras debería ceñirse a lo estrictamente necesario.

También es deseable que los organismos y empresas responsables del mantenimiento de carreteras y ferrocarriles tiendan al empleo de vehículos más eficientes, de bajo consumo y emisiones, para reducir la huella de carbono de sus actividades. Muchos de estos vehículos o circulaciones están específicamente dedicados al servicio de un tramo de carretera o ferroviario, lo que facilita el uso de combustibles limpios, utilizando puntos fijos de suministro o recarga.

Con respecto a la eliminación de vegetación y podas, a menudo acometida de forma sistemática (Figura 45), solo se justifica cuando existan interferencias con la seguridad vial o ferroviaria o cuando haya riesgo elevado de incendios. En el resto de casos, es una eliminación innecesaria de sumideros, con impactos estéticos y ecológicos negativos, e incluso entra en contradicción con las labores de revegetación realizadas.

Figura 45 Desbroce injustificado

Fuente: Asociación de Empresas de Conservación y Explotación de Infraestructuras (http://acex.eu)

5.2.5.4. Frecuencia y métodos de reposición

Las partes de una infraestructura tienen una determinada vida útil (véase 4.4.1), tras la cual deben ser reparadas o sustituidas, como ocurre con la reposición de la capa de rodadura en firmes, las marcas viales o elementos afectados por corrosión.

Un adecuado diseño de las partes de la infraestructura, y una selección y empleo de materiales duraderos en la construcción alarga su vida útil, lo que implica reducir su huella de carbono. Como norma general, todo lo que es poco duradero requiere frecuentes reposiciones, siendo costoso en energía y emisiones. Por ejemplo, uno de los

argumentos a favor del empleo de firmes de hormigón es su mayor durabilidad frente a los firmes asfálticos, aunque también presentan otros inconvenientes asociados a su rigidez, como mayor fragilidad y dificultad de reparación, aparte de ser más ruidosos. Incorporar la huella de carbono en la evaluación de alternativas, aunque no sea el factor determinante, es siempre muy deseable. Como se indicó, la elección de un tipo adecuado de firme es una medida de mitigación preventiva (véase 5.2.2).

Cuando un firme precisa una reparación o reposición lo habitual era proceder al fresado y a la extensión de una nueva capa de rodadura. Eso implica la generación de un residuo de firme, que debe ser transportado a una planta de reciclaje, y la adquisición de áridos para la nueva capa, que deben transportarse desde canteras o yacimientos. Sin embargo, existen alternativas que permite la rehabilitación del firme mediante su reciclado. El Ministerio de Fomento tiene una Orden Circular 8/2001 sobre reciclado de firmes (MFOM 2001) donde se indican los tipos y casos en que pueden aplicarse, siendo la principal limitación la categoría de tráfico pesado que tenga la carretera.

De acuerdo con la Orden 8/2001 existen tres tipos de reciclado de firmes:

- Reciclado en central en caliente de capas bituminosas. Consiste en la utilización del material resultante de la disgregación (mediante fresado o demolición y trituración) de capas de mezcla bituminosa de pavimentos envejecidos en la fabricación de mezclas bituminosas en caliente.
- Reciclado in situ con emulsión de capas bituminosas. Con una sola pasada se fresa la carretera envejecida, se mezcla y homogeneíza con emulsión y agua, y se hace el extendido y precompactación, reduciendo al máximo el transporte de materiales, el vertido de residuos y la necesidad de materiales de canteras o yacimientos, con un ahorro de costes económicos y ambientales (Almazán 2007).
- Reciclado in situ con cemento de capas bituminosas (Figura 46). Consiste en disgregar el firme existente en la profundidad requerida, mezclar el material con cemento y agua, compactar la mezcla a la densidad adecuada y disponer encima cierto espesor de mezcla bituminosa según el trafico (IECA 2013).

Figura 46 Reciclado in situ con cemento de capas bituminosas

Fuente: TRABIT (http://www.trabit.com)

Siempre que sea viable estas soluciones son mejores ambientalmente, y en concreto en cuanto a su contribución al cambio climático.

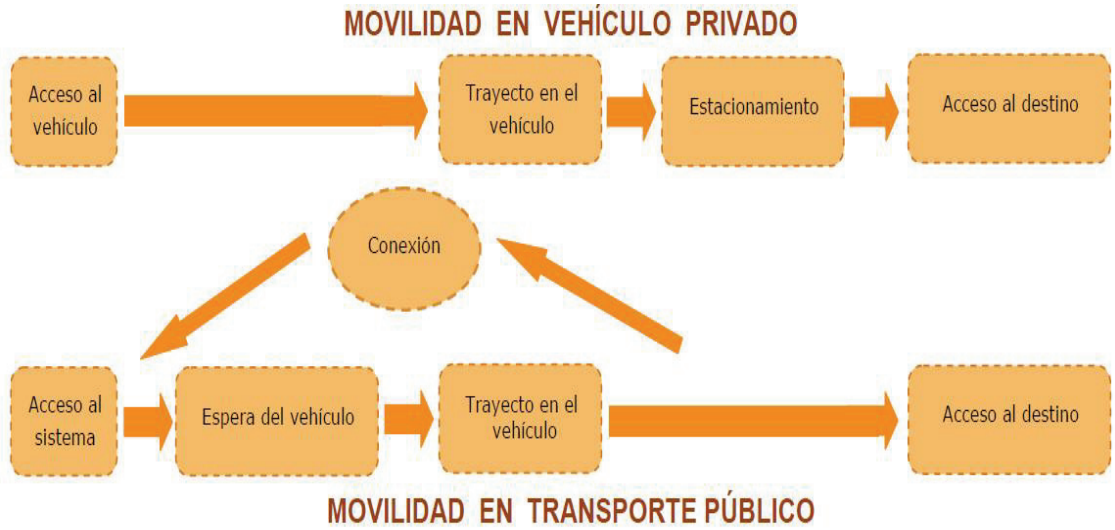
5.2.6. Mitigación preventiva comportamental

Existe un tipo de mitigación preventiva que se basa en modificar el comportamiento de un colectivo, o de la sociedad en general, para lograr una menor contribución al cambio climático. Aunque supera el ámbito de la EIA, es interesante destacar su existencia, ya que es muy deseable y efectivo su fomento. Desde hace años son habituales las campañas de ahorro energético destinadas a lograr una mayor concienciación y una reducción en el consumo. Centrándose en las infraestructuras de transporte, las principales medidas comportamentales que fomentan la mitigación son el uso del transporte público en lugar del vehículo privado y la conducción eficiente.

Uso de transporte público

El fomento del transporte público supera la planificación, dependiendo de la voluntad política. La expansión de las redes de transporte público, el coste para el usuario o la desincentivación del vehículo privado son medidas políticas, condicionadas por la aceptación social. Para definir las posibilidades de actuación se debe partir de las diferencias entre movilidad en vehículo privado y transporte público (Figura 47).

Figura 47 Diferencias en la movilidad en vehículo privado y transporte público



Fuente: CETMO (2006)

Partiendo de las diferentes etapas que componen un desplazamiento, y añadiendo el coste global que supone, se pueden establecer medidas de incentivación del transporte público, y desincentivación del vehículo privado (Tabla 30). El fomento del transporte público será tanto más exitoso cuantas más medidas en ambos sentidos se tomen, pero mientras incentivar el transporte público tiene una amplia aceptación social, desincentivar el vehículo privado despierta un rechazo mayoritario, que dependerá de la conciencia ambiental y educación de la sociedad.

Tabla 30 Medidas para incentivar el transporte público y desincentivar el privado

Etapa	Incentivación del transporte público	Desincentivación del vehículo privado
Acceso al vehículo	Extensión de la redes, proximidad paradas	-
Espera	Mayores frecuencias, puntualidad	-
Trayecto	Rapidez, carriles especiales, comodidad	Limitación velocidad, atascos
Conexión	Intercambiadores modales	-
Estacionamiento	-	Estacionamiento de pago, tarifas elevadas
Acceso al destino	Extensión de la redes, proximidad paradas	Peaje de acceso a ciudades
Coste	Costes menores que vehículo privado	Costes mayores que transporte público

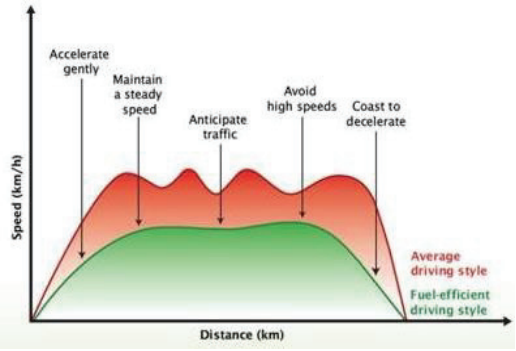
Fuente: Elaboración propia

La comodidad del transporte público ha mejorado mucho, salvo horas punta zonas urbanas, en trayectos cortos. Su desventaja es un mayor tiempo de viaje si las paradas no están próximas, son precisas conexiones o sufre atascos. En el vehículo privado las desventajas son los atascos, el estacionamiento y el mayor coste. Se debe fomentar la expansión de las redes, el aumento de frecuencias y los intercambiadores, con costes para el usuario aceptables, y acompañarse con mayores costes de aparcamiento e incluso peajes urbanos, que hagan del vehículo privado una alternativa poco atractiva.

Conducción eficiente

Existe consenso sobre la necesidad de adoptar una conducción eficiente para reducir el consumo de carburantes y la generación de emisiones, existiendo varias guías dedicadas a ello (p.e. IDAE 2002, 2005 o DGT 2014 en España; Auto Alliance 2008, Department for Transport 2009, Porter et al. 2013 o NRC 2016 en países anglosajones). Entre las medidas más habituales para una conducción eficiente están una aceleración progresiva, mantener una velocidad estable, anticiparse al tráfico, evitar las velocidades elevadas o decelerar en lugar de frenar (Figura 48). Otras medidas son mantener las ventanillas cerradas o regular adecuadamente el aire acondicionado (DGT 2014).

Figura 48 Técnicas de conducción eficiente



Fuente: NRC (2016)

Una adecuada formación puede llevar a una reducción en el consumo de carburante, y de las emisiones de CO_2, del 25% de forma inmediata tras la formación, y del 10% a largo plazo en conductores particulares, y del 25% y 6,5% en conductores empleados (Department for Transport 2016). Sin embargo, el grado de concienciación ciudadana es aún limitado, al menos en España. El informe del Department for Transport (2016) señala también para el Reino Unido que la conducción eficiente no tiene un perfil elevado en la formación de nuevos conductores ni en los exámenes, y que hay escaso interés en pagar cursos de formación sobre esta materia tanto por conductores particulares como por empresas, al no asociarse a una ganancia clara.

Aparte de la formación y concienciación, la incorporación de mejoras tecnológicas a los vehículos para informar del consumo, cada vez más habituales, también tienen cierta efectividad, mientras no incrementen el coste de adquisición.

5.3. Mitigación correctiva

5.3.1. Concepto de mitigación correctiva

Las medidas correctoras tienen por objeto corregir, paliar, atenuar o minimizar impactos que se producirán de forma cierta e inevitable. Las posibilidades de mitigación correctiva de la contribución al cambio climático son muy limitadas. Es posible lograr una minimización en las emisiones aplicando las medidas preventivas indicadas en el anterior apartado, pero si se emiten GEI la única alternativa es la compensación, como se expone en el siguiente apartado. Solo existe un caso en que se puede hablar de mitigación correctiva, la restauración de la cubierta vegetal afectada por las obras, ya que cuando la implantación de vegetación se hace en otro lugar, como sustitución de la vegetación destruida, se trataría de una medida compensatoria.

5.3.2. Revegetación

Durante las obras se produce una destrucción de vegetación, lo que da lugar a una pérdida del stock de carbono que tiene acumulada y de su capacidad de secuestro. La vegetación se destruye a consecuencia del desbroce, pero los terrenos afectados pueden o no quedar ocupados de forma permanente, y por lo tanto pueden ser o no susceptibles de revegetación (Tabla 31).

En ocasiones, las obras afectan a terrenos que son necesarios durante la construcción, pero no de forma permanente, como las zonas de instalaciones auxiliares, zonas de acopio, zonas bajo viaductos o caminos provisionales de obra. En otras ocasiones la obra ocupa permanentemente los terrenos, pero puede generar nuevas superficies susceptibles de soportar vegetación, como son los taludes de desmonte y terraplén, las cubiertas de falsos túneles o las isletas de enlaces, por ejemplo. También existen zonas ocupadas y alteradas de forma permanente, pero susceptibles de ser revegetadas, como préstamos y vertederos.

Para cada una de las zonas de afección señaladas en la Tabla 31 se debería valorar la posibilidad de recuperación del stock y del secuestro mediante la implantación de nueva vegetación. Esta restauración de la cubierta vegetal permite corregir parcialmente el impacto generado en las obras (es imposible la corrección total al existir zonas con ocupación permanente), y restablecer una cubierta vegetal que mitigue en parte la pérdida de stock y de secuestro.

La recuperación de la cubierta vegetal por siembras y plantaciones es un proceso lento. Se parte de la implantación de semillas o plantas jóvenes, que se irán desarrollando, y que además sufrirán marras. Por ello, su evaluación exige un estudio durante un periodo de tiempo, que debe ser coincidente con el establecido para la evaluación de la pérdida de secuestro, y que al igual que en ese caso, como mínimo debería ser el año horizonte, para el cual se diseña la infraestructura.

Tabla 31 Afección a la vegetación durante la fase de obras y recuperabilidad

Zona			Ocupación	Posibilidad de revegetar	Observaciones
Plataforma	Plataforma estricta		Permanente	Nula	Ocupado definitivamente por la carretera/vía
	Taludes	Desmonte	Permanente	Baja	Terreno compacto, pobre y con fuerte pendiente
		Terraplén	Permanente	Media	Terreno con pendiente pero menos compacto
Bocas de túneles			Permanente	Muy baja	Terreno muy difícil, a menudo gunitado
Cubierta de falsos túneles			Permanente / temporal	Media/Alta	En general puede devolverse al uso anterior
Zonas bajo viaductos			Permanente / temporal	Media/Alta	Limitaciones de agua y luz en viaductos bajos
Estaciones y aparcamientos			Permanente	Nula	Ocupado definitivamente
Subestaciones eléctricas			Permanente	Nula	Ocupado definitivamente
Áreas de servicio			Permanente	Nula	Ocupado definitivamente
Márgenes (dominio público)			Temporal	Baja/Alta	Terreno muy variable, desde llano a abrupto
Zonas de instalaciones auxiliares			Temporal	Media/Alta	En general zonas llanas, recuperables
Acopios de tierras			Temporal	Media/Alta	En general pendiente moderada, recuperables
Préstamos			Permanente	Muy baja	A menudo con frentes de excavación difíciles
Vertederos			Permanente	Baja	Más sencillos de restaurar que los préstamos

Fuente: Elaboración propia

En la revegetación se parte de un stock de carbono de la vegetación implantada que es prácticamente despreciable, al consistir habitualmente en semillas y plantas jóvenes. Por ello, la valoración del secuestro y el stock de carbono son coincidentes. Se puede valorar el secuestro de CO_2 producido en el periodo de referencia (que se deriva del crecimiento anual de la vegetación), o bien se puede valorar el stock de la vegetación implantada al final del periodo de referencia, entendiendo que dicho stock deriva de un secuestro equivalente de CO_2 (Tabla 32).

Tabla 32 Cálculo del stock o secuestro de carbono en la vegetación implantada

Etapa	Ud	Fuentes documentales	Metodología de cálculo
Revegetación de zonas con ocupación temporal	ha	Planos del proyecto de revegetación	S_{vi} S_{vi} = Superficie de zonas revegetadas, según tipo de vegetación implantada (ha)
Opción 1. Secuestro de carbono de la nueva vegetación implantada (crecimiento de la vegetación en el periodo de referencia)	t C	Bibliografía según tipo de vegetación implantada, considerando su crecimiento real. Periodo al menos igual al año horizonte (20 años)	$SQ_{C_{generado}} = \sum S_{vi} \cdot SQ_{Cvi} \cdot T$ $SQ_{Cgenerado}$ = Secuestro de carbono generado (t C) S_{vi} = Superficie vegetación implantada (ha) SQ_{Cvi} = Secuestro de carbono de la vegetación (t C/ha/año) T = Periodo de referencia (años). Al menos 20.
Opción 2. Stock de carbono de la nueva vegetación implantada al final del periodo de referencia	t C	Bibliografía según tipo de vegetación, considerando el volumen al final del periodo y el porcentaje de carbono	$ST_{C_{generado}} = \sum S_{vi} \cdot B_{vi} \cdot pC_{vi}$ $ST_{Cgenerado}$ = Stock de carbono generado (t C) S_{vi} = Superficie vegetación implantada (ha) B_{vi} = Biomasa de la vegetación (t/ha) pC_{vi} = Porcentaje de carbono en la biomasa
CO_2 equivalente derivado de secuestro por la vegetación implantada en el periodo de referencia	t CO_2	Factor de conversión de C orgánico a CO_2 (3,67)	$S_{CO_2\,generado} = f_{C-CO_2} \cdot SQ_{C_{generado}}$ $S_{CO_2\,generado} = f_{C-CO_2} \cdot ST_{C_{generado}}$ $S_{CO2\ generado}$ = Emisión de CO_2 equivalente al secuestro (t CO_2) $f_{C\text{-}CO2}$ = factor de equivalencia 3,67 t CO_2 / t C $SQ_{C\ generado}$ = Secuestro de carbono generado (t C) $ST_{C\ generado}$ = Stock de carbono generado (t C) (Se parte de una biomasa inicial en la plantación despreciable)

Fuente: Elaboración propia

Para determinar la efectividad de esta medida correctora se puede relacionar con la destrucción de vegetación en la fase de obras, y la pérdida de stock y capacidad de secuestro definido anteriormente (Tabla 15), mediante la expresión:

$$B_{CO_2} = ST_{CO_2\,perdido} + SQ_{CO_2\,perdido} - S_{CO_2\,generado}$$

donde
B_{CO2} es el balance neto de emisiones de CO_2 por afección y restauración de la cubierta vegetal
$ST_{CO2\ perdido}$ es la pérdida de stock de carbono por la vegetación destruida
$SQ_{CO2\ perdido}$ es la pérdida de secuestro de carbono en la vegetación destruida
$S_{CO2\ generado}$ es el secuestro de carbono logrado con la vegetación implantada

Si $B_{CO_2} > 0$ existe contribución neta al cambio climático por emisiones de CO_2 a consecuencia de la destrucción de vegetación, que es lo más habitual. Si $B_{CO2} < 0$, existe un mitigación neta del cambio climático por secuestro de CO_2 lo que podría ocurrir por ejemplo si se afectan zonas con vegetación herbácea y se restauran con vegetación arbórea, logrando al final del periodo de referencia un stock superior al inicial.

Otra opción es calcular la efectividad de la medida como un porcentaje:

$$E_{mc} = \frac{S_{CO_2\,generado}}{ST_{CO_2\,perdido} + SQ_{CO_2\,perdido}} \cdot 100$$

donde
E_{mc} es la efectividad de la mitigación correctiva en porcentaje
$ST_{CO2\ perdido}$ es la pérdida de stock de carbono por la vegetación destruida
$SQ_{CO2\ perdido}$ es la pérdida de secuestro de carbono en la vegetación destruida
$S_{CO2\ generado}$ es el secuestro de carbono logrado con la vegetación implantada

En este caso, si $E_{mc} = 100\%$, se corrige totalmente el impacto asociado a la contribución al cambio climático por afección a la vegetación. Si $E_{mc} < 100\%$, la corrección no es total, existiendo un impacto residual. Finalmente si $E_{mc} > 100\%$, se logra un beneficio neto con la medida, una mitigación neta del cambio climático.

Es importante realizar cálculos realistas del secuestro generado por medio de la revegetación, ya que en la EIA se ha tendido, y aún se tiende, a sobrevalorar la eficacia de las medidas correctoras, y sobre todo de la revegetación, cuando los resultados que aporta en la práctica el seguimiento ambiental son mucho más modestos.

Una estimación realista debe considerar lo favorables o desfavorables que son los terrenos revegetados y las características del clima de la zona, haciendo una estimación realista de las marras que pueden producirse, de la nascencia de siembras e hidrosiembras y de los crecimientos anuales posibles. Por ejemplo, los resultados esperables en desmonte y terraplenes son muy diferentes, ya que los primeros son terrenos compactos y desfavorables mientras que los segundos son aportes, con menor compacidad, lo que lleva a una mayor nascencia de las hidrosiembras y desarrollo de las plantaciones (Enríquez de Salamanca et al. 2004, Carrasco et al. 2004).

De igual manera, la revegetación en el norte peninsular, en zonas de clima atlántico, es habitualmente exitosa a corto o medio plazo, con elevada nascencia y gran desarrollo de las plantaciones, que da lugar a formaciones con abundantes hemicriptófitos y fanerófitos, que incluso llegan a precisar desbroces para la prevención de incendios. Por el contrario, en gran parte de la península, bajo un clima mediterráneo con fuerte sequía estival, el desarrollo logrado de la vegetación suele ser deficiente, o a lo sumo moderado, con dominancia de terófitos y caméfitos cuya biomasa total es muy escasa, y poco constante en el tiempo.

5.4. Mitigación compensatoria

5.4.1. Concepto de mitigación compensatoria

Definiciones

Existen numerosas definiciones de compensación ambiental, en ámbitos técnicos, académicos o legales, en esencia concurrentes. La Real Academia Española de la Lengua define “compensatorio” como “igualar en opuesto sentido el efecto de una cosa con el de otra” o “dar algo o hacer un beneficio en resarcimiento del daño, perjuicio o disgusto que se ha causado”. Cowell (1996, 2000) define la compensación ambiental como la adopción de medidas ambientales positivas para corregir, equilibrar o remediar la pérdida de recursos ambientales. Kuiper (1997) considera la compensación como la creación de nuevos valores, que son iguales a los valores perdidos.

En el ámbito de la EIA es un concepto establecido desde la primera Directiva de EIA (EU 1985) y el ya derogado Real Decreto Legislativo 1302/1986 (BOE 1986), aunque actualmente se tiene a asociar medidas compensatorias con afección a la Red Natura 2000, en cumplimiento de la Directiva 92/42/CEE (EU 1992), una visión muy limitada y restrictiva (Carrasco et al. 2013, Enríquez de Salamanca & Carrasco 2013).

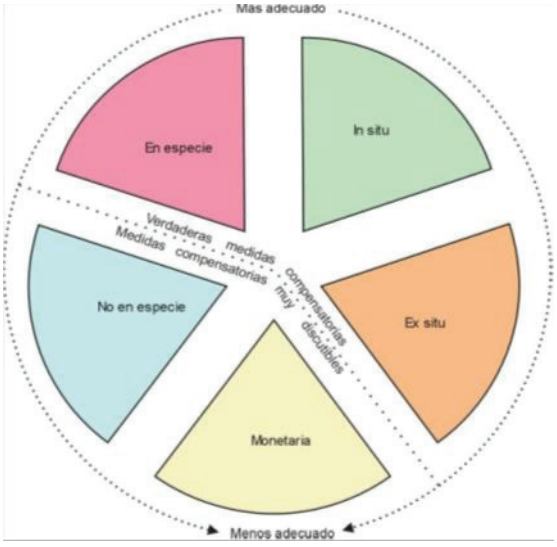
Las medidas compensatorias se pueden dividir en diversas categorías, no excluyentes entre sí (Cuperus et al. 1999, NRC 2001, Cuperus 2004, Rajvanshi 2008, Darbi et al. 2009, Enríquez de Salamanca et al. 2014):

- **Medidas compensatorias *in situ*** (*on-site*), donde se generan los impactos.
- **Medidas compensatorias *ex situ*** (*off-site*), fuera de la zona afectada.
- **Compensación en especie** (*in-kind*), relacionada con el recurso afectado, compensando con un valor igual o similar al afectado.
- **Compensación no en especie** (*out-of-kind*), sin relación directa con el recurso afectado. Rajvanshi (2008) incluyen la compensación monetaria.
- **Compensación monetaria.** Pagos monetarios directos, donde es difícil establecer una relación entre recursos afectados y medidas adoptadas.

En Australia se diferencian las **compensaciones directas**, destinadas a **mejora, rehabilitación y conservación de hábitats, como restauración, rehabilitación,** restablecimiento, secuestro o adquisición de tierras para la conservación de otros tipos como son compensaciones contributivas (EPA 2006), actividades indirectas complementarias que, junto con la compensación directa, ayudan a cumplir con los objetivos de la compensación o avanzadas (Australian Government 2012) para un uso futuro. Otra división diferencia entre gestión sobre el terreno (incluyendo revegetación), adquisición de terrenos e investigación (Government of Western Australia 2014).

Existe un amplio consenso en que las medidas de compensación deben ser directas, in situ y en especie (Figura 49). Esto se traduce en actuaciones concretas de restauración, mejora o creación de hábitats, en la zona afectada o su entorno. En España, a lo largo de los últimos 25 años han dominado las medidas indirectas, ex situ y no en especie (Enríquez de Salamanca et al. 2014), lo que supone una deficiente aplicación de la compensación ambiental.

Figura 49 Tipos de medidas compensatorias



Fuente: Enríquez de Salamanca et al. (2014)

Dos aspectos clave para entender la compensación son la adicionalidad y la permanencia (Enríquez de Salamanca et al. 2014):

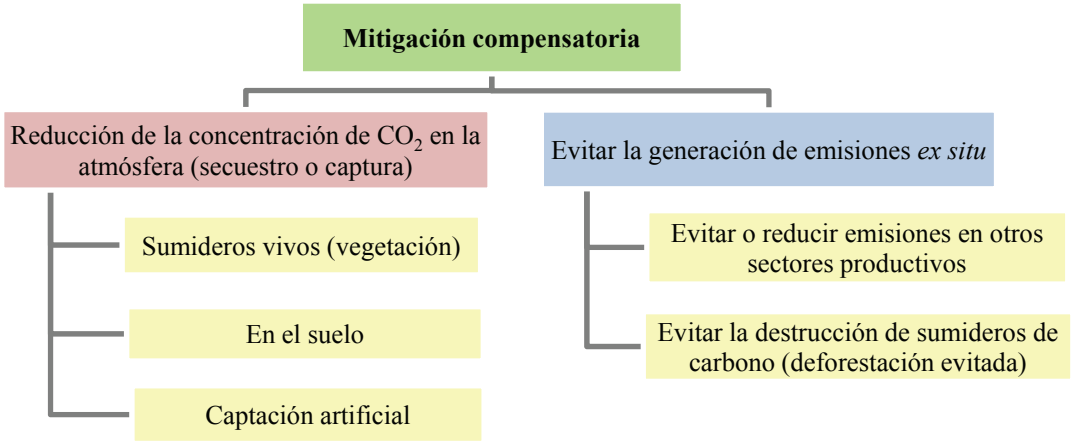
- **Adicionalidad.** Las medidas compensatorias deben suponer un cambio en la situación actual, en cuanto a calidad ambiental o reducción de riesgos.
- **Permanencia.** Si el impacto es permanente, las medidas compensatorias deben serlo también. La compensación mediante mecanismos de carácter temporal, no garantizan la permanencia, salvo que incluyan garantías específicas.

Mitigación compensatoria frente al cambio climático

Existe una urgente necesidad de reducir de forma intensa los niveles de GEI en la atmósfera si se quieren alcanzar los objetivos acordados en la COP21 (UNFCCC 2015) de no superar los 2ºC de incremento en la temperatura. Pese a los ambiciosos y voluntariosos objetivos de la COP21, con las actuales tendencias no parece que vayan a cumplirse, a menos que se hagan grandes esfuerzos adicionales a nivel mundial. Los esfuerzos principales se deben centrar en la mitigación preventiva, reduciendo de forma drástica las emisiones de GEI de todos los países, y en especial los más desarrollados. Pero también puede jugar un papel importante la reducción de la concentración de GEI en la atmósfera mediante su secuestro y almacenamiento. Se está prestando poco interés a la compensación de las emisiones generadas por las infraestructuras de transporte, probablemente por su magnitud y por problemas de responsabilidades, especialmente en el caso de las carreteras. Aplicando la jerarquía de la mitigación, una vez aplicadas todas las medidas de prevención posibles, se deberían compensar los impactos residuales inevitables, en este caso las emisiones de GEI.

La mitigación compensatoria asociada al cambio climático se puede acometer desde dos grandes perspectivas, secuestro o evitar nuevas emisiones (Figura 50), cuya aplicación a la EIA de infraestructuras se analiza en los siguientes apartados.

Figura 50 Tipos de mitigación compensatoria frente al cambio climático



Fuente: Elaboración propia

5.4.2. Secuestro de carbono

5.4.2.1. Secuestro de carbono mediante sumideros vivos

El secuestro de carbono con sumideros vivos se basa en fomentar el desarrollo de vegetación, que absorba CO_2 atmosférico mediante la fotosíntesis, transformándolo en materia vegetal. El empleo de sumideros es una herramienta complementaria a las políticas de reducción de emisiones que pueden usar los estados (EC 2012).

Reforestación y revegetación

Durante la construcción de infraestructuras es frecuente la destrucción de sumideros de carbono, lo que implica la pérdida del stock de carbono que tienen almacenado, así como de su capacidad de secuestro. En algunas zonas es posible restaurar o recuperar la vegetación afectada, lo que se considera una medida correctora.

La implantación de vegetación también puede utilizarse como medida compensatoria, para crear nuevos sumideros (Figura 51), o para mejorar la vegetación en sumideros existentes, incrementando la densidad o variando su composición. A diferencia de la mitigación correctiva, la compensación no restaura vegetación afectada, sino que implanta nueva vegetación en un lugar diferente para compensar la vegetación destruida, o crear un nuevo sumidero de carbono donde no existía, compensando así las emisiones de la infraestructura de transporte.

Figura 51 Bosque REE en Mallorca

Fuente: Red Eléctrica de España (http://www.ree.es)

Se plantean por tanto dos tipos de compensación por revegetación:

- Compensación de la vegetación destruida por las obras. En este caso se busca un doble objetivo, evitar la pérdida neta de biodiversidad *(no-net-loss)* por destrucción de vegetación, en especial si son hábitats de interés, y compensar la pérdida de sumideros de carbono. De forma prioritaria se buscará recuperar comunidades vegetales iguales a las destruidas, con un criterio ecológico.
- Compensación de emisiones mediante nuevos sumideros. En este caso no se busca compensar una vegetación destruida sino crear sumideros que compensen las emisiones de GEI. En este sentido, cuando mayor sea la capacidad de secuestro del sumidero, mayor efectividad tendrá.

Cuando la compensación pretende la creación de nuevos sumideros, lo habitual es recurrir a la reforestación para lograr nuevos bosques con elevado potencial de secuestro y almacenamiento. Es importante aunar capacidad de secuestro y biodiversidad, evitando plantaciones monoespecíficas de especies exóticas. Entre las especies forestales de mayor crecimiento en España se cuentan varias exóticas como el pino de Monterrey *(Pinus radiata)*, utilizado sobre todo en la Cornisa Cantábrica y País Vasco, los eucaliptos *(Eucalyptus globulus* y *E. camaldulensis)*, abundantes en Huelva, Galicia, y la Cornisa Cantábrica, o el chopo híbrido *(Populus x canadensis)* plantado en vegas de todo el país (Enríquez de Salamanca & Iglesias 2012). El uso de estas especies maximiza el secuestro de carbono, y puede ser aceptable en terrenos agrícolas, pero resulta ecológicamente indeseable si reemplaza a la vegetación natural. Por el contrario, el uso de quercíneas espontáneas como encina *(Quercus ilex),* alcornoque *(Q. suber),* quejigo *(Q. faginea)* o melojo *(Q. pyrenaica),* supone crecimientos lentos, lo que hace que la compensación sea moderada, aunque longeva en el tiempo. Los robles atlánticos, como el carballo *(Q. robur)* o el albar (*Q. petraea)* se desarrollan en climas más favorables, aunque su crecimiento es también más lento que en otras especies forestales.

El mayor problema en España para la compensación mediante reforestación es el lento crecimiento de los árboles en zonas con clima mediterráneo, dominante en el país, ralentizando el secuestro de carbono y haciendo la compensación más cara. A este problema se suman los malos resultados obtenidos en la reforestación directa con quercíneas, por la degradación de los suelos, y la falta de protección por un dosel arbóreo. Una solución es emplear masas mixtas compaginando especies espontáneas de pino con quercíneas, lo que permite mejores resultados, una adecuada integración ecológica, y unos valores de secuestro de carbono aceptables a medio plazo.

Pese a la importante fijación de carbono de los bosques españoles (Montero et al. 2005), el clima mediterráneo limita el potencial forestal (Nabuurs & Schelhaas 2002). Esto ha llevado a un creciente interés por el matorral y la agricultura como sumideros (Agudo et al. 2007, CITAA 2008, Alías et al. 2009), con medidas como incrementar la biomasa en los bosques, manejo de restos agrícolas o sistemas agroforestales.

El empleo de la reforestación para compensar GEI puede competir con la agricultura. Las alternativas basadas en usos del suelo pueden contribuir un 13 a 52% del objetivo de reducir un 20% los GEI en 2020, pero requerirían que el 8 a 30% de tierras agrícolas de la UE-25 fueran reforestadas o destinadas a cultivos bioenergéticos (Ovando & Caparrós 2009). En Estados Unidos pagos por encima de USD 50 por t CO_2 podrían reducir las emisiones de GEI más de 700 millones t CO_2-eq por año, pero implicaría la reducción de la superficie agrícola un 10% o más (Jackson & Baker 2010).

En España existen grandes superficies de tierras agrícolas marginales o de baja productividad y eriales susceptibles de ser reforestadas. Durante la posguerra española, sobre todo en la década de 1940, se produjo un masivo carboneo de montes y roturación de terrenos para destinarlos a la agricultura, muchos de ellos de escasa aptitud. La

mejora de la situación económica a partir de finales de los años 1950 llevó a un progresivo abandono de esas tierras de bajo valor agrícola, que pasaron a ser eriales, y en los mejores casos a ser recolonizadas por matorrales e incluso encinares. Además, se esperan altas tasas de abandono de terrenos en los próximos 25 años en Europa si se mantienen las actuales tendencias y políticas (EFTEC et al. 2010). Otras condiciones favorables para España de cara a la reforestación son el tamaño del país, el segundo más grande de la UE, la gran superficie agrícola y forestal y una densidad de población menor que la media de la UE-28 (EUROSTAT 2015).

En consecuencia, con una adecuada planificación es posible reforestar amplias superficies de territorio sin que eso suponga un conflicto con la agricultura, ni afecte a la producción agraria ni a los precios de los alimentos en España.

Sistemas agroforestales

Los sistemas agroforestales combinan el uso agrícola o ganadero con la presencia de arbolado, permitiendo la producción agropecuaria y el secuestro de carbono de forma simultánea, sin requerir la transformación total del terreno (Flugge & Abadi 2006, Trines 2006, Balderas et al. 2010, Bryan et al. 2014).

En España existe un sistema agro-silvo-pastoral tradicional, la dehesa (Figura 52), formada por cultivos de cereal o pastos con una cubierta clara de arbolado con una densidad de 20-100 pies/ha (Olea & San Miguel 2006), generalmente encina *(Quercus ilex)* o alcornoque *(Q. suber),* aunque a veces también fresno *(Fraxinus angustifolia)* en suelos húmedos en zonas de piedemonte de sierras, como el Sistema Central. Las dehesas ocuparon amplias extensiones de terreno en el pasado, pero la intensificación de los cultivos ha llevado a una importante reducción de su superficie.

Figura 52 Dehesas de encina con uso ganadero

Navalmoral de la Mata (Cáceres). Fuente: Elaboración propia. Ortofoto Iberpix (http.//www.ign.es)

En consecuencia, una medida muy evidente de mitigación compensatoria, con beneficios no solo por el secuestro de carbono sino también por aumento de la biodiversidad y mejora del paisaje es volver a plantar arbolado disperso en zonas agrícolas o ganaderas donde no existe, por haber desaparecido las dehesas, o porque

nunca llegaron a existir. Sin embargo los sistemas agroforestales son difíciles de promover por razones sociales y culturales (FAO 2001).

En zonas de cultivo la presencia de árboles dificulta en laboreo y la cosecha, mientras que en zonas con uso ganadero es necesario proteger los árboles hasta la madurez para evitar que sean destruidos por el ganado. Los usos agrícolas y forestales han sido tradicionalmente antagónicos, y su conciliación, que es lo que en realidad son las dehesas o sistemas agroforestales es compleja.

La presencia de arbolado tiene grandes ventajas ecológicas y paisajísticas así como asociadas a la fijación de carbono, ventajas sobre los suelos, incrementando el contenido de carbono en el entorno de los árboles, y facilitando el movimiento vertical de agua y nutrientes en el suelo. Sin embargo, las ventajas ecológicas, paisajísticas y climáticas no aportan beneficios evidentes a corto plazo a los propietarios, y las ventajas edáficas son poco evidentes. En consecuencia, los propietarios perciben la plantación de arbolado en sus cultivos o pastos como un motivo de pérdida de producción.

Estos inconvenientes productivos solo serían asumidos por los propietarios si la presencia de arbolado supusiera alguna ventaja para sus ingresos, lo que en la actualidad no ocurre casi nunca. Una excepción son las dehesas dedicadas a la cría de cerdo ibérico en el Oeste de España, donde la bellota es una parte esencial de la alimentación del ganado, pero ni siquiera en estos casos se plantan nuevas dehesas, y las existentes están amenazadas por la excesiva edad de los árboles y la falta de regeneración natural.

Para revertir la falta de interés en las dehesas se podrían establecer pagos o subsidios que compensen las molestias o dificultades operacionales y la pérdida de productividad por una parte, y que incluyan un incentivo en forma de un beneficio adicional para fomentar su aplicación. Es un tipo de Pago por Servicios Ambientales (PES), donde se puede compensar el secuestro de carbono, el incremento de la biodiversidad y la mejora del paisaje.

Es precisamente en este punto donde entran las infraestructuras de transporte, ya que son capaces de aportar fondos para esos subsidios (como puede ser un impuesto a los carburantes), de forma independiente o en conjunto con otros mecanismos, de manera que el fomento y subvención de sistemas agroforestales se utilice como medida de compensación de las GEI de la infraestructuras, sobre todo de las carreteras. Lo normal sería que las carreteras (o sus usuarios más exactamente) financiaran el PES derivado del secuestro de carbono, y se aportasen fondos de otras fuentes como complemento para pagar por la mejora de la biodiversidad y el paisaje, para no gravar excesivamente los combustibles.

Setos vivos

El paisaje agrario de la España mediterránea ha cambiado a lo largo del tiempo, sufriendo un proceso progresivo de intensificación en el que se ha ido perdiendo

progresivamente el arbolado y el matorral. En muchas comarcas españolas aparecen enormes extensiones cerealistas prácticamente deforestadas, lo que supone un notable empobrecimiento ecológico y paisajístico, así como la destrucción de un importante stock de carbono.

Este proceso es mucho menos acusado en el norte de España, con clima más lluvioso y un paisaje donde alternan prados, bosques, repoblaciones forestales y setos, con una mayor o menor dominancia de cada unidad, pero no tan extrema.

En gran parte la intensificación agraria está asociada a la baja productividad del cultivo de cereal en secano en clima mediterráneo. De hecho, solo bajo ciertas condiciones concretas la explotación es rentable, pudiendo fácilmente resultar deficitaria. Como consecuencia, la supervivencia del agricultor de secano pasa por amplios terrenos y con una explotación y mecanización lo más fácil posible. En este escenario, los setos suponen por una parte una pérdida de superficie agraria y por otra una molestia al tránsito de tractores y cosechadoras.

Pero el problema es más profundo, ya que la concentración parcelaria, fomentada desde las administraciones públicas, ha supuesto en muchos lugares la destrucción de setos y ribazos entre cultivos o prados, dando lugar a parcelas más amplias, optimizadas desde el punto de vista productivo, pero a costa de una notable pérdida de biodiversidad. Aunque en la actualidad estas actuaciones se someten a evaluación ambiental no fue así durante años; además, concentrar parcelas para favorecer la explotación es incompatible con mantener setos en ellas que las fragmentan.

Las ventajas ecológicas y paisajísticas de los setos son innumerables. Suponen un refugio para la vegetación natural, y para las especies de flora y fauna, que en ocasiones han sido erradicadas en enormes extensiones de terreno. Además, permiten la proliferación de orlas arbustivas, a menudo espinales, que aportan alimento y refugio a la fauna. En estas zonas pueden pervivir insectos y vertebrados útiles para el control de plagas agrícolas. Desde el punto de vista paisajístico, se produce un cambio visual drástico, ya que el paisaje aparenta ser arbolado, aunque sea un mosaico de cultivos y setos, como ocurre por ejemplo en Inglaterra, país que ha cuidado mucho sus setos.

Pero además de estas ventajas ecológicas, algunas con incidencia muy directa en el uso agrícola como el control de plagas, hay otras influencias beneficiosas para la agricultura como la fijación de carbono en el suelo, el bombeo vertical de agua y nutrientes del suelo, la protección contra el viento, reduciendo su incidencia y sus daños mecánicos y por desecación, o el sombreado, muy beneficioso en verano, o el incremento de la humedad en el entorno de los setos.

Todas estas razones deberían llevar a su recuperación, plantando hileras de setos entre cultivos, pastos y prados (Figura 53), empezando por todas las venas de agua naturales, y aprovechando ribazos o desniveles de menor valor agrícola. Recientemente se ha publicado una guía que aborda este tema (Rey et al. 2016).

Figura 53 Plantación de setos e islotes forestales en un paisaje agrícola

Fuente: Rey et al. (2016)

Como en casos anteriores, la financiación de estos setos se apoya en los PES, pudiendo financiar las infraestructuras de transporte el secuestro de carbono asociado a estos setos y buscar otras vías de financiación complementarias para fomentar la mejora de la biodiversidad y el paisaje.

Medidas de gestión forestal

Los bosques europeos son un ejemplo de recuperación después de siglos de degradación, con un incremento de superficie forestal y volúmenes de madera (EEA 2008), aunque Nabuurus et al. (2013) detectan signos tempranos de saturación. En España los bosques crecen anualmente 20 911 786 t de materia seca, y solo el 25,5% se extrae; teniendo solo en cuenta las principales especies arbóreas, los bosques españoles fijan anualmente 75 143 536 t CO_2, prácticamente la cuarta parte de las emisiones de GEI del país (Montero et al. 2005).

La gestión forestal, y los tratamientos selvícolas y culturales aplicados a las masas, tienen una repercusión directa en el stock de carbono y en el potencial de secuestro. En España, y en general en todos los países desarrollados, el objetivo prioritario en la gestión de las masas forestales es su preservación y continuidad, no existiendo riesgos apreciables de deforestación, al existir una legislación y una larga tradición forestal que lo evita.

Sin embargo, dentro de esa conservación y mejora de la masa, hay distintas actuaciones que influyen positiva o negativamente en el stock de carbono y en la capacidad de secuestro (Tabla 33). El hecho de que influyan negativamente no quiere decir que deban ser evitadas, ya que pueden tener otro tipo de repercusiones que las hagan recomendables.

Tabla 33 Medidas de gestión forestal con influencia en la mitigación del cambio climático

Medida	Influencia en el stock de carbono	Influencia en el secuestro de carbono	Influencia en otros factores
Cambio del turno de corta	En general mayor stock con turnos largos	Turnos largos reducen el crecimiento medio de la masa	Influencia en el tipo de madera obtenida
Cambio del turno de claras o podas	En general, menor stock a mayor frecuencia de cortas	Dependerá del crecimiento inducido	Influencia en el tipo de madera y en el crecimiento de la masa
Intensidad de cortas y claras	En general, menor stock a mayor intensidad de cortas	Dependerá del crecimiento inducido. En general reducción	Influencia en el crecimiento de la masa y su edad media
Cambio de densidad de la masa	En general mayor stock con densidad alta, aunque puede ser pies finos de escaso volumen	Mayor competencia con densidad alta: crecimiento en altura pero menor en diámetro	Influencia en el riesgo de incendios, y en la regeneración de la masa
Desbroce de matorral, fajas y cortafuegos	Pérdida de stock	Pérdida de vegetación con capacidad de secuestro	Reducción del riesgo de incendio y de la pérdida de stock y capacidad de secuestro
Retirada del ganado de zonas forestales	Aumento del stock a medio y largo plazo	Mejora de la regeneración y crecimiento del matorral	Mejor regeneración, mayor riesgo de incendio
Uso cinegético	Mayor presión sobre la vegetación sin uso cinegético	Mayor presión sobre la vegetación sin uso cinegético	Influencia positiva o negativa en la comunidad animal
Escamonda (poda de ramas muertas)	Pérdida de stock	Sin influencia (ramas muertas)	Reducción del riesgo de incendios
Poda de ramas vivas	Pérdida de stock	Pérdida de crecimiento en ramas bajas, pero mejora apical	Menor riesgo de incendios, mejor crecimiento apical
Plantaciones y siembras	Aumento del stock, sobre todo a medio y largo plazo	Aumento del secuestro, sobre todo a medio plazo	Apoyo a la regeneración, aumento de la diversidad, aumento de la densidad
Erradicación de especies invasoras	Pérdida de stock, al menos a corto y medio plazo	Pérdida de secuestro de las invasoras pero reducción de competencia con espontáneas	Evita cambios en el ecosistema por la invasión biológica
Eliminación de residuos: quema	Pérdida de stock	Sin influencia (residuo muerto)	Contribución al cambio climático por emisión de CO_2
Eliminación de residuos: trituración	Incorporación del stock al suelo con cierta pérdida	Sin influencia (residuo muerto)	Mejora de la fertilidad de los suelos
Fertilización	Aumento del stock a medio y largo plazo	Mayor crecimiento y fijación de carbono en plantaciones	Emisión de N_2O del fertilizante y CO_2 en su fabricación
Riego	Aumento del stock a medio y largo plazo	Mayor crecimiento y fijación de carbono, mayor garantía de arraigo en plantaciones	Impactos por consumo de agua (ecosistemas, biodiversidad...)
Control de plagas y enfermedades	Mayor garantía de mantenimiento del stock	Crecimiento menor con ataque de plagas o enfermedades	Reducción de mortandad o de la pérdida de vigor

Fuente: Elaboración propia

5.4.2.2. Secuestro de carbono mediante fijación en el suelo

El uso agrícola de los terrenos, en especial el laboreo, lleva a una progresiva pérdida de carbono orgánico del suelo (SOC), que alcanza hasta dos tercios de las reservas originales (Houghton & Skole 1990, Rasmussen & Collins 1991, Kinsella

1995, Smith et al. 1996, Loveland & Webb 2003, Lal 2004). Por el contrario, la reducción del laboreo y el mantenimiento de los residuos de cultivo en el suelo favorecen el incremento del SOC. Estas técnicas se conocen como agricultura de conservación o laboreo de conservación, y comprenden principalmente:

- No-laboreo (NT, *no-tillage*), eliminación completa del laboreo de los terrenos sometidos a un laboreo convencional (CT, *conventional tillage*).
- Laboreo reducido (RT, *reduced-tillage*), eliminación de alguna de la pasadas de laboreo aplicadas a los campos de cultivo con CT, pero no todas como en NT.
- Mantenimiento de los residuos vegetales de cosecha sobre el suelo, sin recogerlos, como por ejemplo la paja de cereal.

Los primeros estudios sobre el laboreo de conservación aportaron un resultados entusiastas sobre las posibilidades de esta técnica para el secuestro de carbono (Powlson et al. 2011), principalmente porque se centraron en la capa superior del suelo. Los estudios recientes (Baker et al. 2007, Powlson et al. 2011, Dikgwatlhe et al. 2014, Xue et al. 2015, Wiesmeier et al. 2015, Cheesman et al. 2016) son más cautos, y analizan todo el perfil del suelo.

El NT da lugar a un incremento de SOC en la capa superior del suelo y un gradiente vertical, pero por debajo de la profundidad de laboreo la concentración de SCO es mayor con el CT. Esto se debe a que el CT entierra los restos vegetales que haya sobre el suelo, todo el residuo o la parte que haya quedado tras retirarlos, lo que favorece su degradación, y una mayor concentración de SOC en profundidad. En consecuencia, el NT produce una gradación vertical del SOC, más natural, con máximos en superficie y una reducción con la profundidad, mientras el CT produce una concentración más homogénea en toda la profundidad de laboreo.

De forma global, comparando ambos escenarios, la cantidad total de SOC parece ser ligeramente superior en el NT frente al CT (Lal 1999, Eve et al. 2002, Kimble et al. 2002, Arrouays et al. 2002, Baritz et al. 2004), aunque en ocasiones no se han encontrado diferencias (Carter 2005, Luo et al. 2010).

La revisión de Angers & Eriksen-Hamel (2008) aportan un valor medio de secuestro de SOC con NT de 4.9 t ha^{-1} a lo largo de 16 años. En España Álvaro-Fuentes & Cantero-Martínez (2010) da un valor de 0,226 t ha^{-1} $año^{-1}$ y Álvaro-Fuentes et al. (2014) de 5,7 t ha^{-1} en 20 años (que equivale a una media de 0,285 t ha^{-1} $año^{-1}$).

El tasa de secuestro de SOC no es linear, con un fuerte crecimiento hasta los 10-11 años, sobre todo en los 5 primeros, y una estabilización hasta la saturación alrededor de los 20 años (Watson el al. 2000, West & Post 2002, Freibauer et al. 2004, Bing et al. 2006, Álvaro-Fuentes et al. 2014). Aunque la cantidad de SOC se incrementa con la incorporación de residuos de cultivo, la existencia de secuestro de carbono depende del destino alternativos de los residuos (Powlson et al. 2011). Si se logra un incremento

sostenido en el tiempo del contenido medio del SOC del suelo sí puede hablarse de un secuestro, ya que es una fijación a medio o largo plazo, más duradera que la vida útil de los residuos vegetales empleados de otra forma.

Un riesgo del NT es el incremento en las emisiones de N_2O debidas a la descomposición de la materia orgánica (Mackenzie et al. 1998, Smith et al. 2001, Freibauer et al. 2004, Powlson et al. 2011), un GEI trescientas veces más potente que el CO_2. Esta emisión es solo significativa en suelos mal aireados en climas húmedos (Rochette 2008), por lo que no es un problema en la inmensa mayoría de España, con un clima mediterráneo poco lluvioso, aunque podría ser un problema en las regiones atlánticas, mucho más lluviosas y en ocasiones con tendencia al encharcamiento.

En ocasiones se plantea como forma de mejorar la fijación de SOC el empleo de abonos nitrogenados (N), lo que a su vez implica mayor riesgo de liberación de N_2O. Sin embargo, los estudios desarrollados en España no detectan relación entre la fertilización con N y la fijación de SOC (López-Bellido et al. 2010, Melero et al. 2012), por lo que no tiene sentido incrementar su aporte en el NT, al ser inútil, costoso y potencialmente negativo por liberación de N_2O.

Una ventaja del NT frente al CT es el menor consumo de combustible por un menor uso de maquinaria agrícola, reduciéndose las emisiones desde a 53 a 29 kg C ha^{-1} $año^{-1}$ (Kern & Johnson 1993).

En regiones semiáridas el NT además puede favorecer una mejor conservación de la humedad en el suelo (Larney & Lindwall 1994, Rieger et al. 2008). García (2006) considera para Castilla y León, en el centro de España, con precipitaciones escasas e irregulares, que el laboreo incrementa los costes y facilita la evaporación, pudiendo reducir la producción.

La reducción de rendimiento en los cultivos de cereal en secano en España con NT es escasa, probablemente compensada por lo menores costes operativos (menor uso de maquinaria), haciendo que sea un sistema más eficiente que el CT (Lacasta & Meco 2004, Brown et al. 2011, Lacasta 2014).

En climas mediterráneos con sequía estival, la producción de cereal depende más de la precipitación que del laboreo (López-Fando & Almond 1995). Es necesario, en cualquier caso, considerar la pérdida de ingresos para los propietarios derivada de dejar de vender la paja, al dejarla en el suelo.

En los suelos agrícolas bajo clima mediterráneo existe un déficit de SOC (Moyano et al. 1986, Romanyà et al. 2007). Una situación adecuada podría ser un contenido de materia orgánica del suelo (SOM) del 5%, valor que se alcanza en suelos bien conservados, frente a valores normalmente inferiores a un 2% e incluso un 1%.

Una tasa conservadora de secuestro de carbono en suelos agrícolas sería 0,226 t ha^{-1} $año^{-1}$ (Álvaro-Fuentes & Cantero-Martínez 2010) durante 20 años, hasta la

estabilización. Eso supondría que se pueden fijar 4,52 t ha^{-1}, valor muy inferior a la tasa de saturación si se parte de valores del orden de un 2% de SOM. A este valor se pueden sumar 0,48 t C ha^{-1} también en un periodo de 20 años (0,024 t ha^{-1} $año^{-1}$) derivados del menor consumo de combustible, sumando un total de 5 t C ha^{-1} en 20 años.

En conclusión, la agricultura de conservación es una medida de compensación de emisiones de GEI, con una capacidad potencial de secuestro de 5 t C ha^{-1} durante 20 años, reduciéndose a partir de ese momento, pero con grandes ventajas ecológicas.

Podría aplicarse como compensación de las emisiones generadas por las infraestructuras de transporte, apoyándose su financiación, si bien los costes medios que supone derivados de la baja tasa de secuestro (véase Anexo 3) hace que no puedan financiarse únicamente con impuestos a los combustibles, siendo precisas ayudas de otro tipo, como las ayudas agroambientales de la Política Agrícola Común (PAC).

5.4.2.3. El sector LULUCF como sumidero

Los inventarios de emisiones de GEI realizados de acuerdo a la Convención Marco de Naciones sobre Cambio Climático se estructuran en grandes sectores, de una forma normalizada, para permitir la obtención de resultados globales y su comparación.

Todos los sectores incluidos en los inventarios son contribuidores netos a las emisiones de GEI salvo las actividades de uso de la tierra, cambios de uso del suelo y silvicultura, habitualmente conocido por sus siglas en inglés, LULUCF (*Land Use, Land Use Change and Forestry*). El sector LULUCF es el único considerado un sumidero neto, debido a que su balance entre el almacenamiento de carbono y la emisión de carbono es positivo (EEA 2014b).

En el año 2014 el sector LULUCF en España dio lugar a una emisión de GEI de 3 014 kt CO_2-eq y a una absorción de 34 515 kt CO_2-eq, lo que supone una balance neto de -31 501 kt CO_2-eq (MAPAMA 2016a), casi el 10% del total de emisiones.

Tradicionalmente este sector había sido excluido de la contabilidad de GEI, pero recientemente se ha propuesto su inclusión en el Marco sobre Clima y Energía para 2030 de la Unión Europea (EC 2015a), lo que podría animar a su empleo para la compensación de emisiones, ayudando a lograr las metas propuestas.

Las actividades de uso de la tierra, cambios de uso del suelo y silvicultura que dan como resultado la captura de carbono y su almacenamiento en el material vegetal se consideran sumideros. Hay muchas recomendaciones sobre la forma de mitigar el cambio climático a través de actividades LULUCF, específicamente para la situación española (Tabla 34).

Tabla 34 Medidas de mitigación del cambio climático mediante actividades LULUCF

Sector	Medidas
Forestal	Incremento de la cubierta forestal, restauración de la vegetación y reforestación [1, 2, 3, 4, 5] I+D sobre el papel del sector forestal en la captura de GEI [1] Medidas de prevención de incendios forestales [1, 4, 5] Gestión forestal sostenible y cambios en la gestión [1, 2, 3, 4] Protección de los bosques y evitar la deforestación [2, 3, 4] Producción de productos de madera de larga duración y uso de madera en la construcción [2, 5] Uso de la biomasa para reemplazar combustibles fósiles [2, 3, 4, 5] Asegurar el empleo de turnos óptimos y reducción de la intensidad de corta [4] Sacar el ganado fuera de los bosques [4] Utilizar diversas especies en la reforestación [4] Plantar y proteger áreas vulnerables [4] Prevención de plagas y enfermedades [5] Maximización de los productos forestales [4] Fertilización sostenible [5]
Agrícola	Aumentar la absorción de carbono en los sistemas agrícolas [1] Eficiencia energética [2, 3] Nuevas técnicas de cultivo [2] Producción de biocombustibles [2] Uso de biomasa para energía [3] Mejorar el manejo del ganado [2] Mejor uso de los fertilizantes [2] y mejor gestión del estiércol [3] Reducción de las pérdidas de carbono y N_2O en los suelos [3] Reducción de la quema de biomasa y del uso de cal [3] Incrementar el stock de C en productos agrícolas de larga duración o sistemas agroforestales [3] Manejo de humedales para cultivo de arroz [3]
Comunes	Fomentar la participación del sector privado [1] Promover el Fondo del Patrimonio Natural [1] Desarrollar un sistema de información sobre el C absorbido en el sector LULUCF [1]

Fuente: Elaboración propia. [1] MMA (2007); [2] MAGRAMA (2015c); [3] Trines (2006); [4] Vickers et al. (2012); [5] COSE (2008)

El uso de las actividades LULUCF como herramienta para la captura de carbono, tiene oportunidades interesantes, pero también algunos retos importantes (Tabla 35).

Tabla 35 Oportunidades y desafíos del secuestro de C mediante actividades LULUCF

Oportunidades	Mitigar el cambio climático por absorción y almacenamiento de CO_2 o deforestación evitada Los procesos se puede acelerar y traducir en créditos de C potencialmente comercializables [1] Unir el secuestro de C con el suministro de productos sostenibles y con mayores ingresos [2] Fortalecer el valor de los ecosistemas y ligarlo a los pagos por servicios ambiental (PES) Reducción de la pobreza (y desempleo) a través de PED, incluyendo mercados de C [3]
Desafíos	Credibilidad, necesitando estándares internacionales que den legitimidad a la compensación [4] No existe adicionalidad en la deforestación evitada en países desarrollados La maximización del secuestro de C tiene el riesgo de causar daños a la biodiversidad [5] Reducción de tierras agrícolas, con menor seguridad alimentaria e incremento de precios [6] Ocupación de las tierras menos productivas, donde se mantiene la mayoría de biodiversidad [7] La permanencia es esencial para la compensación ambiental.

Fuente: Elaboración propia. [1] Vickers et al. (2012); [2] Canadell & Raupach (2008); [3] Landell-Mills (2002), Pagiola et al. (2005), Grieg-Gran et al. (2005), Wunder (2008), Engel et al. (2008), Muradian et al. (2010), Milder et al. (2010); [4] GS (2013, 2014), VCS (2013, 2015); [5] Caparrós & Jacquemont (2003), Canadell & Raupach (2008), O'Connor (2008), Hall et al. (2012), Matthews et al. (2002), Xiong et al. (2014), Pielke et al. (2003); [6] Canadell & Raupach (2008), Ovando & Caparrós (2009), Jackson & Baker (2010); [7] Huston & Marland (2003)

Las actividades LULUCF pueden mitigar el cambio climático mediante absorción y almacenamiento de CO_2, evitando la deforestación o mediante prácticas agrícolas o forestales. Estos procesos se pueden acelerar mediante una adecuada gestión y conservación, o mediante la creación de nuevas zonas forestales o con vegetación. Si se puede demostrar que esos esfuerzos se traducen en el secuestro y almacenamiento de carbono, es posible crear unos "créditos de carbono" utilizables para la compensación ambiental, y potencialmente comercializables (Vickers et al. 2012). En consecuencia, si se gestionan bien las actividades LULUCF se puede traducir en un mecanismo de compensación e incluso en un mercado de carbono (véase 5.4.5).

Funk et al. (2014) demuestran que en Gisborne (Nueva Zelanda) la mayor parte de los terrenos podría obtener mayores ingresos de la "agricultura del carbono" que del pastoreo. Balderas et al. (2010) indican que en México los pagos en los primeros años y los costes de transacción bajos tienden a favorecer el desarrollo de proyectos de forestación en sistemas agroforestales.

La maximización del secuestro de carbono tiene el riesgo de causar daños a la biodiversidad, como reemplazar vegetación de interés ecológico por plantaciones de especies exóticas de crecimiento rápido, con mayor tasa de absorción de carbono (Caparrós & Jacquemont 2003, Canadell & Raupach 2008, O'Connor 2008, Hall et al. 2012), cambios en las poblaciones de aves (Matthews et al. 2002), efectos inesperados en el secuestro de carbono en los suelos (Xiong et al. 2014) o alteración del forzamiento radiativo de la atmósfera por cambio en uso del suelo (Pielke et al. 2003).

Con respecto a los impactos sociales, el secuestro de carbono mediante sumideros puede implicar una reducción de las tierras agrícolas, reduciéndose la seguridad alimentaria, incrementando los precios de los alimentos y forzando a la ocupación de tierras menos productivas, que retienen la mayoría de la biodiversidad (Huston & Marland 2003, Canadell & Raupach 2008, Ovando & Caparrós 2009, Jackson & Baker 2010), pero si se enfoca bien puede ligar el secuestro de carbono con el suministro de productos sostenibles generando ingresos adicionales que favorezcan el desarrollo rural (Canadell & Raupach 2008). Por ejemplo, los sistemas agroforestales no requieren un cambio total del uso del suelo (Flugge & Abadi 2006, Trines 2006, Balderas et al. 2010, Bryan et al. 2014).

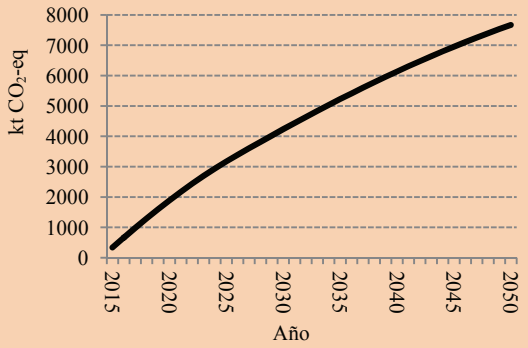
La permanencia es esencial para la compensación ambiental (véase 5.4.1). Cuando se usan sumideros vivos, si se destruye la vegetación se pierde la compensación. Marland et al. (2001) sugieren que cuando la reducción de las emisiones no es claramente permanente, como el secuestro en bosques, los créditos de compensación se pueden alquilar, en lugar de vender; es decir, se podría establecer un mecanismo de compensación temporal, en lugar de permanente.

Cuadro 4. Compensación de las emisiones de CO_2 en carreteras de Segovia

Este caso se desarrolla en el Anexo 3 y se está en fase de evaluación en la revista *Science of the Total Environment.* En él se analiza la viabilidad técnica y económica de compensar las emisiones de GEI generadas por una red de carreteras de Segovia a través del secuestro de carbono mediante actividades LULUCF, aunando objetivos climáticos, mejora de la biodiversidad y paisaje y desarrollo rural.

El ámbito espacial es la provincia de Segovia, considerando las redes de carreteras del Estado y Autonómica, que suponen el 47,53% de la longitud pero el 94,57% del tráfico. El periodo de estudio son 35 años, desde 2015 a 2050, para el cual se dispone de datos objetivos para la prognosis de emisiones, y a su se compensan las diferencias de crecimiento y secuestro de carbono de la vegetación con la edad.

Para calcular las emisiones de CO_2 se parte del tráfico actual, el incremento anual establecido por el Ministerio de Fomento y variación futura de emisiones de los vehículos. Considerando la longitud y tráfico de cada sección de carretera, se calculan las emisiones, que suman en total 7 669,69 kt CO_2-eq.



La gestión forestal en España es adecuada por lo que no existe adicionalidad en evitar la deforestación. Las medidas seleccionadas por tanto son agricultura de conservación, sistemas agroforestales, reforestación y plantación de setos. Para cada caso, y en función de las superficies posibles de aplicación en la provincia, se ha calculado el secuestro de carbono potencial en el periodo de referencia y el coste.

La agricultura de conservación se basa en el no laboreo y mantener la paja de cereal en el suelo. Se ha adoptando un tasa conservadora de secuestro de carbono (0,226 t ha^{-1} $año^{-1}$) durante 20 años, hasta la estabilización. Se podrían fijar 4,52 t ha^{-1}, a los que se suman 0,48 t C ha^{-1} por menor consumo de combustibles, dando un total de 5 t C ha^{-1} en 20 años. La superficie de cereal en secano es de 167 365 ha por lo que el secuestro de carbono entre 2015 y 2035 sería de 3 071 kt CO_2-eq.

Secuestro de SOC	Menor consumo de combustible	Total	Total en 20 años	Cereal en secano en la provincia	Máximo secuestro de carbono entre 2015 y 2035	
t C ha^{-1} $año^{-1}$	t C ha^{-1} $año^{-1}$	t C ha^{-1} $año^{-1}$	t C ha^{-1}	ha	kt C	kt CO_2
0,226	0,024	0,250	5,00	167 365	836,83	**3 071,15**

Las otras medidas propuestas se basan en la plantación de arbolado. Para los sistemas agroforestales se propone plantar dehesas de encina en cultivos de cereal y zonas de pastos, y de fresno en pastos más húmedos. La reforestación consiste en plantar masas de encina y pino en eriales improductivos. Los setos son plantaciones estrechas de arbolado entre parcelas de cultivo de cereal. Los resultados son:

	Especies	Densidad arbolado	CO_2 fijado por ha en 35 años	Uso del suelo en la provincia		CO_2 fijado en la provincia en 35 años
Sistemas agroforestales	*Quercus ilex*	25 pies/ha	5,89 t CO_2/ha	Cereal	167 365 ha	985,78 kt CO_2
		100 pies/ha	23,56 t CO_2/ha	Pastos	103 609 ha	2 441,02 kt CO_2
	Fraxinus angustifolia	100 pies/ha	78,24 t CO_2/ha	Pastos	25 902 ha	2 026,59 kt CO_2
						5 453,39 kt CO_2
Reforestación de eriales	*Quercus ilex*	222 pies/ha	52,30 t CO_2/ha	Eriales	54 783 ha	2 865,08 kt CO_2
	Pinus pinaster	222 pies/ha	69,40 t CO_2/ha			3 802,03 kt CO_2
						6 667,11 kt CO_2
Setos entre cultivos	*Quercus ilex*	266	62,66	2,07%		216,55 kt CO_2
	Quercus pyrenaica	89	11,91	cereal	3 456 ha	41,16 kt CO_2
	Fraxinus angustifolia	89	69,64	secano		240,68 kt CO_2
						498,39 kt CO_2

El coste por tonelada de CO_2 fijado depende de la eficacia de la medida, coste de ejecución, compensación por pérdida de productividad e incentivos para su adopción. Los costes son superiores a los precios medios de los mercados voluntarios de carbono, pero se trata de una compensación nacional, no es un país en desarrollo, y aúna el secuestro con una mejora de la biodiversidad y fomento del desarrollo rural.

Medida			Máximo secuestro	Eficiencia	Coste
Sistemas agroforestales	Cereal		985.78 kt CO_2	5.89 t CO_2/ha	311.73 €/t CO_2
	Pastos	*Quercus ilex*	2441.02 kt CO_2	23.56 t CO_2/ha	52.42 €/t CO_2
		Fraxinus angustifolia	2026.59 kt CO_2	78.24 t CO_2/ha	15.78 €/t CO_2
Reforestación			6667.11 kt CO_2	121.70 t CO_2/ha	50.33 €/t CO_2
Setos			498.39 kt CO_2	144.17 t CO_2/ha	140.84 €/t CO_2
No laboreo			3071.15 kt CO_2	18.35 t CO_2/ha	114.94 €/t CO_2
			15690.04 kt CO_2	**74.03 t CO_2/ha**	**78.14 €/t CO_2**

El secuestro potencial aplicando todas las medidas sería 15 690 kt CO_2, más del doble de las emisiones del tráfico. Se han considerado tres hipótesis, optimización de costes, uso equitativo de todas las medidas y combinación más costosa, obteniéndose un presupuesto de compensación de entre 315.85 y 892.19 millones de €.

Como posible vía de financiación se propone un impuesto sobre los carburantes. Considerando el consumo en España de gasoil y gasolina y su emisión de CO_2, las emisiones totales en la zona equivalen a un consumo de 2 948,75 millones de litros de carburante. Dependiendo de los escenarios de compensación, el impacto sobre el precio del combustible sería de 0,11 a 0,30 € por litro (9 al 25% de su precio). Para reducir el impacto en el precio deberían incluirse vías adicionales de financiación.

La compensación de las emisiones de CO_2 generadas por el tráfico rodado a través de actividades LULUCF es posible en el centro de España y probablemente en muchas otras regiones y países. Su viabilidad depende de la disponibilidad de tierras y del tráfico, y sus costes del clima, que determinan el crecimiento de la vegetación, y del nivel de vida, que determina el coste de ejecución, compensación e incentivación.

El principal desafío es la financiación, que depende en gran medida de la voluntad política y la conciencia de los ciudadanos.

5.4.3. Captura y almacenamiento de carbono

Desde finales del siglo XX se han venido desarrollando métodos artificiales y tecnologías que permiten la captación de CO_2 atmosférico y su fijación en algún material o su almacenamiento, generalmente en capas geológicas profundas.

El secuestro mediante sumideros vivos y su almacenamiento como materia orgánica es más deseable que los métodos artificiales, al tener ventajas ecológicas y paisajísticas adicionales. Sin embargo tiene importantes limitaciones como medida principal de mitigación, por la necesidad de terrenos y la velocidad de crecimiento de la vegetación. Por ello, cada vez se presta más atención a métodos de secuestro artificial y almacenamiento de CO_2 como medida para reducir la concentración de GEI en la atmósfera (Figura 54).

Figura 54 Recreación de un sistema artificial de captura y almacenamiento de CO_2

Fuente: Institution of Mechanical Engineers (http://www.imeche.org)

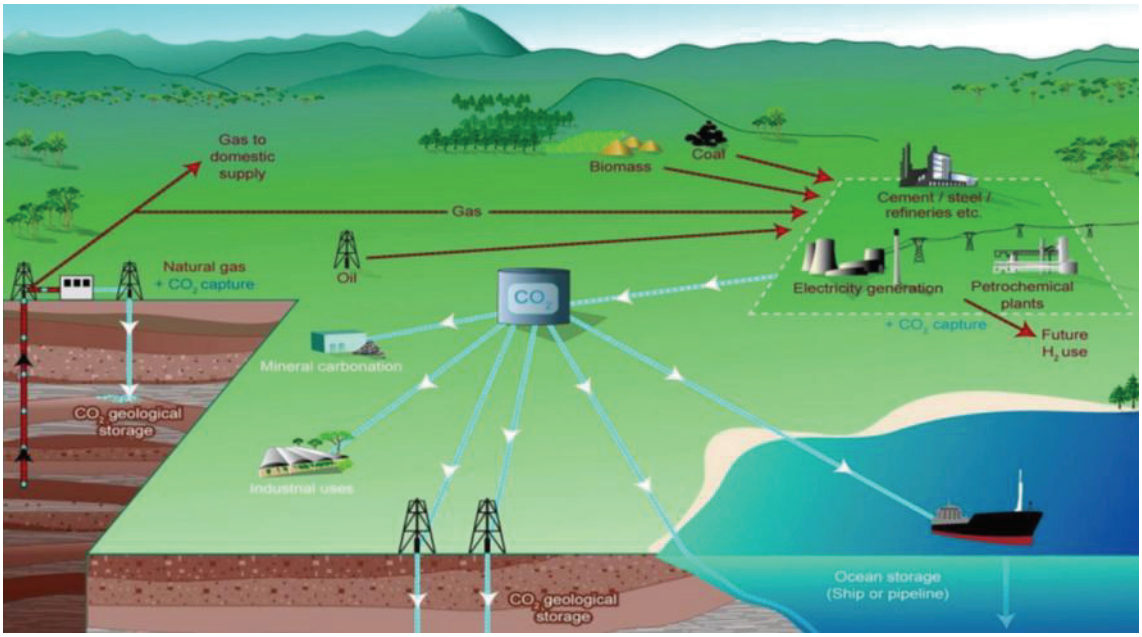
Para evitar un incremento de temperatura superior a 2ºC respecto a niveles pre-industriales, es preciso mantener una concentración atmosférica próxima a 450 ppm CO_2-eq en 2100, lo que implica escenarios con unas emisiones de GEI en 2050 un 40-70% menores a las de 2010 y niveles de emisión próximos a cero $GtCO_2eq$ en 2100, asociados a rápidas mejoras en la eficiencia energética, mayor suministro de renovables y nuclear, y captura y almacenamiento (CAC) de CO_2 (Edenhofer et al. 2014).

El IPCC ha editado un documento sobre CAC (Metz et al. 2005), concluyendo que presenta un potencial considerable y que el coste de mitigación del cambio climático podrían reducirse. Dooley (2013) señala que la demanda para almacenamiento geológico de CO_2 es bastante pequeña en comparación con la capacidad de la tierra, no siendo un impedimento. El CO_2 captado puede gestionarse de varias formas (Figura 55):

- **Fijación en materiales**, por ejemplo de construcción. Existen experiencias con materiales y cementos capaces de fijar CO_2, pero con un potencial limitado, no siendo una alternativa generalizada de reducción de la concentración de CO_2.
- **Transformación en otros productos**. Existen estudios sobre transformación del CO_2 en gas de síntesis, proceso viable pero poco eficiente energéticamente, generando más carbono del que elimina. Quizá el empleo de energía solar en el proceso pueda abrir nuevas expectativas.
- **Almacenamiento geológico profundo**. Técnica discutida por su baja eficiencia en la jerarquía de mitigación, al no reducirse las emisiones de CO_2 sino que se "esconden". También tiene potenciales riesgos sísmicos. Pese a ello es la única

alternativa realista en la actualidad de almacenamiento de CO_2, por lo que se contempla en muchos escenarios de mitigación (Edenhofer et al. 2014).

Figura 55 Posibles sistemas de captura y almacenamiento de CO_2



Fuente: IPCC (http://www.ipcc.ch)

La importancia futura de la CAC para mitigar el cambio climático dependerá de los incentivos financieros que se faciliten para su puesta en práctica y de si se pueden gestionar adecuadamente los riesgos que presenta el almacenamiento. En este último sentido en España saltaron las alarmas a raíz del proyecto Castor, de almacenamiento geológico profundo de gas en el mar Mediterráneo, cuya explotación indujo temblores en la zona, afectando al litoral levantino, y obligando a paralizar su funcionamiento, pese a la elevada inversión. Por ello, cualquier alternativa de almacenamiento profundo debe llevar aparejados estudios geológicos y sísmicos detallados.

5.4.4. Evitar la generación de emisiones ex situ

5.4.4.1. Evitar la generación de emisiones en otros sectores

Es posible evitar la generación de emisiones en otros sectores, mediante proyectos de eficiencia energética o sustitución de fuentes de energía que ayuden a reducir la generación de emisiones. Es el caso de los Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) o las iniciativas de Aplicación Conjunta (AC) establecidos por el Protocolo de Kioto. Estos mecanismos no son aplicables al transporte al ser un sector difuso, pero es un tipo de compensación que podría aplicarse de forma voluntaria si existe adicionalidad. El mayor problema de estas alternativas es que en realidad actúan como una compensación

monetaria, con todos los problemas asociados a ella (Enríquez de Salamanca et al. 2014), siendo además la última opción de acuerdo con la jerarquía de la mitigación.

Siempre que sea posible es preferible optar por medidas de reducción de la concentración de CO_2 en la atmósfera a través de su secuestro, con una clara adicionalidad, y un uso más transparente de los fondos dedicados a la compensación.

5.4.4.2. Evitar la destrucción de sumideros ex situ (deforestación evitada)

Una medida habitual de compensación del cambio climático es la "deforestación evitada". Consiste en evitar la destrucción de un sumidero de carbono *ex situ,* es decir, no afectado por el proyecto, actuación o actividad por la cual se quiere compensar la contribución al cambio climático; al evitar esa destrucción se evita la pérdida del stock de carbono y de la capacidad de secuestro del sumidero, lo que se considera una medida positiva sobre el cambio climático, y por tanto una medida de compensación.

Es preciso considerar varios aspectos sobre la deforestación evitada: (i) Si se plantea como actuación en sí misma es una medida preventiva. (ii) Si se plantea como contraprestación a las emisiones de GEI de proyecto o actividad es una medida compensatoria, y debe cumplir los requisitos de adicionalidad y permanencia; (iii) En países desarrollados el marco legal garantiza la preservación de las masas forestales, por lo que no hay adicionalidad en evitar la deforestación. (iv) Solo puede hablarse de deforestación evitada cuando exista un riesgo cierto de destrucción de los bosques, y no exista un marco legal sólido y un estado con estructuras administrativas que permitan evitar dicha deforestación. (v) El riesgo de deforestación no es permanente; si el marco jurídico y administrativo de un país evoluciona hacia una efectiva protección de los bosques, la adicionalidad de la deforestación evitada desaparece.

Pueden aplicarse medidas de compensación de las emisiones de GEI mediante la financiación de proyectos de deforestación evitada en países en desarrollo, como los REDD+. Entre sus ventajas están la economía, con costes por t CO_2 muy inferiores a la revegetación en España, y la facilidad de aplicación, al existir empresas y organizaciones que facilitan este tipo de compensación. Un inconveniente es ser una compensación financiera, que da lugar a actuaciones *ex situ* y no en especie, pero al ser el problema la concentración de CO_2 en la atmósfera, es indiferente el lugar donde se produzca la reducción. Sin embargo, aplicar de forma sistemática estos mecanismos lleva a una situación poco deseable donde los países ricos compran contaminación y los pobres venden compensación. Si compensar emisiones de GEI en España es caro, es un aliciente para la mitigación, y no debería ser un acicate para una compensación barata.

Quizá sea una solución necesaria de forma transitoria, o complementaria, pero no parece que toda la compensación de las emisiones del sector del transporte pueda recaer en proyectos de deforestación evitada, siendo precisos esfuerzos locales y nacionales.

5.4.5. Mecanismos para la aplicación de la compensación

Existen diversos mecanismos para aplicar las medidas de compensación ambiental. De forma general, se puede establecer el siguiente esquema de formas de ejecución de la compensación (Enríquez de Salamanca et al. 2014, Tabla 36):

Tabla 36 Formas de ejecución de las compensaciones ambientales

Compensación no financiera	**Realizada por el promotor.** El promotor es responsable legal de la compensación, y la asume de forma directa, o mediante contratos de ejecución con terceros, bajo su responsabilidad.		
	Cedida a terceros. El promotor encomienda la compensación a un tercero	**Traspaso de responsabilidad legal.** El promotor, mediante un acuerdo y un pago, traspasa la responsabilidad legal de ejecutar la compensación a un tercero.	**Mercados de carbono regulados.** El promotor compra créditos de carbono en mercados regulados. Aplicado a la compensación de emisiones de GEI.
			Bancos de mitigación. El promotor compra créditos de mitigación a un banco, quien asume la responsabilidad de ejecutar la compensación. Aplicado a biodiversidad.
			Acuerdos con terceros autorizados. El promotor encarga la compensación a un tercero autorizado que pasa a adquirir la responsabilidad legal de la compensación.
			Acuerdos con autoridades ambientales. El promotor financia la compensación que es realizada por las autoridades ambientales.
		Sin traspaso de responsabilidad legal. El promotor encarga la ejecución de las medidas a ONG o fundaciones en general, sin traspaso de responsabilidad legal.	**Acuerdos con entidades de custodia del territorio u ONG.** Se les encomienda la ejecución de las medidas, pero el promotor mantiene la responsabilidad
			Mercados de carbono voluntarios. El promotor compra créditos de carbono en mercados voluntarios. Aplicado a GEI.
Compensación financiera	**Compensación directa imposible.** Se recurre a la compensación financiera como última alternativa. Es una posibilidad contemplada en muchos países, y para ello debe estar establecido un mecanismo legal		
	Compensación financiera como forma legalmente establecida. El promotor paga las cantidades establecidas en concepto de compensación a un fondo de las Administraciones públicas, quienes se ocupan de emplear los fondos en la restauración y mejora del medio ambiente.		
	Compensación directa o financiera a criterio de promotor. Se puede optar por ejecutar la compensación, o pagar a un fondo público, que se ocupará de realizarla.		
	Compensación financiera además de la directa. Se exige un pago para cubrir incertidumbres en la consecución de los objetivos de calidad ecológica buscados con la compensación.		

Fuente: Elaboración propia

5.4.5.1. Compensación directa por el promotor

La primera solución para llevar a cabo una compensación ambiental, sea sobre la biodiversidad o por contribución al cambio climático, es su ejecución de forma directa por el promotor o responsable de la infraestructura de transporte. El promotor podrá

ejecutar de forma directa la compensación, o mediante una empresa contratada para la ejecución concreta de algunas actuaciones, pero que no se considera una ejecución mediante terceros ya que es una mera contrata. Una de las principales limitaciones que presenta es la dificultad para adquirir los terrenos necesarios, por la restrictiva interpretación que muchas Administraciones públicas hacen de las facultades de adquisición forzosa, de la expropiación (Enríquez de Salamanca et al. 2014).

Una vez ejecutadas las medidas, como puede ser la plantación de sumideros, es poco deseable que el promotor de una infraestructura se ocupe de su conservación y gestión, ya que a menudo esto no está entre sus objetivos. Por ello, es preferible que se opte por la cesión a un tercero, con la adecuada dotación financiera, y con traspaso de la responsabilidad legal. Las opciones generalmente aplicadas en el ámbito internacional son el traspaso a una administración pública ambiental, en España preferiblemente a los órganos ambientales de las Comunidades Autónomas, o su cesión a organizaciones no gubernamentales con fines conservacionistas.

5.4.5.2. Mecanismos de mercado (MBI)

Desde finales de la década de 1980 las agencias ambientales, gobiernos y organizaciones han adoptado en la gestión ambiental los mecanismos de mercado, o *Market Based Instrument* (MBI), que comprenden entre otros los mercados de carbono, bancos de hábitats, compensación de la biodiversidad o Pago por Servicios Ambientales (PES). Se alega que son mecanismos flexible, rentables y capaces de movilizar recursos desde el sector privado (Pirard 2012, Gómez-Baggethun & Muradian 2015).

Estos mecanismos tienen defensores y detractores. Hay opiniones que consideran que el medio ambiente se mercantiliza, que la restauración ecológica esperada no está avalada por evidencias, y que la promesa de compensación puede incrementar la permisividad de los daños, a la biodiversidad principalmente (Robertson 2004, Walker et al. 2009, Maron et al. 2012, McAfee 2012) pero también unos menores esfuerzos por mitigar las emisiones de GEI. Otros autores destacan las limitaciones de las compensaciones sobre la biodiversidad, especialmente asociadas con la efectividad de la restauración ecológica (Quétier & Lavorel 2001, Morris et al. 2006, Palmer & Filoso 2009), lo que puede hacerse extensivo a la efectividad de las reforestaciones cuando se aúna carbono y biodiversidad. Algunos estudios se centran en la efectividad de los bancos de hábitats (Fox & Nino-Murcia 2005, Robertson & Hayden 2008, Robertson 2009). Gómez-Baggethun & Muradian (2015) indican que los MBI incluyen diferentes instrumentos económicos como mercados reales (mercado de carbono), mezclas entre instrumentos regulatorios y de comercio (compensaciones de biodiversidad) o instrumentos donde el componente comercial no está presente (PES). Vaissière & Levrel (2015) analizan los bancos de mitigación en Florida concluyendo que son una forma híbrida a medio camino entre el mercado y la jerarquía, porque el sistema se basa en reglas impuestas por agentes públicos. Boisvert (2015) indica que los discursos a

favor y en contra de los bancos de conservación, caricaturizados como herramientas de mercado o como licencias para matar especies amenazadas y destruir sus hábitats, tienden a ocultar sus verdaderas características.

Las críticas son especialmente virulentas hacia los bancos de conservación o de hábitats, instrumento surgido en un país de amplia tradición liberal como Estados Unidos Son menores respecto a los mercados de carbono, aunque sin duda la "deslocalización" entre emisión y compensación es motivo de polémica. Por último, los PES, pese a ser también un MBI, son mucho más ampliamente aceptados.

Mercados de carbono

Los mercados de carbono son mecanismos de compensación aplicados a la contribución al cambio climático en los cuales un comprador que desea compensar una cierta cantidad de emisiones de GEI compra a un vendedor unos créditos de carbono equivalentes a su emisión, y de los cuales existen garantías de ejecución y adicionalidad. Existen dos tipos de mercados de carbono, el mercado regulado, derivado del Protocolo de Kioto, y los mercados voluntarios.

Mercado regulado

El Protocolo de Kioto ofrece medios adicionales para alcanzar las metas establecidas a través de mecanismos basados en el mercado. Uno de estos mecanismos es el comercio de los derechos de emisión, o mercado de carbono, que la UE ha dado lugar al Programa de Comercio de Emisiones de la UE, el primer mercado mundial de carbono (EC 2015b). Las metas asumidas por los países se expresan en niveles de emisiones permitidos o cantidades atribuidas, divididas en unidades de la cantidad atribuida. El comercio de derechos de emisión permite que los países que tengan unidades de emisión de sobra vendan ese exceso a países que sobrepasan sus metas (UN 1998, 2016). Existen otros mecanismos flexibilidad del Protocolo de Kioto como el Mecanismo para un Desarrollo Limpio (MDL), el mecanismo de Aplicación Conjunta (AC) y el Fondo de adaptación. El mercado regulado y los mecanismos de flexibilidad son de aplicación a sectores industriales pero no a sectores difusos, como el transporte.

Mercado voluntario

El mercado voluntario se basa también en la oferta y demanda de unidades de compensación o créditos de carbono, pero no regulados por el Protocolo de Kioto ni ninguna otra norma. El comprador acude voluntariamente para compensar sus emisiones de GEI, y el vendedor es cualquier entidad que oferta créditos de carbono. Al no tener un soporte legal, un aspecto esencial en los mercados voluntario de carbono es su credibilidad, para lo cual se han desarrollado diversas normas y estándares como *The Gold Standard* o *Voluntary Carbon Standard* (GS 2013, 2014, VCS 2013, 2015), que

buscan aportar legitimidad a las unidades de compensación y evitar la doble contabilidad, es decir, que se pueda vender dos veces el mismo crédito.

En España algunas empresas están ofreciendo actualmente compensación a través de mercados voluntarios, con proyectos de reforestación, deforestación evitada o energías renovables por todo el mundo. La mayor parte de la compensación hecha a través de estos mercados viene de iniciativas privadas. Su ámbito de aplicación es limitado, y su oferta limitada, no estando pensados para grandes compensaciones.

La reducida actividad de estos mercados de carbono se debe en parte a la escasa consideración del cambio climático en la EIA (Enríquez de Salamanca et al. 2016). También en España se detectan problemas como una escasa planificación de la compensación, falta de precisión, dificultades para la adquisición de terrenos y la falta de consideración de los costes de compensación en la planificación (Carrasco et al. 2013), problemas que en parte se repiten en otros países como Reino Unido (Briggs et al. 2009). Además, desde 2008 la crisis económica ha frenado la inversión en obras civiles, la principal fuente de demanda de compensación ambiental, y de financiación.

Buena parte de la oferta de los mercados voluntarios de carbono se basa en proyectos de deforestación evitadas en países en desarrollo, generalmente a través de mecanismos REDD+, mecanismo desarrollado por las Partes en la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UN 1992), destinado a incentivar a los países en desarrollo a reducir las emisiones de carbono causadas por la deforestación y la degradación forestal (UN 2016). Sin embargo, como se ha señalado, no hay adicionalidad en este mecanismo de compensación en países desarrollados, donde existen sólidos marcos legales para la protección de los bosques. En estos países la adicionalidad implica un secuestro de carbono demostrable.

El único mercado aplicable al sector del transporte es sería el voluntario, pero en la actualidad la oferta en España es reducida, más enfocada a empresas privadas que desean compensar sus emisiones que a grandes redes de infraestructuras. Además, los proyectos están mayoritariamente ubicados en el extranjero, sobre todo en países en desarrollo, lo que hace complejo canalizar inversiones públicas fuera del país.

Pagos por Servicios Ambientales

Un instrumento de mercado (MBI) que puede aportar valor tanto a la biodiversidad como al secuestro de carbono, y facilitar con ello el desarrollo de compensaciones ambientales, con los Pagos por Servicios Ambientales (PES), cuyo objetivo es lograr un desarrollo sostenible mediante una mayor apreciación de los valores de los ecosistemas (Huberman 2008).

La consideración del secuestro de carbono es una forma de fortalecer el valor de los ecosistemas, por lo que existe un evidente vínculo entre mercados de carbono y PES. También ha sido ampliamente estudiada la relación entre PES, incluyendo en ellos

los mercados de carbono, y la reducción de la pobreza (Landell-Mills 2002, Pagiola et al. 2005, Grieg-Gran et al. 2005, Wunder 2008, Engel et al. 2008, Muradian et al. 2010, Milder et al. 2010). Aunque estos análisis se basan en países en desarrollo, son en general aplicables a la reducción del desempleo en España, una clara forma de pobreza.

Bancos de conservación

Los bancos de conservación nacen en Estados Unidos vinculados a la Ley de Agua Limpia de 1972 (GPO 2016), para compensar los daños en humedales. Están enfocados a la compensación ambiental de daños a la biodiversidad, a especies y hábitats. Los bancos de conservación, de mitigación o de hábitats son terrenos protegidos de forma permanente donde se actúa para lograr su restauración y mejora y se gestionan con objetivos conservacionistas. Su particularidad es que esas actuaciones de restauración y mejora se traducen en títulos o créditos de compensación, que pueden ser vendidos a promotores que necesitan compensar los impactos sobre hábitats o especies derivados de sus proyectos, funcionando como un mecanismo bancario (Enríquez de Salamanca 2014d).

La primera referencia a bancos de conservación en España aparece en el Plan Estratégico del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad 2011-2017 (BOE 2011b), pero fueron reconocidos legalmente a partir de la Ley 21/2013 de Evaluación Ambiental (BOE 2013). Se ha elaborado un borrador de reglamento para regular los bancos de conservación, dividiendo España en 14 regiones biogeográficas, de manera que los impactos deban compensarse en cada región; los promotores que requieran compensación deben recurrir al banco más próximo, incrementándose el precio de los créditos con la distancia. El Gobierno, los diferentes partidos políticos y las ONG ambientales no han llegado a un acuerdo, al argumentar las últimas que se mercantiliza la biodiversidad, y por ello este borrador no ha sido aún aprobado.

En España, además de las anteriores críticas, la oposición a los bancos de conservación tiene mucho que ver con los papeles del sector público y privado en la conservación de la naturaleza. La protección del medio ambiente ha sido siempre responsabilidad del Estado, y la participación privada se considera sospechosa de tener intereses espurios. Aunque no existe un reconocimiento legal de la conservación privada, la mayoría de tierras protegidas en España son paradójicamente privadas.

Probablemente también exista una depreciación del término “banco”, debido al comportamiento poco ejemplar de la banca tradicional durante la crisis. Los bancos han sido actores fundamentales de la burbuja inmobiliaria, y cuando estalló han requerido un rescate de 41 300 millones de euros, que difícilmente devolverán nunca al Estado. Pese a estas ayudas, los bancos son los principales propietarios de casas en España, y no dudan en desahuciar familias incapaces de pagar sus hipotecas.

Limitaciones al desarrollo de los bancos de conservación en España

Hay algunos aspectos que pueden afectar al desarrollo de los bancos de conservación en España.

- **Aspectos técnicos y funcionales.** Hay una falta de experiencia práctica. La experiencia acumulada en países como Estados Unidos no puede copiarse enteramente porque existen diferencias en los hábitats y especies a compensar, que solo puede resolverse por medio de la implantación y funcionamiento de bancos, que debería acompañarse de un seguimiento y retroalimentación.
- **Aspectos legales.** Vázquez (2014) señala que la regulación de los bancos de conservación se ha desarrollado en países anglosajones, con una realidad legal y social diferente de España, por lo que pueden tener desequilibrios en el encaje con un sistema legal latino. También es importante la diferente concepción entre España y países sajones como Estados Unidos sobre el papel del Estado y el sector privado en la conservación de la naturaleza.
- **Aspectos económicos.** Los bancos necesitan un mercado activo, con verdadera oferta y demanda, débitos y créditos. El tamaño del mercado y la tasa de transformación del territorio a consecuencia del desarrollo tienen una influencia positiva (van Teeffelen et al. 2014, Pirard 2012). Actualmente no hay oferta de créditos en España, pero tampoco de débitos, no hay demanda de compensación. Subsidiar los créditos es una opción, pero son mecanismos frágiles que dependen de la permanencia de los subsidios. La incertidumbre sobre la demanda aleja a posibles inversores, y puede llevar al colapso del mercado (Panayotou 1994). Otra limitación en el desarrollo de los bancos de conservación son las garantías financieras requeridas. También existe el riesgo de que se pierda el interés en los bancos una vez los créditos han sido vendidos (Vázquez 2014).
- **Aspectos ecológicos.** Un desafío para la banca de conservación en España es su variabilidad ecológica. El territorio se divide entre cuatro regiones biogeográficas (Alpina, Atlántica, Macaronésica y Mediterránea), y tienen la biodiversidad más rica de la UE, con más de 8 000 plantas vasculares, cerca de 1 500 endémicas, y aproximadamente la mitad de las 142 000 especies europeas de animales (BOE 2011). Cubrir toda esta diversidad de hábitats y especies requiere un gran número de bancos; si no fuera así, no podría afrontarse la especificidad que requiere la compensación, y el sistema sería ineficaz. De hecho, los requerimiento estrictos en cuanto a la similitud de los hábitats destruidos y restaurados puede inhibir la actividad de los bancos (van Teeffelen et al. 2014, Pirard 2012).
- **Aspectos administrativos.** Los procedimiento administrativos largos y costoso afectan a los mercados de créditos (van Teeffelen et al. 2014, Pirard 2012). También es importante la homogeneidad de procedimientos, lo que resulta particularmente importante en España, con diecisiete comunidades autónomas con

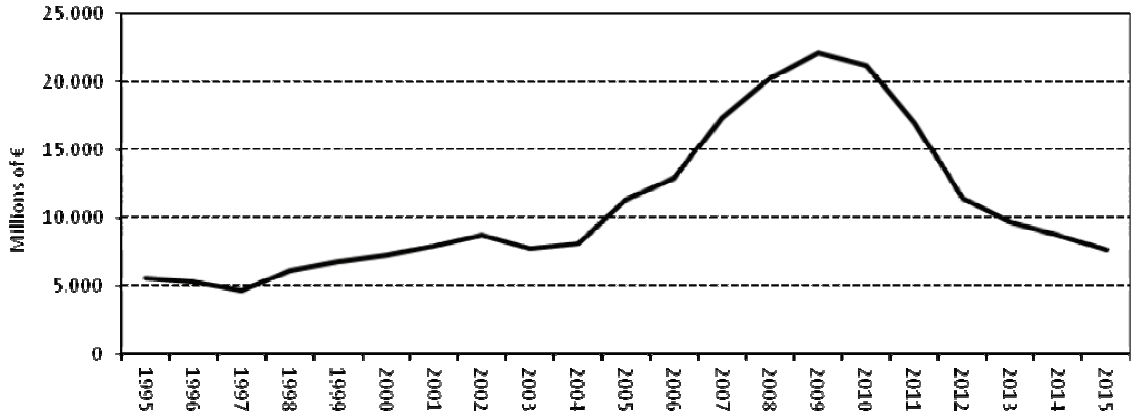
competencias en medio ambiente. Una cobertura homogénea de los hábitats y especies presentes en España, con condiciones homogéneas de compensación, requiere un mercado de compensación inter-regional o inter-autonómico, con una fluida cooperación entre administraciones, lo que no siempre es fácil.

Perspectivas de los bancos de conservación

Entre la década de 1990 y el principio de la crisis en 2008 la actividad inversora del Estado fue grande, especialmente en infraestructuras de transporte, tradicionales demandantes de compensación ambiental. En pocas décadas España pasó a estar interconectada por autovías, y a tener la segunda red ferroviaria de alta velocidad más larga del mundo. Pero incluso con esta coyuntura la aplicación de medidas compensatorias ha sido difícil, y menor de lo esperado en la EIA (Enríquez de Salamanca & Carrasco 2013).

En la actualidad la crisis económica aún afecta a España de forma significativa, y las inversiones en obras públicas son limitadas (Figura 56, MHAP 2016). Aunque parece haber una ligera y gradual recuperación económica, no se prevé alcanzar los niveles de inversión anteriores a la crisis en mucho tiempo. España no va a experimentar pronto niveles de desarrollo de infraestructuras como los experimentados, especialmente porque buena parte de las necesidades existentes ya han sido cubiertas.

Figura 56 Presupuestos del Estado en España destinados a infraestructuras de transporte (1995-2015)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de MHAP (2016)

Una baja inversión en obras públicas es un obstáculo para el desarrollo de los bancos de conservación por falta de demanda de compensación. El resto de compensaciones para la biodiversidad están prácticamente limitadas a impactos significativos en la Red Natura 2000, que solos no aportan suficiente demanda para desarrollar el sistema. El despegue de los bancos de conservación necesita una demanda de créditos, por lo que se deben identificar actividades que requieran compensación.

Posibilidades de integración de mercados de carbono y bancos de conservación

Aunque los bancos se conservación se incluyeron en la normativa española en 2013, la falta de inversión en obras públicas, ausencia de demanda de compensación, tendencia regresiva en la compensación ambiental y mala imagen de los mecanismos bancarios, todo ello unido a una gran variabilidad ecológica del país, hacen que la posibilidad de desarrollo de este mecanismo sea reducida. Esto afecta a la posibilidad de realizar compensaciones ambientales, ya que otras soluciones aplicadas en España han sido poco efectivas, en especial cuando requerían la adquisición o gestión de terrenos.

La compensación ambiental necesita un mercado activo para funcionar. Se podría lograr una demanda inicial ligando la compensación de la biodiversidad con los mercados de carbono. Los bancos de conservación en España pueden ser una oportunidad para combinar ambas compensaciones, biodiversidad y carbono. Permitir a los bancos de conservación actuar a la vez como mercados de carbono podría ser la clave para garantizar una actividad económica suficiente y unos ingresos mínimos que compensen la escasa demanda de compensación por biodiversidad. A la vez, esta unión aportaría sentido ecológico a los créditos de carbono. Unificar ambos mecanismo puede ser la clave de su éxito.

En diversos artículos se analizan las oportunidades de los mercados de carbono y biodiversidad (Berkessy & Wintle 2008, Díaz et al. 2009, Freedman et al. 2009, Midgley et al. 2010, Hall et al. 2012, Rittenhouse & Rissman 2012, Siikamäki & Newbold 2012, Thomas et al. 2013). Es especialmente destacable el interés prestado a este tema en Australia (Flugge & Abadi 2006, Harper et al. 2007, Dwyer et al. 2009, Fensham & Guymer 2009, Ngugi et al. 2011, Witta et al. 2011, Paul et al. 2013, Bryan et al. 2014, Renwick et al. 2014). Cada mecanismo tiene sus peculiaridades, pero existen posibilidades para el desarrollo y potenciación de ambos juntos (Tabla 37).

Las compensaciones por biodiversidad y los mercados de carbono se han desarrollado independientemente, aunque tienen mucho en común. Ambas son compensaciones ambientales, para hábitats y especies o para emisiones de GEI, y requieren una adecuada gestión del territorio y una protección o incremento de la vegetación. Una diferencia importante es que mientras que en las compensaciones por biodiversidad son muy selecticas en hábitats y especies, las compensaciones por emisión de GEI son poco selectivas, buscando solo maximizar la absorción de carbono o el stock almacenado. Sin embargo, esta diferencia no evita la integración.

Los bancos de conservación, que tienen actualmente reconocimiento legal en España, son adecuados para las compensaciones de biodiversidad y GEI, y su adaptación para cumplir los requerimientos de los estándares de carbono (como GS 2013, 2024 y VCS 2013, 2015) es fácil. Además, los bancos de conservación aportan garantías de permanencia, que no son evidentes en los mercados de carbono. Se puede obtener así un amplio y activo mercado fruto de la integración de la absorción de

carbono y la mejora de la biodiversidad en un mismo mecanismo, que pueda aportar compensación en ambos casos, lo que podría solucionar las limitaciones financieras de la compensación ambiental

Tabla 37 Particularidades de bancos de conservación y mercados de carbono y posibilidades unidos

Bancos de conservación	Mercados de carbono voluntarios	Posibilidades de ambos mecanismo unidos
Compensaciones ambientales para hábitats y especies	Compensaciones ambientales por emisiones de GEI	Integración de ambos objetivos de compensación ambiental
Créditos: hábitats o especies	Créditos: carbono	Doble contabilidad de créditos, por carbono y biodiversidad
Altamente selectivos en hábitats y especies	Poco selectivos: maximizar la absorción o stock de carbono	Sacrificar absorción potencial a cambio de mayor especificidad
Reconocimiento legal en España desde 2013	No tienen reconocimiento legal	Aprovechar el reconocimiento legal de los bancos para fortalecer el mecanismo
Sin estándares específicos, pero fáciles de adaptar	Tienen estándares específicos	Cumplimiento de los estándares de carbono en todos los casos
Aportar una sólida garantía de permanencia	No hay garantías sólidas de permanencia	Aprovechar las garantías de permanencia de los bancos
Los fondos provienen sobre todo de obra civil	Los fondos provienen sobre todo de empresas privadas	Integrar fuentes de financiación públicas y privadas para obtener un mayor soporte económico

Fuente: Elaboración propia

Un aspecto clave para una integración exitosa de bancos de conservación y mercados de carbono es permitir una doble contabilidad de créditos, por biodiversidad y por carbono (Berkessy & Wintle 2008), lo que aportaría un valor adicional al banco, reduciendo el riesgo de derivar en puras compensaciones de carbono.

En el sector forestal hay medidas de gestión que pueden favorecer el incremento en la absorción y stock de carbono, con ventajas ecológicas añadidas. Los terrenos forestales en España mantienen gran parte de la biodiversidad y proporcionan importantes servicios ambientales, pero en general tienen una baja productividad económica, aportando escasos rendimientos a sus propietarios, o incluso suponiendo una carga. Solo en el norte peninsular, en zonas con clima atlántico, la productividad es mayor. El clima en el resto del territorio no es favorable a la producción de madera, y los bosques producen escasos ingresos, salvo grandes fincas de caza y algunos escasos bosques productores.

La integración de montes públicos o privados dentro de bancos de conservación, para compensación de biodiversidad y carbono, podría atraer recursos financieros, ayudando a su conservación y haciendo que sean económicamente viables. Los municipios españoles dependen mucho financieramente de la edificación, sector que ha caído tras el estallido de la burbuja inmobiliaria; una adecuada gestión del patrimonio forestal podría suponer una nueva fuente de ingresos. Con respecto a los propietarios

particulares, la compensación de biodiversidad y carbono podría revalorizar sus propiedades y generar nuevos ingresos. Muchos montes podrían convertirse en bancos de conservación, aportando compensación para biodiversidad y GEI,

El sector agrícola tiene un enorme potencial para la compensación ambiental, tanto por biodiversidad como por cambio climático. Este sector está muy condicionado por los subsidios de la PAC, y sufre una falta de diversificación y fluctuaciones en los precios. La incorporación de la compensación de la biodiversidad y el cambio climático podría generar nuevos ingresos con un diferente origen, no dependientes del precio de los cultivos. Además de mejorar la rentabilidad, podría generar grandes cambios en el paisaje, por ejemplo por medio de plantaciones de setos o agroforestales.

Los suelos agrícolas sufren habitualmente una sobreexplotación y pérdida de materia orgánica. Las medidas de gestión como la agricultura de conservación, no laboreo e incorporación de restos de cosecha, puede ayudar a incrementar el stock de carbono de los suelos.

En España, sobre todo en el occidente peninsular, existe un sistema agrosilvopastoral tradicional, la dehesa, que combina una cubierta arbórea clara con cultivos o pastos, armonizando producción agroganadera con captura y almacenamiento de carbono. Hay enormes superficies agrícolas donde sería posible incorporar arbolado disperso, setos o bosquetes para secuestro de carbono, sin afectar a la producción o con escasas pérdidas, que se podrían compensar con la venta de créditos de carbono (véase 5.5.3). Esto implica revertir la actual tendencia a la intensificación agrícola, que da lugar a concentraciones parcelarias que conllevan la desaparición de setos entre parcelas y bosquetes entre otros efectos ecológicos (EFTEC et al. 2010).

Además, hay muchas zonas agrícolas que mantienen ricas comunidades de aves esteparias, cuya conservación es prioritaria. El establecimiento de bancos de conservación que incluyan cultivos productivos, barbechos, eriales, dehesas, setos entre parcelas y la reforestación de tierras agrícolas marginales tiene un enorme potencial como herramienta para diversificar la actividad económica en áreas rurales, atrayendo inversiones, mejorando la biodiversidad y capturando carbono.

Las ventajas de combinar la agricultura y la conservación de la biodiversidad se ha analizado ampliamente (p.e. OECD 2001, FAO 2008, Scherr & McNelly 2008, UNEP 2008, FAO 2010, UICN 2011, Leibel 2011, Pakeman 2011); de hecho, es actualmente un objetivo prioritario de la Política Agrícola Común de la UE (EC 2016). También hay varios documentos sobre integración de la biodiversidad y la silvicultura (p.e. Bawa & Seidler 1998, FAO 2003, Logan 2007, UICN 2010, Forestry Commission 2011, Kraus & Krumm 2013) que es una base de la gestión foresta en muchos países incluyendo España. Existen experiencias sobre la integración de la biodiversidad y las compensaciones de carbono (p.e. Rosa et al. 2004, Charchalac 2012); un esquema ampliamente utilizado son los proyectos REDD +, citados anteriormente. También hay

experiencia en integración de compensación de GEI y agricultura, por ejemplo en cultivos de café (Duque et al. 2013). En consecuencia, no hay duda sobre la conveniencia de integrar biodiversidad, producción forestal y agrícola y secuestro de carbono; sólo es necesaria una visión amplia e inclusiva de todos estos conceptos.

Las posibilidades de compensación de biodiversidad y carbono en los sectores forestal y agrícola son amplias y diversas. Por esta razón, las regulaciones de un mercado integrado de compensación ambiental deben ser flexibles, para acomodar todas estas posibilidades. La regulación de los bancos de mitigación en los Estados Unidos por ejemplo, se centra en áreas específicas dedicadas a la compensación y protección; el uso de este modelo dificultaría la integración de la producción y la compensación, como por ejemplo en sistemas agroforestales. La definición de áreas de compensación no debe necesariamente incluir pequeños sitios intensivos; en muchas áreas los bancos grandes, con una multiplicidad de usos, posibilidades de compensación y diversidad de ingresos, probablemente sean más eficaces. Un problema de los sistemas de compensación es la falta de demanda, por lo que su viabilidad debe buscarse a través de una amplia y diversa gama de fuentes de ingresos, incluyendo la biodiversidad y la compensación de carbono, pero también la producción agrícola, ganadera o forestal si no es incompatible.

La ventajas de un sistema global de compensación son grandes; ecológicas, creando y protegiendo hábitats y especies; sociales, creando empleo y derivando recursos financieros al medio rural; climáticas, reduciendo las concentraciones de GEI en la atmósfera; y políticas, ayudando a lograr los objetivos de emisiones en 2030, cuando se incorpore el sector LULUCF a la contabilidad de GEI.

Los bancos de conservación son una herramienta adecuada para la integración de las compensaciones de biodiversidad y carbono. Tienen reconocimiento legal y cumplen los requisitos de ambos tipos de compensación, con garantías de permanencia. Para que su integración tenga éxito es necesaria una regulación flexible, permitiendo diferentes modelos de bancos que integren producción, conservación y compensación.

5.5. Retos en la incorporación de la mitigación del cambio climático a la EIA

5.5.1. Mitigación del cambio climático en proyectos sometidos a EIA

La consideración del cambio climático en la EIA en España ha sido muy limitada, en especial en infraestructuras de transporte (Enríquez de Salamanca et al. 2016a). Pero si la consideración de la contribución ha sido escasa, la mitigación es prácticamente inexistente; de 1 713 DIA emitidas entre 1989 y finales de 2014 únicamente una, referida a un proyecto de extracción y transporte de gas natural, recoge una compensación equivalente a las emisiones previstas de CO_2 por medio de reforestación,

y en otros dos casos se plantea esta posibilidad a lo largo del procedimiento de EIA, pero no se llega a recoger como condición en la DIA. Por lo tanto, la mitigación del cambio climático en la EIA, tanto preventiva como compensatoria, se puede considerar prácticamente inexistente, siendo un gran reto su incorporación efectiva en el futuro.

Una adecuada incorporación de la mitigación y compensación de la contribución al cambio climático no solo es deseable para reducir la concentración de GEI en la atmósfera, sino que también puede influir de forma esencial en la toma de decisiones. Los costes de mitigación pueden ser tan importantes que hagan recomendable buscar alternativas con menores emisiones, dentro de un proceso de análisis multicriterio, ya que pueden existir razones de otra índole que justifiquen esas soluciones.

En una primera etapa, de mínimos, se deberían analizar todas las posibilidades de mitigación preventiva en la fase de diseño, y adoptar siempre que sean técnica y ambientalmente razonables las mejores soluciones posibles desde este punto de vista. También se debería considerar la mitigación correctiva de la vegetación afectada, y la compensación por los sumideros perdidos. Una segunda fase podría contemplar la compensación de las emisiones de GEI asociadas a la construcción, de manera que el proyecto tenga un balance cero de carbono.

La tercera fase, más ambiciosa, sería la mitigación durante la explotación, tanto con medidas preventivas para reducir las emisiones como por medio de la compensación de las emisiones, lo que conlleva un nivel de planificación e implicación política y administrativa superior para su financiación y puesta en marcha.

5.5.2. Mitigación del cambio climático en proyectos ya operativos

Un enorme reto en referencia al cambio climático es la mitigación de la contribución al cambio climático en infraestructuras de transporte ya construidas, y por tanto donde ya no es aplicable ningún mecanismo de evaluación ambiental.

Como se ha indicado, entre 1990 y 2008, cuando comenzó la crisis económica, se produjo una gran inversión en infraestructuras de transporte, dando como resultado una importante red de carreteras de alta capacidad y de líneas ferroviarias de alta velocidad. Como consecuencia, la mayor parte de las grandes infraestructuras lineales de transporte de España están ya construidas y operativas, salvo algunos tramos de la red de alta velocidad aún en construcción, pero que ya han pasado por EIA.

En estas redes existentes no son aplicables las consideraciones anteriores sobre consideración del cambio climático en la EIA, al estar ya en servicio, pero son el grueso de la contribución al cambio climático del sector de los transportes en España. Si no se actúa en ellas para mitigar la contribución al cambio climático es muy difícil alcanzar los objetivos de reducción comprometidos.

El objetivo inicial del Protocolo de Kioto para la UE era una reducción del GEI del 8% con respecto a 1990 en 2008-2012, distribuido entre los Estados Miembros. En ese reparto, España tenía autorizado un incremento máximo del 15% en sus emisiones. En 2008 se aprobó el paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020, con el objetivo de reducir al menos un 20% las emisiones de GEI en 2020, con respecto a los valores de 1990. España tiene el objetivo de reducir las emisiones en los sectores difusos, entre los que está el transporte, un 10% en 2020 con respecto al nivel de 2005, de acuerdo con la Decisión 406/2009/CE (EU 2009).

En España se ha producido entre 2007 y 2013 una reducción del 27% en las emisiones de GEI, e indicadores como el consumo de energía eléctrica o las emisiones de CO_2 asociadas a su producción son significativamente menores en la actualidad (IEA 2015). En la UE-15 las emisiones de GEI decrecieron 30 millones de tCO_2e entre 2011 y 2012, con una reducción del 4% en el transporte por carretera, especialmente en países que habían sufrido recesión como Italia, España o Grecia (EEA 2014c). Sin embargo, estos resultado tan favorables se deben a la recesión económica, y no a esfuerzos específicos de mitigación. Por ello, la incipiente aunque muy lenta recuperación económica previsiblemente revertirá esta situación. No puede confiarse en esta tendencia decreciente, que es coyuntural y no estructural, sobre todo el descontrolado sector del transporte, reacio a reducir su contribución al cambio climático. Es obligado, si se consideran los compromisos adquiridos por España en referencia al cambio climático, plantear una mitigación en las infraestructuras de transporte existente, posterior a la EIA.

Se plantean tres líneas posibles de actuación: (i) Mitigación preventiva en la explotación, por reducción y regulación del tráfico rodado o ferroviario; (ii) Mitigación preventiva en la operación mediante de cambios en la iluminación y el origen de la energía y optimización de la frecuencia y eficiencia del mantenimiento; (iii) Mitigación compensatoria, mediante secuestro de CO_2 en sumideros o evitando emisiones *ex situ*.

Entre estas medidas hay dos actuaciones especialmente importantes por su potencial frente al calentamiento global, la reducción del uso del vehículo privado como medio de transporte, desincentivando su uso y logrando un trasvase modal al ferrocarril, y la mitigación compensatoria por medio del secuestro de carbono.

La reducción de la movilidad se ha evaluado en Noruega, como se ha indicado, como herramienta para lograr sus metas de reducción de emisiones de GEI en 2020 (Singh et al. 2015), como única actuación o junto al incremento del vehículo eléctrico. Un ejemplo del potencial de trasvase modal al ferrocarril se recoge en el caso práctico sobre el ferrocarril de Soto del Real (Cuadro 3, Anexo 2). Ese trasvase modal puede ser intenso en las aglomeraciones urbanas, donde se concentran las mayores intensidades de tráfico y también las congestiones más intensas, por lo que un transporte público efectivo es una medida efectiva en cuanto a sus emisiones y atractiva para el usuario en cuanto a tiempos de transporte y costes.

Es preciso, por tanto, seguir invirtiendo en transporte público, tanto en la construcción de nuevos transportes como en la adaptación de las infraestructuras para su uso preferente, como es el caso de las plataformas reservadas o carriles bus-VAO. Esa inversión, no obstante, debe estar avalada por datos claros de captación de viajeros, y de beneficio en cuanto al balance global de emisiones, para evitar costosas infraestructuras infrautilizadas, como ha ocurrido a lo largo de toda la geografía española, y por parte de todo tipo de administraciones.

Con respecto a la segunda medida, es preciso asumir que es posible compensar las emisiones de GEI, si no de forma global al menos en parte. Este es el objetivo del caso práctico planteado sobre compensación de emisiones en la red de carreteras de la provincia de Segovia (Cuadro 4, Anexo 3). La compensación no es un concepto teórico, ni una utopía. Existe una posibilidad real de crear nuevos sumideros, tanto por medio de nueva vegetación como potenciando la fijación en el suelo, y además la aplicación de esa compensación tendría enormes ventajas ecológicas y paisajísticas añadidas. Es preciso un compromiso político, y financiación.

Sean cuales sean las medidas adoptadas, no puede considerarse la EIA el final del camino, un hito que, una vez superado, ya hace innecesaria la consideración de los problemas ambientales de las infraestructuras de transporte.

5.5.3. Responsabilidades y financiación de la mitigación

Para establecer la posible financiación de las medidas de mitigación, en especial de la mitigación compensatoria, se debe aplicar el principio de "quien contamina paga" (EFTEC et al. 2010), de manera que el responsable de sufragar los gastos de mitigación y compensación sea quien genera o induce la generación de emisiones de GEI.

Construcción de infraestructuras de transporte

En la fase de construcción de las infraestructuras de transporte la responsabilidad de las emisiones de GEI, y por tanto también de aplicar y financiar las medidas de mitigación y compensación necesarias, es del promotor. El proyecto de construcción de una infraestructura debería incluir un cálculo detallado de la huella de carbono, tanto por las labores de construcción como por la destrucción de sumideros, e incluir su compensación en el propio proyecto, como parte inherente del mismo, y por tanto financiada de manera análoga al resto de la infraestructura.

Explotación de carreteras

En la fase de explotación el gestor de la carretera es responsable de las emisiones asociadas a iluminación, limpieza o mantenimiento, pero la principal contribución proviene de los usuarios. El grueso de emisiones de GEI procede del tráfico rodado, compuesto por gran número de usuarios, cuya contribución varía según el uso que

hagan de la infraestructura, el tipo de vehículo, la eficiencia y la forma de conducción, que se traducen en mayor o menor consumo de carburante y emisión de GEI.

La forma más lógica de financiar la mitigación durante la explotación, excluido el mantenimiento y operación, es a través de impuestos a los carburantes, que además actúan como impuestos pigouvianos, incorporando las externalidades y desincentivando el consumo. Buñuel (2009) indica que para que el impuesto sobre hidrocarburos sea efectivo para disminuir el consumo de combustible se requiere que el aumento de precio que genere conduzca a un máximo histórico del precio real de la gasolina o el gasóleo. Liu & Cirilo (2016) analizan políticas para la reducción de emisiones de GEI del transporte privado en Washington DC; una tasa a los combustibles es la forma más efectiva de reducirlas en hogares con pocos coches y un impuesto a la compra de vehículos reduce la cantidad de vehículos en hogares donde existen varios.

La emisión de CO_2 en carburantes es 2,660 kg CO_2/l en el gasoil y 2,325 kg CO_2/l en la gasolina (EPA 2005). La ventas de carburantes para automoción en España en 2015 (CORES 2015) fue de 21 772 kt de gasoil (82,4%) y 4 646 kt de gasolina (17,6%); con esas proporciones la media de emisión es 2,601 kg CO_2/l carburante. Estos datos permiten relacionar consumo, emisiones e impuestos. Estos impuestos tiene una fuerte carga política, ya que generan rechazo social. Además, la financiación de muchas medidas de compensación, en especial si están diseñadas con criterios sociales y ecológicos, no puede recaer únicamente sobre los carburantes, ya que supondría un excesivo encarecimiento, de 0,10 a 0,30 €/litro según medidas adoptadas (véase Cuadro 4 y Anexo 3).

Existen también dudas sobre la responsabilidad final de las emisiones; Bastianoni et al. (2004) plantean la situación de un país cruzado por camiones que "paga" por las emisiones de GEI asociada a bienes que ni produce ni usa.

Explotación de ferrocarriles

En los ferrocarriles la situación es diferente y más compleja. Los trenes tienen un consumo energético prácticamente fijo para un determinado trayecto, a menudo elevado pero compartidos por muchos usuarios, entre los que se distribuye ese consumo, haciendo que sea muy eficiente. Sin embargo, los trenes tienen horarios fijos, haciendo su recorrido con independencia de la cantidad de usuarios que existan, por lo que hay trayectos y horas con una gran demanda, y otros deficitarios. Eso se traduce en que a pesar de la elevada eficiencia media del ferrocarril presenta una enorme disparidad, con trayectos de una rentabilidad inmensa (como los cercanías en hora punta) y otros con una eficiencia muy baja, incluso peor que el vehículo privado (líneas deficitarias).

Un análisis individualizado de cada línea y franja horaria permitiría establecer la eficiencia en carbono por pasajero, pero hay otros factores a considerar, en especial el servicio público, la accesibilidad y la vertebración territorial, que pueden llevar a

mantener líneas de escaso servicio. Sin embargo, cuando una línea es deficitaria en viajeros, sería deseable incorporar al análisis de posibles soluciones la valoración de las emisiones de GEI por viajero en las diferentes alternativas de transporte.

En el transporte ferroviario los costes de mitigación se podrían sufragar a través de tasas en los billetes, para viajeros, o por unidad de peso transportando, en el caso de las mercancías. No obstante, al ser un modo de transporte mucho menos contaminante con carácter general en cuanto a emisiones de GEI, y que se debe fomentar, para viajeros y sobre todo para mercancías, no parece recomendable gravarlo con impuestos especiales, que debe recaer en los modos más ineficientes, contaminantes y menos deseables, en este caso el transporte por carretera.

Financiación de los mercados de compensación

La financiación para implantar un mercado de compensación puede venir de diferentes fuentes. Por un lado, existe una demanda real de compensación ambiental, sobre todo por afección a la biodiversidad, asociada con proyectos de desarrollo como las infraestructuras de transporte, agua, energía o proyectos urbanísticos, aunque mucho menor que hace unos años. Por otra parte, hay una creciente demanda de créditos de carbono, especialmente por empresas privadas dentro de sus políticas de responsabilidad social corporativa o gestión ambiental. Otra posibilidad es incorporar fondos a través de tasas a los combustibles para compensar la emisión de GEI.

La inclusión del sector LULUCF en el marco de la UE para 2030 podría impulsar la compensación de emisiones y los mercados de carbono como ayuda para lograr los objetivos nacionales. Los fondos comunitarios de la PAC podrían financiar bancos agroambientales, y podría adaptarse el Fondo de Carbono para una Economía Sostenible (FES-CO_2) de España (BOE 2011c, d) para su financiación. Otra fuente de financiación puede provenir de los PES.

Las dificultades financieras para la implantación de los bancos podrían reducirse con el apoyo del Instituto de Crédito Oficial (ICO) y con medidas como exenciones de impuestos, beneficios fiscales, ayudas por creación de empleo o asistencia técnica.

La Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible (BOE 2011c) dedica su artículo 90 a la compensación de emisiones, señalando que las empresas y personas físicas podrán compensar sus emisiones de CO_2 a través de inversiones en incremento y mantenimiento de masas forestales, programas agrarios de reducción del CO_2 y otros programas que establezca la Administración General del Estado, en colaboración con las Comunidades Autónomas. Será el MAGRAMA quien establecerá los criterios de compensación, verificación y obligaciones de mantenimiento e información asociadas, así como las inversiones que se considerarán a efectos de compensación.

5.6. Discusión y conclusiones

Determinar la contribución al cambio climático de las infraestructuras lineales de transporte es un paso esencial, que debe incorporarse a la toma de decisiones, para que influya en la elección de las alternativas menos desfavorables en este sentido. Sin embargo, no es suficiente; es preciso adoptar medidas de mitigación para reducir el impacto de las infraestructuras sobre el cambio climático.

Las principales medidas de mitigación propuestas para el transporte son cambios comportamentales (p.e. evitar viajes innecesarios o conducir de forma más eficiente), desplazamiento hacia modos de transporte más eficientes (en especial el ferrocarril), mejorar la eficiencia energética de trenes y vehículos, emplear combustibles bajos en carbono o con menores emisiones de GEI, impuestos en los combustibles, movilidad sostenible en la planificación urbana, mayor ocupación de los vehículos o criterios ambientales y tasas en la gestión del aparcamiento urbano (MMA 2007, Sims et al. 2014, MAGRAMA 2015b).

La mayoría de estas medidas exceden el ámbito de aplicación de la evaluación ambiental, siendo decisiones de carácter político. En algunos casos sí podrían incorporarse a la EAE de planes de infraestructuras, como el fomento del ferrocarril, pero también con una indudable carga política en la toma de decisiones. Existe una notable carencia de posibles medidas de mitigación aplicables a nivel de proyecto, y por tanto susceptibles de ser incorporadas en la EIA de las infraestructuras de transporte. Esta ausencia de propuestas concretas ha llevado a que la mitigación del cambio climático en carreteras y ferrocarriles quede, al menos en España, fuera de la EIA; las medidas posibles exceden su ámbito, por lo que no tiene sentido plantearlas.

Sin embargo, la mitigación aplicada a proyectos concretos es posible, y necesaria. Hay numerosas medidas de mitigación preventiva que deberían incorporarse al diseño de las infraestructuras, para reducir la emisión de GEI, tanto en la fase de construcción como en la de explotación. El propio concepto de mitigación preventiva, evitar los impactos antes de que se produzcan, debe llevar diseños preventivos, más a que a propuestas reactivas de mitigación. Esto mismo ya se aplica a la protección de otros valores, como la biodiversidad, donde la mejor prevención es una adecuada selección de los trazados, minimizando los daños ambientales. Un diseño preventivo permite plantear alternativas con menor contribución al cambio climático, entroncando con el capítulo anterior.

Uno de las grandes posibilidades de la mitigación en la EIA de infraestructuras de transporte es la posibilidad de plantear la compensación de la afección al cambio climático, aspecto actualmente ignorado. Siguiendo la jerarquía de la mitigación, en primer lugar deben evitarse los impactos, si son inevitables deben corregirse o minimizarse y, finalmente, si no es posible, compensarse. La actual consideración del

cambio climático en la EIA llega, en los mejores casos, a estudiar la contribución, casi nunca a prevenirla, y nunca a compensarla.

La compensación de la contribución al cambio climático de las infraestructuras de transporte tiene dos facetas, la compensación por sumideros destruidos, fácilmente asumibles, y la compensación por la emisión de GEI, un objetivo mucho más complejo y ambicioso. Ninguno de estos aspectos se contempla actualmente en la EIA de infraestructuras, y solo muy puntualmente se ha propuesto la compensación de sumideros en algún proyecto de otro tipo, sin concretarse en detalle.

Ambos tipos de compensación, sumideros y emisiones de GEI, son técnicamente viables a nivel global simplemente mediante actividades LULUCF, asociadas a los usos del suelo y la selvicultura, y pueden acometerse sin causar impactos sociales; muy al contrario, además de las ventajas climáticas pueden ayudar a mejorar el paisaje, la biodiversidad y el desarrollo rural, movilizando inversiones al campo. Las regiones más densamente pobladas y con mayor tráfico tienen más limitaciones de espacio para la compensación, pero España es un país grande, por lo que con una visión territorial amplia la compensación sería viable. El gran reto, es la financiación; compensar exige inversiones importantes, y eso a su vez exige decisiones políticas.

Entre las vías de financiación, parece lógico que al menos una parte de los fondos provenga de impuestos a los carburantes; es una aplicación del principio de "quien contamina paga", básico en la normativa comunitaria, de manera que el usuario del vehículo que consume carburante y emite GEI sea responsable de su compensación. Sin embargo, dados los grandes beneficios sociales y ambientales de esta compensación, también parece razonable que existan más vías de financiación, desde la Política Agrícola Comunitaria a inversiones directas de las administraciones públicas.

Incorporar la compensación de la contribución al cambio climático en la EIA será complejo mientras no se solvente ese reto de la financiación. Sin embargo, debería ir aplicándose de forma progresiva. Un primer paso es compensar los sumideros destruidos, algo perfectamente asumible dentro de los costes del proyecto. En una segunda fase debería compensarse la emisión de GEI en las obras, tanto en infraestructuras como en cualquier otra actividad, de manera que su construcción sea neutral en carbono. El reto final será la compensación en la explotación, sobre todo derivada del tráfico rodado, que exigirá decisiones políticas más ambiciosas.

La compensación del cambio climático en la infraestructuras de transporte abre un horizonte esperanzador para un transporte más sostenible, una mejora ambiental y un desarrollo rural más equitativo, y puede ser una herramienta esencial para cumplir los objetivos de emisiones de GEI comprometidos por España, ya que a partir de 2030 (EC 2015a) el sector LULUCF se incluirá en la contabilidad nacional de emisiones; actualmente se incluye en los inventarios, pero no en los cómputos globales.

6 Impactos del cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte

Objetivos del capítulo

Las infraestructuras lineales de transporte deben perdurar en el tiempo, expuestas a la intemperie, que acaba deteriorando los materiales o afectando a la estabilidad de taludes o estructuras. Por ello, su diseño se hace pensando en la durabilidad y se prevé su conservación para alargar la vida útil y mantener la operatividad. El cambio climático altera los parámetros meteorológicos e induce nuevos riesgos, pudiendo variar la agresividad natural del clima, y con ello sus efectos sobre las infraestructuras.

Las recomendaciones internacionales sobre cambio climático y EIA señalan la necesidad de incluir estos impactos, y la adaptación a ellos, pero en la práctica tienen escasa consideración. Puede deberse a un conocimiento muy sectorial de los impactos climáticos, donde se mezclan problemas hidrológicos, geotécnicos, degradación de pinturas o firmes, pandeo de raíles o mortandad de plantaciones, por ejemplo. Además, esto suele traducirse en problemas constructivos o de mantenimiento, abordados fuera del ámbito ambiental. Es esencial, por tanto, compilar estos impactos y sus consecuencias, ya que son la base para poder adoptar medidas de adaptación. Este es el objetivo esencial del capítulo, como se resume en Enríquez de Salamanca et al. (2016b).

Al hacer esta investigación sobre impactos del clima en la infraestructuras, se detecta una carencia en el estudio de los efectos sobre la vegetación, abordados en parte en trabajos previos (Enríquez de Salamanca et al. 2004, Enríquez de Salamanca 2009).

Como en el resto de capítulos, se incluye un apartado dedicado a analizar los principales retos a la hora de considerar los impactos del cambio climático en las infraestructuras en el marco de la EIA, y se concluye con una discusión y conclusiones sobre el tema abordado.

Publicaciones

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016b. El cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras de transporte: contribución, impactos, mitigación y adaptación. *Actas del VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.* Madrid, 2 y 3 de marzo de 2016. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Enríquez de Salamanca, A. 2009. Conservación de los paisajes áridos ibéricos. *Foresta* 46: 52–58.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, García F, Varela JM. 2004. Seguimiento de la revegetación de taludes en autovías. *Actas del VII Congreso Nacional de Medio Ambiente*. Madrid, 22-26 de noviembre de 2004. Fundación CONAMA.

6.1. Consideraciones generales

6.1.1. Fenómenos climáticos causantes de impactos

El clima interrelaciona con los sistemas naturales y humanos, y condiciona su estructura, relaciones, formas de vida y posibilidades de subsistencia. Sin embargo la climatología no es constante a lo largo del tiempo.

De acuerdo con la definición del IPCC (Agard et al. 2014), el clima es *"una descripción estadística del tiempo en términos de valores medios y variabilidad de las cantidades pertinentes durante períodos que pueden ser de meses a miles o millones de años"* o, en otras palabras, el tiempo medio, formado por valores variables a lo largo del tiempo, tanto más dispares cuanto mayor es la irregularidad del clima de una determinada región. En el caso del clima mediterráneo, dominante en la Península Ibérica, la variabilidad de las precipitaciones, tanto inter como intranual, es especialmente elevada.

Dentro de la variabilidad de los parámetros meteorológicos, se producen valores extremos, tanto por exceso como por defecto, que son parte del clima, aunque quedan enmascarados al hacer una descripción estadística. En el caso de las precipitaciones, por ejemplo, un extremo inferior da lugar a sequía, y un extremo superior a inundaciones.

Sin considerar la influencia humana, los fenómenos meteorológicos son variables, y pueden dar lugar a episodios extremos, susceptibles de generar impactos excepcionales en los sistemas naturales y humanos como sequías, inundaciones, vendavales, huracanes o tormentas.

En consecuencia, el clima, además de permitir la subsistencia de los sistemas naturales y humanos, también puede impactar sobre ellos de forma negativa, obligándolos a recuperarse, de forma espontánea en sistemas naturales, más o menos prolongada, y de forma asistida en sistemas humanos.

Cuando ocurre un episodio hidrometeorológico extremo, a menudo se habla de un desastre. No obstante, como señala el informe de UIP (2010) los desastres 'naturales' no existen. Existen amenazas naturales, como inundaciones o sequías, que pueden causar daño al hombre, la economía o el medio ambiente si no están preparados para ellas. Un 'desastre' ocurre cuando una amenaza provoca devastación que deja comunidades e incluso naciones ante la incapacidad de hacerle frente y sin ayuda alguna.

Los sistemas naturales o humanos expuestos a una amenaza tienen una determinada resiliencia, una capacidad para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos, preservando y recuperando sus estructuras y funciones básicas. Cuanto mayor es la resiliencia del sistema, menor intensidad tendrán los impactos climáticos, o más rápida será su recuperación.

El cambio climático acrecienta las amenazas naturales, y puede superar la resiliencia de los sistemas naturales o humanos, en especial de aquellos que resultan más vulnerables.

6.1.2. Impactos climáticos sobre las infraestructuras

A nivel global, los principales impactos del cambio climático sobre las infraestructuras de transporte están relacionados con varios grupos de fenómenos climáticos (TRB 2008, Nemry & Demirel 2012):

- Incremento de temperaturas, días calurosos y olas de calor.
- Incremento de las temperaturas en el Ártico.
- Incremento de los niveles del mar.
- Incremento de los episodios lluviosos intensos.
- Incremento en la intensidad de huracanes.
- Incremento de la frecuencia de tormentas y marejadas ciclónicas *(storm surge)*.
- Incremento de la frecuencia e intensidad de vientos extremos.

El incremento de la temperaturas en el Ártico, ampliamente estudiado en el norte de Europa y Canadá, tiene efectos negativos y beneficiosos sobre las carreteras (Infrastructure Canada 2006, Vajda et al. 2012, Boyle et al. 2013). Entre los primeros se destaca la degradación del permafrost, afectando a la estabilidad de las carreteras, la reducción del periodo uso de carreteras y puentes de hielo (norte de Canadá) o la mayor frecuencia de ciclos de congelación-descongelación que aceleran el deterioro de las carreteras. Como efectos beneficiosos se cita la reducción en los costes de mantenimiento invernal. Aunque se prevé una disminución de la frecuencia de frío extremo y nevadas se produce un incremento en la irregularidad; los fenómenos extremos no disminuyen con un patrón similar, e incluso en países escandinavos serían más frecuentes a pesar de reducirse el número de días de nieve (Vajda et al. 2012). Un efecto importante es el deshielo, una de las causas del incremento del nivel del mar.

Probablemente el incremento en la frecuencia e intensidad de huracanes y tormentas tropicales sea el fenómeno con mayor potencial de impacto sobre las infraestructuras de transporte, capaz de causar grandes daños materiales y humanos e incluso afectar al desarrollo de los países afectados. Un ejemplo de esos daños se comenta en el Cuadro 5 y el Anexo 4.

El incremento en la frecuencia de tormentas y marejadas ciclónicas se prevé que en Europa afectará sobre todo al Mar del Norte, a la costas de Alemania y Dinamarca, y los vientos extremos se prevé que serán importantes entre los 45 y 55º de latitud Norte, afectando sobre todo a Irlanda y Reino Unido (Nemry & Demirel 2012).

En el Sur de Europa las principales presiones climáticas son el incremento de la temperatura, el incremento de olas de calor, la reducción de la precipitación media, el aumento en la irregularidad en las precipitaciones y el incremento del nivel del mar y de fenómenos costeros adversos, con una mayor incertidumbre en cuanto a la futura incidencia de vientos y tormentas.

Estas presiones climáticas dan lugar a diferentes impactos sobre las infraestructuras de transporte, como el pandeo de raíles, daños en firmes, fatiga de materiales, afección a estructuras, inundaciones o inestabilidad de taludes (Tabla 38).

A su vez, los impactos generados por las presiones climáticas tienen unas consecuencias, que son efectos indirectos del cambio climático, siendo las más habituales la interrupción del servicio, la reducción de la velocidad (ambos efectos afectando a su vez a la puntualidad), una menor seguridad en la circulación y unos mayores costes de mantenimiento y reparación (Tabla 38).

En su inmensa mayoría los impactos asociados al cambio climático y sus consecuencias son negativos, aunque pueden producirse también efectos positivos; por ejemplo, la reducción en las heladas y nevadas puede reducir los costes de mantenimiento invernal, por extensión de sal y retirada de nieve en las carreteras.

El cambio climático no solo afecta a las infraestructuras de transporte y su funcionamiento, sino que también puede afectar a la distribución modal y tráficos, por ejemplo por cambios en los patrones de turismo que alteren la demanda. Asimismo, influyen en la demanda y en las pautas comportamentales, como una preferencia por medios de transporte menos susceptibles de verse afectados por el clima (EC 2013b).

Un último aspecto a tener en cuenta es que existen interdependencias entre las redes de transporte, que también tienen influencia en los efectos del cambio climático. Los trabajadores dependen de los transportes para acceder a sus puestos de trabajo; por ejemplo, si una carretera local se ve interrumpida en un fenómeno meteorológico extremo, los trabajadores ferroviarios o conductores de autobús podrían no llegar a sus puestos de trabajo, afectando a esos servicios, y lo mismo ocurre con empleados de centrales eléctricas o plantas de tratamiento de agua que precisan especial atención en esos episodios extremos (RAE 2011).

En España las infraestructuras de transporte no se consideran muy afectadas por el aumento de las temperaturas, aunque sí por cambios en precipitaciones, vientos o nieblas; no es un sector prioritario ni se incluyó en los programas de trabajo del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (Crespo et al. 2011).

Tabla 38 Impactos del cambio climático sobre las infraestructuras aplicables a España

Factor	Presión climática	Infraestructura	Impactos	Consecuencias
Temperatura	Olas de calor y calor estival más intenso	Ferrocarriles	Pandeo de raíles	Restricciones de velocidad, pérdida de puntualidad, riesgo por fallos de los trenes, interrupción del servicio
			Pandeo de la catenaria	
			Recalentamiento de equipos y motores	Interrupción del servicio
			Calentamiento de estaciones y metros	Pérdida de confort de los usuarios
		Carreteras	Deterioro de los firmes (grietas)	Menor seguridad, menor velocidad, mayores costes de reparación y mantenimiento, daños en vehículos
			Ablandamiento del asfalto y deformación	
			Deterioro de marcas viales (pintura)	
			Recalentamiento de motores	Pérdida de puntualidad
		Ambas	Fatiga de materiales	Mayores costes de reparación y mantenimiento, interrupción del servicio, restricciones de velocidad, pérdida de puntualidad
			Deformación de puentes metálicos	
			Expansión de juntas de puentes	
			Daños por incendios forestales	Interrupción del servicio
			Cambios de humedad y subsidencia	Interrupción del servicio
			Mortandad en plantaciones	Mayor erosión, impacto visual
	Inviernos suaves	Carreteras	Menor frecuencia de hielo y nieve	Menor coste de mantenimiento, menor accidentalidad
Tormentas	Tormentas eléctricas	Ferrocarriles	Sobretensión en subestaciones	Riesgo incendio en subestaciones
			Sobretensión en la catenaria	Daños a la electrificación
				Interrupción del servicio
Viento	Vientos extremos	Ferrocarriles	Daños en la superestructura y catenaria	Mayores costes de reparación
		Carreteras	Daños en señalización y defensas	Mayores costes de reparación
			Afección a la conducción	Menor velocidad y seguridad
		Ambas	Bloqueo por árboles	Interrupción del servicio
			Sobreesfuerzo en pantallas acústicas	Mayores costes de reparación
Precipitación	Precipitaciones extremas	Ferrocarriles	Fallos del equipamiento de vía	Interrupción del servicio
		Carreteras	Daños en pavimentos	Mayores costes de reparación
			Afección a la visibilidad	Menor velocidad y puntualidad, mayor accidentalidad, congestiones
			Pavimentos mojados (menor adherencia)	
		Ambas	Inundaciones	Interrupción del servicio, menor velocidad, pérdida de puntualidad, menor seguridad, mayores costes de reparación
			Hundimientos	
			Desprendimientos y deslizamientos	
			Afección a la estabilidad de taludes	
			Descalce de puentes y viaductos	Mayores costes de reparación
			Colapso de puentes y viaductos	Gran inversión para reparación
				Interrupción del servicio larga
			Inundación de pasos inferiores	Perdida de permeabilidad territorial
			Sobreesfuerzo en drenajes	Mayores costes de reparación
	Descenso en las precipitaciones	Ambas	Mortandad en plantaciones	Mayor erosión, impacto visual
			Cambios de humedad y subsidencia	Interrupción del servicio
Fenómenos costeros	Incremento del nivel del mar	Ambas	Inundación	Interrupción del servicio, riesgos para la seguridad, incremento en los costes de reparación
	Marejadas ciclónicas	Ambas	Inundación	
			Daños en infraestructuras y equipamiento	
	Erosión costera	Ambas	Desprendimientos y deslizamientos	

Fuentes: Rowland et al. (2007), TRB (2008), Koetse & Rietveld (2009), RAE (2011), PIARC (2011, 2012, 2013a, 2015), Regmi & Hanaoka (2011), Nemry & Demirel (2012), EC (2013b), CEDEX et al. (2013), Palin et al. (2013), USAID (2013), Department for Transport (2014), Jenkins et al. (2014), Taylor & Philp (2015), Enríquez de Salamanca et al. (2016b) y elaboración propia.

6.2. Impactos asociados al incremento de la temperatura

6.2.1. Pandeo de raíles

Los raíles ferroviarios, construidos de acero, son sensibles a la temperatura ambiente, estando sujetos a fuerzas de contracción bajo temperaturas frías y de dilatación bajo temperaturas elevadas. Un excesivo calentamiento de los raíles puede dar lugar a una dilatación que, al ser un raíl continuo, produce una deformación o pandeo. El pandeo de raíles se define por tanto como la formación de grandes desalineaciones laterales en vías de raíl continuo soldado, y puede dar lugar en casos extremos a descarrilamientos (TRB 2008, EC 2013b, Palin et al. 2013, Nemry & Demirel 2012).

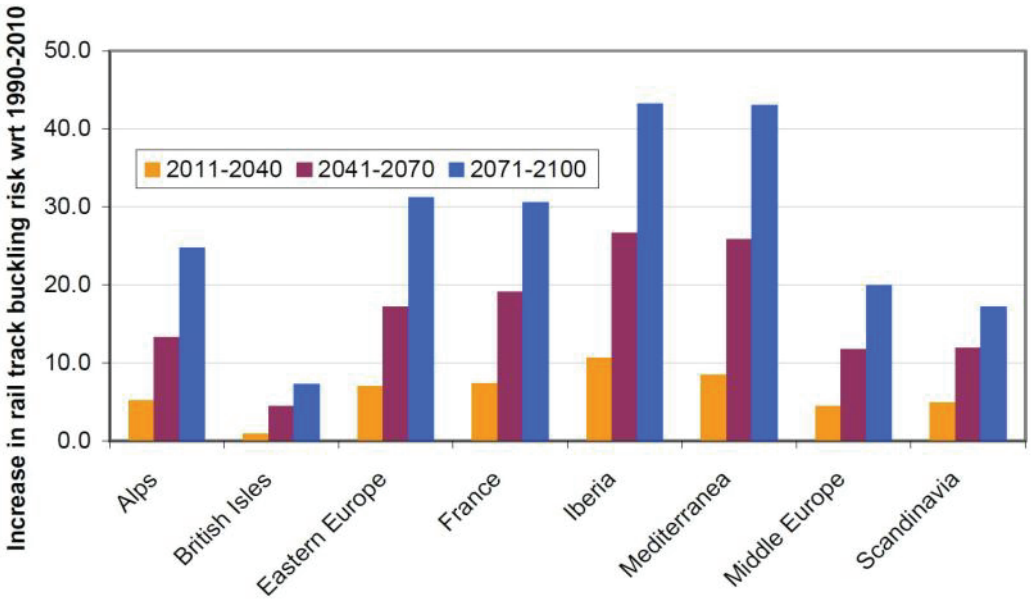
Se considera temperatura libre de estrés en raíles o SFT *(Stress Free Temperature)* a la temperatura a la cual no se produce estrés térmico en los raíles; cuando se supera, comienzan a aparecer un gran estrés por fuerzas compresivas. A nivel de la UE no existe una STF estándar adoptándose diferentes valores según países: 23ºC en Alemania o Irlanda, 25ºC en Francia u Holanda, o 27ºC en España y Reino Unido (Dobney 2010, Nemry & Demirel 2012). Se define temperatura máxima crítica del raíl o CRT *(Critical Rail Temperature)* como la temperatura a partir de la cual el pandeo de raíles es prácticamente una certeza. Por último, se define temperatura admisible como el aumento de temperatura por encima de la SFT que proporciona un margen de seguridad frente a la probabilidad de pandeo (Petkova & Gil-Negrete 2015).

Aparte de la temperatura, el riesgo de pandeo está relacionado con el tipo de traviesas, siendo mayor en las de madera, y sobre todo con el estado de conservación del balasto (Dobney 2010, Nemry & Demirel 2012). El pandeo de raíles obliga a una reducción en la velocidad de la circulación de los trenes, que suele establecerse en función de la CRT y del estado del balasto. No obstante, el concepto de balasto en buen o mal estado no es muy claro.

Para vías con balasto en mal estado de conservación, la situación de alerta se alcanza simplemente con superar 10ºC la STF, lo que resulta fácil en verano en España. en los cálculos que hace Nemry & Demirel (2012), asumen que las líneas de ferrocarril de larga distancia principales están en buen estado mientras que en las líneas de media y corta distancia cerca del 5% están asentadas sobre un balasto inadecuado

Estos autores analizan también el número medio anual de días adicionales con temperatura máxima superior a CRT30 (es decir, temperatura crítica que obliga a restringir la velocidad a 30 km/h) en el futuro, en comparación con la situación actual (Figura 57), para el escenarios A1B de los propuestos en el proyecto PESETA II (Ciscar et al. 2014, Figura 13). Se observa un incremento muy notable de los días adicionales con CRT30, sobre todo en la Península Ibérica y región mediterránea.

Figura 57 Número medio anual de días adicionales con Tmáx> CRT30 en el escenario A1B



Fuente: Nemry & Demirel (2012)

La restricciones de velocidad cuando se prevé pandeo de raíles evitan los descarrilamientos, y permiten circular con seguridad, pero tienen impactos asociados como mayores tiempos de transporte y costes de operación, retrasos en el envío de mercancías, reducción en la capacidad de la línea ferroviaria, y necesidad de más equipos y flotas para asumir el servicio (Nemry & Demirel 2012). Por lo general las restricciones se aplican durante el 50% del periodo de tráfico, entre 12:00 y 20:00 h, y afectan tanto al tráfico de pasajeros como de mercancías. Para el periodo 1990-2010 en España se han producido retrasos en el 0,022% del tiempo de tráfico de pasajeros y el 0,012% de mercancías, valores algo por encima de la media de la UE27 (Tabla 39).

Tabla 39 Retrasos asociados al pandeo de raíles por año en el periodo 1990-2010

Zona	Pasajeros		Mercancías	
	Retrasos (h)	% sobre días sin velocidad limitada	Retrasos (h)	% sobre días sin velocidad limitada
España	324 000	0,023%	116 000	0,019%
UE27	3 973 000	0,022%	2 537 000	0,012%

Fuente: Nemry & Demirel (2012)

Los impactos asociados a la reducción de la velocidad por el pandeo pueden monetarizarse, para estimar los impactos económicos asociados. Nemry & Demirel (2012) para la UE27 parten de unos costes horarios unitarios según el uso perdido sea trabajo (21,00 €/h), desplazamientos (6,40 €/h) u ocio (3,20 €/h), realizando una estimación media horario según usos de 8,00 €/h, y considerando para mercancías un valor de 0,76 €/t. En función de estos costes, y aplicando los escenarios de PESETA II (Figura 13), estos autores hacen una prognosis de los costes asociados al pandeo de raíles para diferentes periodos de tiempo entre 1990 y 2100 (Tabla 40).

Tabla 40 Coste estimado de retrasos debidos a restricción de velocidad por pandeo raíles en España

Escenario	1990-2010	2040-2070			2070-2100		
	Coste anual retrasos millones €	Coste anual retrasos millones €	Coste adicional retrasos millones €	Incremento de costes	Coste anual retrasos millones €	Coste adicional retrasos millones €	Incremento de costes
E1		5,6	2,9	109%	6,9	4,2	156%
AB1	2,7	4,3	1,7	62%	5,5	2,8	104%
RCP 8.5		4,2	1,5	57%	10,5	7,8	292%

Fuente: Nemry & Demirel (2012)

El impacto del clima sobre el pandeo de raíles es un problema que afecta a la operación de las líneas, afectando a la movilidad y generando pérdidas económicas, y por tanto con repercusiones sociales y económicas pero no medioambientales.

6.2.2. Pandeo de la catenaria

Palin et al. (2013) señalan como impacto asociado al incremento de las temperaturas el pandeo de la catenaria. En efecto, al ser una línea aérea suspendida pueden variar las flechas en función de la temperatura. Sin embargo, estos autores no aportan datos concretos que permitan valorar este impacto, que no se considera por lo general un problema importante, como ocurre con el pandeo de los raíles.

6.2.3. Afección al confort térmico

El incremento de las temperaturas afecta al confort térmico de los viajeros, tanto en el transporte por carretera como en el ferroviario. En la actualidad la mayoría de vehículos dispone de aire acondicionado, aunque existe parte del parque móvil que carece de él. Cuando se dispone de él, la pérdida de confort se soluciona con un uso más frecuente o intenso del aire acondicionado, pero esto a su vez implica unos mayores consumos energéticos, de electricidad o de carburantes. Lo mismo ocurre en instalaciones asociadas a los transportes, como estaciones ferroviarias, centros de control, gasolineras o garitas de peaje, por ejemplo.

Un caso particular son los ferrocarriles subterráneos, y en especial el metro, donde el funcionamiento de los trenes y las instalaciones asociadas, unido a un elevado número de usuarios hace que la temperatura se eleve. Jenkins et al. (2014) indican que con un escenario elevado de cambio climático en 2050 se registraría una insatisfacción generalizada de los viajeros del metro de Londres por el ambiente térmico si no se produjeran cambios con respecto a la situación actual. Teniendo en cuenta las conclusiones para el metro de Londres, la situación sería mucho más desfavorable en las ciudades españolas que cuentan con este transporte o lo están implantando (Barcelona, Bilbao, Granada, Málaga, Madrid, Palma, Sevilla y Valencia). En estos casos, puede que la climatización de los vagones no sea suficiente, precisando una refrigeración de las estaciones, lo que supondría un importante consumo energético.

6.2.4. Afección a firmes

El impacto en los firmes asociado a cambios en las temperaturas tiene una doble vertiente, un mayor deterioro por aumento de las temperaturas máximas estivales, y un menor deterioro por la reducción de los días con hielo y nieve en invierno (TRB 2008, Regmi & Hanaoka 2011, Nemry & Demirel 2012, EC 2013b, CEDEX et al. 2013).

Los firmes tienen una vida útil, que depende de su tipología, sobre todo si son bituminosos, la mayoría en España, o rígidos, de hormigón, que suponen apenas un 0,7% de la red viaria nacional. En firmes asfálticos es necesario reparar periódicamente la capa de rodadura, por su desgaste y deterioro, variando la frecuencia según la zona y uso, con un periodos de 7 a 25 años (Nemry & Demirel 2012).

El incremento de las temperaturas máximas puede dar lugar a una oxidación prematura del ligante, que dé lugar a la formación de roderas y fisuras (CEDEX et al. 2013). Asimismo, las temperaturas muy elevadas pueden ablandar los firmes asfálticos, lo que favorece su deformación (TRB 2008, Regmi & Hanaoka 2011, Nemry & Demirel 2012), sobre todo si existe un elevado tráfico de vehículos pesados.

Otros aspectos que producen un deterioro acelerado de los firmes son la sucesión de episodios de hielo-deshielo y el uso sistemático de fundentes, ambos asociados a la presencia de hielo y nieve en la plataforma. Las previsiones apuntan a una reducción en las heladas y días de nieve durante el invierno, lo que se traduce en menores daños a los firmes al reducirse tanto los ciclos hielo-deshielo como el uso de fundentes.

Nemry & Demirel (2012) analizan los costes futuros de mantenimiento de las infraestructuras en los países europeos, de acuerdo con los escenarios climáticos del programa PESETA II, obteniendo para España un balance negativo, al superar mucho la reducción de costes de mantenimiento invernal al incremento de costes por daños generados por el aumento de las temperaturas máximas (Tabla 41).

Tabla 41 Costes futuros de mantenimiento de firmes de carreteras en España

Escenario	2040-2070 (millones €)			2070-2100 (millones €)		
	Daños por calor	Menor mantenimiento invernal	Balance global	Daños por calor	Menor mantenimiento invernal	Balance global
E1	9,04	-49,9	-40,9	17,79	-66,4	-48,7
AB1	6,45	-69,9	-63,4	11,88	-93,0	-81,1
RCP 8.5	7,85	-74,0	-66,1	33,27	-98,4	-65,2

Fuente: Nemry & Demirel (2012)

De acuerdo con estos datos, el impacto global del cambio climático sería positivo, no siendo en consecuencia un factor de preocupación importante en cuanto a costes de mantenimiento. No obstante, estos valores son medios, existiendo una gran diferencia entre regiones, que se verán más favorecidas por los inviernos más suaves o más perjudicadas por los veranos más calurosos.

6.2.5. Afección a señalización y equipamiento

El informe de CEDEX et al. (2013) señala que el incremento de las temperaturas y olas de calor supone un incremento del soleamiento que puede afectar a la durabilidad de algunos elementos de señalización por efecto de los rayos ultravioletas, puede acelerar el envejecimiento de las marcas viales, o provocar roturas en los elementos de unión de tramos largos de barreras de seguridad metálicas. Los rayos ultravioletas producen fotodegradación, siendo especialmente sensibles los materiales plásticos como paneles antideslumbramiento o hitos de balizamiento (Figura 58).

Figura 58 Hitos de balizamiento y pantallas antideslumbramiento de materiales plásticos

Fuente: Proinbal (http://proinbal.es)

Las señales de tráfico también envejecen, teniendo una influencia importante la exposición al sol. La degradación es función de la edad de la señal y tiempo de exposición, la climatología y la calidad de los materiales; si la calidad de los materiales es baja, el proceso de fotodegradación puede ser rápido. Lo mismo es aplicable a las marcas viales horizontales, que también tienen una vida útil determinada (Figura 59).

Figura 59 Señales y marcas viales envejecidas

Fuentes: Dirección General de Tráfico (izquierda); http://www.coches.net (centro y derecha)

En todos estos casos el incremento de insolación asociado al cambio climático puede acorta la vida útil de elementos de seguridad, señales y marcas viales, obligando a un mantenimiento más frecuente, con el consiguiente incremento de costes.

6.2.6. Recalentamiento de equipos y motores

Un problema asociado al incremento de temperaturas estivales es el recalentamiento de equipos y motores (EC 2013b, Nemry & Demirel 2012). Existe gran incertidumbre al respecto, pero parece que mayores temperaturas podrían incrementar los problemas de funcionamiento de grandes motores o equipos, obligando a su parada. En líneas ferroviarias puede afectar especialmente a transformadores, y a locomotoras de gasoil, mientras que en el tráfico rodado es potencialmente más previsible la afección a camiones, por su mayor cilindrada y peso transportado. En ambos casos se vería afectado sobre todo el transporte de mercancías.

6.2.7. Afección a estructuras y fatiga de materiales

Un impacto asociado al incremento de las temperaturas es la afección a estructuras por un recalentamiento, en concreto por expansión de las juntas (TRB 2008, Regmi & Hanaoka 2011, Nemry & Demirel 2012), que puede afectar a su operación. Más importante puede ser la deformación de puentes metálicos (Regmi & Hanaoka 2011). Aunque su uso en la actualidad es muy limitado, aún existen numerosos puentes metálicos en la red ferroviaria convencional. Pese a ello, no se considera un problema significativo, ni se han citado en España problemas relacionados con estos efectos, pese a haberse alcanzado temperaturas máximas extremas muy elevadas.

6.2.8. Mayor intensidad y frecuencia de sequías

El incremento de las temperaturas, unido a la reducción en las precipitaciones, da lugar a una mayor frecuencia de sequías, o de su intensidad, que producen diferentes impactos como el incremento del riesgo de incendios, cambios de humedad del terreno y subsidencia y mortandad de plantaciones, aspectos tratados posteriormente en el apartado destinado a los impactos asociados a la variación de las precipitaciones (véase 6.4), al estar más influenciados por la disponibilidad de agua que por la temperatura.

6.2.9. Menor frecuencia de hielo y nieve

Como se ha señalado, el cambio climático puede dar lugar a un incremento o reducción en los costes de construcción y mantenimiento de las infraestructuras, dependiendo del tipo de cambios que ocurran en cada zona. Un ejemplo de reducción de costes, y por ello un impacto positivo asociado al cambio climático, es la reducción de costes de mantenimiento invernal al acortarse la duración y severidad de los inviernos. En países del norte de Europa y en Canadá donde la influencia del incremento de temperaturas en el Ártico es importante, se identifican impactos negativos (descongelación del permafrost, imposibilidad de uso de carreteras de hielo, daños por congelación-descongelación) pero también efectos beneficiosos como la reducción de

costes de mantenimiento invernal (Infrastructure Canada 2006, Vajda et al. 2012, Boyle et al. 2013).

Figura 60 Nevada en la autovía A-6 en León

Fuente: El Norte de Castilla (http://www.elnortedecastilla.es)

En España la disminución de heladas y nevadas comportará importantes efectos positivos en la operación de carreteras y líneas ferroviarias al disminuir la necesidad de mantenimiento invernal y mejorar las condiciones de explotación (CEDEX et al. 2013). Como indica este informe la nieve y hielo suponen siete de cada diez incidencias asociadas a factores climáticos que producen restricciones en la red troncal, y una cuarta parte de incidencias climáticas que afectan a la circulación de los trenes de RENFE.

La presencia de hielo y nieve en las carreteras obliga a adoptar medidas tanto de prevención como de corrección, como la extensión de fundentes en la plataforma o la retirada de la nieve mediante quitanieves. Una menor frecuencia de nevadas y heladas reduce los costes asociados a estas operaciones, aunque al menos en el norte de Europa (Vajda et al. 2012) los fenómenos extremos pueden ser más frecuentes.

En los ferrocarriles la presencia de nieve y sobre todo hielo puede afectar de forma importante a la circulación, obligando a adoptar medidas. En regiones donde esto ocurre con frecuencia puede ser preciso recurrir a sistemas de calefacción para las vías.

La menor frecuencia de hielo y nieve mejora la operación de las infraestructuras. En carreteras se reducen los cortes y la accidentalidad asociada a estos fenómenos, lo que supone un impacto positivo sobre la seguridad. En ferrocarriles también se ha reducido el número de interrupciones del servicio. También en este caso es una mejora estadística, ya que no desaparecerán las nevadas intensas, e incluso podrían incrementarse, pese al menor número de días al año con hielo y nieve.

6.3. Impactos asociados a las tormentas

Un problema importante asociado a las tormentas, aparte de las precipitaciones, es el aparato eléctrico, que puede originar sobretensiones en las líneas eléctricas de suministro, las subestaciones de tracción, la catenaria o los vehículos tractores, y que pueden dar lugar a daños en el equipamiento eléctrico. Las sobretensiones son 10 veces superiores en la catenaria que a nivel del suelo, por lo que si el equipamiento de vía toma corriente de ella puede sufrir daños (Ono et al. 2012). Asimismo, una sobretensión puede dañar los sistemas de señalización, obligando a detener la circulación ferroviaria. De acuerdo con los datos del operador ferroviario británico NetworkRail, la caída de rayos causó daños en sus infraestructuras una media de 192 veces al año entre 2010 y 2013, con un retraso de 361 minutos por rayo, y la cancelación de 58 trenes al año.

6.4. Impactos asociados a la variación en las precipitaciones

6.4.1. Inundación y afección a sistemas de drenaje

Uno de los efectos más importantes asociado a la mayor irregularidad en las precipitaciones y precipitaciones extremas es el riesgo de inundación de las infraestructuras (Figura 61), y la afección a los sistemas de drenaje (RAE 2011, Regmi & Hanaoka 2011 Nemry & Demirel 2012, EC 2013b, CEDEX et al. 2013, USAID 2013, Taylor & Philp 2015). Para el sur de Europa el riesgo se considera medio desde 2015 y elevado desde 2080 (EC 2013b).

Figura 61 Daños por inundaciones en infraestructuras lineales de transporte

Izquierda: Desbordamiento del río Ebro en la N-113 en Castejón, Navarra (Fuente: http://www.noticiasdenavarra.com, Noticias de Navarra). Derecha: Plataforma ferroviaria entre Lorca y Águilas tras un temporal (Fuente: CEDEX et al. 2013)

Las infraestructuras lineales de transporte disponen de sistemas de drenaje diseñados para permitir la continuidad de cauces y escorrentías interceptadas y para evitar su inundación en caso de precipitaciones.

Estos sistemas constan de un drenaje (i) transversal, para permitir el cruce de cauces y de aguas de escorrentía; (ii) longitudinal, en los márgenes de la plataforma, y en las medianas de carreteras con doble calzada; y (iii) de la plataforma en carreteras, mediante bombeo, para evacuar el agua de su superficie.

El sistema de drenaje debe permitir el paso del agua y su evacuación, en condiciones normales y extraordinarias, para lo cual se establecen unos caudales de cálculo, basados en premisas de seguridad. Para ello, se adopta un determinado periodo de retorno (T), definido como el periodo de tiempo expresado en años, para el cual el caudal máximo anual tiene una probabilidad de ser excedido igual a 1/T (BOE 2016a).

Desde el año 1990 existe la norma 5.2-IC Drenaje Superficial, de la Instrucción de Carreteras, donde se establecen las condiciones de diseño, metodología, periodos de retorno y todos los aspectos relacionados con este tipo de obras. Esta Norma se aplica tanto al diseño del drenaje de carreteras como de ferrocarriles, al no existir una norma específica para estos últimos. Recientemente se ha aprobado una revisión de la Norma 5.2-IC (BOE 2016a), que actualiza la metodología y criterios a los conocimientos actuales, y que se traduce en mayores caudales de cálculo, y en consecuencia mayores obras de drenaje. Esta norma establece unos periodos de retorno para el cálculo del drenaje de la plataforma y márgenes de 25 años, de 50 años para el bombeo y superior o igual a 100 años para el drenaje transversal.

Cuando los caudales generados a consecuencia de un episodio lluvioso superan los caudales de diseño se puede producir una incapacidad de los sistemas de drenaje para evacuarlos, dando lugar a la inundación de la plataforma, o de los márgenes de la infraestructura, y causar sobresfuerzos que dañen las obras existentes, como cunetas, imbornales, arquetas, tubos o marcos.

La mayor irregularidad en las precipitaciones hace que las precipitaciones extremas puedan ser más frecuentes, afectando a los sistemas de drenaje (Regmi & Hanaoka 2011, Taylor & Philp 2015). En la situación actual, se puede hacer una diferenciación entre las infraestructuras de acuerdo con su fecha de construcción:

- Las infraestructuras cuyo drenaje se ha diseñado con la nueva Norma (a partir de marzo de 2016) están adaptadas a la irregularidad del clima. MFOM et la. (2013) consideran que el impacto del cambio climático por aumento en la intensidad de las precipitaciones extremas en nuevas carreteras no será *a priori* relevante, como consecuencia de los criterios de diseño que establece la nueva Norma 5.2-IC.
- Las infraestructuras construidas entre 1990 y 2016 siguen la Norma 5.2-IC pero no en su versión actual, por lo que en algunos casos los periodos de retorno aplicados son menores, y en general los caudales de diseño también lo son.
- Las infraestructuras construidas con anterioridad a 1990 no siguen la Norma 5.2-IC. Sobre todo en carreteras y ferrocarriles antiguos son frecuentes los drenajes pequeños, como pasos de mampostería menores de 1x1 m o tubos muy reducidos.

Como consecuencia, el impacto de la irregularidad en las precipitaciones asociada al cambio climático puede considerarse bajo en infraestructuras diseñadas con la Norma 5.2-IC de 2016, bajo a medio en las construidas entre 1990 y 2016, dependiendo de los supuestos aplicados, e impredecible en infraestructuras anteriores a 1990.

6.4.2. Inundación de pasos inferiores

Las infraestructuras lineales de transporte generan un importante efecto barrera en el territorio, interceptando otros elementos lineales como cauces, caminos, carreteras o ferrocarriles. La reposición de caminos hace precisa la construcción de pasos que crucen la infraestructura, que dependiendo de su alzado podrán ser superiores o inferiores. Los pasos inferiores tienen menor coste y a menudo mejor aptitud para la fauna, estando menos expuestos al tráfico. Sin embargo, son susceptibles de inundarse en episodios lluviosos intensos (Nemry & Demirel 2012), sobre todo si el diseño no es adecuado.

En ocasiones, la falta de gálibo ha llevado a construir los pasos inferiores rebajando el nivel del terreno, con un resultado desastroso, ya que al estar deprimidos carecen de forma de evacuar las aguas y se inundan constantemente, haciendo que sean inútiles (Figura 62). Este caso se da, por ejemplo, en la Autovía del Baix Llobregat en todo su recorrido por la vega del Llobregat.

Figura 62 Inundación de paso inferior en Ibiza

Fuente: Diario de Ibiza (http://www.diariodeibiza.es)

Si el diseño del paso es adecuado debe tener capacidad de evacuar las aguas de escorrentía. No obstante, en episodios lluviosos intensos la barrera que suponen los terraplenes puede retener las aguas, actuando como presas, favoreciendo la inundación de pasos inferiores. Este fenómeno, muy asociado al diseño del drenaje transversal y de los propios pasos, puede agravarse con un incremento de las precipitaciones extremas.

6.4.3. Erosión en puentes

La erosión o socavamiento de cimientos en puentes es uno de los impactos más importantes sobre las infraestructuras lineales de transporte en términos económicos asociados al cambio climático (Regmi & Hanaoka 2011, RAE 2011, EC 2013b, Nemry & Demirel 2012, CEDEX et al. 2013, Taylor & Philp 2015). Una mayor irregularidad y agresividad en las precipitaciones, con lluvias intensas en periodos cortos de tiempo, llevan a una mayor torrencialidad en los cauces, aumentando su capacidad de arrastre y erosión en el lecho, y en cimentaciones de puentes.

El socavamiento de cimientos de puentes puede ser un proceso gradual, súbito o una combinación de ambos. La erosión gradual debe preverse en el diseño; un socavamiento en condiciones normales de circulación del agua se debe a un diseño defectuoso o a obras antiguas sin adecuados estudios para la cimentación. Sin embargo, no siempre es un proceso gradual; un solo fenómeno extremo, o unos pocos, pueden dar lugar a una situación de riesgo si el socavamiento es intenso, evidentemente agravada si ha habido una erosión gradual que haya descalzado parcialmente los puentes.

En San Vicente y las Granadinas (Cuadro 5, Anexo 4), el paso de huracán Tomas unido a las tormentas tropicales de 2013 dieron lugar a un socavamiento en los cimientos de los puentes de la carretera de Green Hill a Fenton, una pista no pavimentada, poniendo en peligro su estabilidad, y obligando a su sustitución para permitir la reapertura al tráfico rodado (Figura 63, izquierda).

La consecuencia más llamativa del socavamiento de puentes es el colapso de estructuras, infrecuente pero espectacular y peligroso. Un ejemplo es la autovía A-7 entre Lorca y Puerto Lumbreras (Figura 63 derecha). En este caso un episodio lluvioso extremo dio lugar a una crecida súbita, produciendo un socavamiento acelerado de la cimentación de las pilas de la estructura, que pierden sustentación y finalmente se hunde el viaducto. El aumento de la irregularidad en las precipitaciones y en episodios lluviosos extremos asociados al cambio climático puede incrementar estos riesgos.

Figura 63 Erosión en cimientos y colapso de estructuras

Izda: Fenton, San Vicente y las Granadinas (Fuente: Autor). Dcha: A-7 Lorca-Puerto Lumbreras, Murcia (Fuente: La Verdad, http://www.laverdad.es)

6.4.4. Daños en pavimentos

Regmi & Hanaoka (2011) señalan entre los efectos del incremento de episodios lluviosos intensos la afección a pavimentos. En realidad, estos daños están relacionados principalmente con afecciones a la estabilidad de la plataforma, por deslizamientos o hundimientos o por subsidencia, que pueden ocurrir tanto en carreteras como en ferrocarriles, y que se comentan a continuación.

6.4.5. Inestabilidad de taludes, deslizamientos y hundimientos

Las precipitaciones pueden afectar a la estabilidad de taludes y plataformas, tanto a causa de procesos erosivos como por saturación del suelo, favoreciendo los deslizamientos, sobre todo si alternan capas geológicas diferenciadas con un comportamiento diferente ante el agua. Un incremento en los episodios lluviosos intensos puede dar lugar a su vez a una mayor incidencia de problemas asociados a la estabilidad de taludes y plataforma (RAE 2011, Regmi & Hanaoka 2011, Nemry & Demirel 2012, EC 2013b, CEDEX et al. 2013).

En episodios lluviosos intensos los efectos sobre la estabilidad de la plataforma y los taludes suelen ser más intensos que las inundaciones en sí mismas. Cuando una infraestructura se inunda, sin daños estructurales, permanece cortada hasta la bajada del nivel del agua, procediéndose a su limpieza y reapertura. Sin embargo, cuando se producen deslizamientos o hundimientos, el servicio puede estar interrumpido durante meses, precisando obras mayores de reparación.

Puede diferenciarse varios tipos de problemas asociados a la estabilidad de los terrenos, en especial de las plataformas de infraestructuras lineales de transporte que puede verse influenciados por los cambios en las precipitaciones.

Hundimientos

Se producen como consecuencia de alteraciones en la plataforma de las infraestructuras, que hacen que cedan, deformándose. Los pequeños hundimientos por asientos del terreno son frecuentes, dando lugar a badenes en carreteras, que obligan a reducir la velocidad. No obstante, el colapso de una obra de drenaje en un episodio lluvioso intenso, por ejemplo, puede dar lugar a hundimientos de mucha mayor entidad (Figura 64), que obliguen a interrumpir el servicio.

Los ferrocarriles son mucho más sensibles a estos procesos, ya que cualquier pequeña deformación de la vía obliga a interrumpir el servicio.

Figura 64 Hundimiento en una carretera

Derecha e izquierda: N-420 en Fuencaliente, Ciudad Real. Fuente: CEDEX et al. (2013)

Socavamiento

El socavamiento es una rotura y desaparición de parte de la plataforma, producida como situación extrema de daños en un terraplén, por procesos erosivos o por un deslizamiento. Suele producirse cuando coinciden taludes de gran desarrollo o pendiente, materiales geológicos propensos, mala revegetación, problemas de diseño del drenaje y un fenómeno desencadenante (Figura 65).

Figura 65 Socavamiento de carreteras

Izquierda: N-330 en Castiello de Jaca, Huesca. Fuente: Radio Huesca (http://www.radiohuesca.com).
Derecha: Cotobade, Pontevedra. Fuente: La Voz de Galicia (http://www.lavozdegalicia.es)

Deslizamientos

Los deslizamientos son movimientos de una masa de suelo por pérdida de estabilidad. En estos movimientos, una determinada parte del terreno se vuelve inestable, deslizándose sobre otra parte que permanece estable. En función de la entidad de la masa inestable que desliza, la importancia del fenómeno puede ser mayor o menor. Pueden ocasionar la rotura de la plataforma de una infraestructura, o su ocupación, interrumpiendo el servicio (Figura 66).

Figura 66 Deslizamientos afectando a carreteras

Izquierda: Autopista en Taiwán. Fuente: National Airborne Service Corps (http://www.nasc.gov.tw)
Derecha: N-121A en Navarra. Fuente: Gobierno de Navarra (http://www.navarra.es)

Desprendimientos de rocas

Los desprendimientos son caídas de rocas a la plataforma de las infraestructuras al perder su coherencia o estabilidad (Figura 67). Es probablemente el problema más habitual relacionado con la estabilidad de terrenos, obligando a colocar mallas protectoras en taludes o defensas mayores. Tras episodios lluviosos intensos la estabilidad de taludes rocosos puede verse afectada, favoreciendo los desprendimientos.

Figura 67 Desprendimientos de rocas en carreteras

Izquierda: AG-55 Coruña-Carballo Fuente: La Opinión A Coruña (http://www.laopinioncoruna.es)
Derecha: A-23 en Nueno, Huesca Fuente: Noticias Huesca (http://noticiashuesca.com)

Erosión de taludes

La formación de plataformas para infraestructuras lineales de transporte exige la creación de taludes, de desmonte como resultado de la excavación, o de terraplén en zonas de aporte. En ambos casos son terrenos desnudos y con pendientes acusadas, según la tipología de materiales, en general iguales o superiores a 2H:1V. Los desmontes suelen ser compactos, al ser terreno natural que aflora con la excavación, mientras que los terraplenes son aportes, compactados pero no tan duros.

Desde el momento de la formación de taludes los procesos erosivos actúan de forma intensa, dando lugar a una erosión laminar y en regueros, que pueden llegar a ser profundos e incluso afectar a la estabilidad. Para evitarlo se debe proceder a su revegetación, mediante hidrosiembras y plantaciones, ambas operaciones necesarias y complementarias, ya que la siembra de herbáceas logra un control de la erosión superficial, y la plantación de leñosas aporta estabilidad al talud (Enríquez de Salamanca et al. 2004, Figura 68). No obstante, con frecuencia no se realiza la revegetación de los taludes, se hace de forma inadecuada, o se produce una elevada mortandad de plantas, no siendo resembrados ni repuestas las marras. Como consecuencia la erosión en taludes de infraestructuras es un común, sobre todo en zonas con clima mediterráneo, donde la restauración de la cubierta vegetal es más difícil.

El incremento de episodios lluviosos extremos puede incrementar los procesos erosivos en taludes, que a su vez originan problemas de saturación de drenajes e inestabilidad. En desmontes, una erosión mantenida en el tiempo puede acabar derivando en deslizamientos o desprendimientos, que pueden cubrir cunetas o incluso la plataforma. En terraplenes, la formación de cárcavas puede dar lugar a erosión remontante que lleve al descalce de la plataforma, y a su hundimiento.

Figura 68 Efectos de la revegetación en la erosión de los taludes de una carretera

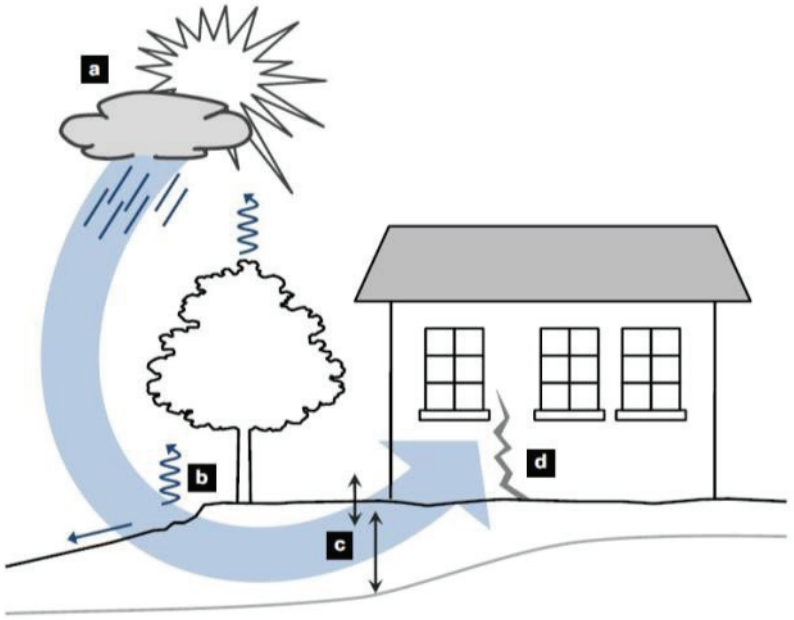
Dos terraplenes en la autovía A-52 en Zamora. Izquierda: Talud plantado pero no sembrado, con graves problemas de erosión. Derecha: Talud sembrado, y con caméfitos, sin problemas de erosión. Fuente: Autor

6.4.6. Cambios de humedad y subsidencia

Un elemento esencial en la estabilidad y resistencia de los suelos es la presencia de agua, tanto de capas freáticas como de humedad en el suelo. El incremento de sequías derivado de menores precipitaciones y mayores temperaturas, puede dar lugar a una desecación de los suelos, tanto por pérdida de humedad debida a la evaporación o evapotranspiración como por reducción en los niveles freáticos. El agua pérdida por el suelo se sustituye por aire, lo que reduce la capacidad portante, con riesgo de subsidencia, que dependerá del tamaño y forma de las partículas, la composición mineralógica de las arcillas, la geoquímica de los poros en las capas arcillosas o el agua en los acuíferos contiguos (Poland & Davis 1988). El riesgo de subsidencia es un impacto potencial asociado al cambio climático (TRB 2008, RAE 2011).

Este fenómeno se ha estudiado sobre todo en referencia a los daños producidos en edificaciones, por su importancia económica (Corti et al. 2009, SwissRe 2011). Dependiendo del tipo de suelo, litología y granulometría, las sequías pueden dar lugar a cambios de volumen, por contracción o expansión, lo que puede provocar daños importantes en los edificios (Figura 69). Corti et al. (2009) analizan los efectos de las sequías en Francia, detectando el doble de daños a edificios por subsidencia entre 1990 y 2002 que entre 1961 y 1990, lo que apunta a una influencia del cambio climático.

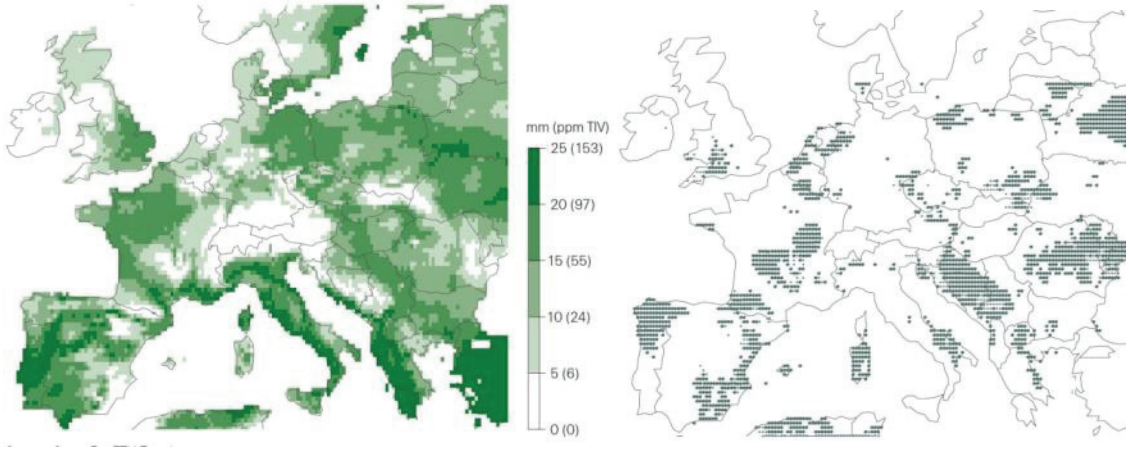
Figura 69 Daños a construcciones por subsidencia del terreno



Meteorología (a), hidrología del suelo (b), contracción e hinchamiento del suelo (c), daños a la construcción (d). Fuente: Corti et al. (2009)

El informe de SwissRe (2011) valora los daños experimentados en Francia a causa de la subsidencia y los extrapola al resto de Europa. Según sus resultados, en la actualidad gran parte de la región mediterránea está expuesta a daños en edificios por subsidencia, preveyéndose un 50% de incremento de costes en numerosas zonas, entre ellas el noroeste y este de la Península Ibérica (Figura 70).

Figura 70 Pérdidas por daños a edificaciones derivados de subsidencia del terreno



Izquierda: Perdidas actuales (mm: descenso del suelo; TIV: valor asegurado). Derecha: Zonas con un incremento previsto de pérdidas derivadas de subsidencia del suelo superior al 50% entre 2021 y 2040. Fuente: SwissRe (2011)

El mismo problema señalado para edificaciones afecta también a infraestructuras de transporte, causando daños como hundimientos o grietas, e incluso pudiendo generar la interrupción del servicio en ferrocarriles, sensibles a cualquier alteración en los raíles.

Dawson (2015) señala que el aumento de subsidencia afecta a las cimentaciones y la desecación de taludes a las defensas contra inundaciones, redes de transporte, cables y tuberías subterráneas, pilonas y mástiles de telecomunicaciones. Pritchard et al. (2013) destacan que casi todos los sistemas y estructuras relacionados con infraestructuras críticas en Reino Unido están en contacto con el terreno, pudiendo verse afectados por sus movimientos. En la Tabla 42 se señalan las principales causas de movimiento del terreno. El comportamiento del suelo está muy condicionado por su humedad, que es dependiente del clima, por lo que el cambio climático tiene el potencial de incrementar los riesgos geológicos relacionados con el suelo, y en especial con sus movimientos.

Tabla 42 Causas de movimiento del suelo

Material	Procesos
Arcilla	Contracción o expansión
Arena	Erosión
Turba	Contracción
Limo	Levantamiento por heladas
Suelos aluviales	Compresibilidad
Suelos con sulfatos	Movimiento del suelo

Fuentes: Dawson (2015), Pritchard et al. (2013)

6.4.7. Afección a equipamientos de vía

Los ferrocarriles precisan numeroso equipamiento para su operación, distribuido a lo largo de la vía, como subestaciones de tracción, señales luminosas y mecánicas, accionamientos electromecánicos de agujas, pasos nivel, sistemas electrónicos de detección de trenes, comprobadores eléctricos de posición de espadines, sistemas de de bloqueo automáticos de trenes, puestos de radio y repetidores o puestos de control. Cuanto mayor es la velocidad e intensidad de circulación mayor es el equipamiento.

Todo estos equipos son susceptibles de verse dañados durante fenómenos meteorológicos extremos, como precipitaciones intensas (Palin et al. 2013). En caso de daño al equipamiento de vía se produce una interrupción del servicio hasta que se repare, generando impactos sobre la movilidad y actividades económicas. En general el diseño del equipamiento de vía están adecuado a la intemperie, no siendo probable una afección frecuente, salvo en casos de inundación, comentados posteriormente.

6.4.8. Afección a la seguridad vial

Un aspecto muy importante asociado los fenómenos meteorológicos extremos es la afección a la seguridad. En ferrocarriles los efectos son menos apreciables, y de hecho los trenes solo circulan si existen garantías de seguridad. Sin embargo, en las carreteras el tráfico puede circular en cualquier situación meteorológica, en condiciones muy dispares de seguridad. Durante los episodios lluviosos el pavimento está mojado, reduciendo la adherencia, a lo que se suma una pérdida de visibilidad; cuando más intensa sea la precipitación más se agravarán estos fenómenos, especialmente en carreteras con firme asfáltico convencional, no drenante (RAE 2011, Regmi & Hanaoka 2011, Nemry & Demirel 2012, EC 2013b, Department for Transport 2014).

En caso de lluvias muy intensas, el bombeo de la plataforma, los sistemas de drenaje o una saturación de los firmes drenantes pueden llevara a una incapacidad para evacuar el agua caída, inundando la plataforma, con un incremento del riesgo de *aquaplaning* (CEDEX et al. 2013).

Koetse & Rietveld (2009) señalan, con datos procedentes de Estados Unidos, que los patrones apuntan a que las precipitaciones afectarán a la seguridad vial, incrementando la frecuencia de accidentes pero decreciendo su gravedad, y también incrementarán las congestiones, sobre todo en horas punta.

6.4.9. Mortandad en la vegetación

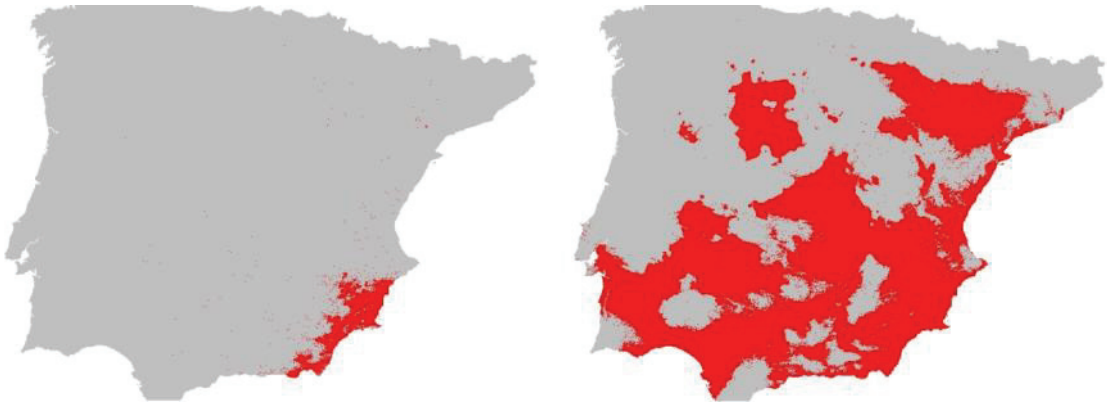
La restauración de la cubierta vegetal afectada por infraestructuras tiene objetivos estéticos, ecológicos y de control de la erosión. Es esencial frenar la erosión en taludes para permitir una evolución progresiva, combinando especies herbáceas y leñosas para una adecuada estabilidad (Enríquez de Salamanca et al. 2004). Esta restauración comprende: (i) Preparación y adecuación de los suelos y aporte de tierra vegetal; (ii) Implantación de vegetales mediante siembra, hidrosiembra o plantación; y (iii) Mantenimiento de la vegetación en los primeros años y reposición de marras.

El clima mediterráneo es poco favorable para el desarrollo de la vegetación, al tener el periodo vegetativo dividido en dos etapas, primavera y otoño, separadas por un periodo de sequía estival. Los vegetales pasan en pocos meses del invierno al periodo seco, debiendo adaptarse, acortando su ciclo vital (terófitos o plantas anuales) o con estrategias para sobrevivir con poca agua (cutículas, indumento, raíces profundas...).

El éxito de siembras y plantaciones depende del año meteorológico concreto en que se ejecuten; si la primavera es lluviosa y el verano no muy severo se logrará una buena supervivencia, mientras que en años secos la mortandad se dispara. Superar los primeros periodos estivales es crítico en plantaciones, ya que las plantas jóvenes son muy sensibles a la sequía; puede paliarse mediante riegos, aunque su efectividad varía según la frecuencia y dosis. Una vez que los vegetales han logrado establecerse, y sus sistemas radicales han profundizado, su capacidad de soportar la sequía es mayor, pero no total; en años muy secos llega a producirse mortandad de matorrales incluso rústicos.

Entre los efectos del cambio climático previstos para España se cuenta el incremento en las temperaturas estivales y una mayor incidencia de sequías. La situación de partida es ya difícil, con amplias zonas áridas en España (Enríquez de Salamanca 2009), como muestra el índice de aridez de Lang, que divide la precipitación anual entre la temperatura media anual (Figura 71). Un incremento en la aridez afectará a siembras y plantaciones realizadas en infraestructuras de transporte (CEDEX et al. 2013), generando mayores marras en los primeros años tras la plantación, e incluso en años posteriores si las condiciones son extremas.

Figura 71 Zonas áridas y desérticas en la Península Ibérica según el índice de Lang



Izquierda: Zonas desérticas (índice de Lang 0-20). Derecha: Zonas áridas (índice de Lang 20-40). Fuente: Enríquez de Salamanca (2009).

En función de las especies empleadas en la revegetación el efecto será más o menos intenso, siendo deseable emplear vegetales propios de la flora local (Enríquez de Salamanca et al. 2004). Los daños además pueden extenderse a vegetales ya asentados, si las condiciones climáticas son extremas. La pérdida de cubierta vegetal acarrea daños inducidos, asociados al incremento de los procesos erosivos (inestabilidad, aterramiento de drenajes) o estéticos y ecológicos (Tabla 43).

Tabla 43 Efectos inducidos por la pérdida de vegetación derivada del cambio climático

Presión climática	Efectos en la vegetación	Efectos inducidos
Incremento de temperaturas estivales y reducción en las precipitaciones	<u>Nueva vegetación implantada</u> - Mortandad en siembras e hidrosiembras - Incremento de marras en plantaciones <u>Vegetación existente</u> - Mortandad de especies alóctonas poco adaptadas - Mortandad de especies autóctonas en su límite ecológico - Mortandad de especies autóctonas bien adaptadas en sequías extremas - Desaparición de hemicriptófitos	- Erosión en taludes - Inestabilidad de taludes y deslizamientos - Afección a la estabilidad de la plataforma - Arrastre de tierras al sistema de drenaje y obstrucción - Arrastre de tierras a cauces - Impactos paisajísticos - Pérdida de hábitats para la fauna - Pérdida de sumideros de carbono

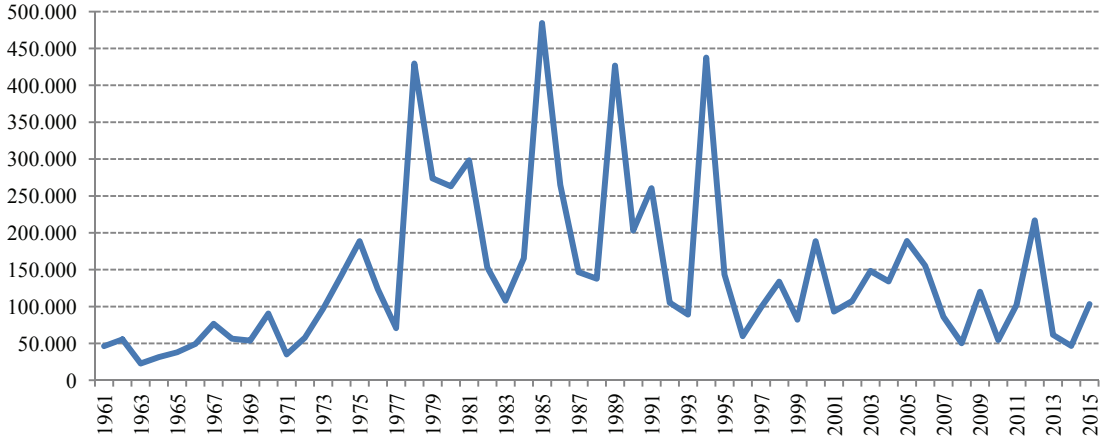
Fuente: Elaboración propia

6.4.10. Incendios forestales

Los incendios forestales son un mal endémico en España, y en general en gran parte de la región mediterránea. La existencia de un periodo estival seco, con elevadas temperaturas y bajas precipitaciones, hace que el riesgo de incendio se dispare; si a eso se unen las características de los combustibles, a menudo con alta inflamabilidad, y aspectos sociales propios de ciertas regiones, la situación se agrava.

Existen estadísticas de incendios desde 1961 (Figura 72, MAGRAMA 2016). Los resultados muestran una superficie media anual incendiada de cerca de 50 000 ha entre 1961 y 1971, que se dispara entre 1977 y 1995, alcanzando casi 485 000 ha en 1985, reduciéndose desde entonces, permaneciendo entre 50 000 y 200 000 ha anuales.

Figura 72 Superficie forestal incendiada (hectáreas) en España (1961-2015)



Fuente: Elaborado propia a partir de las estadísticas de incendios forestales de MAGRAMA (2016)

Los cambios previstos en el clima mediterráneo apuntan a un incremento de temperatura superior a la media europea, sobre todo en verano, y una reducción de la precipitación, más acusada cuanto más al sur, lo que implica mayor riesgo de incendios. Aparte de los impactos de los incendios forestales sobre la biodiversidad, el paisaje o el cambio climático, al destruir sumideros y liberar de forma súbita su stock de carbono, afectan a las infraestructuras de transporte (TRB 2008, EC 2013b, CEDEX et al. 2013).

El principal impacto se asocia con el corte de carreteras o líneas ferroviarias durante los incendios, interrumpiendo el servicio, afectando a la movilidad y generando con costes económicos y de oportunidad. En el caso de grandes incendios las interrupciones pueden durar varios días, con importantes pérdidas económicas. Por otra parte, en ocasiones el fuego alcanza las infraestructuras, causando daños materiales, sobre todo en señalización y equipamiento. En este sentido, las líneas ferroviarias son más sensibles, al disponer de un mayor equipamiento de vía, aunque en carreteras también se puede afectar iluminación o señalización.

6.5. Impactos asociados al viento

Los temporales de viento pueden generar diversos daños en las infraestructuras lineales de transporte. Nemry & Demirel (2012) señalan riesgos importantes por vientos entre los 45º y 55º de latitud Norte, con especial incidencia en las Islas Británicas. CEDEX et al. (2013) señalan que las previsiones actuales de cambio en el régimen e intensidad de vientos no son *a priori* significativas en España, aunque son inciertas.

En carreteras los daños principales se pueden producir sobre la señalización vertical y los paneles situados en pórticos y banderolas, que por su tamaño y ubicación suponen un riesgo importante para la circulación en caso de caída. El Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes, en concreto su revisión de 2015 (BOE 2015b), señala que el comportamiento estructural de las señales y carteles verticales de circulación y de pórticos y banderolas deberán cumplir lo indicado en diversas normas (UNE-EN 1090-1:2011+A1:2012, UNE-EN 12899-1:2009, UNE 135311:2013). La consideración de esta normativa aporta una elevada seguridad, aunque existes señalización antigua con menor seguridad.

En ferrocarriles los riesgos son mayores que en carreteras, debido a la superestructura, y en especial a la electrificación. Los vientos intensos pueden afectar a la catenaria (CEDEX et al. 2013) por su desplazamiento. Existe una estricta regulación y homologación, que define la velocidad máxima del viento que puede soportar la línea aérea de contacto; en caso de superarse debe interrumpirse el servicio. Vélez (2012) analiza el efecto del viento lateral en las catenarias de líneas de alta velocidad.

Un riesgo importante en carreteras y ferrocarriles es la caída de árboles o ramas, que puede afectar a señales, interrumpir la circulación viaria o ferroviaria, o afectar a la línea aérea de contacto (MFOM et. al 2013, Figura 73).

Figura 73 Caída de árboles en carreteras y ferrocarriles

Izquierda: Caída de árbol en una carretera en Asturias. Fuente: El Fielato (http://elfielato.es). Derecha: Caída de árbol sobre la catenaria en un ferrocarril en Cantabria. Fuente: El Diario Montañés (http://www.eldiariomontanes.es).

Otro elemento susceptible de verse afectado por vientos extremos son las pantallas acústicas colocadas en los márgenes de la infraestructuras lineales de transporte (CEDEX et al. 2013), en cuyo cálculo estructural y cimentación influye mucho esta variable. El viento aplica sobre las pantallas una carga que, al estar fijadas en su base, da lugar a un momento de vuelco, que tiende a hacerlas rotar. Ese esfuerzo afecta a la cimentación y a la estructura que une la barrera a ella (Fleming et al. 2011), en especial los pernios que unen los perfiles de soporte a las cimentaciones.

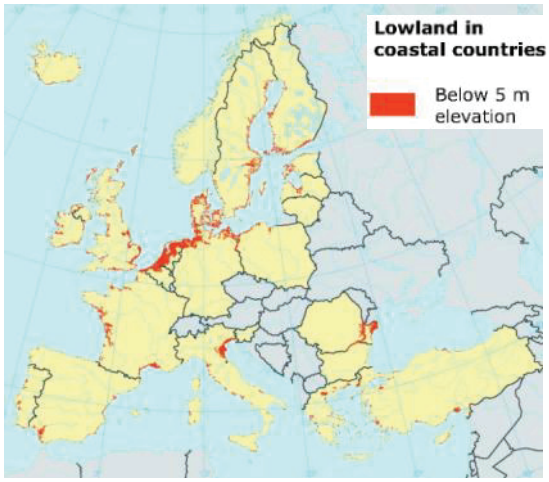
6.6. Impactos asociados al incremento del nivel del mar y fenómenos costeros

6.6.1. Inundación

Hay dos fenómenos que pueden causar la inundación de infraestructuras próximas a la costa, el incremento del nivel del mar y el incremento en la intensidad o frecuencia de marejadas ciclónicas, siendo realmente el riesgo de inundación una combinación de ambos factores (TRB 2008, RAE 2011, Regmi & Hanaoka 2011, EC 2013b, CEDEX et al. 2013, Department for Transport 2014, Dawson et al 2016).

La susceptibilidad de un territorio a estos impactos depende de la orografía, en concreto de la cantidad de territorio situado a un cota baja sobre el nivel de mar y por ello susceptible de inundarse, y de la exposición de los fenómenos costeros (Figura 74). España no resulta muy sensible en ninguno de estos parámetros. Orográficamente es un país elevado, y pese al gran número de playas que rodean el país las franjas litorales, entendidas como zonas prácticamente al nivel del mar, son muy estrechas en comparación con países del norte de Europa.

Figura 74 Zonas costeras europeas más vulnerables a la subida del nivel mar



Fuente: European Environmental Agency (EEA)

Figura 75 Riesgo de marejadas ciclónicas en Europa

Fuente: ESPON. Unión Europea

Con respecto a las marejadas ciclónicas, la ESPON (*European Observation Network, Territorial Development and Cohesion*) prevé que en Europa afectarán sobre todo al Mar del Norte, el Báltico y el norte del Golfo de Botnia, con zonas de riesgo localizadas en el Golfo de Génova, al norte del Mar de Liguria, el Golfo de Venecia al norte del Mar Adriático y la costa atlántica portuguesa. Nemry & Demirel (2012) destacan como zonas más problemáticas las costas de Alemania y Dinamarca (Figura 75).

En España no se identifican zonas de especial riesgo, aunque existen temporales ocasionales, sobre todo en el norte y noroeste.

En España existen 156 km de infraestructuras con riesgo de inundación temporal o permanente en caso de un incremento de 1 m del nivel de mar, o para marejadas ciclónicas con un periodo de retorno de 100 años (Nemry & Demirel 2012). Se trata de una cifra moderada teniendo en cuenta la longitud de costas, muy inferior a otros países europeos (Tabla 44). Considerando la relación entre infraestructuras en riesgo y longitud de costa por países (r), se distinguen tres grupos: (i) Riesgo bajo (r<0,04), Estonia, Grecia, Reino Unido, España, Irlanda, Suecia, Dinamarca, Rumania y Portugal; (ii) Riesgo medio (r 0,1-0,3), Francia, Letonia, Polonia, Italia, Eslovenia y Alemania; (iii) Riesgo extremo (r>3), Bélgica, Lituania y Países Bajos. El riesgo más intenso, porcentual y por longitud total, se da en los Países Bajos, al estar situados en gran parte por debajo del nivel del mar. España presenta un valor muy moderado de riesgo.

Tabla 44 Longitud de infraestructuras en zonas de riego de inundación por el mar en Europa

País	Longitud de infraestructuras en riesgo	Longitud de costa del país	Ratio infrastr. riesgo / longitud de costa
Alemania	705 km	2 389 km	0,30
Bélgica	218 km	66 km	3,30
Dinamarca	163 km	7 314 km	0,02
Eslovenia	9 km	47 km	0,19
España	156 km	10 663 km	0,01
Estonia	1 km	3 794 km	0,00
Francia	529 km	5 500 km	0,10
Grecia	69 km	14 880 km	0,00
Irlanda	17 km	1 448 km	0,01
Italia	1 412 km	7 600 km	0,19
Letonia	61 km	531 km	0,11
Lituania	382 km	99 km	3,86
Países Bajos	1 403 km	451 km	3,11
Polonia	73 km	491 km	0,15
Portugal	63 km	1 793 km	0,04
Reino Unido	124 km	12 429 km	0,01
Rumania	6 km	225 km	0,03
Suecia	39 km	3 218 km	0,01

Fuente: Nemry & Demirel (2012) y elaboración propia

Dawson et al. (2016) analizan una línea ferroviaria costera en Inglaterra, preveyendo un incremento del 1 170% en el número de días con restricciones en 2100 con un horizonte de fuerte incremento del nivel del mar (0,55-0,81 m). Los mayores costes en este caso se producirían en caso de ser preciso el desvío de la línea. Como se observa en la tabla anterior, Reino Unido no se cuenta entre los países especialmente sensibles, por lo que para los países más vulnerables la magnitud del problema puede ser muy significativa, tanto en la afección a la movilidad como en los costes para mantener el servicio, e incluso posibles impactos ambientales inducidos si fuera preciso reubicar las infraestructuras.

6.6.2. Daños en infraestructuras y equipamiento

Aparte de los problemas de inundación, las marejadas ciclónicas y temporales marítimos pueden dañar las infraestructuras situadas en zonas costeras y todo su equipamiento, sobre todo debido a la fuerza del viento y del oleaje, y a las inundaciones. Como se ha señalado el riesgo de marejadas ciclónicas en España es bajo, aunque existen temporales esporádicos que pueden llegar a tener mucha virulencia (Figura 76).

Figura 76 Temporal en Tazones (Asturias)

Fuente: El Comercio (http://www.elcomercio.es)

A diferencia del incremento del nivel del mar, que es un proceso lento pero permanente, las inundaciones derivadas de marejadas ciclónicas y tormentas costeras son súbitas y temporales, pudiendo causar grandes daños en un corto plazo de tiempo.

6.6.3. Desprendimientos y deslizamientos

El litoral está sometido a la acción erosiva del mar, que depende de la mareas y de la intensidad del oleaje. Un incremento en la agresividad de los fenómenos costeros puede incrementar los procesos erosivos, llegando a afectar a infraestructuras próximas a la costa. Este fenómeno no se incluye entre los impactos más importantes del cambio climático sobre las infraestructuras en Europa; aunque hay casos llamativos como la costa Este de Inglaterra (Figura 77 izquierda). En otras regiones del mundo, hay casos muy notables en todo el Caribe (Figura 77 derecha), en las costas del Pacífico de Perú, o en numerosas islas del Pacífico, por ejemplo.

Figura 77 Carreteras afectadas por erosión costera

Izquierda: Yorkshire, Inglaterra. Fuente: http://epoty.org. Derecha: Loíza, Puerto Rico. Fuente: Noticias PRTV (http://noticiasprtv.com)

6.7. Retos en la integración de los impactos del cambio climático en la EIA

La evaluación de los impactos del cambio climático sobre las infraestructuras de transporte requiere considerar tres áreas (Jaroszweski et al. 2014):

- Cómo afecta actualmente la climatología a las infraestructuras y a su operación.
- Cómo el cambio climático puede alterar frecuencia y magnitud de esos impactos.
- Cómo el desarrollo tecnológico y socioeconómico pueden configurar las redes de transporte en el futuro, mejorando o exacerbando los efectos del cambio climático

La EIA de infraestructuras de transporte debería evaluar estos impactos, según los escenarios previsibles, de manera que sirva de base para la definición de las medidas de adaptación necesarias, que deberían integrarse en el propio diseño de los proyectos. Hasta el momento esta integración no se ha realizado, el menos en los proyectos de infraestructuras sometidos a EIA por el Estado (Enríquez de Salamanca et al. 2016).

Un aspecto importante a considerar es el análisis de los impactos del cambio climático en infraestructuras de transporte existentes, y en consecuencia no sometidas a EIA. Precisamente estas infraestructuras, más antiguas, a menudo se han diseñado siguiendo normas o criterios que no se adaptan a las actuales previsiones climáticas, siendo en consecuencia más vulnerables. Una solución podría ser acometer proyectos de evaluación de impactos del cambio climático y adaptación en infraestructuras existentes, y someterlos a EIA, lo que requeriría un cambio legislativo para incluir este supuesto en la normativa.

6.8. Discusión y conclusiones

Los principales impactos derivados del cambio climático sobre las infraestructuras de transporte se relacionan con el incremento en la frecuencia de huracanes, a menudo con efectos catastróficos y la subida de las temperaturas en el Ártico, causando descongelación del permafrost y deshielo del casquete polar, que junto al calentamiento del mar causa un incremento en su nivel. De estos efectos, solo el último afecta a España, y no de forma excesiva, ya que al ser un país elevado solo hay 156 km de infraestructuras en riesgo para 10 663 km de costa (Nemry & Demirel 2012).

Los principales impactos derivados del cambio climático en España son un incremento de las temperaturas máximas estivales y las olas de calor, una reducción de las precipitaciones medias, mayor cuanto más al sur, y un aumento en su irregularidad y, con una probabilidad menor, un riesgo de incremento de vientos y de la agresividad de fenómenos costeros. En consecuencia, el gran impacto será calor y sequía estival.

Estos impactos tendrán una notable influencia en sectores como la agricultura, el abastecimiento de agua, el potencial hidroeléctrico e incluso el turismo, pero se consideran menos importantes en las infraestructuras de transporte, que no se califica como sector prioritario de cara a la adaptación (Crespo et al. 2011). Muchos de estos impactos suponen un incremento en la frecuencia de fenómenos que ya se producen habitualmente, como el calor estival, la sequía o la irregularidad pluviométrica, rasgo definitorio del clima mediterráneo.

No obstante, la incidencia de estos impactos en las infraestructuras no debe minusvalorarse; se diseñan para hacer frente a la irregularidad natural del clima, y a una cierta recurrencia de fenómenos extremos, pero el cambio climático puede exacerbar la variabilidad y modificar la intensidad o frecuencia de ciertos riesgos. En la ingeniería son esenciales los conceptos de riesgo y garantía, inverso uno de otro, expresiones de la probabilidad de ocurrencia de fenómenos adversos que afecten a la infraestructura o, por el contrario, de la probabilidad de que no se vea afectada. Un cambio en la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno varía tanto el riesgo como la garantía.

La importancia de estos impactos dependerá del elemento de la infraestructura afectado, el tipo de afección y las consecuencias. Las temperaturas máximas y olas de calor afectarán a los firmes de carreteras, deteriorándolos de forma acelerada, pero en general no implicará una interrupción del servicio. El pandeo de raíles por temperaturas elevadas en ferrocarriles afecta a la velocidad de circulación, y podría ser crítico en líneas de alta velocidad. Por el contrario, la previsión de inviernos más suaves supondría menores problemas de vialidad invernal y menores costes de mantenimiento.

Más notables pueden ser los problemas hidrometeorológicos, sobre todo los asociados a la irregularidad de las precipitaciones, que puede acrecentar las crecidas súbitas, provocando inundaciones, desbordamiento de drenajes, deslizamientos y socavamiento de puentes, un problema este último que se prevé importante en España.

La magnitud de estos impactos presenta una gran incertidumbre, dependiendo de los esfuerzos a corto, medio y largo plazo por mitigar la contribución al cambio climático, en especial por recortar las emisiones de GEI. Por ejemplo, como se señaló en el capítulo introductorio, el incremento de la temperatura media en España en 2081-2010 puede variar desde 0,3-1,7ºC en un escenario favorable (RCP2.6) a 2,6-4,8ºC en uno desfavorable (RCP8.5). Como consecuencia, no pueden evaluarse los impactos del cambio climático en general, sino que es preciso hacerlo para escenarios concretos.

Los impactos del cambio climático sobre las infraestructuras de transporte son conocidos, aunque el conocimiento está disperso, recogiéndose de forma sistemática en este capítulo. Es preciso incorporarlos a la EIA, siendo lo más delicado establecer el escenario de referencia, ya que previsiones optimistas infravaloran los riesgos, mientras que escenarios pesimistas tendrán repercusiones económicas en el diseño.

7 Adaptación al cambio climático de las infraestructuras lineales de transporte

Objetivos del capítulo

El cambio climático implica modificaciones en los parámetros meteorológicos normales y efectos inducidos como sequías, deshielo o incremento del nivel del mar. Si se mantienen los criterios tradicionales de diseño, construcción y mantenimiento de las infraestructuras de transporte, estas modificaciones pueden producir daños imprevistos, acortar su vida útil o afectar su funcionalidad. Por ello, es preciso adoptar medidas de adaptación acordes con los escenarios previsibles. En regiones vulnerables al cambio climático existe conciencia sobre la necesidad de adaptar las infraestructuras, pero en España se considera un sector poco sensible. Para entender los impactos del cambio climático y la necesidad de adaptación, se ha incluido un caso desarrollado en San Vicente y las Granadinas, estado insular donde dichos impactos ya se están sintiendo (Enríquez de Salamanca 2014b, Enríquez de Salamanca & Carrasco 2015).

Los análisis sobre adaptación al cambio climático en infraestructuras son poco sistemáticos, limitándose a citar las medidas más destacadas de forma superficial. Por ello, resulta muy recomendable una revisión global y sistemática, que profundice en cada una de las medidas, a partir de fuentes muy dispersas. Este es el objeto esencial de este capítulo, cuyo resumen se incluye en Enríquez de Salamanca et al. (2016b). Las medidas de adaptación a menudo están más relacionadas con el diseño de la infraestructura que con su evaluación ambiental. Sin embargo, también hay medidas de adaptación *ex situ,* que superan el propio diseño. Además, es esencial conocer las medidas de adaptación para valorar sus potenciales impactos, aspecto ignorado en el debate académico y técnico, al que se ha dedicado el siguiente capítulo.

Se ha incorporado un apartado sobre retos para la incorporación de la adaptación a la EIA, donde se evidencian las principales carencias, disfuncionalidades y lagunas, así como una discusión y conclusiones globales del capítulo.

Publicaciones

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016b. El cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras de transporte: contribución, impactos, mitigación y adaptación. *VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2-3 de marzo de 2016.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2015. Evaluación ambiental en proyectos de adaptación al cambio climático en San Vicente y las Granadinas. En: Casermeiro MA, Vázquez A (Eds.) *Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental. Nuevos retos de la Evaluación Ambiental*. Madrid, 11, 12 y 13 de marzo de 2015. Libro de actas (VIII CONEIA). Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental, Madrid, pp. 365–369.

Enríquez de Salamanca Á. 2014b. Reducción de la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. El caso de San Vicente y las Granadinas. *Foresta* 62: 18–29.

Enríquez de Salamanca Á. 2014c. *Environmental Management Plans. Disaster Vulnerability Reduction Project. South River. Warrawarrow River. Fenton to Green Hill Road.* INHA-Vigiconsult-Euroconsult-Government of St Vincent and the Grenadines-World Bank. Inédito.

7.1. Consideraciones generales

7.1.1. Adaptación a riesgos climáticos recurrentes y al cambio climático

La adaptación no es un proceso exclusivamente ligado al cambio climático. El clima es variable, con fenómenos extremos capaces de afectar a los sistemas naturales y humanos, que exigen una adaptación. Los sistemas naturales desarrollan estrategias de adaptación autónomas, pero en los sistemas humanos la adaptación depende de la acción antrópica. Aunque algunas respuestas adaptativas son espontáneas, como la migración en caso de sequía, la mayoría son planificadas, y exigen adaptar sistemas como edificaciones o infraestructuras a las amenazas climáticas. El grado de adaptación depende no solo se las amenazas climáticas, sino también de la riqueza de las regiones; los países desarrollados están mejor adaptados a sus riesgos naturales.

En la práctica, los efectos del "cambio climático" debido a la influencia humana, o al "clima cambiante", debido a su irregularidad natural son muy similares (Kiem & Austin 2013), y la frontera entre las medidas de adaptación al cambio climático y a los riesgos hidrometeorológicos recurrentes no está clara (Cox et al. 2015). De hecho, la mayoría de medidas de adaptación al cambio climático se basan en fortalecer medidas tradicionales de adaptación a la irregularidad del clima.

7.1.2. Características de la adaptación de las infraestructuras de transporte

Existen diferentes clasificaciones de la adaptación en la literatura, atendiendo a la intención, tiempo, alcance temporal, alcance espacial, forma, dureza, estrategia, modo de acción y efectos (Tabla 45).

Tabla 45 Tipos de adaptación

Tipos		Atributos
Intención [1]		Autónoma, espontánea o planificada (Au), planificada, deliberada o intencional (Pl)
Momento [1, 2, 3]		Anticipatoria, proactiva o *ex ante* (An), concurrente (Co), responsiva, reactiva o *ex post* (Re)
Ámbito temporal [1]		Corto plazo (St), largo plazo (Lt)
Ámbito espacial [1]		Localizada (Lo), extensa (Wi)
Forma [1, 4]	Planificación	Planificación territorial (Sp), financiera (Fi)
	Comportamental	Institucional (It), informacional (If), educativa (Ed), comportamental (Be)
	Actuación	Tecnológica (Te), ingeniería y construcción (En), basada en ecosistemas (Eb)
Dureza [1]		Dura (Ha), suave (So)
Estrategia [5, 6, 7]		Protección o defensa (Pr), retirada o desplazamiento (Rt), acomodación (Ac)
Modo de acción [8]		Reducir la sensibilidad (Se), alterar la exposición (Ex), incrementar la resiliencia (Rs)
Efectos [7, 9]		Incremental o preservacionista (Ic), transformacional (Tr)

Fuente: Elaboración propia. [1] Smit et al. (2000); [2] Berrang-Ford et al. (2011); [3] Hallegatte et al. (2011); [4] IPCC (2014); [5] Cendrero et al. (2005); [6] UNFCCC (2006); [7] Ruhl (2009); [8] Wreford et al. (2010); [9] Field et al. (2014)

En las infraestructuras de transporte las medidas de adaptación son siempre planificadas, no existiendo una adaptación espontánea. La adaptación puede producirse de forma anticipatoria, antes de que ocurra ningún impacto, concurrente con el fenómeno climático o como respuesta a un fenómeno adverso, para reparar daños. Lo más habitual es que la respuesta adaptativa se desate como consecuencia de un incremento en la frecuencia de fenómenos adversos, es decir, cuando el riesgo en la infraestructura y su vulnerabilidad crecen. Respecto al ámbito temporal la adaptación puede hacerse a corto, medio o largo plazo; una reparación de emergencia o la sustitución de un firme dañado son adaptaciones a corto o medio plazo, mientras que un redimensionamiento de obras de drenaje sería una adaptación a largo plazo.

En cuanto al ámbito espacial, la inmensa mayoría de medidas de adaptación están localizadas en la infraestructura o su entorno próximo, aunque no tendría por qué ser así. Por ejemplo, la adaptación a fenómenos como las inundaciones debería abordarse a nivel de cuenca, y no limitarse a adecuar drenajes o reforzar cimientos.

La adaptación se puede acometer por medio de la planificación, por cambios comportamentales o por actuaciones concretas. La adaptación planificada es la más deseable, pero exige un esfuerzo anticipatorio y colaboración entre administraciones, ya que un organismo responsable de infraestructuras difícilmente puede intervenir en la gestión de cuencas o en la ordenación territorial, por ejemplo. La actual planificación de grandes infraestructuras estatales se hace por medio de estudios informativos que permiten una razonable consideración de los riesgos ambientales, incluidos los derivados del cambio climático, aunque solo se puede minimizar su incidencia en la infraestructura, pero no actuar sobre ellos en su origen.

La planificación de infraestructura tiene una componente financiera esencial, ya que precisan importantes inversiones para su construcción y mantenimiento. La crisis económica iniciada en 2008 ha supuesto una fuerte disminución en la inversión en infraestructuras, lo que se traduce también en una menor capacidad inversora para la adaptación al cambio climático, con consecuencias como un progresivo deterioro de los firmes en las carreteras. En consecuencia, las posibilidades de adaptación dependen en gran medida de la capacidad inversora de las administraciones públicas.

La adaptación basada en el comportamiento tiene aún un escaso recorrido. Comprende acciones institucionales y medidas de información y educación para lograr cambios comportamentales positivos para afrontar el cambio climático.

Existe una excesiva tendencia a asociar adaptación con actuaciones concretas, en especial obras de ingeniería como reforzar cimientos, ampliar drenajes o puentes, elevar plataformas o rehabilitar firmes. Esto se debe a la mayor visibilidad frente a otras medidas, y a razones competenciales, ya que esas actuaciones son responsabilidad de los organismos gestores de infraestructuras, pudiendo acometerlas sin complicaciones.

Un aspecto muy poco tratado en las infraestructuras de transporte es la adaptación basada en ecosistemas. A menudo es mejor ecológica y económicamente dejar que los ríos se desborden o las costas se muevan, en lugar de tratar de domarlas para que no afecten a las infraestructuras. Soluciones como una retirada de zonas de riesgo, o diseños adaptados a fenómenos adversos (como carreteras inundables) pueden ser una solución mejor que grandes obras de defensa o paso.

Muy relacionado con lo anterior está la dureza a la adaptación. La adaptación "dura" se basa principalmente en la ejecución de obras, o la aplicación de tecnología, mientras que la "suave" se apoya más en cambios comportamentales o está basada en los ecosistemas.

Las estrategias de adaptación son la protección frente a los fenómenos climáticos adversos (p.e. defensas costeras y de ríos o estabilización dura de taludes), la acomodación, tratando de adaptar la infraestructura a las condiciones climáticas (p.e. vados inundables, limitaciones de tránsito en olas de calor) o la retirada, reubicando la infraestructura en un lugar más seguro o abandonándola.

El modo de acción de la adaptación también es variable. Se puede reducir la sensibilidad (p.e. especies más rústicas en taludes, firmes más resistentes), alterar la exposición (p.e. defensas fluviales o costeras) o incrementar la resiliencia (p.e. drenajes mayores). Las diferencias no son estrictas, y una misma medida puede responder a varios modos de acción. Con respecto a los efectos de la adaptación, de acuerdo con el IPCC, se considera incremental la que mantiene la esencia e integridad de un sistema (p.e. mantener ubicación y estructura de la infraestructura), y transformacional la que cambia un sistema en respuesta al clima y sus efectos (p.e. reubicar la infraestructura).

La inmensa mayoría de medidas de adaptación en infraestructuras son planificadas, basadas en actuaciones concretas, a menudo estructurales, para incrementar la resiliencia, y en general una vez se han producido daños. Estas medidas se pueden acometer en la fase de diseño, cuando están construidas o de forma recurrente a lo largo del tiempo. Sería preciso completar estas medidas con otras anticipatorias basadas en un enfoque ecosistémico y con cambios comportamentales.

7.1.3. Vida útil de las infraestructuras, mantenimiento y adaptación

No es posible entender la adaptación al cambio climático en infraestructuras de transporte sin considerar varios puntos de partida: la larga vida útil de sus componentes y de la infraestructura en su conjunto; un diseño adaptado a la irregularidad del clima; y un mantenimiento periódico para reemplazar elementos afectados y prolongar la vida útil del conjunto. En consecuencia, son elementos adaptados a la irregularidad del clima, aunque puede que no a los nuevos escenarios inducidos por el cambio climático.

Vida útil de las infraestructuras

Las infraestructuras lineales de transporte son construcciones destinadas a perdurar en el tiempo. Aunque en el diseño se considera un año horizonte, en carreteras de 20 años desde la puesta en servicio (BOE 2016b), este valor se establece a efectos de prever el tráfico, pero no es su vida útil. Nemry & Demirel (2012) señalan la vida útil para diferentes elementos que componen las infraestructuras de transporte (Tabla 46).

Tabla 46 Vida útil de elementos de las infraestructuras de transporte

Elemento	Vida útil
Carreteras	Más de 100 años (a veces 30 a 40 años)
Ferrocarriles (vías)	50 a 100 años
Puentes	50 a más de 100 años
Túneles	50 a 100 años
Firme de las carreteras	7 a 25 años de ciclo de mantenimiento
Cunetas	20 a 100 años
Calzadas en zonas costeras bajas	20 a 100 años
Drenaje superficial	20 años

Fuente: Elaboración propia con información de TRB (2008) y Nemry & Demirel (2012)

Con independencia de la vida útil de los diferentes elementos, que exigen trabajos de reposición, las infraestructuras lineales de transporte se diseñan para perdurar en el tiempo, aunque vayan modificándose o actualizándose. De hecho, buena parte de las actuales carreteras son caminos tradicionales de hace siglos. En la práctica, una infraestructura lineal de transporte solo se abandona cuando es reemplazada por otra, o cuando ha perdido su uso, lo que ocurre rara vez.

En las carreteras, es muy raro que queden fuera de uso, ya que aunque se construya una nueva vía con mejores condiciones de diseño, las antiguas carreteras se mantienen para tráfico local o acceso a fincas colindantes. Solo quedan fuera de uso tramos de antiguas carreteras que no dan acceso a ninguna propiedad, como ocurre en algunas rectificaciones de curvas, o tramos peligrosos. Pero en la práctica, la inmensa mayoría de carreteras se mantiene a lo largo del tiempo, con mayor o menor tráfico.

En ferrocarriles es más habitual que un tramo quede sin servicio, ya que no existe la necesidad de dar acceso a propiedades. Una línea ferroviaria puede quedar sin servicio por construirse otra con mejores prestaciones, o por resultar deficitaria, suspendiéndose las circulaciones; de hecho, en España hay más de 6 000 km de vías fuera de servicio (MFOM 2014). No obstante, el suspender la circulación ferroviaria no implica necesariamente abandonar el mantenimiento, ya que si la infraestructura se degrada, sería imposible cualquier uso futuro, perdiéndose un activo.

En consecuencia, una infraestructura de transporte, aunque requiera a lo largo de su vida útil inversiones para el mantenimiento, reforma, mejora o ampliación, en general está pensada para perdurar en el tiempo, sin fecha predeterminada de abandono.

Mantenimiento de las infraestructuras

Las infraestructuras de transporte se diseñan para hacer frente a un posible estrés a lo largo de su vida útil, incluyendo los fenómenos meteorológicos extremos tal y como se conocen históricamente. Además, se prevé un mantenimiento regular para mantener la capacidad de resistencia a las condiciones climáticas.

El mantenimiento regular incluye trabajos de limpieza, conservación, reparación, rehabilitación y sustitución ordinarios y previsibles (Tabla 47), que desarrollan de forma continuada los organismos responsables de las infraestructuras, de forma directa o mediante contratas.

Tabla 47 Operaciones de mantenimiento ordinario en carreteras y ferrocarriles

Elemento	Carreteras	Ferrocarriles
Plataforma	Limpieza de vertidos accidentales Limpieza de residuos Vialidad invernal: fundentes, quitanieves Reparación firmes: bacheo, grietas, blandones Reposición periódica de firmes	Limpieza de residuos Limpieza y depuración del balasto
Superestructura y electrificación	Mantenimiento del alumbrado Mantenimiento instalaciones eléctricas	Nivelación y alineación de la vía Amolado y estabilizado Engrasado de aparatos de vía Mantenimiento de instalaciones eléctricas Mantenimiento de la catenaria
Obras de tierra	Conservación de obras de tierra (reperfilado, rellenos) Estabilización de taludes (escolleras, gunitados, muros)	
Drenaje y obras de fábrica	Limpieza de cunetas y obras de fábrica Limpieza de muros y obras de fábrica Reparación del drenaje y obras de fábrica	
Vegetación	Resiembras y reposición de marras Eliminación de vegetación en márgenes Podas y apeos en mediana y márgenes	
Márgenes	Limpieza de residuos en márgenes Desbroce de márgenes Reparación y reposición de cerramientos	
Túneles	Conservación de túneles e instalaciones asociadas	
Señalización, seguridad y comunicaciones	Reposición de marcas viales Mantenimiento de señalización vertical Mantenimiento de elementos de seguridad Mantenimiento de equipos de comunicaciones Mantenimiento de equipos de vigilancia Reparación de daños causados por accidentes	Mantenimiento de la señalización Mantenimiento de equipos de seguridad Mantenimiento de equipos de comunicaciones Mantenimiento de equipos de vigilancia
Elementos complementarios	Conservación de elementos complementarios Reparación de daños causados por accidentes	
Estaciones y centros de control	Mantenimiento de edificios Mantenimiento de instalaciones	

Fuente: Elaboración propia

Aparte de este mantenimiento ordinario, existen labores de reparación o rehabilitación extraordinarias, que pueden deberse a daños mayores inesperados (p.e. inundaciones, deslizamientos, incendios) o bien por alcanzar algunos elementos su vida útil (p.e. cambio de luminarias, estructuras, señales, raíles o traviesas).

La reposición periódica de firmes de carreteras y de marcas viales se sitúa entre ambos tipos de operaciones de conservación, ya que son reposiciones debidas a que el firme o las marcas alcanzan su vida útil, pero dada su frecuencia y previsibilidad a menudo se incluyen entre las operaciones de mantenimiento ordinario.

Mantenimiento y adaptación

El cambio climático puede dar lugar a nuevos impactos, lo que en España se limita a la subida del nivel del mar, o más habitualmente a exacerbar los fenómenos meteorológicos extremos, variando su intensidad o frecuencia, modificando con ello las necesidades de mantenimiento, y la vida útil de ciertos elementos de la infraestructura.

Como consecuencia los límites entre las medidas de mantenimiento ordinarias, las medidas de rehabilitación debidas al agotamiento de la vida útil de partes de la infraestructura y la adaptación al cambio climático son muy difusos. De hecho, en muchos casos se está ya realizando una adaptación al cambio climático sin tener conciencia de ello, por ejemplo al aumentar la frecuencia de labores de mantenimiento. Un ejemplo son los firmes de carreteras, que se reponen periódicamente; el cambio climático puede acelerar su deterioro, obligando a adoptar un periodo más corto de reposición, pero no sería una nueva medida, sino un cambio en la frecuencia de una operación habitual de mantenimiento.

Más complejo aún es el límite entre mantenimiento, reposición y adaptación a largo plazo, cuando los materiales o elementos se acercan al final de su vida útil. Por ejemplo, una estructura metálica tiene una determinada vida útil, llegada la cual debería sustituirse. El cambio climático puede dar lugar a un incremento de impactos meteorológicos (p.e. mayores temperaturas o vientos) que den lugar a sobreesfuerzos, que acorten esa vida útil; pero si la duración prevista es, por ejemplo, de 50 o más años, determinar si se ha modificado su vida útil a causa del cambio climático es muy difícil.

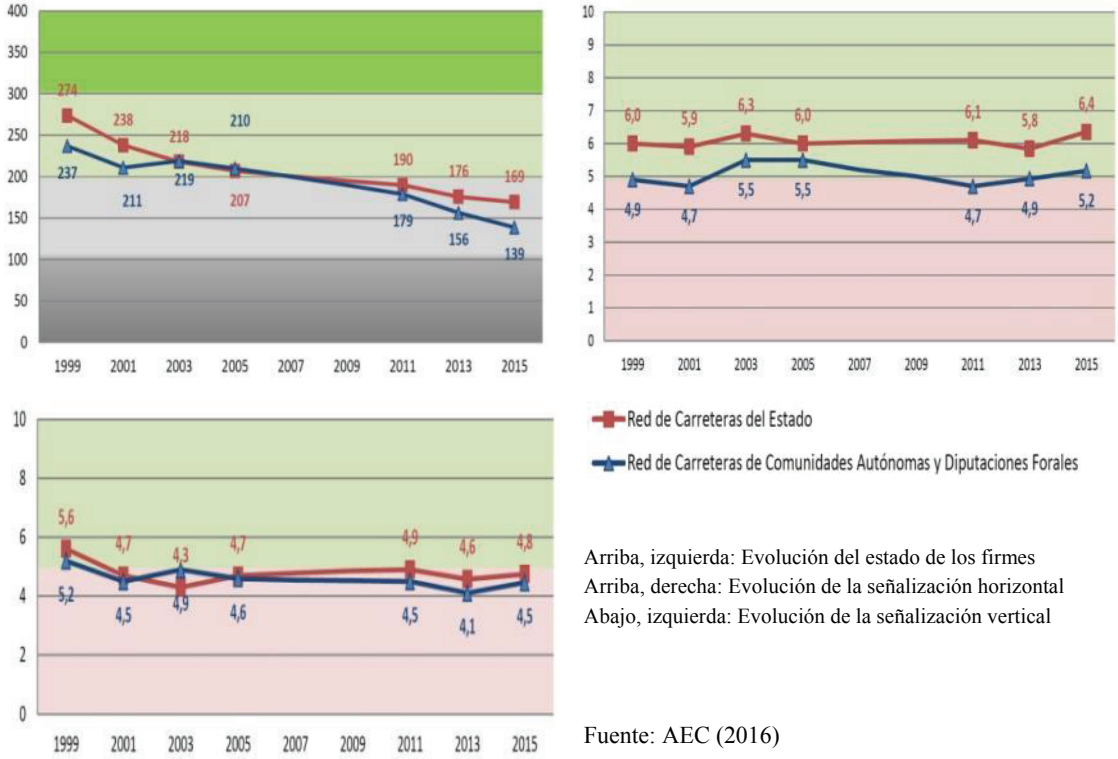
Estado de conservación de las infraestructuras

Carreteras

El estado de conservación de las carreteras ha sido abordado por diferentes agentes como la Asociación Española de la Carretera (AEC), la Asociación Española de Fabricantes de Mezclas Asfálticas (ASEFMA), la Asociación de Conservación y Explotación de Carreteras (ACEX) o Automovilistas Europeos Asociados, apareciendo en la prensa con frecuencia durante los últimos años, sobre a partir de 2012.

En la XI Jornada Nacional de ASEFMA celebrada en mayo de 2016 se expuso que el estado de las carreteras era de suspenso, tanto para autovías como para carreteras convencionales, planteando realizar una desafectación de los impuestos derivados del uso de la red viaria para garantizar un presupuesto suficiente para conservación. El trabajo más sistemático sobre el tema son los informes anuales de la AEC, sobre estado de la red viaria, el último de 2016 (AEC 2016). Este informe destaca el deterioro acelerado de los pavimentos en las redes de carreteras del Estado y autonómicas, con calificación deficiente en ambos casos. La señalización vertical obtiene calificación deficiente (4,8 para carreteras del Estado y 4,5 para autonómicas) y las marcas viales un aprobado (5,5), con ligera mejoría desde el anterior informe (Figura 78). En consecuencia existe un déficit de inversión en la actualidad, que se vería muy incrementado si se quisiera asumir la adaptación global al cambio climático.

Figura 78 Evolución del estado de las carreteras 1999-2015



Arriba, izquierda: Evolución del estado de los firmes
Arriba, derecha: Evolución de la señalización horizontal
Abajo, izquierda: Evolución de la señalización vertical

Fuente: AEC (2016)

Ferrocarriles

En los ferrocarriles el mantenimiento es más exigente ya que influye en la seguridad de circulación, determinada por el material móvil, los sistemas de seguridad y la infraestructura. El nivel de calidad de la vía está relacionado con la velocidad de circulación, siendo muy alta para circular a más de 250 km/h, como es el caso de la red de alta velocidad (MFOM 2014). La optimización de inversiones en conservación y mantenimiento pasa por evaluar el grado importancia estratégica y utilización de la red, para establecer prioridades.

El informe de la comisión técnico-científica para el estudio de mejoras en el sector ferroviario (MFOM 2014) recomienda reducir la Red Ferroviaria de Interés General del Estado gestionada por ADIF, que debería centrarse en las rutas estratégicas para la comunicación del país, con mayor grado de utilización, de comunicación entre varias comunidades autónomas o internacionales, y para el resto proceder a su cierre, traspaso a las comunidades autónomas o asignación a la iniciativa privada, con obligaciones de mantenimiento de la infraestructura.

7.1.4. Adaptación y toma de decisiones

Bases para el diseño de la adaptación

La adaptación es un proceso complejo y costoso, que puede tener grandes ventajas pero a su vez puede dar lugar a problemas, sociales, ambientales o económicos. Por ello, es preciso partir de unos criterios básicos, para evitar efectos indeseados. De acuerdo con DEFRA (2011), un enfoque de adaptación exitoso debe ser: (i) Eficaz, la decisión que se tome debería reducir la vulnerabilidad al cambio climático; (ii) Eficiente, los beneficios de la adaptación deben ser superiores a los costes; (iii) Equitativo, se deben tener en cuenta las consecuencias distributivas asociadas a las medidas de adaptación; (iv) Basado en evidencias, la decisión debe estar avalada por las investigaciones más recientes, datos concretos y experiencia práctica.

Este esquema puede resultar complejo de aplicar. Medidas de adaptación efectivas, pueden reducir la resiliencia, por ejemplo cuando se basan en el consumo de energía. Los beneficios de la adaptación pueden no estar adecuadamente valorados, e incurrir en costes económicos o ambientales. También la equidad puede ser compleja; adaptar infraestructuras principales puede quitar recursos para la adaptación de carreteras rurales o ferrocarriles con baja ocupación. La incertidumbre en el cambio climático dificulta trabajar con evidencias. En cualquier caso, el análisis de estos cuatro aspectos debería explicitarse en todo proceso de toma de decisiones sobre la adaptación.

Estrategias de adaptación

La larga vida útil de las infraestructuras, combinada con la incertidumbre sobre el clima futuro, con horizontes de 20 a 100 años, complican la toma de decisiones sobre la adaptación (Nemry & Demirel 2012), exigiendo un análisis caso por caso y estudios coste-beneficio para decidir sobre dos posibles estrategias de adaptación:

- Gestión adaptativa, aplicando una adaptación incremental en escalas de tiempo cortas sucesivas (10 años, por ejemplo), con lo que se gestiona mejor la incertidumbre sobre el cambio climático, basándose en datos cada vez más fiables, evitando fuertes inversiones sin saber si realmente son precisas.

- Adaptación de una sola vez, asumiendo que se plantea para hacer frente a los impactos del cambio climático a largo plazo.

Para nuevas infraestructuras estratégicas (carreteras y ferrocarriles principales), lo lógico es adecuar el diseño a unas condiciones a largo plazo, y construirlas ya adaptadas a posibles condiciones futuras, pero en infraestructuras existentes, y sobre todo aquellas con un uso menos intenso o estratégico, la gestión adaptativa suele ser más adecuada, sobre todo por razones económicas, ya que la actual demanda de inversión en mantenimiento es enorme y las disponibilidades presupuestarias escasas.

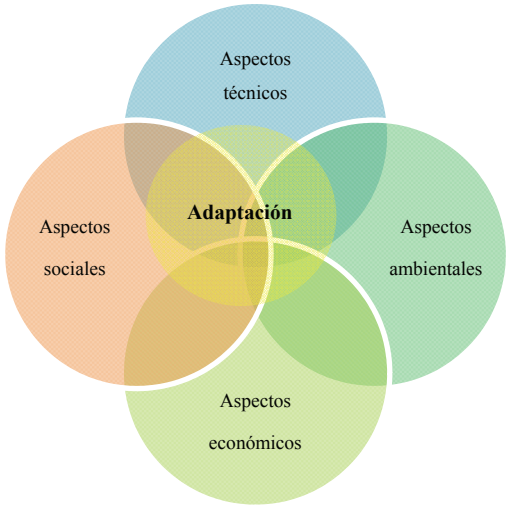
Aspectos que influyen en la toma de decisiones sobre la adaptación

La adaptación al cambio climático se sitúa en la intersección entre ciencia, comunidades y toma de decisiones, con diferentes escalas espaciales y temporales y una alta incertidumbre (Scarlett 2011). También se ve influida por los aspectos sociales, el contexto político, la conciencia pública, la politización del cambio climático o la incertidumbre científica (Carlson & McCormick 2015).

Las cuatro aspectos más importantes a considerar en la adaptación son (Figura 79):

- Técnicos o funcionales. Opciones viables de adaptación y efectividad.
- Económicos. Recursos económicos disponibles para la adaptación.
- Sociales. Efectos sobre la población, y aceptación social de las medidas.
- Ambientales. Impactos ambientales de cada opción de adaptación.

Figura 79 Aspectos de la adaptación



Fuente: Elaboración propia

Englobando todos los anteriores se encuentran los aspectos políticos, que es la esfera en la que se toman las decisiones, y que puede estar más o menos condicionada por unos u otros criterios. Muchas medidas de adaptación parten de los gobiernos, que dependen de los ciudadanos, sus votantes. Como resultado, medidas ambientalmente deseables no se aplican por resultar impopulares, como la retirada de las llanuras de inundación y la eliminación de defensas de ríos, mientras otras ambientalmente controvertidas se aplican por ser populares o tangibles (Klein 2011, Sovacool 2012), como los trasvases. La adaptación tiene también costes que, si se dedican a este concepto deberán ser detraídos de otros, lo que puede resultar impopular. Existe un riesgo de que criterios concretos monopolicen el debate, polarizando o sesgando las decisiones respecto al tipo de adaptación seleccionada.

Lógicamente, las opciones de adaptación barajadas deben ser viables, por lo que los aspectos técnicos son esenciales en la toma de decisiones. Sin embargo, se prestan mucho a la manipulación o la parcialidad, en función de los intereses de las partes o los agentes implicados en la toma de decisiones. Así, desde la ingeniería civil se tenderá a proponer soluciones de ingeniería, mientras que desde la ecología se tenderá a buscar enfoques basados en ecosistemas. La diversidad de alternativas de adaptación en cuanto a características y formas de aplicación hacen difícil una valoración objetiva.

Los aspectos económicos son también esenciales, ya que la diversidad de opciones de adaptación hace que también los costes puedan ser muy dispares. Proteger una infraestructura costera con un muro es mucho más barato que reubicarla. En los aspectos económicos influye mucho la situación económica concreta del país, la deuda, crecimiento, disponibilidad de recursos y un largo etcétera.

Por último, los aspectos ambientales, como se comenta posteriormente (véase capítulo 8) son aún una asignatura pendiente, con escaso peso en la toma de decisiones, lo que puede llevar a una maladaptación, o a impactos superiores a los corregidos.

Adaptarse o no adaptarse

Una pregunta que debe hacerse es si hay que adaptar o no las infraestructuras lineales de transporte al cambio climático, y la respuesta no tiene por qué ser siempre favorable. Con carácter general, en la literatura sobre cambio climático se sigue un proceso deductivo, explícito o implícito, en tres fases:

1. Se está produciendo, o se va a producir, un cambio climático
2. Ese cambio climático causa impactos en las infraestructuras
3. Para evitar esos impactos es preciso adoptar medidas de adaptación

Esta deducción, sin embargo, no es automática ya que el paso al tercer nivel puede ser o no recomendable.

La adaptación de una infraestructura frente al cambio climático implica inversiones, y en ocasiones también impactos ambientales añadidos, con frecuencia infravalorados. Por ello, el grado de adaptación, y en consecuencia el nivel de resiliencia que deben tener las infraestructuras de transporte no es un valor fijo, dependiendo de la intensidad de usos, la disponibilidad de alternativas y la importancia económica de la ruta; cuanto más intenso sea su uso e importancia social y económica, menor tolerancia existe a su interrupción (Department for Transport 2014).

Existen numerosos estudios que analizan las inversiones derivadas de la adaptación o no adaptación, en especial en carreteras, con resultados que no son homogéneos, e incluso resultan contradictorios.

Para el caso de Ghana el coste acumulado de reparación de daños a carreteras por el cambio climático sin adaptación entre 2020 y 2100 se estima en 473 millones de dólares, mientras que si se adapta el diseño y construcción de las carreteras el coste sería de 678,47 millones de dólares, debido al coste inicial de adaptación; se plantea si es interesante una mayor inversión inicial para reducir los costes futuros de mantenimiento o no, considerándose beneficioso para el país la no adaptación, reparando las carreteras cuando se vean dañadas (Twerefou et al. 2015).

En otros países de África la evaluación de costes de la adaptación y no adaptación hasta 2050 arroja valores muy variables (Chinowsky et al. 2015): mientras que en Malawi el coste total de ambas opciones es similar, en Zambia el coste de adaptación casi duplica a la no adaptación y en Mozambique casi lo triplica. No obstante, también hay que considerar los costes de oportunidad, también muy dispares en cada caso.

Schweikert et al. (2014a) analizan la situación en diez países (Bolivia, Camerún, Croacia, Etiopía, Italia, Japón, Nueva Zelanda, Suecia, Filipinas y Venezuela), concluyendo que en todos ellos las medidas de adaptación proactiva reducen los impactos y costes frente a las escenario reactivo de no adaptación.

En otro trabajo de estos autores (Schweikert et al. 2014b) recopilan estudios de once países o regiones (Japón, China, Corea del Sur, Mongolia, Sudáfrica, Malawi, Mozambique, Zambia, Tailandia, Vietnam y Pan-África, incluyendo 49 países), con resultados variables entre ellos en los costes de adaptación o no adaptación, y entre escenarios medios o máximos de cambio. Para un escenario medio la no adaptación es más económica en Japón, China o Mongolia, aunque en uno máximo pasa a ser más costosa. En el resto de casos la no adaptación es más costosa en ambos escenarios.

El criterio económico (coste de inversión o de oportunidad), o la intensidad de uso de una infraestructura no puede ser el único criterio de decisión. Schweikert et al. (2014a) destacan como en zonas rurales, sobre todo en países con bajos ingresos, las carreteras, dispersas geográficamente, representan una "línea de vida", base del sustento económico, la agricultura, el acceso a la sanidad, la educación o la participación política entre otros aspectos, por lo que todas ellas pueden ser críticas. Además, la falta de rutas alternativas en muchas áreas rurales puede llevar al aislamiento de comunidades locales, al centrarse los esfuerzos en la red primaria (Taylor & Philp 2015).

A esto se suma que las carreteras locales, con baja intensidad de tráfico, suelen tener estándares de construcción más bajos que las carreteras principales, por motivos económicos, lo que hace que sean más vulnerables a fenómenos climáticos extremos, por lo que centrar los esfuerzos en las áreas urbanas y vías principales puede dejar a la población rural en una situación más vulnerable; la falta de rutas secundarias practicables en zonas rurales puede aislar a las comunidades locales si la red primaria se ve comprometida (Taylor & Philp 2015).

Un ejemplo de esta problemática en España son las carreteras locales que cruzan ramblas (Figura 80). Las ramblas son cauces estacionales, que permanecen secos o con caudales mínimos casi todo el año, pero que en episodios lluviosos intensos, como la gota fría, transportan enormes caudales durante periodos de tiempo reducidos. Eso da lugar a grandes cauces, en ocasiones de cientos de metros de anchura. Construir puentes de cruce de esos cauces supone grandes costes, no asumible en carreteras locales, aunque sí en las de alta capacidad. En consecuencia, las carreteras locales son transitables prácticamente todo el año, pero algunos días, cuando hay lluvia intensa, se cortan, aunque todos los años hay que lamentar alguna tragedias al intentar cruzarse el paso durante crecidas. Si existe una alternativa de recorrido no tiene sentido una adaptación, siendo lo más lógico cortar temporalmente el tráfico, pero si no existen alternativas se fuerza a los vecinos a intentar cruzar el cauce durante la avenida.

Figura 80 Rambla donde se han producido accidentes en crecidas

Onda, Castellón. Fuente: Autor

Un caso de adaptación parcial a las inclemencias meteorológicas se da en muchas pistas forestales, donde periódicamente se repara la plataforma para garantizar la transitabilidad y se repasan las cunetas, pero no se plantea su pavimentación ni el uso de cunetas revestidas, que no sería económicamente rentable (Figura 81).

Un último aspecto muy poco tratado en la literatura es el impacto ambiental de las medidas de adaptación, abordado posteriormente. Dependiendo de las alternativas planteadas, los efectos ambientales pueden variar mucho.

Figura 81 Mantenimiento de pistas forestales

Fuentes: Izquierda, Vaersa (Generalitat Valenciana); derecha, Cabildo de Tenerife

En consecuencia, hay tres aspectos esenciales que pueden influir notablemente en la toma de decisiones sobre la conveniencia de la adaptación:

- Los impactos del cambio climático en las infraestructuras se traducen principalmente en daños, y por tanto son sobre todo económicos, no ambientales, por lo que la adaptación puede someterse a parámetros de rentabilidad.
- El impacto social de la interrupción de una infraestructuras por daños asociados a fenómenos climáticos, y los costes de oportunidad asociados, dependen de su grado de utilización, importancia estratégica y la existencia de alternativas. Hay interrupciones inasumibles, y otras que causas pocas molestias.
- Los impactos ambientales se derivan sobre todo de la aplicación de medidas de adaptación, y no del impacto del clima en las infraestructuras. Esos impactos ambientales pueden llegar a ser muy intensos en algunas medidas de adaptación.

Como consecuencia, se puede concluir que la adaptación no es una respuesta automática a los impactos del cambio climático, sino una decisión que se debe adoptar analizando los costes económicos, directos y de oportunidad, y los impactos sociales y ambientales. El resultado puede dar lugar a diferentes respuestas, más a menos conservadoras, en función del grado y momento de intervención (Tabla 48):

Tabla 48 Respuestas adaptativas en infraestructuras

Adaptación	**Estrategia**	**Seguridad y coste**
Adaptar	Abandonar la infraestructura y construir una nueva adaptada	Coste creciente Seguridad creciente
	Adaptar la infraestructura para evitar cualquier daño o interrupción	
	Adaptar la infraestructura para evitar daños, asumiendo interrupciones breves	
No adaptar	Asumir interrupciones breves, reparando los daños cuando se produzcan	
	Asumir interrupciones prolongadas, reparando los daños cuando se produzcan	
	Abandonar la infraestructura, y sustituirla por alternativas existentes	

Fuente: Elaboración propia

La primera solución es la más lógica en las infraestructuras estratégicas de cada país, las carreteras y líneas ferroviarias esenciales para las comunicaciones y con un mayor número de viajeros. Pero también puede ser precisa para comunidades muy sensibles; cuando una localidad únicamente tiene un acceso, el mantenimiento de su operatividad es esencial para la población, a menos que se decida plantear medidas alternativas, como construir un helipuerto, solo aplicables en pequeños núcleos aislados.

La última solución, abandonar la infraestructura, parece drástica, pero es mucho más habitual de lo que parece. Una infraestructura es tanto más esencial cuantas menos alternativas existen para dar servicio a las zonas que conecta. Pero si existe otras alternativas, o se construyen nuevas, la necesidad de mantenerla en servicio puede reducirse o incluso desaparecer. Los casos más claros se ven en puentes antiguos, con problemas estructurales o de erosión en sus cimientos, que quedan abandonados cuando existen otras opciones razonables, evitando así los costes de una reparación innecesaria.

Figura 82 Tres puentes para cruzar el río Almonte en Jaraicejo (Cáceres) a lo largo del tiempo

En primer plano, puente del Cardenal del siglo XV, abandonado; en medio puente de la antigua N-V de la década de 1950, con tráfico local; al fondo, viaducto de la A-5 de la década de 1990, que canaliza el tráfico principal. Fuente: Autor

Entre ambos extremos, existe una amplia casuística, que debe valorarse en cada caso. El ejemplo de las ramblas inundables se incluye en los casos intermedios, donde se asume una interrupción breve, durante las crecidas del río, en lugar de la construcción de un costoso viaducto, no justificado con el escaso tráfico local.

También en muchas carreteras locales de escaso tráfico es más razonable su reparación periódica que una actuación intensa para modificar taludes, plataforma y drenaje, que resultaría muy costosa y podría tener grandes impactos ambientales.

Como conclusión, aunque la asociación impactos del cambio climático-adaptación es casi automática, debe someterse a una adecuada valoración; en la actualidad se tienen ya en cuenta los aspectos económicos y sociales, siendo deseable una mayor incorporación de los potenciales impactos ambientales asociados a la adaptación.

7.1.5. Medidas de adaptación en infraestructuras

Existen diversas formas de analizar las medidas de adaptación, según el impacto a que respondan, su tipología o el tipo de infraestructura o elementos afectados. La más evidente, y empleada en la literatura, es la primera, una relación causa-efecto.

En el capítulo anterior se analizaron los impactos del cambio climático en las infraestructuras y sus consecuencias. Siguiendo el mismo esquema, se pueden relacionar estos impactos con las principales medidas de adaptación (Tabla 49).

Tabla 49 Impactos del cambio climático sobre las infraestructuras y medidas de adaptación

Factor	Presión climática	Infraestructura	Impactos	Adaptación
Temperatura	Olas de calor y calor estival más intenso	Ferrocarriles	Pandeo de raíles	Reducción de velocidad de circulación Empleo de materiales menos sensibles
			Pandeo de la catenaria	Cambio de normas de diseño
			Recalentamiento de equipos y motores	Mejora y modernización de equipos Programación de paradas periódicas
			Calentamiento de estaciones y metros	Incremento de sistemas de refrigeración
		Carreteras	Deterioro de los firmes (grietas)	Cambios en la instrucción de firmes Mezclas bituminosas más resistentes Firmes rígidos, sobre todo de hormigón Ligantes bituminosos transparentes
			Ablandamiento del asfalto y deformación	Incrementar la reflectancia (albedo) Mayor frecuencia de reposición Cierre temporal de carreteras Enfriamiento forzado con agua Limitación temporal al tráfico pesado Circulación de mercancías por la noche Derivar tráfico pesado al tren o barco Reducir la carga admisible por eje Estudiar situación en países más cálidos
			Deterioro de marcas viales (pintura)	Mayor frecuencia de pintado Uso de pinturas más resistentes
		Ambas	Recalentamiento de motores	Modernización de la flota de vehículos Programación de paradas periódicas
			Fatiga de materiales	Mayor frecuencia de reposición Uso de materiales más resistentes
			Deformación de puentes metálicos	Adecuación de las normas de diseño Modificación de puentes existentes
			Expansión de juntas de puentes	Limitaciones de paso o velocidad Abandono de puentes
			Daños por incendios forestales	Incremento de medidas preventivas Incremento de medios de extinción Sustitución de zapatas en vagones
			Cambios de humedad y subsidencia	Modificación plataforma (base/subbase) Desvíos de trazado
			Mortandad en plantaciones	Reposición de marras y resiembra Sustitución de especies no adaptadas
	Inviernos suaves	Carreteras	Menor frecuencia de hielo y nieve	Menor uso de quitanieves Maquinaria quitanieves multifuncional Menor consumo de fundentes
Tormentas	Tormentas eléctricas	Ferrocarriles	Sobretensión en subestaciones	Revisión de normas de diseño Mejora de seguridad frente a incendios
			Sobretensión en la catenaria	
Viento	Vientos extremos	Ferrocarriles	Daños en la superestructura y catenaria	Revisión de normas de diseño Refuerzo de cimentaciones
			Daños en señalización y defensas	Cambio de materiales en señalización Mantenimiento de arbolado próximo
		Carreteras	Afección a la conducción	Señalización de zonas de riesgo Mayor señalización variable Pantallas arbóreas
		Ambas	Bloqueo por árboles	Revisión periódica del arbolado y eliminación de pies y ramas muertas
			Sobreesfuerzo en pantallas acústicas	Revisión de normas de diseño Refuerzo de cimentaciones

Tabla 49 (cont.) Impactos del cambio climático sobre las infraestructuras y medidas de adaptación

Factor	Presión climática	Infraestructura	Impactos	Adaptación
Precipitación	Precipitaciones extremas	Ferrocarriles	Fallos del equipamiento de vía	Mayor frecuencia de mantenimiento Cambio por equipos más resistentes
		Carreteras	Daños en pavimentos	Mayor frecuencia de reposición Modificación de plataformas
			Afección a la visibilidad	Mayor señalización variable Mayor empleo de firmes drenantes
			Pavimentos mojados (menor adherencia)	Aumento del bombeo de la plataforma Mejor conservación de marcas viales
			Inundaciones	Ampliación del drenaje transversal Ampliación del drenaje longitudinal Incremento de bombeo de la plataforma Elevación de la rasante Mayor limpieza de sistemas de drenaje
		Ambas	Hundimientos	Estabilización de terraplenes Modificación plataforma (base/subbase) Muros de retención
			Desprendimientos y deslizamientos	Mejora de la vegetación en taludes Cunetas de guarda en desmontes Taludes más tendidos
			Afección a la estabilidad de taludes	Mallas en desmontes rocosos Cambio de normas de obras de tierras
			Descalce de puentes y viaductos	Revisión de normas de diseño Refuerzo de cimentaciones
			Colapso de puentes y viaductos	Construcción de nuevos puentes Abandono de puentes
			Inundación de pasos inferiores	Evitar pasos deprimidos sin desagüe Pasos inferiores en pendiente Diseño de bombeo y cunetas
			Sobreesfuerzo en drenajes	Sobredimensionamiento de drenajes Mayor frecuencia de mantenimiento
	Descenso en las precipitaciones	Ambas	Mortandad en plantaciones	Reposición de marras y resiembra Sustitución de especies no adaptadas Riego en zonas emblemáticas
			Cambios de humedad y subsidencia	Modificación plataforma (base/subbase) Desvíos de trazado
Fenómenos costeros	Incremento del nivel del mar	Ambas	Inundación	Elevación de la cota de la rasante Reubicación de infraestructuras
	Marejadas ciclónicas	Ambas	Inundación	Construcción de barreras contra oleaje Construcción de drenajes adicionales
			Daños en infraestructuras y equipamiento	Mayor frecuencia de mantenimiento Reubicación en zonas menos expuestas
	Erosión costera	Ambas	Desprendimientos y deslizamientos	Construcción de muros de defensa Construcción de tramos en viaducto Reubicación de infraestructuras

Fuentes: Elaboración propia a partir de TRB (2008), RAE (2011), Regmi & Hanaoka (2011), Nemry & Demirel (2012), PIARC (2011, 2012, 2013a, 2015), CEDEX et al. (2013), USAID (2013), Jenkins et al. (2014), Enríquez de Salamanca et al. (2016b).

7.2. Adaptación al incremento de la temperatura

Existen dos tipos esenciales de presiones climáticas sobre las infraestructuras asociadas a las temperaturas, con impactos y necesidades de adaptación muy diferentes, el incremento de las temperaturas estivales y de la incidencia de olas de calor, esencialmente negativo, y la reducción en la crudeza de los inviernos y en los días de nieve y hielo, esencialmente positivo en España, aunque no a nivel mundial.

7.2.1. Incremento de temperaturas estivales y olas de calor

Ferrocarriles

El principal impacto en ferrocarriles asociado al incremento de temperaturas es el pandeo de raíles. La medida de adaptación más utilizada es el establecimiento de limitaciones en la velocidad de circulación. En Australia se establecen restricciones de velocidad a 90 km/h entre las 12:00 y 20:00 h en los días en que la previsión de temperaturas alcanzará o excederá los 36ºC, que equivale aproximadamente a 54ºC en los raíles (Nemry & Demirel 2012). Para el Reino Unido, Dobney (2010) establece unos límites de velocidad en función de la CRT y el estado del balasto (Tabla 50). El problema de establecer limitaciones de velocidad es la afección inducida en la movilidad, como son retrasos en el transporte de viajeros y mercancías, pérdida de puntualidad y pérdida de capacidad en líneas ferroviarias con mucho tráfico.

Tabla 50 Temperatura máxima crítica del raíl (CRT) según estado de la vía en Reino Unido

Estado de la vía	Estado de alerta	Restricción de velocidad a 30-60 mph (48-97 km/h)	Restricción de velocidad a 20 mph (32 km/h)
Buen estado	SFT + 32	SFT + 37	SFT + 42
Balasto inadecuado	SFT + 10	SFT + 13	SFT + 15

SFT: Temperatura libre de estrés en raíles *(Stress Free Temperature)*. Fuente: Dobney (2010)

Otras adaptaciones frente al pandeo de raíles (Nemry & Demirel 2012) son:

- Mejorar la predicción y seguimiento de la temperatura de los raíles, empleando nuevas tecnologías para mejorar la rentabilidad.
- Materiales con mejores prestaciones (p.e. traviesas o elementos de sujeción).
- Mejorar el mantenimiento, reparación interestacional y reposición del balasto.
- Cambio de la SFT para adaptarse a las nuevas condiciones locales, considerando las limitaciones derivadas de períodos de frío, ya que una SFT demasiado alta puede dar lugar a un mayor riesgo de rotura de raíles en la temporada de invierno.

El incremento de temperaturas puede producir un mayor pandeo de la catenaria, pero la literatura no cita medidas de adaptación. Es preciso un análisis de la flecha y su variación con la temperatura, para ajustar las tensiones. La adaptación de raíles y superestructura puede acometerse mediante una adecuación de las normas de diseño.

Durante olas de calor las locomotoras, equipos y maquinaria se someten a unas temperaturas más elevadas de lo normal, por lo que pueden recalentarse, al no ser suficiente sus sistemas de refrigeración o superar las temperaturas normales de servicio. La adaptación en este caso pasa por el establecimiento de paradas técnicas para la refrigeración de los equipos, o en casos en que el problema sea reiterado la sustitución por nuevos equipos mejor adaptados a la nueva situación térmica.

El incremento de temperaturas estivales dará lugar a una pérdida de confort térmico en edificios asociados al transporte terrestre (estaciones de ferrocarril o autobús, estaciones de servicio) así como en ferrocarriles subterráneos. Eso hará preciso colocar aparatos de refrigeración cuando no existan, o aumentar la potencia de los existentes.

Carreteras

El impacto más importante del incremento de las temperaturas en las carreteras es la afección a los firmes, por oxidación prematura del ligante y por deformación debida al ablandamiento de firmes asfálticos, sobre todo en carreteras con importante tráfico de vehículos pesados. El informe del PIARC (2012) recoge una amplia relación de medidas de adaptación al cambio climático para los firmes (Tabla 51), que se puede agrupar en cinco categorías según su forma de aplicación: medidas enfocadas al diseño y construcción de los firmes, para lograr que sea más resistentes o menos vulnerables al calor; medidas destinadas a su mantenimiento; medidas externas para protección; medidas de gestión del tráfico, en especial limitación en olas de calor para evitar que se dañen los pavimentos; y medidas para minimizar los impactos de estas actuaciones.

Tabla 51 Adaptación de los firmes de carreteras al cambio climático

Tipo de actuación	Medidas
Medidas constructivas sobre los firmes	Uso de mezclas bituminosas más resistentes y pavimentos más rígidos
	Uso de firmes de hormigón
	Uso de ligantes bituminosos transparentes
	Ajuste en el diseño de mezclas bituminosas
	Ajuste del diseño estructural
	Aglutinantes con mayor punto de reblandecimiento
	Ligantes bituminosos transparentes
	Incrementar la reflectancia (albedo) y revestimiento reflectantes
Medidas de aplicación externa a firmes	Enfriamiento forzado con agua
Medidas de mantenimiento	Ajuste del plan de mantenimiento
Medidas de gestión del tráfico	Cierre temporal de carreteras en olas de calor
	Limitación a pesados en olas de calor
	Sacar tráfico de pesado de las carreteras
	Forzar a las mercancías a circular de noche
	Reducir la carga admisible por eje
Medidas de minimización de impactos	Minimizar transporte de materiales
	Reciclado in situ de pavimentos
	Uso de materiales con menor consumo de energía
	Pavimentos con menor rozamiento y menor consumo de combustible
	Cambio en la forma de hacer el hormigón para usar menos agua

Fuente: Elaboración propia

Unas mayores temperaturas pueden acortar la duración de las marcas viales (Figura 83), obligando a una mayor frecuencia de pintado o al empleo de pinturas más resistentes. Existen varios estudios sobre a durabilidad y costes de diferentes tipos de marcas viales, promovidos por departamentos de infraestructuras (p.e. Montebello & Schroeder 2000, Zayed et al. 2014, Elwakil et al. 2014, Howard et al. 2015).

Estos estudios analizan diversos materiales (pintura plástica, al agua, termoplástica, termoplástica en aerosol, metil metacrilato plástico en frío, metil metacrilato plástico en frío en espray o cintas prefabricadas), evaluando su durabilidad, coste de utilización y coste repercutido. Dependiendo del material la durabilidad oscila entre 6 meses y 6 años, y el coste para marcas viales de 10,2 cm de ancho, teniendo en cuenta su vida útil, entre 0,07 y 0,63 €/m. Cruz et al. (2016) hacen un análisis de ciclo de vida, concluyendo que se puede lograr una reducción del 50% en el potencial de calentamiento con materiales más duraderos, en especial metil metacrilato plástico en frío. En este caso, el empleo de materiales más duraderos y con menor huella de carbono permite a la vez mitigar el cambio climático y adaptarse a él.

Figura 83 Paso de cebra en mal estado

Fuente: El Faro de Vigo (http://www.elfarodegivo.es)

Unas mayores temperaturas estivales pueden dar lugar a un recalentamiento de motores, especialmente en vehículos antiguos o de gran cilindrada, como los camiones. La adaptación en este caso pasa por programar paradas periódicas, especialmente en el transporte de mercancías por carretera, y en la modernización de la flota de vehículos.

Medidas comunes a carreteras y ferrocarriles

Hay impactos asociados al incremento de temperaturas comunes a carreteras y ferrocarriles. Una mayor exposición térmica puede producir fatiga en los materiales, acelerando su degradación y acortando la vida útil, lo que exige mayor frecuencia de reposición o materiales más resistentes. Al ser impactos que acortan la vida útil de elementos duraderos, como estructuras metálicas, es difícil establecer el límite entre adaptación y reposición normal.

Figura 84 Puente de ferrocarril abandonado en Arganda del Rey (Madrid)

Fuente: Ayuntamiento de Arganda del Rey

Los cambios fuertes de temperatura pueden producir deformación en puentes metálicos y expansión de juntas de puentes. Aunque los puentes metálicos son cada vez más raros en carreteras, aún son frecuentes en líneas ferroviarias antiguas. Para nuevos puentes, es preciso adecuar las normas de diseño considerando las posibles dilataciones. En puentes existentes, las soluciones posibles son su modificación y reforma, el establecimiento de limitaciones de paso o de velocidad de circulación y, en casos extremos, su abandono (Figura 84).

7.2.2. Inviernos más suaves y reducción de días con nieve y hielo

La reducción de la duración y crudeza de los inviernos implicará una menor demanda de fundentes para su empleo en carreteras, y una menor necesidad de maquinaria quitanieves. No obstante, el hecho de que los inviernos sean más suaves de media no implica que desaparezcan los episodios extremos, como fuertes nevadas, lo que obligará a disponer de silos de fundentes y maquinaria quitanieves preparada para casos de emergencia. Una posible adaptación a esta situación es la adquisición de maquinaria quitanieves multifuncional, que pueda destinarse también a otros usos, evitando así tener maquinaria infrautilizada (Figura 85).

Figura 85 Vehículos todoterreno adaptados como quitanieves

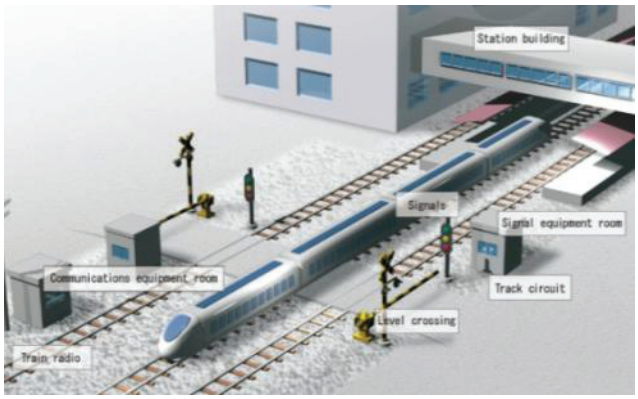
Fuente: Diputación de Albacete

7.3. Adaptación al incremento de tormentas

Como se señaló, la caída de rayos en tormentas eléctricas puede originar sobretensiones en la catenaria y subestaciones de tracción, dañando los equipos y obligando a detener las circulaciones.

La adaptación en este caso debe centrarse en adecuar las normas de diseño a un posible incremento de la frecuencia de tormentas eléctricas así como a mejorar la seguridad de las instalaciones mediante la colocación de dispositivos de seguridad en estaciones, trenes, señalización y en general todo el equipamiento eléctrico ferroviario (Figura 86).

Figura 86 Elementos sensibles a sobretensiones



Fuente: Sankōsha (http://www.sankosha.co.jp)

7.4. Adaptación a los cambios en las precipitaciones

Las dos principales presiones climáticas sobre las infraestructuras asociadas a los cambios en las precipitaciones son una mayor irregularidad y frecuencia de precipitaciones extremas, y una reducción de las precipitaciones medias.

7.4.1. Incremento de episodios de precipitación extrema

Inundación

Un primer impacto asociado a las precipitaciones extremas es la inundación de las infraestructuras, y la afección a sus sistemas de drenaje, que pueden verse desbordados.

Un ejemplo de adaptación a los cambios en las precipitaciones es el proyecto de incremento de la capacidad de la línea ferroviaria entre Copenhague y Ringsted, en Dinamarca (EC 2013b). Se realizó una evaluación de los impactos del cambio climático, detectando, entre otros aspectos, un incremento previsible del 20% en la intensidad de aguaceros extremos para el año 2100, lo que llevó a incrementar la capacidad de los drenajes un 30% con respecto a la norma usada actualmente.

En España la actual revisión de la norma 5.2-IC Drenaje Superficial, de la Instrucción de Carreteras (BOE 2016a) a aumentando los caudales de diseño en las obras de drenaje, por lo que las nuevas infraestructuras estarán adecuadamente adaptadas. Con respecto a las infraestructuras existentes, pueden ser precisas obras de recrecimiento de los drenajes, que pueden ser muy costosas.

La inundación de pasos inferiores suele estar asociada a problemas de diseño, por lo que la adaptación pasa por corregirlos mediante un adecuado bombeo, cunetas y un sistema de desagüe. Cuando sea inviable, por ser puntos bajos, se puede optar por una adecuada señalización del riesgo, sin son poco utilizados, o por reemplazarlos por pasos superiores si tienen un uso intenso.

Erosión en puentes

La erosión en puentes es uno de los principales impactos del cambio climático en carreteras y ferrocarriles, sobre todo por el elevado coste que tiene la reparación o sustitución de estas estructuras. Nemry & Demirel (2012) estiman un coste de adaptación por la erosión en puentes en la Península Ibérica de 91,1 millones de euros entre 2040 y 2070, y de 51,6 millones de euros entre 2070 y 2100.

Figura 87 Refuerzo de cimentación

Fuente: Gobierno de La Rioja

Cuando el socavamiento de los cimientos no es intenso es posible repararlo mediante refuerzo de las zapatas o profundización de la cimentación, acompañado de protecciones con escollera o construyendo tajamares. La ejecución de estas operaciones es más sencillas en cauces estacionales o cuando es posible desviar temporalmente el cauce. En los casos en que la erosión es muy importante se debe proceder a construir nuevas pilas o, si es inviable, al abandono del puente y la construcción de uno nuevo.

Daños a firmes

Los daños a los firmes a causa de la lluvia se asocian principalmente a problemas con la estabilidad de la plataforma, cuya adaptación se comenta a continuación.

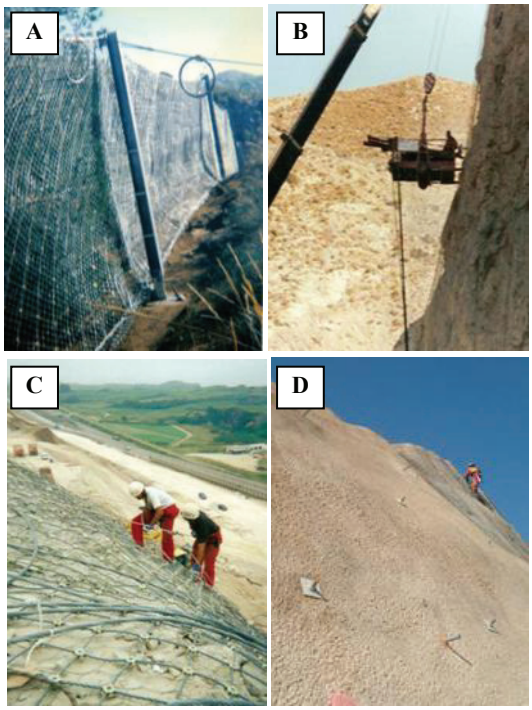
Estabilidad de taludes y plataforma

Las precipitaciones extremas pueden desencadenar procesos geológicos que afecten a la estabilidad de la plataforma. Los hundimientos suelen producirse por un socavamiento intenso o un colapso de drenajes o pasos inferiores. En estos casos es preciso un adecuado seguimiento de las infraestructuras, reforzando obras en situación de riesgo, o reparando taludes socavados mediante aporte de tierras y, cuando sea preciso, refuerzos con muros o escolleras.

En los deslizamientos concurren factores como geología de los terrenos, pendiente y grado de humedad, pudiendo actuarse sobre todos ellos. Cuando los terrenos son geológicamente poco estables, es posible reforzarlos mediante escolleras, bulonados o gunitados de hormigón. Una solución habitual son las cunetas de guarda en cabecera de desmontes, para evitar que el agua de escorrentía alcance el talud. Para reducir el esfuerzo cortante se puede rebajar la pendiente del talud, adoptando secciones más tendidas y estables. Otra solución son muros (hormigón, gaviones).

Los desprendimientos de piedras son otro problema importante, que puede interrumpir la circulación o causar accidentes. Lo más habitual es proteger los taludes con mallas metálicas combinadas con bulones, o gunitar los taludes. Otra opción es la colocación de barreras dinámicas de protección en la base de los taludes (Figura 88).

Figura 88 Protección frente a desprendimientos



A. Barrera dinámica. B. Perforación para bulonado. C. Colocación de malla. D. Gunitado (Fuente: Terratalud)

La erosión en taludes afecta a los sistemas de drenaje, que pueden quedar colmatados de tierras, y desembocar en problemas de estabilidad si la profundidad de los regueros y la intensidad de las pérdidas de suelo es elevada. La mejor solución es una adecuada revegetación del talud de forma inmediata tras su apertura, combinando una cubierta herbácea, aportada mediante hidrosiembra, y otra leñosa, aportada mediante siembra, plantación o una combinación de ambas técnicas (Figura 89).

En taludes difíciles, con problemas de erosión severos o de difícil control, se puede recurrir al empleo de nuevos materiales y técnicas de bioingeniería, como las mantas de fibras vegetales (paja, coco, yute o esparto), mallas plásticas tridimensionales o georredes. Estos materiales, que se combinan con la realización de hidrosiembras, aportan una protección adicional y más intensa del talud hasta que se logre una buena revegetación.

Figura 89 Revegetación de taludes

A. Hidrosiembra (Fuente: Bonterra). B. Plantación (Fuente: Bioingeniería del Paisaje). C. Manta de fibras (Fuente: Projar)

En ocasiones se opta por el gunitado de los taludes, efectivo para controlar la erosión bajo valor estético, pese a que cada vez se emplean con más frecuencia hormigones coloreados que simulan el color de la roca, para reducir su impacto visual.

Equipamientos de vía

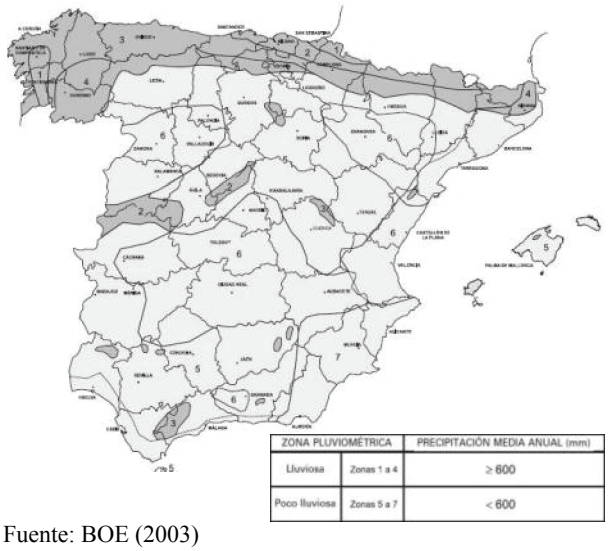
Para minimizar la afección a equipamiento de vía se deben buscar ubicaciones seguras frente a inundaciones, y proteger mediante arquetas, cajas o casetas todo el equipamiento sensible. Estas medidas se aplican ya con carácter general.

Seguridad vial

Los problemas de seguridad vial asociados a precipitaciones extremas se deben a una menor visibilidad y a la acumulación de agua en la calzada. La primera respuesta a unas condiciones difíciles de circulación es reducir la velocidad, limitando el riesgo de accidente. Como medida de adaptación en zonas con riesgos de precipitaciones extremas, se debería contar con paneles de señalización variable, asociados a sistemas de control y alerta meteorológica, que permitan informar a los conductores de la presencia de tramos con lluvias intensas de forma anticipada.

Para mejorar la seguridad en la calzada se debe evacuar la máxima cantidad posible de agua, lo que se puede lograr incrementando el bombeo lateral, o utilizando firmes drenantes. Esta segunda opción tiene una aplicación limitada en España, ya que las normas 6.1 IC y 6.3 IC de firmes (BOE 2003a, 2003b) no permiten usar este tipo de firmes por debajo de 600 mm anuales de precipitación (Figura 90), siendo previsible una reducción futura en su área de empleo por la reducción en las precipitaciones medias.

Figura 90 Zonas pluviométricas para firmes



Fuente: BOE (2003)

7.4.2. Reducción en las precipitaciones medidas

A diferencia del caso anterior, precipitaciones de elevada agresividad, la reducción en las precipitaciones medidas tiene una influencia menos llamativa en las infraestructuras de transporte. No obstante, hay varios factores especialmente sensibles a la sequía, y por tanto asociados también al incremento de la temperatura, el riesgo de subsidencia, la afección a la vegetación y el riesgo de incendios forestales.

Subsidencia

Las tres posibles medidas para evitar la subsidencia debido a la extracción de fluidos (en este caso a su pérdida a causa de un clima más seco) son la reducción de la extracción de aguas subterráneas, la recarga artificial de acuíferos desde la superficie del terreno y la represurización de acuíferos a través de pozos (Poland 1984). Estas medidas pueden aplicarse a nivel local, pero no extensivo, siendo sobre todo medidas *ex situ*, comentadas posteriormente (7.8).

En nuevas construcciones se puede prever la subsidencia mediante cimentaciones más profundas o pilotes. Para las edificaciones ya afectadas la compañía japonesa Something Co (Figura 91) propone colocar tubos de acero en las cimentaciones hasta llegar a un terreno duro, empleando luego un gato hidráulico para corregir la inclinación del edificio.

Figura 91 Corrección de subsidencia

Fuente: Something Co (https://www.s-thing.co.jp/en)

Mortandad de vegetación

En las infraestructuras lineales de transporte se implanta vegetación en taludes, márgenes, pasos de fauna, cauces o zonas de instalaciones, préstamos o vertederos. Esta vegetación se verá afectada por el incremento en la frecuencia de sequías, y sobre todo la implantada en desmontes, al ser suelos pobres, compactos y con pendiente. Existen varias medidas de adaptación al respecto. Por una parte, es preciso prever una mayor frecuencia de resiembras y reposiciones de marras, para compensar la mortandad.

También es preciso revisar las especies a emplear en plantaciones (CEDEX et al. 2013), buscando aquellas que sean más rústicas, y preferiblemente propias de la flora local. Hay especies que, siendo espontáneas en una región, se encuentran en su límite ecológico; se debe evitar el empleo de especies en su límite de viabilidad pluvial, ya que resultará complejo lograr su desarrollo en un escenario de menores precipitaciones.

En zonas con clima mediterráneo, las más afectadas por la sequía, es muy recomendable fomentar el empleo de caméfitos en la revegetación de taludes de desmonte (Enríquez de Salamanca et al. 2004), ya que resultan mucho más resistentes y efectivos en el control de la erosión que los fanerófitos y los hemicriptófitos.

Una última medida de adaptación sería el aporte de agua a las plantas para compensar la mayor sequía. La adopción de riego generalizado en las infraestructuras es ambientalmente insostenible, y en consecuencia no debería plantearse, salvo tramos urbanos o emblemáticos, donde sea preciso garantizar un buen estado de la vegetación, cuyo tratamiento es similar al de una zona verde. También es posible prever o incrementar la previsión de riegos de sostenimiento en los primeros años tras la plantación, para garantizar el arraigo inicial, con una duración de uno a tres años.

Incendios forestales

El cambio climático incrementará el riesgo de incendios en la región mediterránea. Carreteras y ferrocarriles, como focos potenciales de incendio, precisan medidas de adaptación, para evitar una mayor frecuencia en su generación. La principal medida es mantener los márgenes y cunetas limpios de vegetación, para que actúen como fajas cortafuegos (Figura 92), mediante desbroces periódicos, podas y realces en arbolado, buscando un equilibrio con los aspectos ecológicos. Aunque estas operaciones se realizan habitualmente, puede ser precisa una mayor extensión o frecuencia

Figura 92 Desbroce en margen de carretera

Fuente: Diario de Ibiza (http://www.diariodeibiza.es)

Un factor de riesgo muy importante son las chispas generadas en ferrocarriles, sobre todo por el empleo de zapatas de fundición en los sistemas de frenado de vagones de mercancías. Un solución a este problema es el uso de zapatas de material compuesto tipo K (material compuesto orgánico) o LL (material compuesto orgánico o metal sinterizado) en lugar las convencionales de fundición (CEDEX et al. 2013), lo que además reduce el ruido de rodadura percibido hasta un 50% (EC 2008).

7.5. Adaptación al incremento de vientos extremos

Los vientos extremos dan lugar a impactos en las infraestructuras de transporte como el desplazamiento lateral de la catenaria de ferrocarriles, un sobresfuerzo en estructuras, señalización y cimentaciones, un mayor riesgo de caída de ramas y árboles sobre las carreteras y ferrocarriles y una pérdida de seguridad en la conducción.

El diseño de elementos estructurales, pantallas, señales o catenaria, tiene en cuenta ya el empuje del viento, pero un incremento de su frecuencia o intensidad puede llevar a una mayor frecuencia o intensidad de afecciones. Cuanto menor sea el riesgo que se quiera asumir, mayor debe ser la garantía, lo que se traduce en la adopción de unos periodos de retorno más prolongados para definir el viento de cálculo.

En catenarias es preciso adaptar el diseño a un periodo de retorno que se aproxime a la vida útil de la infraestructura; habitualmente ese periodo es de 50 años, pero en Australia se ha elevó en 1989 hasta los 1 000 años, para reducir el riesgo (Vélez 2012). De manera análoga, el diseño de estructuras, señales o pantallas, acústicas o para aves, especialmente vulnerables al viento, puede adecuarse adoptando mayores periodos de retorno, lo que implica mayores empujes del viento en el cálculo.

El incremento en la seguridad implica un sobrecoste en la construcción, por lo que es susceptible de análisis coste-beneficio, considerando también los efectos que puede tener en la población la interrupción del servicio. Estos aspectos deben ser abordados en las normas de diseño, adecuándolas a los escenarios previsibles con respecto al viento.

Más compleja es la seguridad asociada al riesgo de caída de ramas y árboles. Las medidas de adaptación, igual que se aplican en condiciones normales, son la poda de ramas y el apeo de árboles en situación de riesgo. En zonas boscosas no es fácil establecer los límites de seguridad, ya que podas o talas excesivas garantizarían la seguridad a costa de grandes impactos ambientales.

Con respecto al incremento de riesgos sobre la conducción asociados al viento, especialmente si es racheado, la solución pasa por una reducción en la velocidad de circulación. Para ello, es importante una adecuada señalización de los tramos peligrosos y el empleo de señalización variable (luminosa), que debe apoyarse en sistemas efectivos de alerta temprana.

7.6. Adaptación a fenómenos costeros

Los principales impactos asociados a fenómenos costeros son el incremento del nivel del mar, y una mayor agresividad o frecuencia de fenómenos costeros extremos, que pueden producir inundaciones, daños en infraestructuras e incremento de la erosión.

El incremento del nivel del mar es un proceso lento pero progresivo. Aunque se redujeran actualmente las emisiones de GEI de forma drástica, solo tendría efectos sobre el incremento del nivel del mar a largo plazo, debido al alto poder calorífico de los océanos (Nicholls & Lowe 2004).

Las dos respuestas posibles de adaptación de las infraestructuras a este proceso son su adecuación *in situ* o su reubicación.

Cuando una infraestructura se inunda cada vez con más frecuencia a consecuencia de la subida del nivel del mar, la adaptación *in situ* pasa por elevarla, con una adecuada protección de los taludes frente a los efectos erosivos del mar. Esta solución se está poniendo en práctica en distintas partes del mundo, como por ejemplo en Nueva Zelanda, en la *Western Ring Route* en el entorno de Auckland (Figura 93). El objetivo final es lograr una plataforma más elevada, mediante aporte de materiales, lo que compensa el incremento del nivel del mar. Es una buena solución para minimizar la ocupación de terrenos y mantener la operatividad de la infraestructura, y la única posible en infraestructuras esenciales que no puede desplazarse o en entornos densamente habitados o de alto valor natural.

Figura 93 Elevación de la rasante en la Western Ring Route (Nueva Zelanda)

Fuente: PIARC (2015)

Otra alternativa más drástica es abandonar la infraestructura, y reubicarla en un terreno más seguro, no afectado por el incremento del nivel del mar. Como se señaló anteriormente, en España son escasas las tierras costeras bajas susceptibles de verse afectadas por el incremento del nivel del mar. Por eso, la reubicación de infraestructuras no parece una opción muy necesaria en España. Sin embargo, en zonas costeras de Bélgica, Países Bajos, Alemania o el litoral atlántico francés, la vulnerabilidad es mayor, y la elevación de la rasante puede ser insuficiente, obligando a la construcción de nuevos trazados. En pequeños territorios insulares del Caribe o el Pacífico, algunos regiones ultraperiféricas de la Unión Europea, esta situación es ya una realidad.

El segundo grupo de impactos se asocia a la agresividad de los fenómenos costeros, tanto de la erosión como de marejadas ciclónicas y temporales. Como se ha destacado en España el riesgo de marejadas ciclónicas es bajo, aunque periódicamente se producen temporales de cierta intensidad. Al no preverse cambios significativos, la necesidad de adaptación es baja. En el ámbito europeo si se observan problemas importantes en el mar del Norte, con procesos erosivos importantes por ejemplo en la costa oriental inglesa. Las estrategias de adaptación son en gran parte coincidentes con las anteriormente comentadas, la adaptación *in situ*, o la reubicación.

Con respecto a la erosión costera, la medida natural sería permitir la evolución de la costa, que implicaría un desplazamiento hacia el interior, reubicando asentamientos e infraestructuras. Sin embargo, esa solución solo es posible en zonas sin desarrollar. La alternativa es la construcción de defensas costeras, como muros o escolleras, que limiten la acción erosiva del mar, garantizando así su estabilidad.

La adaptación a temporales y marejadas ciclónicas es compleja, ya que aunque su duración es limitada, dan lugar a una fuerte erosión y elevación temporal del nivel del mar, y con ello a inundaciones y daños mecánicos por el impacto de las olas. Si no se desea reubicar la infraestructura se requerirá una combinación de defensas costeras y la elevación de la rasante, e incluso la construcción de muros elevados de defensa contra el oleaje, a menudo con perfil curvo para devolver las olas al mar (Figura 94).

Figura 94 Defensa costera frente al oleaje

Redcar (Inglaterra). Fuente: Gazette Live (http://www.gazettelive.co.uk)

7.7. Adaptación comportamental

La adaptación comportamental se basa en modificar el comportamiento de un colectivo para lograr una mejor adaptación al cambio climático. La principal adaptación en este sentido es una mayor conciencia de la necesidad de evitar desplazamientos durante eventos extremos, en especial en zonas o épocas de riesgo. Son relativamente frecuentes las víctimas al cruzar en coche vados de cauces durante crecidas o los colapsos circulatorios en nevadas previamente anunciadas y con recomendaciones para evitar desplazarse en coche (Figura 95). En estos casos, es precisa una mayor conciencia de los ciudadanos, y un respeto a las recomendaciones y limitaciones de paso establecidas, que actúan en sí mismas como medidas de adaptación a unas condiciones excepcionales, y que podrían incrementarse en el futuro.

Figura 95 Comportamientos imprudentes de conductores en eventos extremos

Izquierda: Vehículo arrastrado al cruzar un vado en una crecida (Fuente: El Heraldo de Aragón, http://www.heraldo.es). Derecha: Colapso circulatorio durante una nevada anunciada (Fuente: El País, http://elpais.com)

7.8. Adaptación ex situ

La inmensa mayoría de medidas de adaptación comentadas a lo largo de este capítulo se aplica a las propias infraestructuras o su entorno inmediato. No obstante, muchos impactos climáticos se abordan de forma más eficiente con una adaptación *ex situ*, fuera de la infraestructura.

El mayor problema para afrontar estas medidas de adaptación es competencial, ya que superan el ámbito de trabajo de los organismos responsables de las infraestructuras lineales de transporte. En este apartado se citan algunas medidas significativas (Tabla 52), para destacar que la adaptación es un concepto amplio, que no debería circunscribirse solo a actuaciones concretas.

Tabla 52 Medidas de adaptación ex situ a presiones climáticas

Presión climática	Medidas de adaptación ex situ
Mayor frecuencia de sequías (olas de calor y menores precipitaciones)	Tratamientos preventivos contra incendios en las masas forestales de la comarca y mejora de la infraestructura y medios de extinción Reducción de la extracción de agua subterránea para evitar la subsidencia del terreno.
Vientos extremos	Fomento de zonas arboladas y setos para reducir la velocidad del viento
Precipitaciones extremas	Reducción de la escorrentía en la cuenca mediante: - Cambios de usos del suelo a otros con menor escorrentía - Evitar laboreos siguiendo línea de máxima pendiente - Fomento de sistemas agro-silvo-pastorales - Fomento de vegetación permanente (pastos, matorral o bosques) - Incremento de la superficie de zonas verdes en áreas urbanas Reducción de avenidas mediante restauración fluvial: - Restauración de la vegetación de ribera - Descanalización de ríos permitiendo inundaciones controladas - Eliminación de ocupaciones y obstáculos artificiales en cauces

Fuente: Elaboración propia

Un impacto asociado al incremento de olas de calor y sequías son los incendios forestales. Como medida de adaptación en infraestructuras se cita habitualmente la realización de tratamientos preventivos, como desbroce de márgenes. Sin embargo, es deseable una adaptación a mayor escala. Los tratamientos preventivos deberían extenderse a todas las masas forestales del entorno, y no solo a sus márgenes.

Figura 96 Cortafuegos en el SO de Madrid

Fuente: Elaboración propia. Ortofoto Comunidad de Madrid

La pérdida de fluidos del suelo puede dar lugar a subsidencia del terreno. Esa pérdida se produce principalmente por la extracción de aguas subterráneas, sobre todo empleadas en riego, y puede verse acrecentada por el cambio climático. Una importante medida de control de la subsidencia es limitar la extracción de aguas subterráneas, de manera que se compensen las menores aportaciones y mayor evaporación asociadas al cambio climático con una menor extracción de agua. La recarga artificial de acuíferos se podría aplicar de forma muy local, pero no es una solución realista de forma extensiva.

Figura 97 Setos cortavientos

Fuente: USDA

La velocidad del viento y los lugares de flujo preferente están determinados por la orografía del terreno y por la vegetación, que puede ayudar a frenarlo; mientras en paisajes deforestados el viento sopla libremente, en zonas boscosas se ve frenado por el arbolado, siendo su intensidad a nivel del suelo, menor. Los agricultores utilizan desde hace siglos barreras cortavientos (Figura 97) con especies vegetales como el chopo, ciprés, taray o caña.

Existen manuales para su diseño desde hace décadas (p.e. Guyot & Elejabeitia 1970). Esa idea es aplicable también a zonas expuestas cruzadas por infraestructuras.

El mayor campo de actuación *ex situ* es la hidrología, donde es posible adoptar medidas en las cuencas hidrográficas que limiten la intensidad de las inundaciones, reduzcan los tiempos de concentración y caudales de avenida o reduzcan la velocidad del agua y su erosividad. Todas estas medidas se traducen en menores impactos hidrológicos sobre las infraestructuras, reduciendo las necesidades de adaptación *in situ*.

Un primer grupo de medidas se puede encaminar a reducir la escorrentía en la cuenca, lo que a su vez reducirá tanto las aportaciones totales a los cauces en episodios lluviosos intensos como el tiempo de concentración, esencial en la formación del pico de avenida, muy dañino en inundaciones súbitas (*flash flooding*). Para lograrlo, se deben fomentar los usos del suelo con menor escorrentía, evitar laboreos en máxima pendiente, el fomento de sistemas agro-silvo-pastorales (dehesas) y de paisajes en mosaico con manchas de vegetación permanente (pastos, matorral o bosques) o, en zonas urbanas, el incremento de la superficie de zonas verdes.

Un segundo grupo de actuaciones se centra en actuar sobre los propios ríos, para evitar su desbordamiento de una forma sostenible. La canalización y las motas de defensa acaban exacerbando los problemas de inundación en grandes avenidas, siendo precisa una mayor descanalización, una recuperación de la vegetación de ribera y permitir la inundación de terrenos en avenidas, como zonas agrícolas, para lograr que el agua pierda energía y minimizar la inundación de zonas sensibles.

Un ejemplo son los desbordamientos del río Ebro, que causan inundaciones y afectan de forma extensiva a pueblos, infraestructuras, granjas o cultivos. El último evento, en 2015, se desencadenó por la suma de unas elevadas precipitaciones, una concentración de nieve en el Pirineo y una subida brusca de la temperatura que desencadenó una acelerada fusión nival. Estos fenómenos se producen periódicamente y se van a seguir produciendo (Sánchez et al. 2015), pudiendo exacerbarse por una mayor irregularidad térmica y pluviométrica de los inviernos. La solución no pasa por medidas costosas y de fuerte impacto ambiental, como dragados o defensas, sino por dar mayor espacio al río y ordenar la llanura de inundación (Sánchez et al. 2015).

Figura 98 Desbordamiento del río Ebro en Navarra en 2015

Fuente: Gobierno de Navarra (htttp://www.navarra.es)

Cuadro 5. Adaptación al cambio climático en San Vicente y las Granadinas

Este caso práctico se recoge en el Anexo 4, se ha publicado en Enríquez de Salamanca (2014b) y presentado en el VIII Congreso Nacional de Evaluación Ambiental (Enríquez de Salamanca & Carrasco 2015). Se trata de un proyecto de adaptación al cambio climático en San Vicente y las Granadinas, país insular de las Antillas Menores sometido a frecuentes desastres naturales, incrementados a consecuencia del cambio climático. El huracán Tomas en 2010 y las tormentas tropicales de 2013 produjeron importantes daños y pérdidas materiales, acelerando la adopción de medidas de adaptación. Para ello se desarrollaron varios proyectos financiados por el Banco Mundial, uno de los cuales se analiza.

A consecuencia de las tormentas de 2013 se desbordó el South River en la capital, Kingstown, produciendo inundaciones por un puente demasiado pequeño. Además, se cortó la carretera entre la capital y el aeropuerto, y la única ruta alternativa, por la montaña, quedo inutilizable. Las crecidas destruyeron las tres centrales hidroeléctricas del país. La única central operativa, de gasoil, quedo en peligro por la erosión del río Warrawarrow, que además se desbordó en la desembocadura inundando el aeropuerto.

El proyecto contempla sustituir el puente de Kingstown por otro mayor (1), arreglar de la carretera de montaña entre Fenton y Green Hill, reparando el drenaje y sustituyendo tres puentes para mantener una ruta alternativa entre la capital y el aeropuerto (2), la defensa de márgenes del río Warrawarrow junto a la central eléctrica de Cane Hill (3) y el incremento de la sección de este río en la desembocadura, ya canalizado, para evitar inundaciones en el aeropuerto (4).

Al depender el proyecto de un préstamo del Banco Mundial son de aplicación las políticas operativas de este organismo, y en concreto la relativa a evaluación ambiental. Por ello, cada una de las actuaciones incluye un Plan de Gestión Medioambiental, que consiste en una evaluación simplificada de sus impactos ambientales y una propuesta de medidas protectoras, correctoras y compensatorias.

Asimismo se incorpora al proyecto un Plan de Manejo Integral para las cuencas de los ríos Warrawarrow y South River, que contempla medidas de adaptación ex situ, para minimizar en el futuro la agresividad de los eventos hidrometeorológicos.

7.9. Plazos y fase de aplicación de la adaptación

7.9.1. Prioridades y plazos en la adaptación

El derogado Real Decreto 1131/1988 (BOE 1988) definía efectos a corto, medio y largo plazo como aquellos cuya incidencia puede manifestarse, respectivamente, dentro del tiempo comprendido en un ciclo anual, antes de cinco años, o en período superior, definición no incluida en la actual Ley 21/2013 de evaluación ambiental (BOE 2013). Por su parte, el informe de CEDEX et al. (2013) propone medidas de adaptación para la red troncal española de infraestructuras de transporte, divididas en corto y medio plazo, pero sin establecer los periodos de tiempo que componen cada clase.

Teniendo en cuenta la vida útil de las infraestructuras, y de sus diferentes elementos, y la probabilidad de ocurrencia de los impactos, se proponen cuatro categorías de frecuencia para las medidas de adaptación en este sector (Tabla 53).

Tabla 53 Medidas relacionadas con impactos climáticos según su plazo de ejecución

Plazo	Medidas
Corto (< 5 años)	Limpieza de cunetas aterradas por arrastres de tierras
	Limpieza de drenajes obstruidos por ramas
	Limpieza de infraestructuras temporalmente inundadas
	Eliminación de árboles muertos o inestables próximos a la infraestructura
	Desbroces de herbáceas para prevención de incendios
	Revisión de infraestructuras (taludes, plataforma, drenaje, cimentaciones, puentes)
	Revisión de la normativa de obras de tierras para reducir afección a taludes
	Revisión de la normativa de diseño de puentes y viaductos
	Revisión de la normativa de raíles y de electrificación
	Revisión de la normativa de puentes y túneles
	Revisión de sistemas de saneamiento en estaciones (normativa y estado)
	Redimensionado de sistemas de climatización en estaciones
	Fomentar uso de sistemas de frenado en trenes de bajo riesgo de incendio
	Establecer registros de incidencias y actuaciones de adaptación
	Mejorar los sistemas de alerta meteorológica
Medio (5 - 15 años)	Reposición de firmes asfálticos y empleo de firmes más resistentes
	Repintando de marcas viales
	Reperfilado y reparación de taludes
	Podas de ramas en árboles próximos a la infraestructura con riesgo
	Repaso de fajas cortafuegos en zonas con matorral o arbolado
	Revisar las normas 6.1-IC y 6.3-IC de firmes (mapas, tipos, drenante, rehabilitación)
	Revisar pliegos de concesiones considerando las necesidades de adaptación
	Revisar normativa de diseño de catenaria y apantallamientos por el viento
Largo (15 - 50 años)	Sobredimensionamiento de drenajes
	Refuerzo de cimientos de puentes
	Refuerzo de cimentaciones de señales y pantallas
	Reparación del sistema de drenaje
	Sustitución de señalización
	Modificaciones de trazado, en planta o alzado
	Construcción de nuevos drenajes o viaductos
Excepcional (> 50 años)	Revisión y reparación de puentes
	Revisión y sustitución de raíles y traviesas y empleo de materiales más resistentes
	Revisión y sustitución de pórticos y banderolas
	Revisión y sustitución y sustitución de superestructura de electrificación

Fuente: Elaboración propia

- **Medidas a corto plazo**, que deben adoptarse con frecuencia inferior a cinco años, y que incluirían tanto medidas urgentes de adaptación como operaciones periódicas de conservación que requieren ciclos cortos de reiteración.
- **Medio plazo**, adoptadas con una frecuencia 5 a 15 años, plazo donde entraría la rehabilitación de firmes. Formarían parte las medidas cuya urgencia es menor o las que se repiten periódicamente con menos frecuencia.
- **Medidas a largo plazo**, adoptadas con un plazo de 15 a 50 años. Comprenden medidas menos urgentes, o con horizonte temporal alejado, o frecuencia baja.
- **Medidas excepcionales**, con un plazo mayor de 50 años, asociadas al desgaste o envejecimiento de materiales y a la proximidad del fin de su vida útil.

7.9.2. Fase de aplicación de la adaptación

Adaptación de normas de diseño

La mejor forma de tener infraestructuras resilientes y poco vulnerables es un adecuado diseño, teniendo en cuenta los potenciales impactos del cambio climático. Para ello, una primera medida muy necesaria es adecuar las normas de diseño de las infraestructuras y de sus diferentes componentes, de manera que se incorporen las condiciones futuras previsibles asociadas al cambio climático.

En algunos casos ya se han adaptado las normas, como la revisión de la instrucción 5.2-IC de drenaje superficial (BOE 2016a), cuya actual versión es más conservadora en el cálculo de caudales, lo que implica obras de drenaje más amplias. Recientemente se han revisado documentos como la instrucción ferroviaria IF-3 "vía sobre balasto" (BOE 2015a) o la norma 3.1-IC "trazado" de la instrucción de carreteras (BOE 2016b), o se han elaborado borradores como las instrucciones ferroviarias IFI-2016 "subsistema de infraestructura", IFE-2016 "subsistema de energía" o IF MR ALC-2016 "material rodante ferroviario" (AESF 2016a, 2016b, 2016c).

A medio plazo precisarían revisión las normas 6.1-IC y 6.3-IC sobre firmes (BOE 2008a, 2008b), en aspectos como los mapas climáticos, los tipos de firmes a emplear o su rehabilitación (CEDEX et al. 2013), de manera que con su aplicación el diseño de los firmes esté adaptado a los futuros escenarios.

La instrucción de puentes de carreteras se actualizó en 2011 (BOE 2011e), pero podría requerir a medio plazo una nueva revisión que considere los problemas de erosión en cimientos y sobrecargas por viento asociados al cambio climático.

Otras normas que podrían precisar una revisión son las de obras de tierras, para reducir afección a taludes, raíles, electrificación, sistemas de saneamiento en estaciones, catenaria o apantallamientos por el viento (CEDEX et al. 2013).

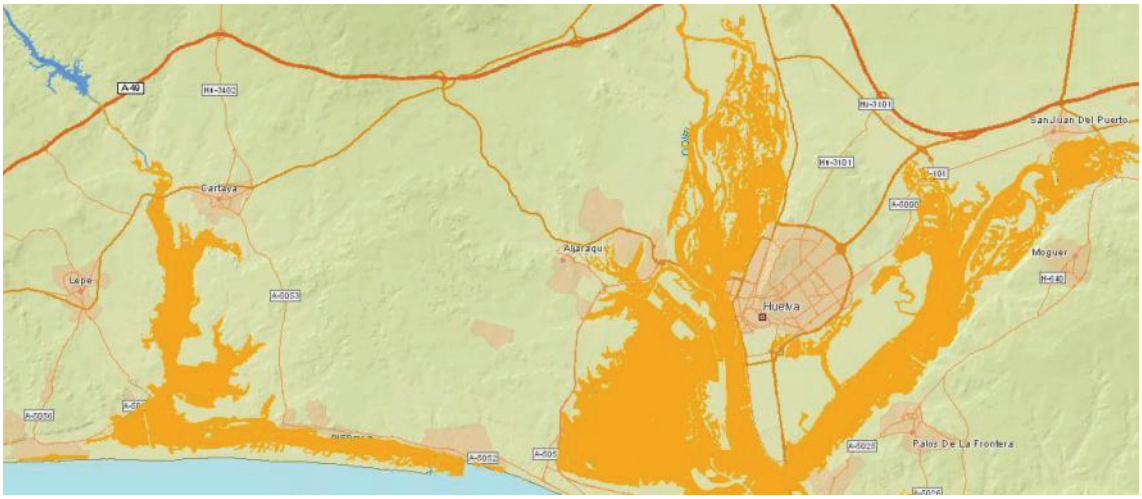
Adaptación en la selección de trazados

Existe una excesiva tendencia hacia la adaptación reactiva, lo que limita mucho las posibilidades reales de actuación. La mayoría de medidas de adaptación dan respuesta a impactos del cambio climático, siendo en consecuencia medidas correctoras. Este tipo de medidas son inevitables en infraestructuras ya existentes, pero en el caso de nuevos proyectos una adecuada planificación previa a la construcción puede reducir mucho los efectos del cambio climático.

Una etapa esencial en la adaptación de nuevas infraestructuras es la búsqueda de ubicaciones o trazados que discurran por terrenos poco vulnerables a los efectos del cambio climático, lo que permitirá a su vez tener una infraestructura poco vulnerable.

En la actualidad, los estudios informativos de ferrocarriles y sobre todo de carreteras del Estado incluyen una primera fase de caracterización del territorio, donde se analiza la capacidad de acogida para la infraestructura desde los puntos de vista físico, ambiental y territorial (Carrasco & Enríquez de Salamanca 2004). Entre los condicionantes físicos se incluyen aspectos como el relieve, la geotécnica o la inundabilidad; en aquellos factores con influencia hidrometeorológica, debería considerarse la influencia del cambio climático, para establecer posibles restricciones futuras, como la consideración de mayores periodos de retorno para determinar las zonas inundables fluviales o marinas (Figura 99), o una valoración de la estabilidad considerando una mayor frecuencia de precipitaciones extremas.

Figura 99 Zonas inundables de origen marino con probabilidad media u ocasional (T=100 años)



Fuente: SNCZI-IPE. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente (http://www.mapama.gob.es)

Adaptación en el diseño de infraestructuras

Una vez seleccionados trazados lo menos vulnerables posible al cambio climático, se debe proceder a un diseño adaptado de la infraestructura. Por ejemplo, si se cruzan

zonas con riesgo de inundación marina será preciso prever una cota adecuada de la rasante y un drenaje transversal que evite represamientos; si se detecta un riesgo de inestabilidad en taludes, podrán diseñarse con pendientes más suaves; si se prevé una degradación acelerada de los firmes por mayores temperaturas, podrán diseñarse mezclas más resistentes; o si se prevé una reducción en las precipitaciones, deberá tenerse en cuenta en la selección de especies a emplear en la revegetación. En estos casos la adaptación es parte del diseño del proyecto, y por tanto está totalmente integrada en el mismo, lo que resulta muy deseable. La mayoría de infraestructuras lineales de transportes se someten a EIA, por lo que las medidas de adaptación, como parte inherente del proyecto, serían también evaluadas.

Adaptación en infraestructuras existentes

La adaptación también puede aplicarse a infraestructuras ya existentes, para incrementar su resiliencia y reducir la vulnerabilidad. Las medidas pueden ser:

- Medidas *in situ*, aplicadas a la propia infraestructura, que podrán precisar la ocupación de terrenos (p.e. tender taludes, bermas, elevar la rasante) o no precisarlos (p.e. modificar firmes, reponer marras, proteger taludes).
- Medidas aplicadas fuera de la actual infraestructura, por ejemplo su reubicación fuera de zonas de riesgo (p.e. desvíos en carreteras o ferrocarriles para evitar zonas inundables). En muchos casos estas medidas se derivan de una mala planificación inicial de la infraestructura, cruzando zonas vulnerables.

Si la adaptación exige un nuevo trazado supone la construcción de una nueva infraestructura, que debería someterse a EIA, aunque podría no hacerlo si no alcanza los umbrales establecidos en la normativa, o si se fracciona el proyecto (Enríquez de Salamanca 2016). Las adaptaciones sobre una infraestructura pueden abordarse mediante proyectos independientes o junto a las operaciones de conservación habituales, sin una evaluación ambiental al no ser supuestos recogidos en la normativa, algo que debería evitarse para no infravalorar sus efectos ambientales.

Adaptación recurrente

El caso más evidente de adaptación recurrente es el mantenimiento, que puede verse incrementado como consecuencia del cambio climático. Son ejemplos la limpieza de obras de drenaje para garantizar su operatividad, la poda de árboles peligrosos, reparaciones en firmes, instalaciones, superestructura, señalización, marcas viales o cualquier otro elemento dañado por un envejecimiento acelerado por las elevadas temperaturas, o por daños causados por lluvia, viento o tormentas. Como se ha señalado el límite entre mantenimiento ordinario por irregularidad del clima y reposición de elementos al llegar a su vida útil por un lado, y adaptación y reposición de elementos por deterioro prematuro a causa del cambio climático es muy difuso.

7.10. Retos en la integración de la adaptación al cambio climático en la EIA

En la práctica, la inclusión de la adaptación en la EIA es escasa, no solo en España (Enríquez de Salamanca et al. 2016a) sino también en otros países de nuestro entorno donde se han realizado estudios al respecto, como Dinamarca (Larsen 2014) o Austria y Alemania (Jiricka et al. 2016). Existen varias razones que pueden justificarlo.

En primer lugar, la consideración del cambio climático en la EIA es escasa, y eso afecta a todos sus componentes, contribución, mitigación, impactos climáticos y adaptación. En segundo lugar, la adaptación de las infraestructuras no se considera prioritaria en España (Crespo et al. 2011). En tercer lugar, la escasa adaptación en las infraestructuras en España se está abordando de forma muy sectorial, de manera que son principalmente medidas de ingeniería o constructivas para afrontar los nuevos escenarios climáticos; son por tanto, aspectos de diseño, y no ambientales.

El primer reto es incorporar a la EIA tanto los impactos del cambio climático que pueden afectar a las infraestructuras, comentados en el anterior capítulo, como las medidas de adaptación aplicadas, aunque sean aspectos integrados ya en el diseño.

En segundo lugar, es precisa una integración de la adaptación en el proceso de EIA de manera que los aspectos ambientales influyan en las decisiones. Por ejemplo, diversas posibilidades de adaptación pueden dar lugar a alternativas diferentes que entren a formar parte de la EIA, y no sean decisiones previas inamovibles.

7.11. Discusión y conclusiones

Al abordar la adaptación al cambio climático es preciso partir de una serie de consideraciones que condicionan mucho su aplicación.

La adaptación al cambio climático es a menudo difusa. La adaptación no es un proceso específicamente ligado al cambio climático; el clima es variable de forma natural, lo que obliga a una adaptación de los sistemas naturales y humanos, por medio de respuestas espontáneas en los primeros o basadas en su diseño en las segundas. El cambio climático acrecienta los fenómenos adversos, pero no existe una clara línea definitoria entre adaptación al "cambio climático" o al "clima cambiante" (Kiem & Austin 2013, Cox et al. 2015). De hecho, muchas adaptaciones al cambio climático son un refuerzo de medidas adoptadas tradicionalmente para adaptarse al clima.

Una segunda consideración esencial en las infraestructuras de transporte es que los impactos del cambio climático no son necesariamente negativos. El caso más evidente es la previsión de inviernos más suaves, con menores heladas y nevadas, que favorecerán la vialidad invernal en carreteras y ferrocarriles, reduciendo interrupciones

de servicio, costes de mantenimiento invernal y degradación de los firmes; en las carreteras el balance entre degradación de firmes por olas de calor y menores daños invernales hace previsible a medio o largo plazo un ahorro, no un incremento de costes.

Otro aspecto importante es que la adaptación puede aplicarse de muchas maneras, o no aplicarse. La adaptación ideal es aquella que logra incrementar la resiliencia del sistema, de manera que es capaz de hacer frente a las nuevas condiciones climáticas; un ejemplo claro es elevar la rasante de una infraestructura para contrarrestar la subida del nivel del mar. Pero en muchas ocasiones la adaptación es reactiva, como consecuencia de un desastre. Incluso en ocasiones, al hacer un estudio coste-beneficio, puede que la adaptación no sea rentable, y resulte preferible reparar los daños, caso que se da por ejemplo en Ghana (Twerefou et al. 2015). Sin ir tan lejos, en España existen infinidad de carreteras locales con vados inundables, donde no es rentable construir puentes, optándose por cortarlas al tráfico durante las crecidas.

Con frecuencia no existe una respuesta adaptativa única; un mismo problema puede afrontarse de diferentes maneras, con repercusiones dispares. Un ejemplo son las infraestructuras amenazadas por fenómenos costeros, que pueden protegerse, elevarse, reubicarse o abandonarse. La adaptación debe basarse en un análisis multicriterio, donde se valoren los aspectos sociales, funcionales, económicos y ambientales, estos últimos muy descuidados actualmente, para tomar las mejores decisiones en cada caso.

Tampoco todas las infraestructuras de transporte tienen las mismas prioridades. La adaptación exige inversiones, y los fondos son limitados, por lo que se debe priorizar. La red estratégica nacional o regional de infraestructuras debe permanecer operativa, teniendo grandes impactos sociales y económicos su interrupción, pero existe una extensa red local, sobre todo de carreteras, donde los problemas asociados a su interrupción dependerán de lo esenciales que sean para la accesibilidad y la existencia de itinerarios alternativos. Un riesgo es que la priorización de la red troncal genere mayor vulnerabilidad en las zonas rurales, donde pese al menor uso de las carreteras, son auténticas “líneas de vida” (Schweikert et al. 2014a, Taylor & Philp 2015).

Una vez comentados estos aspectos generales, es preciso señalar que la adaptación de las infraestructuras de transporte suele abordarse de manera muy sectorial, basada en actuaciones en la propia obra o su entorno próximo, a pesar de que los problemas pueden ser globales. Es un problema que afecta a la adaptación al cambio climático en general, que pese a ser un problema transversal, y muy ligado al uso del territorio, se suele afrontar sectorialmente: transportes, agua, poblaciones, agricultura... Un ejemplo son los problemas hidrometeorológicos, asociados al régimen pluviométrico pero también de forma esencial al estado de conservación de las cuencas y su gestión; muchas avenidas que afectan a infraestructuras son una manifestación de una gestión inadecuada (cultivos, deforestación, urbanización, canalización de ríos...).

Es también cierto que los problemas asociados al cambio climático no se prevén críticos para las infraestructuras en España, como si pueden serlo en otros sectores como la agricultura. La mayoría de impactos generarán un envejecimiento prematuro de las infraestructuras, o problemas temporales, que en muchos casos no son nuevos, sino una mayor recurrencia de problemas ya existentes.

Pese a que la necesidad de adaptación de las infraestructuras de transporte no se considera prioritaria en España (Crespo et al. 2011), el margen de incertidumbre es fuerte, y las consecuencias podrían ser importantes. Es preciso analizar la problemática que ya existe en regiones vulnerables, como se ha hecho para San Vicente y las Granadinas, para entender la magnitud de los problemas para la población. Los problemas en firmes de carreteras, como se ha comentado, parece que supondrán en el futuro menos costes a nivel nacional, al ser mayor el ahorro por reducción de problemas invernales que el coste por altas temperaturas estivales; pero la distribución de daños no es homogénea, y las zonas más cálidas del sur pueden ver muy dañadas sus carreteras, que ya presentan actualmente un déficit de mantenimiento. También los problemas asociados al pandeo de raíles merecen especial atención al precisar limitaciones de velocidad, contraproducentes con la rentabilidad del transporte ferroviario, y mucho más aún con el transporte de viajeros en la alta velocidad. El socavamiento de cimientos de puentes es un problema ya existente y que se agravará, pudiendo generar grandes problemas de seguridad e interrupciones prolongadas de servicio.

La adaptación en infraestructuras de transporte se analiza principalmente en función de los costes derivados de los impactos climáticos, de reparación, mantenimiento o por retrasos o interrupciones de servicio. Esta visión limita la posibilidad de afrontar los problemas de forma global. Muchas medidas de adaptación propuestas en este capítulo no están específicamente diseñadas para hacer frente al cambio climático, sino para reducir costes de mantenimiento, como ocurre con firmes o pinturas para marcas viales, pero son también efectivas para este problema.

Las carreteras y ferrocarriles se diseñan en función de normas, que establecen parámetros aceptables para su adaptación a las condiciones climáticas actuales, normales o extremas, con un margen de garantía o riesgo asumible. Por ello, una buena parte de la adaptación al cambio climático de las infraestructuras de transporte puede hacerse adecuando esas normas a los escenarios previsibles. De hecho, la reciente revisión de la norma 5.2-IC de drenaje (BOE 2016a) establece mayores caudales de cálculo, por lo que las nuevas infraestructuras estarán mejor adaptadas a las futuras condiciones. Se plantea sin embargo un gran problema con las infraestructuras existentes, construidas con normas menos exigentes, o sin ellas, y no sometidas a EIA, donde podría exigirse incluir la adaptación, y por ello mucho más vulnerables. Si se opta por una adaptación progresiva, podría quedar fuera del ámbito de la EIA, excluyendo los aspectos ambientales de la toma de decisiones.

Una conclusión esencial con respecto a la adaptación es su carácter transversal, lo que debería llevar a un planteamiento de soluciones interdisciplinar e intersectorial. Las crecidas de ríos afectan a las infraestructuras, pero también a la población o los cultivos, por lo que, con independencia de medidas sectoriales, deberían afrontarse globalmente. La adaptación *ex situ*, no necesariamente limitada a las infraestructuras, debería ganar peso, aunque resulta muy difícil por razones competenciales, y queda también fuera del ámbito de la EIA.

Otro aspecto esencial es la necesidad de hacer un diseño global adaptado a las condiciones que puede inducir el cambio climático. Un parte esencial son las citadas normas, pero también se debe considerar la ubicación de las infraestructuras, y los riesgos que ello implica; en muchas infraestructuras dañadas en crecidas el problema no es tanto del diseño técnico, como de una ubicación inadecuada, en zonas inundables.

Por último, es preciso fomentar la adaptación comportamental, una respuesta adecuada de la ciudadanía a los riesgos ambientales. Siguen siendo tristemente frecuentes las tragedias al cruzar en coche cauces durante avenidas, o los colapsos por nevadas anunciadas, casos en los que interviene la responsabilidad de los conductores. Es económicamente inviable construir grandes puentes en pequeñas carreteras que cruzan cauces estacionales, o tener enormes parques de quitanieves parados para situaciones excepcionales; un corte de carretera o una recomendación de no circular son medidas adaptativas razonables. Además, aunque se reducirán las precipitaciones y nevadas, es previsible que se incrementen los episodios extremos.

8 Impacto ambiental de la adaptación al cambio climático

Objetivos del capítulo

Las medidas de adaptación son esenciales para enfrentarse al cambio climático, pero pueden tener también impactos ambientales indeseados. Al analizar las propuestas de adaptación, con carácter general y no solo en las infraestructuras de transporte, se detecta una falta de atención a estos impactos, que también son ignorados en las guías y directrices sobre impacto ambiental y cambio climático.

Por ello, en una primera parte de este capítulo se incluye una investigación sobre los impactos ambientales de la adaptación, un tema novedoso, concluyendo que el grado de consideración es muy limitado, debido a diferentes razones que se detallan. Esta investigación se ha presentado en el XI Congreso Internacional de Geomática y Ciencias de la Tierra (Enríquez de Salamanca et al. 2016d) y está en proceso de revisión en la revista *Environmental Impact Assessment Review*.

Una vez analizado el problema general, se ha desarrollado un apartado, también novedoso al no existir literatura al respecto, sobre los impactos de la adaptación en las infraestructuras lineales de transporte, así como sobre las posibilidades de mitigación de estos impactos inducidos.

Es esencial que los agentes implicados en el diseño de la adaptación al cambio climático, sea cual sea su especialidad, sean conscientes de la posible existencia de impactos ambientales asociados a la medidas propuestas. Por ello, como desarrollo práctico de este capítulo, se ha elaborado un artículo dedicado específicamente a los impactos ambientales de la adaptación al cambio climático en firmes de carreteras, y remitido a una revista específica de ese sector para alcanzar a los responsables de esta adaptación; está en proceso de evaluación en la revista *International Journal of Pavement Engineering*.

Publicaciones

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016d. Impacto ambiental de la adaptación al cambio climático. *XI Congreso Internacional de Geomática y Ciencias de la Tierra TOPCART 2016*. Toledo, 26 a 30 de octubre de 2016. Colegio de Ingeniería Geomática y Topográfica.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. Environmental impacts of climate change adaptation. *Environmental Impact Assessment Review* **(en revisión)**.

Enríquez de Salamanca Á. Environmental impacts of climate change adaptation of road pavements and mitigation options. *International Journal of Pavement Engineering* **(en revisión)**.

8.1. Consideración del impacto ambiental de la adaptación

8.1.1. Introducción

Los efectos del cambio climático son apreciables, demandando acciones (Pielke et al. 2007, Klein 2011), de mitigación para evitar emisiones de GEI o reducir su concentración atmosférica, o de adaptación, para adaptarse al clima real o esperado y sus efectos (Field et al. 2014). Sin embargo, cualquier medida de adaptación puede tener impactos ambientales no deseados (Adger et al. 2005).

Los impactos del cambio climático en los sistemas humanos y naturales y la adaptación a esos impactos han sido ampliamente estudiados (capítulos 6 y 7). Las directrices existentes sobre cambio climático y EIA (p.e. CEQ 2010 en Estados Unidos; CEAA 2003 en Canadá; IEMA 2010a, 2010b en Reino Unido; EU 2013 en la Unión Europea) indican que debería evaluarse la contribución al cambio climático y los impactos del cambio climático en los proyectos, y proponer medidas de mitigación y adaptación. Estos documentos no mencionan los posibles impactos derivados de la mitigación y, sobre todo, de la adaptación.

En las infraestructuras lineales de transporte la falta de consideración de los potenciales impactos ambientales de la adaptación es prácticamente total. Pero este problema trasciende a este sector, y parece ser una carencia generalizada; los impactos ambientales de la adaptación están recibiendo poca atención en las políticas, la normativa, el debate académico (Fezzi et al. 2015) y la toma de decisiones.

Antes de centrarse en carreteras y ferrocarriles es preciso establecer el marco general, que permita determinar en qué medida se incorpora el enfoque ambiental a la adaptación al cambio climático, y el grado en que se consideran sus potenciales impactos ambientales. Al tratarse de un problema general, su enfoque también debe serlo, no teniendo sentido abordarlo de forma sectorial. Por ello, en este primer apartado se ha ampliado el foco de la tesis para, una vez estudiado el problema global, la escasa consideración de los impactos ambientales de la adaptación, centrase posteriormente de nuevo en las infraestructuras lineales de transporte. Esta investigación se ha presentado preliminarmente en el congreso Topcart (Enríquez de Salamanca et al. 2016d), estando en proceso de publicación en la revista *Environmental Impact Assessment Review*.

8.1.2. Metodología

La adaptación es un campo multidisciplinar, con diferentes agentes trabajando en él. En consecuencia, una revisión de este tema debe incluir una amplia gama de documentos con diferentes perspectivas y fuentes, tanto académicas como grises. La diferencia en el formato de las fuentes, el estilo y los objetivos, y la necesidad de buscar

conceptos bastante específicos, limita la capacidad de los motores de búsqueda tradicionales para proporcionar información, requiriendo combinar el uso de buscadores tradicionales con la búsqueda individualizada en los documentos. Una vez realizada esta búsqueda combinada, se analiza de forma individual cada documento, tanto cualitativa como cuantitativamente. De acuerdo con Berrang-Ford et al. (2015) esta revisión se enmarca en el método de "revisión realista", con un componente mixto cualitativo y cuantitativo. También se ha seguido la propuesta de componentes para una revisión que hacen estos autores, y que incluye la pregunta/objetivo de la investigación, las fuentes de datos y selección de documentos, y el análisis y presentación de resultados.

Preguntas de investigación

Esta revisión evalúa cómo se abordan en la literatura los impactos ambientales de la adaptación. Para ello, se han definido preguntas en tres temas principales:

a) *Enfoques de la adaptación*. ¿Cuáles son los principales enfoques de la adaptación al cambio climático en la literatura? ¿Es importante el enfoque ambiental? El objetivo es establecer las perspectivas con las que la literatura considera la adaptación al cambio climático y su peso.

b) *Impactos ambientales de la adaptación*. ¿Se mencionan en la literatura los posibles impactos ambientales de la adaptación al cambio climático? El objetivo es analizar si los impactos, reales o potenciales, de las medidas de adaptación se mencionan efectivamente en la literatura y, en caso afirmativo, en qué medida.

c) *EA y adaptación*. ¿Está integrada la EA en la adaptación al cambio climático y en la toma de decisiones? ¿Se menciona en la literatura? El objetivo es determinar la integración de EA y adaptación.

Fuentes de información y selección de documentos

a) *Justificación y descripción de las fuentes bibliográficas*. La investigación sobre la adaptación al cambio climático puede encontrarse en la literatura académica, pero las políticas y prácticas se recogen principalmente en la literatura gris (manuales, informes, estrategias, estudios de casos, resúmenes de países, etc.). El enfoque de esta revisión requiere la inclusión de literatura académica y gris. El idioma utilizado en las búsquedas ha sido el inglés. La revisión se centra principalmente en la literatura de los últimos diez años, incluyendo también fuentes anteriores encontradas mediante seguimiento de citas (Berrang-Ford et al. 2015).

b) *Selección de documentos y criterios de inclusión*. La cantidad de documentos sobre adaptación al cambio climático es enorme, por lo que es esencial limitar los resultados de la búsqueda para obtener una muestra que sea a la vez manejable y significativa. Esto se ha hecho mediante un proceso en tres etapas.

- *Selección primaria*. Se ha basado en términos de búsqueda. (i) Para la literatura académica se ha utilizado el buscador *Web of Science* (WoS), utilizando las palabras "climate change " AND "adaptation" en el campo "Título", y limitando el período de publicación (2006-2015), el idioma (inglés) y los tipos de documentos (artículos o revisiones). Como resultado, se obtuvieron cerca de 1 500 resultados. (ii) Para la literatura gris se utiliza un buscador general, Google, empleando los términos "climate change" AND "adaptation", y limitando los tipos de archivo a "pdf". Se obtuvieron 500 resultados.
- *Selección secundaria*. Después de la selección primaria, se hizo una selección secundaria con dos criterios. (i) *Calidad*: los documentos deben cumplir requisitos mínimos de calidad; para documentos académicos se considera suficiente su inclusión en la WoS, y para documentos grises sólo se aceptan los procedentes de instituciones internacionales (OCDE, Banco Mundial, Naciones Unidas, OTAN, etc.), organismos gubernamentales (Bolivia, Canadá, Unión Europea, España, Reino Unido, Estados Unidos, etc.) o instituciones reconocidas o solventes (asociaciones mundiales, universidades, instituciones de investigación, etc.). (ii) *Ámbito de aplicación*: se seleccionaron solo documentos centrados en la adaptación al cambio climático; la aparición de los términos de búsqueda primarios no significa necesariamente que el documento esté dedicado a este tema. Para detectarlo, se han leído los resúmenes en documentos académicos, o los índices e introducción en la literatura gris.
- *Selección terciaria*. El tercer filtro de selección se basó en las medidas de adaptación incluidas en los documentos, con tres criterios. (i) Los documentos deben incluir medidas de adaptación específicas y no genéricas. Para detectar estas medidas se buscó el término "adaptation" en los documentos. También se ha buscado el término "assessment" en esta etapa, para detectar referencias a EA, EIA o SEA. (ii) Las medidas de adaptación son una respuesta al cambio climático y no a los riesgos climáticos naturales; las fronteras entre ambos no están claras (Cox et al. 2015) y las medidas se superponen, pero sólo se incluyen documentos donde las medidas se proponen como adaptación al cambio climático. (iii) Las medidas de adaptación pueden tener impactos significativos; aunque este criterio puede parecer subjetivo, clave en la EA (Lawrence 2007, Briggs & Hudson 2013, Jones & Morrison-Saunders 2016). Para decidir si los impactos ambientales son significativos se ha seguido la práctica en EA, porque todas las medidas analizadas son conocidas. Como no se sabían de antemano las medidas propuestas, no existen criterios de inclusión preliminares, tomando una decisión caso por caso. La información extraída de la literatura ha sido primero el enfoque principal del documento y luego las medidas de adaptación, objetivos o impactos climáticos que las justifican, características e impactos ambientales, variando en cada caso.

- *Otros criterios de selección*. La muestra principal, se completa con: (i) Seguimiento de citas, principalmente de documentos claves y revisiones extensas como los informes del IPCC. (ii) Búsquedas específicas en sitios web de instituciones importantes en este tema. Para estos documentos los criterios de selección son similares a lo expuesto en la selección terciaria.

Como resultado, se seleccionan 120 documentos con 239 referencias a medidas de adaptación (un documento puede tener una o varias). Los documentos proceden de 41 revistas diferentes, 4 conferencias y 26 instituciones u organizaciones.

c) *Error y sesgo*. La búsqueda puede dejar fuera documentos que cumplan los criterios de selección. Los criterios de búsqueda hacen que la revisión no sea exhaustiva, sino una muestra (Berrang-Ford et al. 2015). El tipo de revisión requiere una selección experta, con un uso limitado de términos de búsqueda, por lo que algún documento puede ser excluido indeseadamente. La disponibilidad de literatura gris depende de la transparencia de las organizaciones y su cultura de acceso abierto. El uso del inglés también puede sesgar la selección. A pesar de ello los resultados aportan una muestra representativa porque: (i) Los documentos seleccionados abarcan todo el mundo. (ii) Los documentos de las organizaciones internacionales, como la ONU o el Banco Mundial, proporcionan datos incluso de zonas remotas, y la literatura académica es internacional. (iii) Se obtiene una amplia representación de medidas de adaptación y enfoques sectoriales, desde la investigación sobre el cambio climático hasta la ingeniería, la economía, la salud, la agricultura o las ciencias sociales. (iv) El objetivo de la investigación es mostrar si se incluyen los impactos ambientales de la adaptación, pero no un metanálisis de los datos cuantitativos, que son inexistentes. Documentos adicionales pueden cambiar los porcentajes concretos, pero no las tendencias generales.

Análisis de las publicaciones seleccionadas

a) *Enfoques de adaptación*. Se ha clasificado cada documento por su enfoque sobre la adaptación, es decir, la perspectiva sectorial dominante: económica (costos, financiación, coste/beneficio, etc.), técnica (diseño, viabilidad, funcionalidad, eficacia, etc.), social (resiliencia de comunidades, aceptación, influencia en la calidad de vida, etc.) o ambiental (impactos no deseados, cambios en ecosistemas, etc.). La decisión es individual; unos casos tienen un enfoque claro y otros menos. Una vez identificados los enfoques, se calculó su peso en la muestra.

b) *Medidas de adaptación.* Se extrae información sobre medidas de adaptación con potenciales impactos significativos. Medidas similares pueden tener nombres diferentes en los documentos, por lo se ha hecho un análisis para agruparlas en categorías. Para cada medida se incluyó una corta definición, de acuerdo con las descripciones y objetivos mencionados en los documentos. Como resultado, se han obtenido 32 medidas de adaptación con posibles impactos significativos.

c) *Problemas del cambio global*. Las medidas de adaptación son respuestas a problemas de cambio global, relación que puede estar o no definida en los documentos. Se ha definido siete problemas principales, asignando cada medida a uno de ellos (aunque los límites entre problemas son a menudo difusos).

d) *Tipo de adaptación*. Cada una de las medida de adaptación analizadas se ha clasificado según los tipos y atributos de la adaptación, definidos en el anterior capítulo (Tabla 45), atendiendo a la intención, tiempo, alcance temporal, alcance espacial, forma, dureza, estrategia, modo de acción y efectos.

c) *Especificidad de la adaptación*. Se define el nivel de especificidad de las medidas de adaptación con respecto a los impactos del cambio climático. Para ello, se ha desarrollado un esquema de clasificación en el que se define si las medidas responden a impactos específicos del cambio climático, tienen múltiples usos, son un refuerzo de las medidas existentes o similares a otras medidas ya utilizadas (Tabla 54). Luego, se aplican estas categorías a cada medida cualitativamente.

Tabla 54 Especificidad de la adaptación con respecto a los impactos del cambio climático

Adaptación	Definición	Ejemplos
Exclusiva (Ex)	Medidas aplicadas solo para adaptarse al cambio climático	Adaptación a la subida del nivel del mar, descongelación del permafrost
Múltiple (Mu)	Medidas con múltiples objetivos, aparte de la adaptación	Presas y embalses
Intensiva (In)	Medidas usadas de forma más intensa por las presiones del cambio climático	Defensa de ríos, recrecido de presas
Multifuncional (Mf)	Medidas usadas como adaptación, similares a las utilizadas para otros usos	Extracción de agua subterránea, riego

Fuente: Elaboración propia

e) *Impactos ambientales*. Se definen los principales impactos significativos que motivan la inclusión de las medidas en la revisión. Se utiliza como fuente primaria la literatura revisada, y si los impactos no están detallados, la práctica en EA.

f) *Referencias y localización*. Para cada medida, se incluyen las referencias bibliográficas y las ubicaciones (países, regiones o continentes).

8.1.3. Resultados

Se han seleccionado de la literatura 32 medidas de adaptación propuestas en todo el mundo con posibles impactos ambientales significativos (Tabla 55).

Tabla 55 Problemas del cambio global, adaptación, tipos, especificidad, impactos y localización

Problema del cambio global	Adaptación	Definición	Tipo de adaptación	Especificidad con cambio climático	Impactos ambientales	Referencias
Incremento del nivel del mar y de la agresividad de los fenómenos costeros	Defensas costeras	Obras para proteger zonas costeras y frenar la erosión, como muros de contención, diques, espigones o escolleras	Pl, An-Re, Lt, Lo, En, Ha, Pr, Rs-Ex, In	Ex (subida del nivel del mar) In (agresividad costera)	- Afección a manglares, marismas y praderas marinas por la subida del nivel del mar[1] - Interrupción del movimiento natural de la arena; pérdida de playas; evitar migración de humedales al interior[2, 5] - Afección erosión de playas[3] - Alteración del balance de sedimentos produciendo erosión in otras áreas[4] - Favorece el desarrollo[6]	Asia (Regmi & Hanaoka 2011, Hijioka et al. 2014)[1], Canadá (Richardson 2010[2], Boyle et al. 2013), Djibouti (UNFCCC 2007), Ghana (World Bank 2010f), Japón (Klein et al. 1999), Kiribati (Donner & Webber 2014)[3], Maldivas (Sovacool 2012), Mozambique (World Bank 2010a), Países Bajos (PRC 2009), sin localizar (Cendrero et al. 2005, UNFCCC 2006, Klein 2011[4], Warren et al. 2012, USAID 2013, Wong et al. 2014), Noruega (Arntsen & Tørum 2007), Samoa (World Bank 2010b), Sur de China (Du et al. 2013), Reino Unido (DEFRA 2010, RAE 2011), EEUU (Kirshen et al. 2008b5, TRB 2008, ACC 2010)[6], Vietnam (World Bank 2010d)
	Regeneración de playas	Suministro de arena para compensar las pérdidas por erosión costera natural o por defensas	Pl, Re, St, Lo, En, Ha, Ac, In	Ex (subida del nivel del mar) In (agresividad costera)	- Impacto en la extracción de arenas - Impacto en los componentes del ecosistema marino	Maldivas (Sovacool 2012), Mozambique (World Bank 2010a), Países Bajos (PRC 2009, Hewitson et al. 2014), sin localizar (Warren et al. 2012)
	Islas artificiales	Ganar terreno al mar para compensar la pérdida por subida del nivel del mar	Pl, An, Lt, Lo, En, Ha, Tr	Ex (subida del nivel del mar)	- Alteración de la dinámica costera - Destrucción de lecho marino - Daño a biodiversidad marina	Maldivas (Sovacool 2012)
	Elevación de infraestructuras	Elevar calles, carreteras, ferrocarriles y terraplenes para evitar inundaciones por subida del nivel del mar	Pl, An-Re, Lt, Lo, En, Ha, Pr, Rs-Ex, In	Ex (subida del nivel del mar)	- Ocupación de terrenos - Impacto en el paisaje - Necesidad de préstamos y vertederos	Asia (Regmi & Hanaoka 2011), Canadá (Boyle et al. 2013), EEUU (TRB 2008, Romero-Lankao et al. 2014), sin localizar (USAID 2013)
	Retirada costera	Mover asentamientos e infraestructuras tierra adentro para evitar daños costeros	Pl, An, Lt, Wi, En-Eb, Ha-So, Re, Ex, Tr	Ex (subida del nivel del mar)	- Ocupación de terrenos con afección a la biodiversidad, agricultura o paisaje - Cambio en escorrentía por nuevas áreas construidas con consecuencias hidrológicas	Asia (Regmi & Hanaoka 2011), Australia, Nueva Zelanda (Reisinger et al. 2014), Bangladesh (IFAD 2009), EEUU (Kirshen et al. 2008b), Mozambique (Artur & Hilhorst 2012), Islas Salomón (Rasmussen et al. 2009), Samoa (World Bank 2010b), Reino Unido (Klein et al. 1999, Dawson et al. 2016), EEUU (TRB 2008, Romero-Lankao et al. 2014), sin localizar (Cendrero et al. 2005, UNFCCC 2006, USAID 2013, Wong et al. 2014)
Erosión fluvial e inundaciones	Defensas en ríos	Canalización, muros, escolleras o motas para estabilizar ríos y evitar inundaciones	Pl, An-Re, Lt, Lo, En, Ha, Pr, Ex, In	In (frecuencia de inundaciones)	- Incremento de inundaciones aguas abajo[7] - Pérdida de naturalidad, cambio en el caudal de ríos, alteración de la calidad del agua, daños a la vegetación de ribera[8]	Bangladesh (IFAD 2009, World Bank 2010e), Chile (Young et al. 2014), Mekong (Jacobs 1996), San Vicente y las Granadinas (Enríquez de Salamanca & Carrasco 2015)[8], Reino Unido (DEFRA 2010, RAE 2011, Hewitson et al. 2014), Vietnam (World Bank 2010d), sin localizar (Adger et al. 2005b[7], UNFCCC 2006, USAID 2013)
	Retirada de llanuras de inundación	Mover asentamientos e infraestructuras fuera de llanuras de inundación para evitar daños	Pl, An, Lt, Wi, En-Eb, Ha-So, Rt, Ex, Tr	In (frecuencia de inundaciones)	- Similar a la retirada costera	Reino Unido (DEFRA 2010)
	Retirada de sedimentos en ríos	Dragado de ríos para incrementar capacidad o permitir navegar con menor caudal	Pl, An-Re, St, Wi, En, Ha, Ac, Ex, In	In (frecuencia de inundaciones) Ex (menores caudales)	- Destrucción de lecho, fauna bentónica y zonas de freza - Alteración de la dinámica fluvial - Pérdida de calidad del agua	Ghana (World Bank 2010f), EEUU (TRB 2008)
	Aumento y/o refuerzo de puentes	Refuerzo cimientos y mayor sección de puentes para permitir mayor caudal	Pl, An-Re, Lt, Lo, En, Ha, Pr, Rs-Se, In	In (frecuencia de inundaciones)	- Pérdida de calidad del agua, daños al lecho fluvial y a la vegetación de ribera[9]	Europa (Nemry & Demirel 2012), San Vicente y las Granadinas (Enríquez de Salamanca & Carrasco 2015)[9], Reino Unido (DEFRA 2010), EEUU (TRB 2008)
Incrementos de temperatura estival y olas de calor	Cambios de pavimento en carreteras y aeropuertos	Cambio firmes bituminosos por menos sensibles calor, reducción en frecuencia de mantenimiento	Pl, Re, Lt, Lo, En, Ha, Ac, Rs, In	In (mayor temperatura)	- Incremento de ruido en firmes de hormigón - Mayor consumo de recursos y energía y más residuos al acortar el mantenimiento	Asia (Asia (Regmi & Hanaoka 2011), Australia (Taylor & Philp 2015), Europa (Nemry & Nemirel 2012), EEUU (TRB 2008, Chinowsky et a. 2013), España (CEDEX et al. 2013), sin localizar (PIARC 2012)
	Aire acondicionado	Mayor uso aire acondicionado en usos residencial, comercial o industrial o estaciones	Pl, Re, Lt, Lo, Te, So, Pr, Ex, Tr	In (mayor temperatura)	- Mayor demanda de energía y emisión de GEI [16-24] - Mayor necesidad de redes de transporte de energía[18]	Australia (Ren et. al. 2011[16], Reisinger et al. 2014[17], Farbotko & Waitt 2011[18]), Reino Unido (Jenkins et al. 2014), EEUU (Kirshen et al. 2008a[22], Mansur et al. 2008[23], Romero-Lankao et al. 2014[24], Barreca et al. 2016), España (CEDEX et al. 2013), sin localizar (Haines et al. 2006[19], UNFCCC 2006, Scott et al. 2008[20], Isaac & van Vuure 2009[21])

Tabla 55 (cont.) Problemas del cambio global, adaptación, tipos, especificidad, impactos y localización

Problema del cambio global	Adaptación	Definición	Tipo de adaptación	Especificidad con cambio climático	Impactos ambientales	Referencias
Sequía, reducción de precipitación caudales y agua potable disponible	Presas y embalses	Construcción de presas para almacenar agua o incrementar su capacidad recreciendo o dragando	Pl, An-Re, Lt, Lo, En, Ha, Ac, Rs, In	Múltiple (consumo de agua, riego, energía) In (frecuencia de sequías)	- Riesgo de hidrodependencia y amenaza a la salud del ecosistema y la resiliencia de las comunidades[10] - Sedimentación, evaporación[11] - Ocupación del área inundada - Regulación-reducción caudales - Barrera para la fauna: presa para peces y embalse para animales terrestres	África (Niang et al. 2014)[10], Países árabes (Verner 2012)[11], Bolivia (World Bank 2010g), Ghana (World Bank 2010f), Llanura Indo-Gangeática (Rivera-Ferre et al. 2013), Kenia, Malawi (UNFCCC 2007), Oriente Medio-Norte de Africa (Sowers et al. 2011), Países Bajos, Portugal, Ucrania, Hungría (Huntjens et al. 2010), Reino Unido (DEFRA 2010, RAE 2011), Tanzania (Rajabu et al. 2009), Vietnam (World Bank 2010d), sin localizar (UNFCCC 2006)
	Pequeñas presas y estanques	Construcción de pequeñas presas y estanques para almacenar agua a menudo para riego	Pl, An-Re, Lt-St, Lo, En, Ha-So, Ac, Rs, In	In (frecuencia de sequías)	- Ocupación del área inundada - Reducción de caudales - Barrera para los peces	Armenia (Ahouissoussi et al. 2014a), Brasil (IFAD 2009), India (Sukhija 2008), Chile (Young et al. 2014), Llanura Indo-Gangeática (Rivera-Ferre et al. 2013), Oriente Medio-N África (Sowers et al. 2011), SE Asia-Himalayas (Tyler & Fajber 2009), Suroeste EEUU (Blinman 2008), O Africa (Van de Giesen et al. 2010), África (Niang et al. 2014)
	Trasvases de agua	Detracción de agua de una cuenca para trasvasarla a otra, donde será utilizada	Pl, An-Re, Lt, Wi, En, Ha, Ac, Rs, Tr	Mf (consumo de agua, riego) In (frecuencia de sequías)	- Impacto en la cuenca de origen: reducción caudal, degradación fluvial, desaparición fauna y vegetación fluvial, bajada nivel freático, pérdida uso recreativo o energético, degradación de estuarios...	Botswana (Stringer et al. 2009), California (Tanaka et al. 2006), Costa de Marfil (UNFCCC 2007), Ghana (World Bank 2010f), India (Moors et al. 2011), Región Mediterránea (Iglesias et al. 2007), Países Bajos, Portugal, Ucrania, Hungría (Huntjens et al. 2010), sin localizar (UNFCCC 2006)
	Extracción de aguas subterráneas	Extraer agua subterránea por perforaciones o pozos (consumo humano o riego), para compensar la reducción de agua potable	Pl, Re, St, Lo-Wi, Te, Ha-So, Ac, Rs, In	Mf (consumo de agua, riego) In (frecuencia de sequías)	- Sobrexplotación, salinización[12] - Descenso del nivel freático - Consumo de recursos con baja tasa de renovación - Reducción de aporte a ríos - Impacto vegetación freatófita - Subsidencia del terreno - Mayor daño en terremotos	Países árabes (Verner 2012)[12], Bolivia (Gonzales et al. 2006, World Bank 2010g), Brasil (IFAD 2009), California (Tanaka et al. 2006), Ghana (World Bank 2010f), India (Moors et al. 2011), Kenia, Malawi (UNFCCC 2007), Región mediterránea (Iglesias et al. 2007), Oriente Medio-N África (Sowers et al. 2011), Namibia (Newsham & Thomas 2011), Senegal (Mbow et al. 2008)
	Desalinización	Desaladoras para obtener agua dulce a partir del agua del mar	Pl, Re, Lt, Lo, En-Te, Ha, Ac, Rs, Tr	Mf (consumo de agua, riego) In (frecuencia de sequías)	- Salmuera, huella carbono[13] - Incremento de salinidad, metales, hidrocarburos y compuestos tóxicos[14] - Nexo agua-energía, emisión de GEI, contaminantes y salmuera y subida del precio del agua[15]	Países árabes (Verner 2012)[13], Australia (Reisinger et al. 2014)[14], Reino Unido (RAE 2011), EEUU-México (McEvoy & Wilder 2012)[15], sin localizar (UNFCCC 2006),
	Nuevos proyecto hidroeléctricos	Nuevas centrales hidroeléctricas para compensar la pérdida de producción por menor caudal	Pl, An-Re, Lt, En, Ha, Ac, Rs, In	In (menores caudales)	- Reducción de caudal entre la derivación y la descarga - Barrera para peces - Daño a peces en las turbinas	Etiopía (World Bank 2010c), Mozambique (World Bank 2010a)
Inviernos más cortos y suaves: reducción de nevadas y deshielo del permafrost	Fabricación de nieve y esquí en glaciares	Innivación artificial en estaciones esquí y expansión a zonas de glaciar para asegurar nieve para esquiar	Pl, An-Re, Lt, Lo, Te, Ha, Ac, Se, In	In(menores nevadas) Mu (expandir estaciones y duración de la temporada)	- Afección a vegetación, suelo e hidrología en zonas alpinas[33] - Recesión de glaciares; reducción del nivel de agua, impacto en la vida acuática; balsas afectan al paisaje[34] - Consumo de agua y energía; impacto vegetación y suelo[35] - Ruido de cañones de nieve	Australia (Bicknell & McManus 2006, Hennessey et al. 2008, Reisinger et al. 2014[33]), Austria (Steiger & Mayer 2008, Unbehaun et al. 2008, Steiger 2010), Alpes (Abegg et al. 2007[34], Rixen et al. 2011[35]), Canadá (Scott et al. 2003 2007), Nueva Zelanda (Hendrikx & Hreinsson 2012), Pirineos (Pons et al. 2015)
	Regulación de caudales en ríos	Cambio en la regulación de caudales de ríos por la reducción del caudal de base por menor acumulación de nieve	Pl, Re, Lt, Wi, En, Ha, Ac, Se, Tr	In (menores caudales)	- Reducción de caudales - Degradación fluvial - Desaparición de fauna y vegetación fluvial - Bajada del nivel freático - Pérdida de uso recreativo y potencial energético - Degradación de estuarios	España (Mora et al. 2016)
	Reubicación de infraestructuras	Reubicación de infraestructuras en zonas de permafrost a áreas estables y nuevos puentes que reemplacen a rutas de hielo	Pl, Re, Lt, Wi, En, Ha, Ac, Se, Tr	Ex (calentamiento global)	- Ocupación de terrenos, pudiendo afectar al paisaje y la biodiversidad	Canadá (Infrastructure Canada 2006), EEUU (TRB 2008)
Reducción en la seguridad alimentaria, mayor frecuencia de desastres, malestar de la población	Migración	Movimiento de población temporal (por escasez o actividades estacionales) o permanente (condiciones vida insoportables)	Au, Co-Re, St-Lt, Wi, Be-Fi-Sp, So, Rt, Ex, Tr	In (menores ingresos y cantidad de alimento) Mf (desastres naturales, guerras, sequía,...)	- Rápida expansión urbana - Barriadas sin alcantarillado ni recogida de basuras - Mayor presión humana en el entorno de zonas de acogida - Ocupación de tierra inculta con posibles efectos sobre la biodiversidad - Conflictos sociales y tragedias humanas	África (Niang et al. 2014), países árabes (Verner 2012), Bangladesh (World Bank 2010e), Burkina Faso (Barbier et al. 2009, Nielsen & Reenberg 2010), Ghana (Kwadwo & Asantewaa 2016), Irán (Keshavarz et al. 2014), Malawi (Stringer et al. 2009), Mali, Nigeria (Adepetu & Berthe 2007), Somalilandia (Hartmann & Sugulle 2009), Sudeste Asia-Himalayas (Tyler & Fajber 2009), Tayikistán, Kazajistán (Barbone et al. 2010)

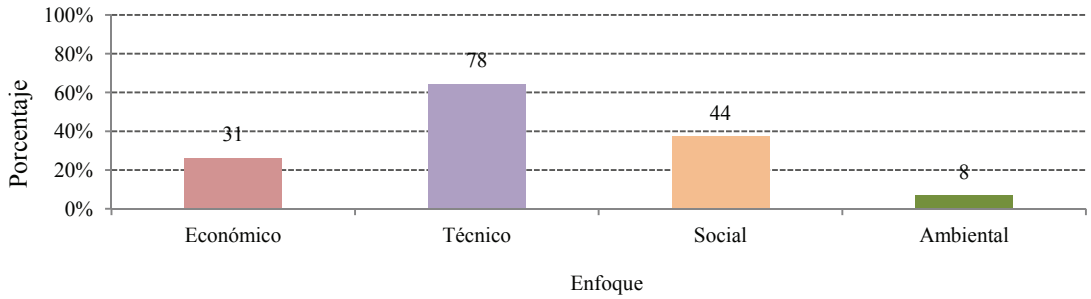
Tabla 55 (cont.) Problemas del cambio global, adaptación, tipos, especificidad, impactos y localización

Problema del cambio global	Adaptación	Definición	Tipo de adaptación	Especificidad con cambio climático	Impactos ambientales	Referencias
Perdida de producción agrícola y ganadera, reducción de la seguridad alimentaria	Riego de cultivos	Riego de cultivos de secano o mayor aporte de agua a regadíos para compensar la menor precipitación y evitar pérdida de producción	Pl, Co-Re, St, Wi, Te, Ha, Ac, Se, In-Tr.	In (menor precipitación) Mf (riego de cultivos de secano)	- Transmisión enfermedades (malaria, esquistosomiasis, filariasis linfática) por el almacenamiento de agua[25] - Salinización de acuíferos; degradación de humedales[26] - Impacto en biodiversidad acuática[27] - Impactos asociados a la obtención de nuevos recursos hídricos (presas, embalses, pozos, trasvases, desaladoras)	Albania (Sutton et al. 2013a), países árabes (Verner 2012), Armenia (Ahouissoussi et al. 2014a), Azerbaiyán (Ahouissoussi et al. 2014c), Bolivia (Gonzales et al. 2006, World Bank 2010g), Brasil (Burney et al. 2014), Burkina Faso (Barbier et al. 2009), Asia Central (Lioubimtseva & Henebry 2009)[25], Etiopía (Bryan et al. 2009, Deressa et al. 2009, World Bank 2010c), Eritrea (IFAD 2009), Georgia (Ahouissoussi et al. 2014b), Ghana (Tambo 2016), Irán (Keshavarz et al. 2014), Macedonia (Sutton et al. 2013d), Mali (Adepetu & Berthe 2007), Oriente Medio-Norte de Africa (Sowers et al. 2011), Moldavia (Sutton et al. 2013c), Pakistán (Abid et al. 2016), Sudáfrica (Bryan et al. 2009), Suiza (Tendall & Gaillard 201527), Tayikistán, Kazajistán (Barbone et al. 2010), Uzbekistán (Sutton et al. 2013b), Vietnam (World Bank 2010d), Africa subsahariana (Niang et al. 2014), sin localizar (Wreford et al. 2010, Klein 2011[26])
	Incremento en el uso de abonos y pesticidas	Mayor dosis de abonos para compensar la pérdida de productividad y pesticidas por mayor incidencia de plagas	Pl, Co, St, Wi, Te, Ha, Ac, Se, In-Tr	In (menor producción) Mf (abonar cultivos no fertilizados)	- Riesgo para la salud humana y de los ecosistemas[28] - Mayor emisión de N_2O procedente de los abonos	Albania (Sutton et al. 2013a), Armenia (Ahouissoussi et al. 2014a), Azerbaiyán (Ahouissoussi et al. 2014c), Burkina Faso (Barbier et al. 2009), Asia Central (Lioubimtseva & Henebry 2009)[28], Europa (Olesen et al. 2011), Georgia (Ahouissoussi et al. 2014b), Macedonia (Sutton et al. 2013d), Mali (Adepetu & Berthe 2007), Moldavia (Sutton et al. 2013c), Senegal (Mbow et al. 2008), Swazilandia (Stringer et al. 2009)
	Aterrazado	Aterrazado de laderas para infiltrar agua, y compensar menor precipitación y escorrentia	Pl, An, Lt, Wi, En, Ha, Ac, Rs, Tr	In (menor precipitación y escorrentía) Mf (aterrazar cultivos no aterrazados)	- Impactos en el paisaje - Cambios en la escorrentía	Países árabes (Verner 2012), Eritrea (IFAD 2009)
	Extensificación de explotaciones	Expansión de explotaciones para compensar la mejor producción	Pl, Re, Lt, Wi, Sp, Ha-So, Ac, Rs, Tr	In (menor producción)	- Menor ecoeficiencia[29] - Ocupación de tierra inculta con posibles efectos sobre la biodiversidad	EEUU (Coles & Scott 2009), Canadá (Cox et al. 2015), Ghana (Kwadwo & Asantewaa 2016), Nueva Zelanda (Lieffering et al. 2016), Suiza (Tendall & Gaillard 2015)[29]
	Reubicación de cultivos y zonas de pastoreo	Cambio de pastos agotados por otras zonas productivas	Pl, Co-Re, St, Wi, Sp, Ha-So, Ac, Rs, Tr	In (menor producción)	- Impacto en la vegetación natural por mayor intensidad de cultivo y ganadería[30] - Ocupación de tierras con efectos sobre la biodiversidad	EEUU (Coles & Scott 2009), Burkina Faso (Barbier et al. 2009), Chile (Young et al. 2014), Mali (Adepetu & Berthe 2007), Tanzania (Hamisi et al. 2012)[30]
	Cambio del tipo de ganado	Cambio de especies de ganado para adaptarse a las condiciones, a menudo cabras	Pl, Re, St, Wi, Eb, So, Ac, Se, In	In (menor producción, cambio en los pastos)	- Daños a la vegetación natural, especialmente con la introducción de cabras	Kenia (Kabubo-Mariara 2008)
	Uso de nuevas especies en acuicultura	Cambio de especies en acuicultura para adaptarse a las nuevas condiciones	Pl, Re, St, Lo, Te, So, Ac, Se, Tr	In (menor producción) Mf (selección de especies según nuevas condiciones)	- Riego de introducción de especies exóticas invasoras y parásitos[31]	Sin localizar (Anadón et al. 2005)[31]
	Incremento de capturas pesqueras	Mejora de flota pesquera para aumentar las capturas y compensar la menor cantidad de pesca	Pl, Re, St, Wi, Te, Ha, Ac, Rs, In	In (menor producción) Multifuncional (fluctuaciones del mercado)	- Agotamiento de bancos de pesca - Desequilibrios en el ecosistema marino	Mauricio, Sri Lanka (IFAD 2009)
	Caza de animales salvajes	Caza de animales para compensar menor producción ganadera	Au, Co, St, Wi, Be, So, Ac, Se, In	In (menor producción) y alimentos) Multifuncional (caza habitual)	- Riegos para especies amenazadas si la caza no es selectiva - Desequilibrios en los ecosistemas	Namibia (Newsham & Thomas 2011).
	Cambio de uso del suelo	Cambio de uso del suelo buscando el más productivo por pérdida de valor agrícola	Pl, Re, Lt, Wi, Sp, Ha-So, Ac, Rs, Tr	In (menor producción) Mf (influencia del mercado)	- Cambio en los ecosistemas, afectando a la fauna - Cambios en el paisaje	Australia (Kiem & Austin 2013, Hewitson et al. 2014), Reino Unido (Fezzi et al. 2015), sin localizar (Wreford et al. 2010)
	Producción de carbón vegetal	Carbón vegetal como fuente alternativa de ingresos a la agricultura y ganadería	Au, Co, St, Wi, Fi, So, Ac, Se, In	In (menor producción) Mf (producción usual de carbón)	- Deforestación por la lenta regeneración de las acacias[32]	Somalilandia (Hartmann & Sugulle 2009)[32]

Enfoques de la adaptación

La adaptación es un concepto ambiguo que permite diferentes enfoques, responde a los intereses de diferentes agentes (Sovacool 2011) y está abierto a la manipulación, por ejemplo para mantener el *statu quo* en el desarrollo (Ireland 2012). Se ha encontrado un predominio del enfoque técnico; la mayoría de documentos analizan los impactos del cambio climático y proponen medidas de adaptación. Los documentos con enfoque social ocupan el segundo lugar, la mayoría centrados en países en desarrollo. Existe enfoque económico en cerca de una cuarta parte de los documentos, proporción que puede estar subestimada al existir documentos con enfoque económico pero sin medidas específicas (p.e. Schweikert et al. 2014a, 2014b, Chinowsky et al. 2015, Twerefou et al. 2015), no incluidos en la revisión. Una minoría de los documentos tiene un enfoque ambiental, por lo general combinado con otras perspectivas (Figura 100).

Figura 100 Frecuencia de los enfoques de la adaptación al cambio climático en la literatura revisada



Fuente: Elaboración propia

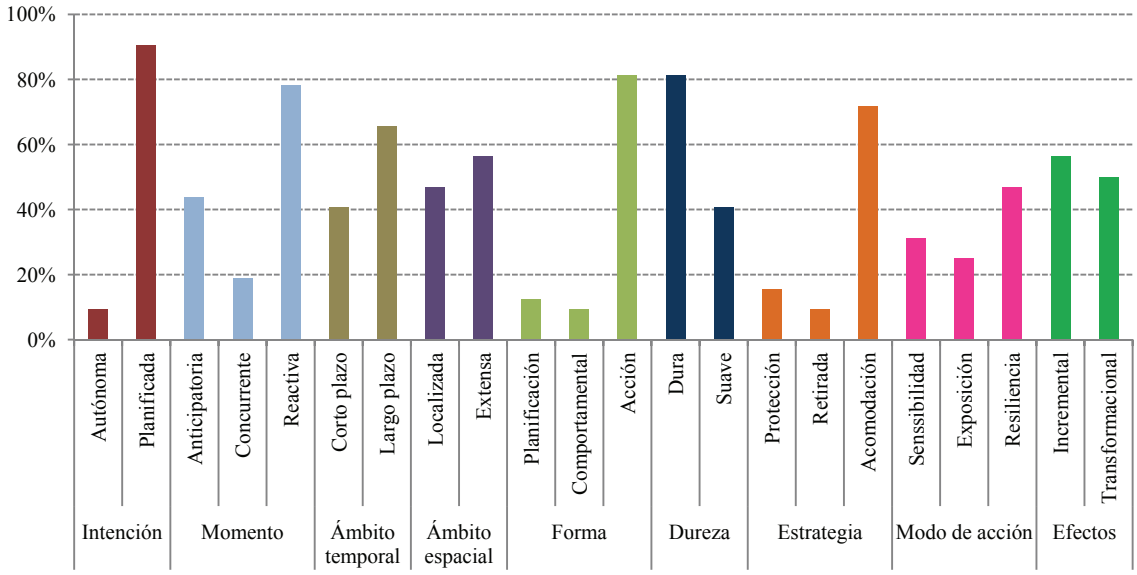
Tipos de adaptación

Existen diferentes clasificaciones para la adaptación (Tabla 45), aunque no todas son aplicables a todos los casos. De las medidas revisadas, el 94% son planificadas, el 81% duras, el 78% reactivas y el 72% acciones de acomodación (Figura 101). Esto significa que las adaptaciones son principalmente acciones duras adoptadas de manera reactiva para acomodarse a una situación. Las medidas más impactantes son las "duras", pero se detecta un 41% de medidas "blandas" con impactos significativos potenciales.

Especificidad de la adaptación con respecto al cambio climático

Una gran mayoría de las medidas fueron intensivas (88%), un 38% multifuncionales, un 19% exclusivas y un 6% múltiples. Esto implica que las medidas de adaptación analizadas consisten principalmente en reforzar prácticas existentes, con impactos ambientales bien conocidos. Las medidas exclusivas no son acciones desconocidas, sino la aplicación de técnicas conocidas para resolver impactos al cambio climático, como elevar una carretera para adaptarla al aumento del nivel del mar.

Figura 101 Tipos y características de las medidas de adaptación analizadas



Fuente: Elaboración propia

Impactos ambientales de la adaptación

Solo el 15% (36 de 239) de las referencias a medidas de adaptación mencionan impactos ambientales, la mayoría superficialmente, a pesar de tratarse de acciones con impactos potencialmente significativos. El único caso en el que los impactos se citan de forma generalizada es el uso del aire acondicionado en relación al consumo de energía. Hay poca o ninguna consideración de los impactos asociados con las medidas que requieren la ocupación de la tierra (reubicación, extensificación) aunque potencialmente pueden ser altamente impactantes.

Evaluación ambiental y adaptación al cambio climático

Se detecta una falta general de atención a la EA en el contexto de la adaptación al cambio climático. El quinto informe del IPCC, dedicado a impactos, adaptación y vulnerabilidad, no tiene en cuenta el papel de EA; como ejemplos llamativos, no se incluye en el capítulo de toma de decisiones (Jones et al. 2014) ni se cita entre las herramientas utilizadas para la planificación de la adaptación en África (Niang et al. 2014).

En el Reino Unido, RAE (2011) considera las limitaciones establecidas por los organismos ambientales como barreras legales, administrativas e institucionales a la adaptación, en lugar de una parte inherente del proceso de diseño de la adaptación. Aunque no se ha registrado si las acciones específicas se han sometido a procedimientos de EA de acuerdo con las regulaciones nacionales, se detecta que en un contexto global la EA no es un instrumento integrado en la toma de decisiones sobre adaptación al cambio climático o, al menos, en decisiones estratégicas.

8.1.4. Análisis de resultados

La adaptación, aunque reduce los efectos adversos del cambio climático, también puede tener impactos ambientales indeseables, y los resultados de esta investigación muestran que este aspecto está siendo mal tratado en la literatura gris y académica. El enfoque principal de la adaptación en la literatura es técnico, seguido de criterios sociales y económicos. Esto parece estar influenciado por el tipo de sectores, grupos de interés y profesionales involucrados en la adaptación. Por ejemplo, los ingenieros civiles prestan atención a la adaptación de infraestructuras, con numerosas publicaciones de investigadores, grupos de trabajo, asociaciones profesionales y gobiernos que analizan acciones y costes. En los países en desarrollo, los donantes internacionales, que financian la mayoría de las acciones de adaptación como ayuda al desarrollo, tienden a centrarse más en el componente social. No encontramos ningún grupo de interesados enfocado en los efectos ambientales de la adaptación, tal vez porque actualmente las principales preocupaciones ambientales son la mitigación y los impactos directos del cambio climático, pero no los impactos de la adaptación.

Los resultados muestran una escasa inclusión de los impactos ambientales de la adaptación en todos los tipos de documentos. Esto es preocupante ya que sólo se analizan medidas de adaptación con impactos potencialmente significativos, y la mayoría son un refuerzo de acciones ya aplicadas o similares a otras bien conocidas. Puede haber varias explicaciones para esta situación.

La primera sería un enfoque excesivamente sectorial de la adaptación, centrado en temas específicos y sin una visión global. Aunque la ciencia del cambio climático es interdisciplinar, se manejada por subunidades especializadas, lo que dificulta la coordinación intersectorial (Larsen et al. 2012).

En segundo lugar, puede haber confusión entre los impactos primarios del cambio climático, resueltos por la adaptación, y los impactos secundarios, causados por ella. Los primeros son actualmente evidentes, causando gran preocupación, mientras que los segundos pueden pasar desapercibidos. Esto es preocupante, porque los efectos ambientales de ciertas medidas de adaptación, como la ocupación de tierras, pueden ser mayores que los impactos del cambio climático corregidos.

Finalmente, existe una tendencia, explícita o implícita, a considerar la adaptación como buena por sí misma. No se encuentran referencias a impactos ambientales de la adaptación, o incluso solo un énfasis en los impactos positivos, en documentos como "libros blancos", estrategias o planes nacionales (OECC 2009, EuropeAid 2009). Otros ejemplos son los planes daneses de cambio climático (Kørnøv & Wejs 2013) o los planes de emergencia del Reino Unido, que incluyen medidas para minimizar los efectos de los desastres (Swain & Therivel 2014), ambos exentos de EAE.

También observamos ideas positivas o negativas preconcebidas sobre algunas medidas de adaptación. La desalinización tiene impactos ambientales significativos y un

gran consumo de energía (Roberts et al. 2010, Liu et al. 2013), pero puede ser una alternativa a opciones con impactos mayores, como trasvases transfronterizos de agua (p.e. en los Países del Golfo, Verner 2012). El consumo de energía suele estar asociado a la desalinización y el aire acondicionado, pero no a la extracción de agua subterránea, también dependiente de la energía. En grandes presas propuestas como adaptación se citan a veces los impactos ambientales, pero no así en pequeñas presas, presentadas como una buena adaptación suave. Sin embargo, también tienen impactos, que pueden ser acumulativos; dependiendo del tamaño y número de presas en una misma cuenca, se pueden producir reducciones de caudal significativas. Por consiguiente, calificar una medida como "buena" o "mala" debe ser el resultado de una evaluación ambiental adecuada y no de opiniones a priori, ni a favor ni en contra de ella; la EA es una herramienta clave para este análisis.

Los impactos ambientales se asocian frecuentemente con medidas "duras", como la construcción, pero también existe un gran número de medidas "blandas" con impactos potenciales. Además, los conceptos "duro" y "blando" no están claros. Por ejemplo, en los Países Bajos se propone la alimentación de playas como una alternativa suave a las defensas costeras (PRC 2009, Hewitson et al. 2014), pero puede tener graves impactos en la vida acuática de los fondos marinos, tanto en las áreas de extracción como de abastecimiento (Speybroeck et al. 2006). Por otro lado, las defensas costeras generan cambios indeseados en la morfología costera (OSPAR 2009), pero pueden evitar la ocupación de tierras por reubicaciones o retirada costera. Las medidas autónomas adoptadas para hacer frente a periodos de escasez pueden tener importantes efectos ambientales (explotación de zonas silvestres, deforestación, pastoreo excesivo, etc.). Las medidas que implican el cambio de uso de la tierra o su ocupación (retirada costera, reubicación, extensificación agraria, etc.) pueden tener impactos significativos usualmente ignorados, o incluso se consideran alternativas blandas. Por consiguiente, "suave" no significa "libre de impactos".

Encontramos ejemplos de medidas "duras" no mencionadas en países desarrollados, pero citadas explícitamente en regiones con mayores amenazas y menos ingresos. Por ejemplo, en los Países Bajos, con defensas costeras masivas, los programas de adaptación destacan la alimentación de playas, mientras que en estados insulares sensibles como Kiribati, Maldivas o Samoa las defensas se proponen abiertamente (World Bank 2010, Donner & Webber 2014). Las defensas de ríos para evitar inundaciones, comunes en todo el mundo, se mencionan principalmente como una adaptación en el sudeste asiático (Jacobs 1996, World Bank 2010b, 2010c). El riego de cultivos y la extracción de agua, frecuentes en todo el mundo, sólo se mencionan abiertamente como adaptaciones en países con sequías severas, especialmente en África. El hecho de no mencionar medidas impactantes que pudieran ser necesarias o inevitables dificulta una evaluación objetiva.

La normativa de EA requiere que los planes, programas y proyectos con impactos ambientales significativos sean sometidos a EAE o EIA. Sin embargo, las medidas de adaptación pueden someterse en etapas tardías, con pocas o ninguna alternativa, o incluso eludir la EA debido a la infravaloración de los impactos, la división del proyecto o la urgencia en la actuación. Una evaluación ambiental adecuada debería abordar la adaptación en forma anticipada, con una auténtica evaluación de alternativas. Como señalan Wende et al. (2012), la EAE no debe utilizarse sólo para introducir algunas medidas aisladas en planes o programas, sino que puede contribuir al desarrollo de enfoques alternativos.

Existen varias posibilidades de aplicación de los procedimientos de EA para analizar los impactos ambientales de las medidas de adaptación, dependiendo de sus atributos y del momento de aplicación. En la Tabla 56 se proponen cuáles son las posibilidades de evaluación ambiental para cada tipo de adaptación.

La EA está vinculada con la planificación y por lo tanto sólo se aplica a medidas planificadas y no a acciones espontáneas o no programadas. Muchas medidas de adaptación requieren EA, EAE para las relacionadas principalmente con la planificación territorial o EIA para las opciones de construcción. Sin embargo, la EA no se aplica a algunos casos, como la adaptación financiera o comportamental, no incluidas en la normativa.

Tabla 56 Posibilidades de aplicación de la evaluación ambiental a las medidas de adaptación

Tipos		Atributos	Posibilidades de evaluación ambiental
Intención		Autónoma	No posible
		Planificada Anticipatoria	Posible mediante EAE o EIA
Momento		Concurrente	Posible mediante EIA limitada, o no posible en medidas urgentes
		Responsiva	
Ámbito temporal		Corto/largo plazo	Posible. No influye en la EA
Ámbito espacial		Localizada/extensa	
Forma	Planificación	Planificación territorial Financiera	Posible mediante EAE
	Comportamental	Institucional, educativa, comportamental	Difícil al ser poco claros los mecanismos
	Actuación	Tecnológica, ingeniería y construcción	Posible generalmente mediante EIA
		Basada en ecosistemas	Probablemente posible, pero sin mecanismo claro
Dureza		Dura/suave	Posible, siendo más evidente en medidas duras
Estrategia		Protección	Posible generalmente mediante EIA
		Retirada	Posible mediante EAE o EIA si está planificada
		Acomodación	Posible generalmente mediante EIA
Modo de acción		Reducir la sensibilidad, alterar la exposición, incrementar la resiliencia	Posible mediante EAE o EIA
Efectos		Incremental, transformacional	

Fuente: Elaboración propia

Los plazos determinan el tipo de procedimiento de EA aplicable, e incluso la posibilidad de no someterse a ninguno. Cuando la adaptación es anticipatoria, puede ser sometida a EAE o EIA, y se pueden analizar diferentes alternativas. Por el contrario, la aplicación de procedimientos de EA a medidas concurrentes o responsivas está restringida, porque las alternativas serán limitadas o inexistentes y, cuando se requieren decisiones rápidas, la urgencia puede dispensar de evaluación. Por ejemplo, si un puente colapsa, la prioridad será reconstruirlo y no evaluar alternativas de adaptación como cambios en la gestión de la cuenca hidrográfica; Swain y Therivel (2014) indican un problema similar, la exención de la EAE en planes de emergencia en Reino Unido. Además, la adaptación progresiva sin una evaluación previa conduce a la división del proyecto, que puede eludir la EIA al no alcanzar los umbrales mínimos o subestimar el impacto global (Enríquez de Salamanca 2016), como por ejemplo en obras sucesivas a lo largo de una infraestructura o una sección costera.

El mensaje clave de esta investigación es que los impactos ambientales de la adaptación son frecuentemente ignorados, infravalorados o considerados superficialmente, sin una verdadera evaluación ambiental, lo que puede tener implicaciones negativas en la toma de decisiones. En consecuencia, es preciso prestar una mayor atención a estos impactos al diseñar las medidas de adaptación, buscando las opciones más adecuadas, y aplicando medidas de mitigación cuando sea preciso.

8.2. Impactos asociados a la adaptación en infraestructuras

En el anterior apartado se ha analizado la problemática asociada a la escasa consideración de los impactos ambientales de la adaptación con carácter general, un problema que trasciende a las infraestructuras de transporte, afectando a la mayoría de sectores. La idea, muy cierta, de que la adaptación es necesaria, reforzada en todos los foros y publicaciones sobre cambio climático, y más en los últimos tiempos cuando sus efectos empiezan a ser apreciables, ha llevado a considerarla buena y necesaria, sin una visión crítica sobre sus potenciales efectos.

Una vez identificado este problema o carencia a nivel global, el siguiente paso es su análisis con mayor detalle en el caso de las infraestructuras lineales de transporte, sector en el que se centra esta tesis. Si a nivel global la consideración de los efectos ambientales asociados a las medidas de adaptación es escasa, en las infraestructuras de transporte es casi nulo. La adaptación en este sector tiende a abordarse por medio de medidas constructivas o de mantenimiento encaminadas a mantener la operatividad de carreteras y ferrocarriles, con muy escasa o nula consideración de la componente ambiental. Sin embargo, relacionando los impactos climáticos y las medidas de adaptación posibles, de forma similar a como se ha hecho de forma global, se observa que ciertas opciones pueden dar lugar a impactos inducidos significativos (Tabla 57), que se analizan a lo largo de este apartado.

Tabla 57 Impacto ambiental de las medidas de adaptación en infraestructuras lineales de transporte

Infraestructura	Impactos	Adaptación	Impactos ambientales
Olas de calor y calor estival más intenso			
Ferrocarriles	Pandeo de raíles Pandeo de la catenaria	Reducción de velocidad de circulación	Impactos en la movilidad por retrasos
		Empleo de materiales menos sensibles	Depende del impacto de fabricación del material
		Cambio de normas de diseño	Depende del tipo de cambios que se realice
	Recalentamiento de equipos y motores	Mejora y modernización de equipos	Dependerá de la eficiencia de los nuevos equipos
		Programación de paradas periódicas	Impactos en la movilidad por retrasos.
	Calentamiento de estaciones y ferrocarriles subterráneos	Incremento de sistemas de refrigeración	Mayor consumo energético y emisión de GEI
Carreteras	Deterioro de los firmes (grietas) Ablandamiento del asfalto y deformación	Cambios en la instrucción de firmes	Depende del tipo de cambios que se realice
		Mezclas bituminosas más resistentes	Posible incremento del ruido del tráfico rodado
		Firmes rígidos, sobre todo de hormigón	Incremento del ruido del tráfico rodado
		Ligantes bituminosos transparentes	Sin efectos previsibles
		Incrementar la reflectancia (albedo)	
		Mayor frecuencia de reposición	Mayor consumo de recursos, energía y emisiones
		Enfriamiento forzado con agua	Consumo de agua
		Cierre temporal de carreteras	Reducción de ruido y emisiones en restricción, pero mayor concentración fuera de esa época
		Limitación temporal al tráfico pesado	
		Circulación de mercancías por la noche	Más ruido nocturno: afección a población y fauna
		Derivar tráfico pesado al tren o barco	Mayor eficiencia y menores emisiones (positivo)
		Reducir la carga admisible por eje	Menor eficiencia y mayores emisiones
		Estudiar situación en países más cálidos	Sin impactos
	Deterioro de marcas viales (pintura)	Mayor frecuencia de pintado	Mayor consumo de recursos, energía y emisiones
		Uso de pinturas más resistentes	Depende del impacto de fabricación del material
	Recalentamiento de motores	Modernización de la flota de vehículos	Positivo: vehículos más eficientes
		Programación de paradas periódicas	Impactos en la movilidad por retrasos
Ambas	Fatiga de materiales	Mayor frecuencia de reposición	Mayor consumo de recursos, energía y emisiones
		Uso de materiales más resistentes	Depende del impacto de fabricación del material
	Deformación de puentes metálicos Expansión de juntas de puentes	Adecuación de las normas de diseño	Depende del tipo de cambios que se realice
		Modificación de puentes existentes	Impactos en los cauces, afección a la calidad del agua, consumo de recursos, energía y emisiones
		Limitaciones de paso o velocidad	Impactos en la movilidad por retrasos
		Abandono de puentes	Acumulación de infraestructuras: viejas y nuevas
	Daños por incendios forestales	Incremento de medidas preventivas	Positivo: reducción de incidencia de incendios
		Incremento de medios de extinción	
		Sustitución de zapatas en vagones	
	Cambios de humedad y subsidencia	Modificación plataforma (base/subbase)	Consumo de recursos, energía y emisiones, necesidad de préstamos, canteras y vertederos
		Desvíos de trazado	Impactos globales: nuevo trazado
	Mortandad en plantaciones	Reposición de marras y resiembra	Positivo: Mejor restauración vegetal
		Sustitución de especies no adaptadas	Riesgo de empleo de especies exóticas rústicas
Inviernos suaves			
Carreteras	Menor frecuencia de hielo y nieve	Menor uso de quitanieves	Menor consumo de energía y emisiones, riesgo de incomunicación en episodios extremos
		Maquinaria quitanieves multifuncional	Variable. Sin efectos claramente previsibles
		Menor consumo de fundentes	Positivo: Menores problemas de corrosión por sal, menor contaminación
Tormentas			
Ferrocarriles	Sobretensión en subestaciones Sobretensión en la catenaria	Revisión de normas de diseño	Depende del tipo de cambios que se realice
		Mejora de seguridad frente a incendios	Positivo: reducción de incidencia de incendios

Tabla 57 (cont.) Impacto ambiental de las medidas de adaptación en infraestructuras lineales de transporte

Infraestructura	Impactos	Adaptación	Impactos ambientales
Vientos extremos			
Ferrocarriles	Daños en la superestructura y catenaria	Revisión de normas de diseño	Depende del tipo de cambios que se realice
		Refuerzo de cimentaciones	Consumo de recursos, energía y emisiones
		Cambio de materiales en señalización	Depende del impacto de fabricación del material
	Daños en señalización y defensas	Mantenimiento de arbolado próximo	Mayor seguridad, riesgo de reducción en la cantidad de vegetación cerca de infraestructuras
Carreteras		Señalización de zonas de riesgo	Sin efectos significativos
	Afección a la conducción	Mayor señalización variable	Mayor seguridad, mayor consumo de energía
		Pantallas arbóreas	Positivo: mayor superficie con vegetación
Ambas	Bloqueo por árboles	Revisión periódica del arbolado y eliminación de pies y ramas muertas	Mayor seguridad, riesgo de reducción en la cantidad de vegetación cerca de infraestructuras
	Sobreesfuerzo en pantallas acústicas	Revisión de normas de diseño	Depende del tipo de cambios que se realice
		Refuerzo de cimentaciones	Consumo de materiales, energía y emisiones
Precipitaciones extremas			
Ferrocarriles	Fallos del equipamiento de vía	Mayor frecuencia de mantenimiento	Mayor consumo de recursos, energía y emisiones
		Cambio por equipos más resistentes	Depende de las características de los equipos
Carreteras	Daños en pavimentos	Mayor frecuencia de reposición	Mayor consumo de recursos, energía y emisiones
		Modificación de plataformas	Consumo de recursos, energía y emisiones, necesidad de préstamos, canteras y vertederos
	Afección a la visibilidad	Mayor señalización variable	Mayor seguridad, mayor consumo de energía
		Mayor empleo de firmes drenantes	Mayor mantenimiento, menor ruido
	Pavimentos mojados (menor adherencia)	Aumento del bombeo de la plataforma	Sin efectos apreciables
		Mejor conservación de marcas viales	Más mantenimiento: recursos, energía, emisiones
Ambas	Inundaciones	Ampliación del drenaje transversal	Consumo de recursos, energía y emisiones
		Ampliación del drenaje longitudinal	Consumo de recursos, energía y emisiones
		Incremento de bombeo de la plataforma	Sin efectos apreciables
		Elevación de la rasante	Consumo de recursos, energía y emisiones, necesidad de préstamos, canteras y vertederos
		Mayor limpieza de sistemas de drenaje	Más mantenimiento: recursos, energía, emisiones
	Hundimientos	Estabilización de terraplenes	Riesgo de sustitución de taludes revegetados por gunitados, escolleras o muros
		Modificación plataforma (base/subbase)	Consumo de recursos, energía y emisiones, necesidad de préstamos, canteras y vertederos
		Muros de retención	Consumo de recursos, energía y emisiones, posible afección a cauces
	Desprendimientos y deslizamientos	Mejora de la vegetación en taludes	Positivo: Mejor restauración vegetal
		Cunetas de guarda en desmontes	Riesgo para la fauna si son revestidas
	Afección a la estabilidad de taludes	Taludes más tendidos	Mayor ocupación de terrenos
		Mallas en desmontes rocosos	Menor naturalidad, dificultad para la vegetación
		Cambio de normas de obras de tierras	Depende del tipo de cambios que se realice
	Descalce de puentes y viaductos	Revisión de normas de diseño	Depende del tipo de cambios que se realice
		Refuerzo de cimentaciones	Consumo de materiales, energía y emisiones
	Colapso de puentes y viaductos	Construcción de nuevos puentes	Afección a cauces, consumo de materiales, energía y emisiones
		Abandono de puentes	Acumulación de infraestructuras: viejas y nuevas
	Inundación de pasos inferiores	Evitar pasos deprimidos sin desagüe	Más necesidad de tierras para elevar rasante
		Pasos inferiores en pendiente	Sin efectos apreciables
		Diseño de bombeo y cunetas	Sin efectos apreciables
	Sobreesfuerzo en drenajes	Sobredimensionamiento de drenajes	Consumo de materiales, energía y emisiones
		Mayor frecuencia de mantenimiento	Más mantenimiento: recursos, energía, emisiones
Descenso en las precipitaciones			
Ambas	Mortandad en plantaciones	Reposición de marras y resiembra	Positivo: Mejor restauración vegetal
		Sustitución de especies no adaptadas	Riesgo de empleo de especies exóticas rústicas
		Riego en zonas emblemáticas	Consumo de agua y energía
	Cambios de humedad y subsidencia	Modificación plataforma (base/subbase)	Consumo de recursos, energía y emisiones, necesidad de préstamos, canteras y vertederos
		Desvíos de trazado	Impactos globales: nuevo trazado

Tabla 57 (cont.) Impacto ambiental de las medidas de adaptación en infraestructuras lineales de transporte

Infraestructura	Impactos	Adaptación	Impactos ambientales
Incremento del nivel del mar			
Ambas	Inundación	Elevación de la cota de la rasante	Consumo de recursos, energía y emisiones, necesidad de préstamos, canteras y vertederos
		Reubicación de infraestructuras	Impactos globales: nuevo trazado
		Construcción de barreras contra oleaje	Afección a la dinámica litoral, erosión costera
		Construcción de drenajes adicionales	Consumo de recursos, energía y emisiones
Marejadas ciclónicas			
Ambas	Inundación	Elevación de la cota de la rasante	Consumo de recursos, energía y emisiones, necesidad de préstamos, canteras y vertederos
		Reubicación de infraestructuras	Impactos globales: nuevo trazado
		Construcción de barreras contra oleaje	Afección a la dinámica litoral, erosión costera
		Construcción de drenajes adicionales	Consumo de recursos, energía y emisiones
	Daños en infraestructuras y equipamiento	Mayor frecuencia de mantenimiento	Más mantenimiento: recursos, energía, emisiones
		Reubicación en zonas menos expuestas	Impactos globales: nuevo trazado
Erosión costera			
Ambas	Desprendimientos y deslizamientos	Construcción de muros de defensa	Afección a la dinámica litoral, erosión costera
		Construcción de tramos en viaducto	Consumo de recursos, energía y emisiones
		Reubicación de infraestructuras	Impactos globales: nuevo trazado

Fuente: Elaboración propia

8.2.1. Impactos globales: nuevos trazados

Los impactos más significativos de la adaptación se derivan de aquellas medidas que implican la reubicación de las infraestructuras, la modificación de su trazado, o cambios mayores, que en la práctica pueden equivaler a construir una nueva infraestructura, con todos los impactos que ello conlleva sobre el medio ambiente.

De forma general, un nuevo trazado supondrá la ocupación de terrenos, cambio de uso del suelo, destrucción de vegetación o cultivos, afección a la fauna por pérdida de hábitats, efecto barrera y riesgo de atropello, fragmentación del territorio, afección al relieve por movimientos de tierras, afección a la red de drenaje natural y la calidad de las aguas, cambios en la accesibilidad territorial, incremento de los niveles sonoros, afección a la planificación territorial, etc. Teniendo en cuenta esta larga serie de efectos potenciales resulta sorprendente la escasa atención que se presta en la literatura a los impactos asociados a medidas de adaptación que precisan ocupar territorio, como extensificación agraria, reubicación de infraestructuras o retirada costera.

8.2.2. Ocupación de terrenos

Aparte de la reubicación de infraestructuras, cuya afección espacial es evidente, hay otras medidas que precisan ocupar terrenos sin que se modifique la localización de los trazados, como la elevación de la rasante o el tendido de taludes.

Para elevar la cota de la rasante de una infraestructura puede optarse por construir estructuras (viaductos) o aportar tierras para elevar la plataforma. En el segundo caso, puede realizarse construyendo muros laterales, o taludes. Si se emplean viaductos, o se

construyen muros laterales, es posible elevar la rasante sin incrementar la ocupación de terrenos, e incluso se podría reducir. Sin embargo, si se opta por elevar la plataforma mediante taludes, cuanto mayor sea la altura vertical de la plataforma mayor será la ocupación en planta, dependiendo de la sección adoptada en los taludes. Considerando taludes 2H:1V, la sección más habitual en terraplenes, por cada metro de altura que se eleve la rasante se ocuparán 4 m lateralmente, dos a cada margen del trazado, lo que supondría 4 m² de ocupación por m de trazado y por m de incremento de cota.

En el tendido de taludes para reducir su vulnerabilidad a deslizamientos o procesos erosivos, la ocupación de terrenos es inevitable. La ocupación dependerá de las secciones iniciales y finales. Por ejemplo, tender taludes de un trazado en trinchera con desmontes de sección 2H:3V y 15 m de altura supondría ocupar lateralmente 30 m con sección 1H:1V (15 m por margen) o 120 m con sección 2H:1V (60 m por margen). A lo largo de un trazado ferroviario o carretera esta ocupación puede ser considerable.

8.2.3. Afección a la movilidad

Uno de los objetivos de la adaptación es minimizar las afecciones a la movilidad, manteniendo las infraestructuras operativas. Sin embargo, algunas soluciones de adaptación afectan al servicio de las infraestructuras, al poder alargar los tiempos de desplazamiento, causar retrasos o afectar a la puntualidad. Un ejemplo es la reducción de la velocidad a causa del pandeo de raíles en ferrocarriles. También puede producirse este efecto si se establecen limitaciones al tráfico rodado en olas de calor, o si se precisan paradas en camiones o ferrocarriles por recalentamiento de motores.

La previsión de inviernos más suaves puede llevar a reducir el parque de quitanieves operativo, ampliando el área de servicio de las máquinas. Sin embargo, aunque parece que el número de días de nieve y la cantidad caída se reducirá, no ocurre lo mismo con los fenómenos extremos. Por ello, en caso de una nevada súbita, un menor parque operativo de quitanieves puede llevar a que ciertas zonas queden incomunicadas. Una posible solución es el empleo de máquinas multifuncionales (vehículos todo terreno, excavadoras o camiones adecuados para poder servir de quitanieves), aunque su operatividad es siempre menor que la de un vehículo específico.

8.2.4. Consumo de recursos, materiales, energía y generación de emisiones

Uno de los impactos que más repite es el incremento en el consumo de recursos, materiales y energía, y la mayor generación de emisiones, entre ellas GEI que a su vez contribuyen al cambio climático. Todas las actuaciones de conservación y mantenimiento de infraestructuras precisan de alguna manera del empleo de maquinaria y materiales, y su transporte, con las emisiones que ello conlleva.

Una medida de adaptación es incrementar la frecuencia de mantenimiento, como acortar el ciclo de reposición de firmes, o aumentar la frecuencia de limpieza de drenajes, reparación de señalización o pintado de marcas viales. Al repetir estas operaciones con ciclos más cortos se produce un incremento en el consumo de recursos y energía y en las emisiones asociadas. Suele ser preferible emplear materiales más duraderos, para evitar ese aumento de la frecuencia de mantenimiento, aunque es preciso valorar los impactos que esos cambios conllevan, porque pueden ser negativos, como el uso de firmes de hormigón comentado posteriormente. También se puede producir un incremento del consumo de agua, empleada en obras de mantenimiento, o en fines específicos como el riego de plantaciones o el enfriamiento de firmes.

Algunas medidas de adaptación influyen en la eficiencia de los transportes, con impactos positivos o negativos. En las restricciones al transporte por carretera en olas de calor, para evitar daños al firme, si se deriva el tráfico de mercancías al ferrocarril se puede mejorar la eficiencia y reducir la huella de carbono por tonelada transportada, pero si se opta por reducir la carga máxima admisible en camiones, se reduce su eficacia, y aumenta la emisión por tonelada transportada.

8.2.5. Préstamos, canteras y vertederos

Algunas actuaciones precisan el empleo de tierras o generan excedentes. Un ejemplo es la elevación de la rasante para evitar problemas de inundación, que hace preciso el aporte de tierras. Al centrarse en elevar los trazados, sin excavaciones, es preciso recurrir a tierras de préstamos, con los impactos asociados a su explotación. También la modificación de bases para mejorar su resiliencia puede precisar materiales seleccionados procedentes de canteras. El tendido de taludes, para aumentar su estabilidad, da lugar a una demanda de tierras si son terraplenes, o a la generación de sobrantes en el caso de desmontes; en este último caso, si no se compensa la excavación con aportes será preciso prever zonas de vertedero para depositar los sobrantes.

8.2.6. Niveles sonoros

Las medidas de adaptación pueden tener efectos positivos o negativos sobre los niveles sonoros. Con carácter general las obras y trabajos de mantenimiento pueden generar un incremento de los niveles sonoros, en especial en actuaciones como la demolición de firmes para su reposición o reciclado. Un incremento en la frecuencia de las labores de mantenimiento implica análogamente una mayor repetición de eventos ruidosos, afectando a la población y la fauna, aunque de forma temporal.

El empleo de firmes rígidos de hormigón para aumentar la durabilidad y reducir la degradación por el calor da lugar a un incremento de los niveles sonoros, al resultar más ruidosos que los pavimentos asfálticos. Por el contrario, un mayor empleo de firmes drenantes, recomendado para mejorar la seguridad vial cuando hay episodios lluviosos,

reduce los niveles de ruido. Sin embargo, en España este firme no se contempla para zonas con precipitación media menor de 600 mm por lo que la previsión de que se reduzcan las precipitaciones medias llevaría a un menor empleo (CEDEX et al. 2013).

También las medidas de gestión del tráfico para evitar daños a firmes en olas de calor tienen influencia acústica. Concentrar el tráfico de mercancías en horario nocturno reduce ligeramente el nivel de ruido durante el día, y lo incrementa notablemente por la noche. Esto se debe a dos causas. Por una parte, la reducción en el tráfico diurno al sacar los vehículos pesados no es significativa (a menudo entre el 5 y 15%), por lo que la influencia acústica no es grande. Sin embargo, en periodo nocturno, con muy poco tráfico, es carga de vehículos pesados supone un gran incremento de tráfico. Además, el periodo nocturno es mucho más sensible desde un punto de vista acústico, tanto para la población como para la fauna, por lo que resulta mucho más fácil superar los baremos de tolerancia u objetivos de calidad acústicos establecidos en la normativa.

Establecer limitaciones al tráfico durante ciertos periodos en olas de calor para evitar daños al firme tiene un efecto positivo en los niveles de ruido, pero a su vez puede inducir un mayor tráfico al finalizar las restricciones, y con ello más ruido.

8.2.7. Efectos en cauces

Cualquier medida de adaptación que afecte a obras de drenaje, puentes o viaductos sobre cauces puede generar afecciones a la morfología fluvial, la vegetación de ribera o la calidad de las aguas, por ejemplo. Uno de los principales impactos asociado a episodios lluviosos extremos es el socavamiento de cimientos de puentes. Para evitarlo es preciso reforzar las cimentaciones o reubicar los puentes. El refuerzo de cimentaciones obliga a trabajar en el lecho de los cauces, pudiendo afectarlo, mientras que la reubicación supone un nuevo trazado, con todos sus impactos. El sobredimensionamiento de drenajes transversales también puede afectar a los cauces. Se puede producir efectos positivos por aumento en la sección de drenajes, o la sustitución de puentes por otros más amplios, favoreciendo la circulación de las aguas, eliminando obstáculos y con efectos inducidos como la mejora en la permeabilidad para la fauna.

8.2.8. Efectos sobre la vegetación

Probablemente el impacto más catastrófico sobre la vegetación sea el producido por los incendios forestales, que la arrasan por completo, pudiendo llegar a hacer inviable su recuperación si se pierde el suelo tras la destrucción de la cubierta vegetal. Por ello, cualquier medida de adaptación para reducir la incidencia de incendios es muy favorable, e incluso puede mejorar la situación inicial, sin considerar los efectos del cambio climático. Un ejemplo es la sustitución de las zapatas convencionales de fundición en los sistemas de frenado de vagones por otros tipos más seguros, para evitar los incendios que periódicamente se producen por las chispas producidas (Figura 102).

Figura 102 Incendio producido por chispas generadas por un ferrocarril

Fuente: Diario de Navarra (http://www.diariodenavarra.es)

El tendido de taludes tiene un efecto negativo por ocupación de terrenos, pero favorece la revegetación, al reducir la pendiente. Sin embargo, si los taludes ya están colonizados por vegetación, el tendido dará lugar a su destrucción.

Entre los impactos del cambio climático se cuenta un mayor fracaso en la revegetación e incluso mortandad de vegetales ya implantados, lo que exige tomar medidas como resiembras y reposición de marras, con un impacto positivo. El empleo de especies rústicas adaptadas a escenarios de menores precipitaciones, puede llevar a fomentar el empleo de especies alóctonas. Un caso de abuso de una especie rústica es *Spartium junceum* en medianas de carreteras (Figura 103), especie espontáneas en el sur peninsular, con alternativas locales como *Retama sphaerocarpa.*

Figura 103 Impactos potenciales de la adaptación al cambio climático en la vegetación

Izquierda: *Spartium junceum* en la mediana de la A-1, La Cabrera, Madrid; especie rústica pero alóctona en la zona (Fuente: Autor). Centro: Desmonte gunitado en la A-6, San Rafael, Segovia; no hay problemas de estabilidad pero tampoco integración paisajística (Fuente: Autor). Derecha: Tala excesiva en una carretera, Canals, Valencia (Fuente: ACDEMA).

Un impacto potencial del cambio climático comentado anteriormente es la afección a la estabilidad de taludes. Lo deseable es lograr una estabilización combinando una adecuada pendiente y una buena revegetación, pero en ocasiones se opta por soluciones más duras como escolleras, e incluso gunitados de hormigón (Figura 103), muy efectivos, pero que impiden el desarrollo de vegetación en el talud e incrementan la incidencia visual de la obra.

El riesgo de incendios y de caídas de ramas y árboles lleva a realizar mayores desbroces, podas y apeos en los márgenes de las infraestructuras, sobre todo en las líneas ferroviarias. Aunque eso da lugar a una mayor seguridad, y a un menor riesgo de incendios, también implica a una menor cubierta vegetal en el entorno de las infraestructuras, y mayores impactos paisajísticos (Figura 103).

8.2.9. Efectos sobre la fauna

Entre los impactos más significativos sobre la fauna pueden citarse los asociados a la ocupación de terrenos, el incremento de los niveles sonoros o la realización de obras en cauces, biotopos especialmente sensibles.

Una adaptación para mejorar la estabilidad de desmontes es construir cunetas de guarda en su cabecera. En cunetas en tierra sin revestir la afección a la fauna es escasa, aunque también su duración. Las cunetas revestidas de sección reducida son una trampa para anfibios, reptiles o pequeños mamíferos que pueden quedar atrapados (Figura 104). Aunque cada vez es más frecuente adaptar el drenaje de la plataforma para evitar este problema, es raro hacerlo en cunetas de guarda, quizá por no asociarse con este impacto.

Figura 104 Cunetas de guarda con diferente impacto sobre la fauna

Izquierda: Cuneta de guarda revestida en piedra, que permite la salida de la fauna. Derecha: Cuneta prefabricada de sección reducida, muy negativa para la fauna (Fuente: Excavaciones Duocastella S.L.)

Forzar a los vehículos de mercancías a circular de noche para evitar dañar los firmes da lugar a problemas de ruido nocturno e incrementa el riesgo de atropello de la fauna, que tienen su máxima actividad por la noche, y que es deslumbrada por los faros, reduciendo su capacidad de respuesta, haciendo que sean más vulnerables.

8.2.10. Acumulación de infraestructuras

Un proceso asociado con la mejora de infraestructuras es el abandono de tramos, que quedan sin servicio o con tráficos residuales. El abandono completo es más frecuente en líneas ferroviarias (Figura 105), al no dar acceso a propiedades (véase 7.1.3). En carreteras es más raro el abandono total, soliendo mantenerse para tráfico local o acceso a fincas. En ocasiones, antiguas carreteras nacionales han perdido su uso al ser sustituidas por autovías, y mantienen tráficos muy bajos pese a sus grandes dimensiones.

Figura 105 Ferrocarril abandonado

Cantagallo (Salamanca). Fuente: Autor

El abandono de tramos de carretera está sobre todo asociado a mejoras de trazado, como rectificaciones de curvas, donde el antiguo trazado ha perdido su uso, pero no ha sido desmantelado (Figura 106). Existe una tendencia a mantener las infraestructuras construidas, al considerarse un patrimonio, si bien en casos donde el uso ha quedado totalmente descartado en realidad son más un pasivo ambiental que un patrimonio.

Figura 106 Rectificación de curva en la autovía A-2 entre Sauca y Alcolea del Pinar (Guadalajara)

Fuente: Elaboración propia. Ortofoto Iberpix (http://www.ign.es)

La adaptación al cambio climático puede hacer precisos desvíos o mejoras en los trazados, para reducir su vulnerabilidad. Esto puede dar lugar a una acumulación de infraestructuras; en algunos puntos llega a ser llamativo cuando un trazado ha sufrido sucesivas mejoras a lo largo del tiempo. Si los tramos sin servicio no tienen un uso justificado (como acceso a propiedades), deberían ser desmantelados, y restaurados, para evitar esa indeseable acumulación de trazados, que incrementan innecesariamente la anchura del corredor de la infraestructura.

8.2.11. Efectos en la seguridad

La práctica totalidad de actuaciones acometidas en las infraestructuras, sea para mantenimiento habitual, mejora o reducción de su vulnerabilidad climática, están encaminadas a lograr un incremento en la seguridad de circulación, tanto ferroviaria como del tráfico rodado. Existen impactos del cambio climático que afectan a la seguridad, precisando medidas de adaptación para recuperarla, desde mejoras en la infraestructura hasta señalización o limitaciones de velocidad. En consecuencia, el impacto de las medidas de adaptación sobre la seguridad, y con ello sobre la población, es en su práctica totalidad positivo, y de no serlo sería un caso de maladaptación.

8.2.12. Corrosión y contaminación salina

El empleo de fundentes para el mantenimiento de la vialidad invernal (Figura 107) da lugar a la contaminación de terrenos y cauces por las sales esparcidas en la plataforma, o la corrosión de elementos metálicos (barreras, señales) y de los vehículos. La esperada reducción en la duración y crudeza de los inviernos hace previsible una reducción en el consumo de fundentes, lo que tendrá un impacto positivo sobre el medioambiente, y sobre los propios elementos de la infraestructura y los vehículos.

Figura 107 Quitanieves esparciendo sal

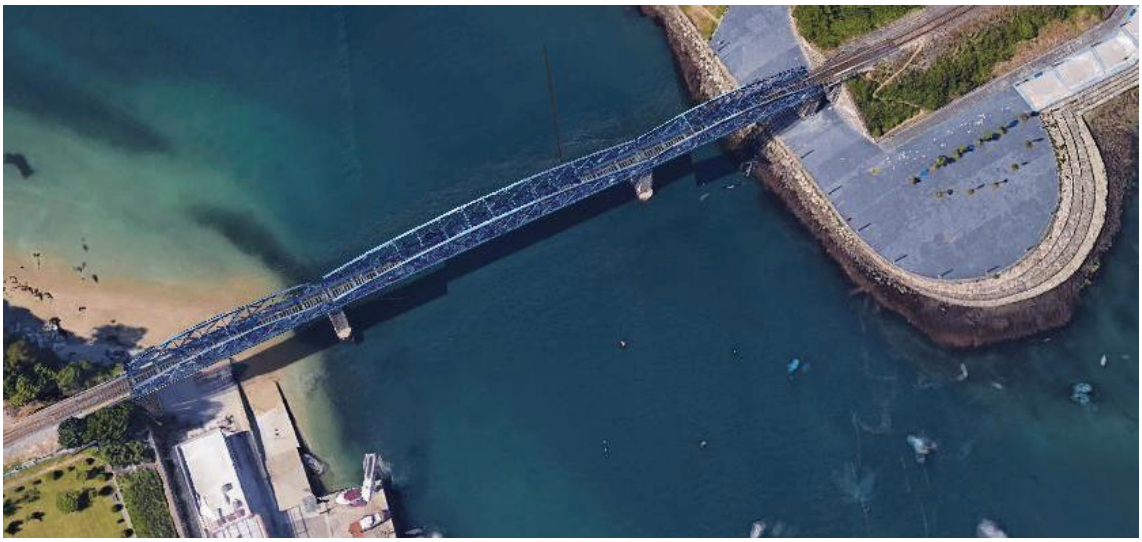
Fuente: Diario Palentino (http://www.diariopalentino.es)

8.2.13. Afección a la dinámica litoral

En España las defensas costeras no son tan frecuentes como en otras naciones europeas más expuestas a fenómenos costeros. La mayor extensión del país, y su mayor elevación media, hace que la construcción de infraestructuras en zonas expuestas a problemas de erosión costera no sea habitual. Aún así, existen tramos donde el relieve abrupto obliga a construir en zonas expuestas, como las rías Gallegas o zonas del País Vasco (OSPAR 2009), precisando construir defensas costeras para garantizar la estabilidad de las infraestructuras (Figura 108). El incremento del nivel del mar y de la incidencia de tormentas ciclónicas asociados al cambio climático puede dar lugar a una mayor necesidad de defensas costeras para proteger las infraestructuras, caso que ya ocurre en otros países de Europa.

Como ya se ha apuntado anteriormente, las defensas costeras duras (muros, escolleras, espigones) pueden generar cambios no deseados en la morfología costera (OSPAR 2009), que deben ser adecuadamente evaluados.

Figura 108 Puente en la ría de Ares (Pontedeume, A Coruña), con defensas costeras



Fuente: Elaboración propia. Ortofoto Google Earth

8.2.14. Impactos impredecibles

Hay un grupo de medidas de adaptación cuyos efectos ambientales es impredecible *a priori*; podrían generar impactos positivos, negativos o no tener una influencia significativa. Un ejemplo es la modificación de las normas de diseño de carreteras y ferrocarriles, o de elementos concretos (drenaje, firmes, electrificación, taludes...). Dependiendo de las propuestas o exigencias que se recoja podrán derivarse o no efectos ambientales. Por ejemplo, si una modificación de la norma de firmes fomentara el uso de pavimentos de hormigón y restringiera el de firmes drenantes tendría una consecuencia muy negativa sobre los niveles sonoros en carreteras.

También tiene impactos impredecibles el empleo de materiales más resistentes al clima, como señales, pinturas o raíles. En estos casos, los efectos asociados dependerán de los costes ambientales (recursos, energía, emisiones, vertidos) asociados a producir los antiguos y nuevos materiales, que podrán verse reducidos o incrementados.

Otro grupo de actuaciones con efectos impredecibles es la sustitución de equipos, maquinaria o vehículos para mejorar el funcionamiento, evitar sobrecalentamientos o reducir su vulnerabilidad; el efecto final dependerá del consumo y eficiencia de los equipos iniciales y nuevos, que podrá verse reducido o incrementado. Con carácter general, la modernización de vehículos y trenes es previsible que lleve aparejada una mayor eficiencia energética con respecto a los equipos viejos. En el caso de los turismos, por ejemplo, las emisiones de CO_2 se han reducido de forma apreciable en los últimos 15 años, aunque parece que no tanto como declaran los fabricantes. Por el contrario, cambios en equipos para aumentar la potencia, como puede ocurrir con los equipos de refrigeración en estaciones o metros, pueden tener asociados mayores consumos energéticos y mayores emisiones de CO_2 inducidas.

8.3. Mitigación de los impactos de la adaptación en infraestructuras

Ciertas medidas de adaptación pueden generar impactos ambientales indeseados, precisando medidas de mitigación. Siguiendo el mismo esquema empleado para resumir estos impactos, a continuación se analizan las principales medidas de mitigación.

8.3.1. Nuevos trazados

La reubicación de infraestructuras o modificaciones de trazado, suponen una nueva infraestructura, precisando la aplicación de todas las medidas preventivas, correctoras y compensatorias asociadas a nuevos proyectos, que puede consultarse en Enríquez de Salamanca et al. (2012b).

8.3.2. Ocupación de terrenos

El impacto de la ocupación lateral de terrenos en infraestructuras, por tendido de taludes o elevación de la rasante por ejemplo, dependerá de la zona atravesada y su valor ambiental y socioeconómico. En zonas no urbanizadas, y de escaso valor ambiental, un aumento lateral de ocupación de unos metros no implica impactos significativos, e incluso si se destina al tendido de taludes puede ser deseable desde un punto de vista paisajístico. Sin embargo, cuando existen zonas edificadas, áreas de alto valor ecológico, o suelos de elevado interés productivo, esas ocupaciones laterales pueden generar fuertes impactos, como la ocupación de viviendas, destrucción de vegetación singular o pérdida de productividad.

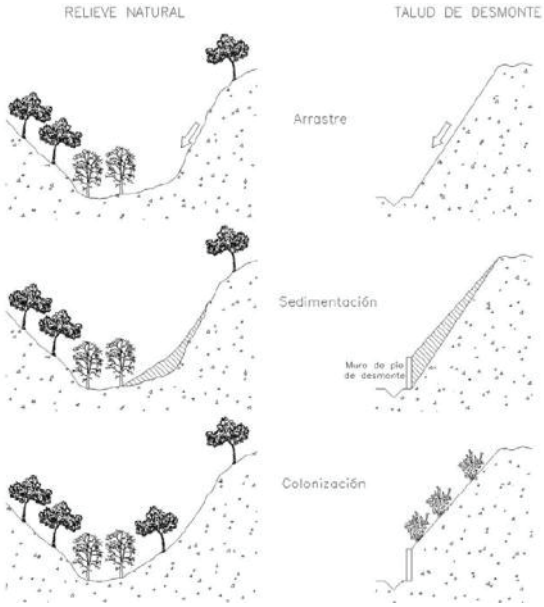
En estos casos, es preciso lograr el objetivo buscado, por ejemplo una rasante más elevada o unos taludes más tendidos, sin que ello implique una mayor ocupación en planta de la infraestructura. La solución más adecuada es el empleo de muros, a pie de desmonte o de terraplén, limitando así la ocupación lateral (Figura 109).

Figura 109 Muros para limitar la ocupación de carreteras

Enlace A-1/M-40, Madrid. Izquierda: Muros prefabricados. Derecha: Muros jardinera (Fuente: Autor)

Los muros a pie de talud, aparte de evitar una mayor ocupación transversal de las infraestructuras, pueden resultar muy favorables para lograr una mejor revegetación de los taludes (Enríquez de Salamanca & Carrasco 2009, Enríquez de Salamanca et al. 2004, 2009a, Carrasco et al. 2004). Por una parte los muros permiten reducir el desnivel que salva el talud, la altura vertical, logrando pendientes más suaves. Por otra parte permite el relleno en la base, o favorece una acreción de coluviones similar a la dinámica natural de laderas, facilitando la colonización (Figura 110).

Figura 110 Formación de suelos en vertientes naturales y con muros a pie de desmonte



Fuente: Enríquez de Salamanca et al. (2004)

También es posible emplear muros para tender los taludes de desmonte, descabezando la parte superior del talud y empleándola como relleno en la inferior. Esto tiene la doble ventaja de reducir la pendiente, y a la vez la compacidad en la zona inferior, al ser un relleno, lo que favorece el desarrollo de los vegetales (Figura 111)

Figura 111 Empleo de muros para tender taludes de desmonte

Izquierda: Empleo de un muro para tender un desmonte y favorecer la revegetación (Fuente: Enríquez de Salamanca & Carrasco 2009). Derecha: Talud de la A-3 en Perales de Tajuña donde se ha aplicado este esquema (Fuente: Autor)

8.3.3. Afección a la movilidad

La adaptación en infraestructuras busca evitar la interrupción del servicio o la afección a las condiciones de uso. Aún así, algunas medidas inciden en las condiciones de uso, como las restricciones en la velocidad o en la utilización de infraestructuras. Cuando la afección al servicio es inevitable, la única medida aplicable es la anticipación, para minimizar las molestias o perjuicios asociados a la operatividad de las infraestructuras, lo que hace precisa la existencia de sistemas eficientes de alerta temprana de los posibles eventos climáticos (olas de calor, episodios lluviosos, vientos), y de aviso a la población y agentes implicados en el transporte de viajeros o mercancías.

8.3.4. Consumo de recursos, materiales, energía y generación de emisiones

El incremento en la frecuencia de mantenimiento de las infraestructuras, o de reposición de elementos, conlleva a su vez un aumento del consumo de recursos, materiales y energía, y en la generación de emisiones. La forma de compensar estos efectos es la reducción de esos consumos y emisiones mediante técnicas y materiales más eficientes, de manera que el balance global no sea desfavorable.

El empleo de materiales más duraderos (por ejemplo pinturas para marcas viales o señales) compensa la mayor velocidad de degradación, siempre que su producción no genere mayores consumos energéticos o emisiones. La necesidad de instalaciones más potentes, por ejemplo para refrigeración de estaciones o líneas de metro, puede compensarse con nuevos equipos más eficientes, que con el mismo consumo energético o menor, logren los mismos resultados.

El riego en zonas revegetadas próximas a infraestructuras es raro, concentrado sobre todo en zonas urbanas o periurbanas. En estas zonas, el empleo de sistemas más eficientes de riego puede compensar la mayor demanda de agua por parte de los vegetales, de manera que el consumo final no se incremente.

Uno de los impactos más importantes es la reducción en la durabilidad de los firmes de carreteras, que obliga a acortar los plazos de reposición, con el consiguiente incremento en la necesidad de materiales (áridos y ligantes) y consumo energético y emisiones (funcionamiento de maquinaria). PIARC (2012) plantea diversas medidas para minimizar el impacto asociado a la reposición de firmes, como minimizar transporte de materiales, técnicas más eficientes energéticamente (reciclado *in situ* de pavimentos), uso de materiales con menor consumo de energía en su fabricación o pavimentos con menor rozamiento para reducir consumo de combustible

La solución más ventajosa es el reciclado *in situ* de pavimentos, donde el material retirado de la capa de rodadura se tritura y emplea en la formación del nuevo firme, lo que evita tener que traer áridos desde canteras. También existen técnicas para la formación de firmes en frío que reducen el consumo energético. La aplicación de cambios en la forma de reponer los firmes de las carreteras, empleando técnicas más eficientes energéticamente, y en cuanto a su ciclo de vida, puede compensar la mayor frecuencia de reposición, e incluso reducir la huella de carbono actual de este proceso.

8.3.5. Préstamos, canteras y vertederos

La adaptación de ciertos tramos de infraestructuras precisa movimientos de tierras, lo que puede implicar una demanda de materiales procedentes de préstamos y canteras y la generación de tierras sobrantes destinadas a veredero. Esto exige una adecuada selección, gestión y restauración de esas zonas, aspectos abordados específicamente en Enríquez de Salamanca & Carrasco (2009).

8.3.6. Niveles sonoros

Durante las obras asociadas a la adaptación se pueden establecer medidas de prevención, como evitar trabajos nocturnos o trabajos ruidosos en la época reproductiva de las especies más sensibles del entorno. La adaptación debe evitar el empleo de firmes más ruidosos que los existentes inicialmente; se deben buscar firmes más resistentes al clima pero no más ruidosos. Concentrar el tráfico de mercancías en periodo nocturno solo debería plantearse tras evaluar la influencia acústica, y fuera de zonas sensibles.

8.3.7. Medidas de protección de cauces

Si se opta por reparar puentes se deberán adoptar medidas de prevención como el desvío provisional del cauce para evitar trabajar sobre el agua, barreras de retención, balsas de decantación, adecuación de pasos provisionales, revegetación, etcétera. En nuevos puentes conviene evitar colocar pilas dentro del cauce, lo que además de evitar daños en las obras, evita futuros problemas de socavamiento. Sin embargo, no siempre es posible o razonable, sobre todo en grandes ramblas estacionales, donde conllevaría a la construcción de costosos puentes atirantados sobre cauces secos (Figura 112).

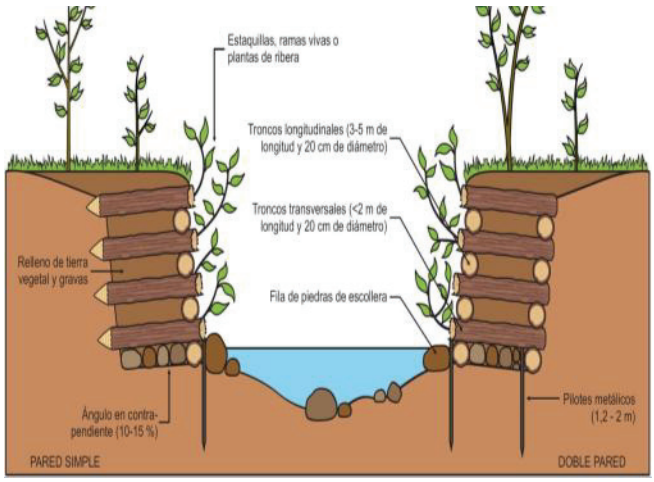
Figura 112 Ejemplos de viaductos de cruce en cauces anchos

Arriba: Viaducto del Vinalopó, línea de alta velocidad a Murcia (Aspe, Alicante). Es una rambla ancha con caudal esporádico, con pilas en el cauce, por razones económicas. Debajo: Puente atirantado del Guadiana, carreteras A-49 (España) y A-22 (Portugal) en Ayamonte (Huelva). Es un gran río de caudal permanente, salvado sin pilas en el cauce (Fuente: Google Street View)

8.3.8. Protección de la vegetación

En la búsqueda de especies para la revegetación se deben primar las más rústicas, capaces de desarrollarse en condiciones de mayor sequía, pero empleando especies propias de la flora local, y no especies alóctonas, y mucho menos invasoras. En la estabilización de taludes difíciles es preferible optar por técnicas de bioingeniería, que permiten una mejor integración paisajística. Por ejemplo, los terraplenes que linden con cauces pueden protegerse de con muros Krainer, logrando un resultado estético mejor que los gaviones o escolleras (Figura 113). Con respecto a las medidas preventivas contra incendios, y para evitar caídas de ramas o árboles, es necesario establecer una adecuado equilibrio entre seguridad e integración paisajística, para evitar podas o apeos injustificados.

Figura 113 Muro Krainer



Fuente: García-Vega et al. (2014)

8.3.9. Protección de la fauna

Es poco deseable para la fauna incrementar el tráfico nocturno, por lo que conviene evitar medidas de este tipo en zonas de interés faunístico.

Si se construyen cunetas de guarda lo deseable es optar por secciones que permitan la salida de la fauna, pero si es inevitable el empleo de secciones reducidas es precisa la construcción de rampas de escape, que permita la salida de los animales en caso de caer a su interior.

Figura 114 Rampa de escape para fauna en cuneta

Fuente: ADIF

8.3.10. Gestión de infraestructuras fuera de uso

Existen medidas de adaptación que implican la construcción de nuevos trazados, o modificaciones en los existentes (p.e. tramos con problemas de estabilidad), pudiendo

quedar tramos de la antigua infraestructura fuera de servicio. Ante esta situación se plantean varias opciones, mantenimiento sin uso, desmantelamiento o cambio de uso.

El desmantelamiento pasa por demoler los firmes en carreteras (Figura 115), retirar el balasto en ferrocarriles, nivelar y, deseablemente, una restauración ambiental.

Otra opción es cambiar el uso de la infraestructura sin servicio, asignándole otro diferente. Un ejemplo es el programa "vías verdes" desarrollado por la Fundación de los Ferrocarriles Españoles para rehabilitar antiguos trazados ferroviarios abandonados para el uso público, sobre todo senderismo y ciclismo (Figura 115).

Figura 115 Ejemplos de gestión de infraestructuras fuera de uso: demolición y cambio de uso

Izquierda: Demolición de firmes (Fuente: CEDEX). Derecha: Vía Verde (Fuente: Fundación de los Ferrocarriles Españoles)

8.3.11. Protección de la dinámica litoral

Con carácter general, cuando mayor es la incidencia de una defensa costera en la dinámica litoral, mayores son sus impactos. Por ejemplo, una escollera siguiendo en un tramo de costa suele ser menos impactante que un espigón perpendicular a la costa, y que afecta al movimiento de la arena. Por ello, cuando sean inevitables las defensas costeras duras se debe tender a su empleo lo más localizado posibles, y con tipologías constructivas que incidan lo menos posible en la dinámica litoral.

8.3.12. Impactos impredecibles

Para todos los impactos impredecibles señalados, como los asociados a normas de diseño. cambio de materiales o sustitución de equipos, maquinaria o vehículos la única medidas aplicable es la incorporación de los aspectos ambientales a la toma de decisiones, de manera que se tengan en cuenta en aspectos como la huella de carbono, los impactos de la fabricación, la durabilidad o la eficiencia energética.

Cuadro 6. Impacto ambiental de la adaptación al cambio climático de los firmes de carreteras y opciones de mitigación

Este caso se desarrolla en el Anexo 5 y se está en fase de evaluación en la revista *International Journal of Pavement Engineering*.

Las condiciones climáticas afectan a la durabilidad de los firmes de carreteras. El cambio climático puede producir variaciones en ciertos factores climáticos, modificando la exposición de los firmes de manera positiva o negativa: el incremento de temperaturas puede producir agrietamiento y deformación pero reducir los daños por congelación; unas menores precipitaciones reducen los daños pero aumentan el riesgo de subsidencia; la mayor irregularidad de la precipitación implica inundaciones más frecuentes. Estos impactos directos generan otros indirectos, también positivos o negativos, relacionados con el tráfico, el ruido, el uso de fundentes o el aumento o reducción de emisiones y consumo de energía y materiales en el mantenimiento.

Cuando los efectos del cambio climático son negativos es preciso aplicar medidas de adaptación, constructivas, externas, de mantenimiento, de gestión del tráfico o regulatorias. Muchas de estas medidas implican nuevos impactos, positivos o negativos, generalmente no considerados en la toma de decisiones. Los principales efectos son el consumo de energía y emisión de GEI y los niveles de ruido, que en ambos casos pueden reducirse o incrementarse a consecuencia de la adaptación.

Impactos primarios		**Medidas de adaptación**	**Impactos secundarios**	
Directos	**Indirectos**		**Directos**	**Indirectos**
(–) Degradación acelerada de firmes	(–) Incremento del ruido del tráfico (–) Menor seguridad vial (–) Mayor desgaste de vehículos (–) Mayor tiempo de viaje por menor velocidad (–) Riesgos de corte de tráfico	Sustitución más frecuente Cambio de tipo de firme o de materiales	(–) Mayor consumo de energía y emisión GEI (–) Mayor consumo de materiales y residuos (–) Incremento del ruido del tráfico (+) Reducción del ruido del tráfico (+) Materiales con menor huella de C (–) Materiales con mayor huella de C	(–) Incremento del cambio climático (–) Daño ambiental (canteras, vertidos) (–) Molestias a población/fauna (+) Mejora para población/fauna (+) Reducción del cambio climático (–) Incremento del cambio climático
(+) Mayor duración de los firmes	(+) Mayor consumo de energía y emisión de GEI	Innecesarias		

La aparición de impactos no deseados a consecuencia de la adaptación hace precisa la aplicación de medidas de mitigación como el uso de materiales más resistentes y con menor huella de carbono y de maquinaria con mayor eficiencia energética, el reciclaje in situ de firmes o el uso de firmes silenciosos.

Impacto de la adaptación	**Criterios**	**Opciones de mitigación**
Mayor uso de materiales y emisión de GEI por mayor frecuencia de reposición de los firmes	La adaptación no debe incrementar la emisión de GEI ni la demanda de materiales	Materiales más resistentes Reciclado *in situ* de firmes Materiales con menor huella de C Maquinaria con mayor eficiencia
Incremento del ruido del tráfico debido al cambio de tipo de firme	El cambio de firme no debe incrementar el ruido del tráfico	Uso de firmes silenciosos y resistentes Evitar firmes ruidosos aún adaptados

8.4. Retos en la evaluación de los impactos de la adaptación

El esquema habitualmente aplicado en el diseño de la adaptación identifica los impactos del cambio climático sobre las infraestructuras, evalúa alternativas con criterios sobre todo funcionales y económicos, y a veces también sociales, y define las medidas de adaptación. Sin embargo, es un modelo deficiente; es preciso incorporar los aspectos ambientales a la toma de decisiones, y considerar los impactos ambientales asociados a la adaptación y su mitigación (Tabla 58).

Tabla 58 Esquema tradicional y propuesto para el diseño de la adaptación

Diseño habitual de la adaptación	**Diseño deseable de la adaptación**
1. Identificación de impactos del cambio climático que afectan a las infraestructuras lineales de transporte.	1. Identificación de impactos del cambio climático que afectan a las infraestructuras lineales de transporte.
2. Evaluación de alternativas de adaptación basada en aspectos funcionales, económicos y sociales.	2. Evaluación de alternativas de adaptación basada en aspectos funcionales, económicos y sociales, **incorporando también los aspectos ambientales**.
3. Definición de las medidas de adaptación.	3. Definición de las medidas de adaptación.
	4. Evaluación de los impactos asociados a las medidas de adaptación.
	5. Definición de medidas de mitigación para los impactos asociados a la adaptación.

Fuente: Elaboración propia

Las directrices sobre consideración del cambio climático en la EA (CEAA 2003, CEQ 2010, EC 2013c, 2013d) están muy centradas en el primer esquema, prestando poca atención a la consideración de los impactos derivados de la adaptación.

La EIA debe considerar adecuadamente tres aspectos esenciales: (i) Los efectos ambientales de las opciones de adaptación, para su incorporación a un análisis multicriterio, analizando verdaderas alternativas y no variaciones de una misma solución. (ii) Los efectos ambientales de la alternativa de adaptación seleccionada, para poder aplicar medidas de mitigación, si fueran precisas. (iii) El diseño de las medidas de mitigación (prevención, corrección y compensación) derivadas de la aplicación de las medidas de adaptación.

Solo esta visión más amplia permitirá una adecuada evaluación ambiental de los efectos tanto directos como indirectos del cambio climático, y evitará la aplicación de medidas cuyos impactos puedan ser superiores a los supuestos beneficios.

8.5. Discusión y conclusiones

La adaptación es una respuesta a los impactos del cambio climático, para minimizar sus efectos, reduciendo la vulnerabilidad y aumentando la resiliencia. Sin embargo, dependiendo de las medidas adoptadas se pueden producir impactos ambientales no deseados (Adger et al. 2005), aspecto que están recibiendo poca atención en el debate académico y técnico (Fezzi et al. 2015, Enríquez de Salamanca et al. 2016d), y es ignorado en las directrices existentes sobre cambio climático y EIA.

Los impactos ambientales de la adaptación son frecuentemente ignorados, infravalorados o considerados superficialmente, sin una verdadera evaluación ambiental. Un ejemplo evidente son los impactos asociados a la reducción de las precipitaciones, que afectarán a la agricultura, la población o el potencial hidroeléctrico; una adaptación propuesta es obtener nuevos recursos hídrico, pero si las aportaciones son menores y el consumo se mantiene, el volumen remanente será menor afectando a los ecosistemas húmedos. Esta situación se repite en la adaptación de la mayoría de sectores, y es especialmente acusada en las infraestructuras lineales de transporte, donde la adaptación a menudo se entienden como un problema de diseño y no como una potencial acción causante de impactos ambientales.

La escasa consideración de los efectos ambientales de la adaptación puede atribuirse a varias causas, como un enfoque excesivamente sectorial de la adaptación, con mayor peso de las perspectivas técnicas, sociales y económicas, confusión entre los impactos primarios del cambio climático y los impactos secundarios de las medidas de adaptación, con una mayor consideración de los primeros, o una tendencia a considerar la adaptación como buena en sí misma. Esta infravaloración de los efectos ambientales de la adaptación puede tener implicaciones negativas en la toma de decisiones.

También llaman la atención las ideas preconcebidas acerca de algunas medidas de adaptación, consideradas buenas o malas sin una evaluación adecuada, y a la asociación "duro-malo" y "suave-bueno", no necesariamente verdadera. En este sentido, actuaciones duras como las defensas costeras, con indudables impactos ambientales (afección a la dinámica litoral), pueden evitar otros impactos mayores, como la reubicación de infraestructuras en zonas sensibles. No hay respuestas únicas, siendo precisa una evaluación caso por caso de las opciones de adaptación.

En las infraestructuras de transporte los impactos potenciales asociados a la adaptación se derivan de la construcción de nuevos trazados, ocupación de terrenos, afección a la movilidad, consumo de recursos, materiales, energía y generación de emisiones, préstamos, canteras y vertederos, variaciones en los niveles sonoros, efectos sobre los cauces y la biodiversidad, acumulación de infraestructuras, modificación de de la seguridad, cambios en los riesgos de corrosión y contaminación salina, afección a la dinámica litoral y otros impactos cuyo signo y magnitud es impredecible *a priori*.

Algunas propuestas de adaptación pueden tener repercusiones ambientales notables. Por ejemplo, reemplazar firmes asfálticos, sensible a la deformación con temperaturas elevadas, por firmes de hormigón, más resistentes al calor, puede dar lugar a un incremento de los niveles sonoros en el entorno de las carreteras. Más llamativas son las medidas que requieren ocupación de terrenos, donde casi nunca se plantean los impactos que generarían. La retirada costera o la reubicación de infraestructuras para hacer frente a la subida del nivel del mar es una buena adaptación, pero implica ocupar terrenos en el interior, con impactos que dependerán de los valores naturales existentes. De igual manera, reubicar puentes implica nuevas obras en los cauces.

La toma de decisiones para seleccionar una opción de adaptación debe integrar los enfoques, social, ambiental, técnico y económico, en un análisis multicriterio. Este análisis debe valorar, entre otras cosas, la sensibilidad social y ambiental, los beneficios e inconvenientes, e incluir todas las opciones de adaptación, entre ellas la alternativa 0 o de no actuación, integrándolos en la toma de decisiones.

La aplicación de la EIA a la toma de decisiones sobre la adaptación es posible, siendo una herramienta efectiva y probada para incluir las consideraciones ambientales en la toma de decisiones. En este sentido, impactos climáticos, adaptación y efectos ambientales de la adaptación deberían abordarse como un conjunto indisoluble, donde existen diferentes alternativas cuyos efectos ambientales deben evaluarse y compararse, proponiendo además medidas de mitigación cuando sea preciso.

Aunque la EIA se aplica ampliamente en todo el mundo, la normativa por sí misma no garantiza una evaluación adecuada de la adaptación. Las obras de gran envergadura, como reubicar infraestructuras, estarán sometidas a EIA, pero a menudo de forma tardía, sin consideran todas las opciones posibles. En otros casos, la adaptación se acomete mediante mejoras parciales, fraccionado los proyectos, o mediante cambios en el mantenimiento, no sometidos a EIA. Además, la urgencia en actuar puede limitar mucho las opciones de adaptación; si un puente colapsa, la prioridad será reconstruirlo y no evaluar alternativas de adaptación. Sería deseable abordar la adaptación de forma anticipatoria, evaluando todas las alternativas posibles, y no de forma reactiva, justificando soluciones predefinidas.

En conclusión, es evidente la necesidad de considerar los potenciales impactos ambientales de la adaptación, y de integrarlos en la toma de decisiones, para evitar opciones poco deseables, o incluso una maladaptación, generando más impactos de los que se corrigen. Se tiene todo lo necesario para la EIA de la adaptación, conocimientos y herramientas, pero se debe tomar conciencia de los principales defectos de los enfoques actuales.

9 Discusión integradora y conclusiones

9.1. Discusión integradora

El cambio climático es un problema ambiental de primera magnitud; el clima está cambiando, y va a seguir cambiando, con una intensidad que dependerá de los esfuerzos que se hagan por mitigar la contribución humana a este proceso. La principal causa antrópica que contribuye al cambio climático es la emisión de GEI, y en una parte apreciable pero menor los cambios de uso del suelo (IPCC 2007).

Existen numerosas actividades que contribuyen a la emisión de GEI, y solo algunas, relacionadas con usos del suelo y selvicultura, que actúan como sumideros. El marco regulatorio de las emisiones de GEI se centra en los sectores regulados o Sectores ETS (*European Trading Scheme*), como la industria, energía o aviación civil, sometidos a comercio de derechos de emisión de acuerdo con el Protocolo de Kioto (UN 1998) la Directiva 2003/87/EC (EU 2003) y la Ley 1/2005 (BOE 2005), siendo el resto sectores difusos, no sometidos a esta regulación.

El transporte tiene un papel muy relevante, siendo responsable de cerca de la cuarta parte de las emisiones de GEI en España (MAPAMA 2016). Dentro del transporte la mayor parte de la aviación es un sector ETS, y la navegación internacional se excluye de las contabilidades nacionales de GEI; la contribución nacional de estos modos es reducida. El sector esencial en España es el transporte por carretera, que supone el 95% de las emisiones de GEI del transporte y el 23% del total nacional. Los ferrocarriles tienen una contribución inferior y en general, salvo líneas deficitarias, son una alternativa favorable a las carreteras desde el punto de vista del cambio climático.

Carreteras y ferrocarriles son infraestructuras ligadas al terreno, con trazados lineales, formando una malla que pone en contacto diferentes puntos; por ello a su conjunto se le denomina infraestructuras lineales de transporte. Ambos son sectores difusos, no sometidos al ETS, y más complejos de gestionar en cuanto a sus emisiones de GEI. En estas infraestructuras de transporte concurren las dos principales causas antrópicas de contribución al cambio climático, la emisión de GEI, especialmente notable en la explotación de las carreteras pero presente también en ferrocarriles así como en las fases de construcción y mantenimiento, y la destrucción de sumideros durante la construcción. Cualquier esfuerzo por reducir la contribución al cambio climático y alcanzar las metas fijadas en los acuerdos internacionales, pasa por actuar en las infraestructuras lineales de transporte, y sobre todo en las carreteras.

A partir de la década de 1980 comenzó un periodo de fuerte renovación de la red de carreteras en España, iniciado con las autovías de primera generación. En las siguientes décadas continuó la expansión de las carreteras de alta capacidad, acompañada de un creciente tráfico rodado, que en ocasiones superó lo previsto. A finales de los años 1990 las previsiones de tráfico apuntaban a fuertes crecimientos y a colapsos en las áreas metropolitanas antes de 2020. Sin embargo, la crisis económica

desencadenada a partir de 2007 llevó a una reducción generalizada del tráfico hasta 2014, y con ello de las emisiones de GEI. El transporte por carretera pasó a tener un comportamiento favorable en cuanto a su contribución al cambio climático, pero por una razón coyuntural, la crisis, y no estructural como sería el esfuerzo de los gobiernos. Esa tendencia se ha revertido en 2015, con un crecimiento de emisiones, y todo apunta a que la recuperación económica implicará un incremento paralelo de emisiones.

En el sector ferroviario se ha producido una mejora en las últimas décadas, sobre todo en ferrocarriles de cercanías y urbanos, muy deseables para reducir el tráfico rodado, y en alta velocidad. Sin embargo, la apuesta por la alta velocidad ha llevado a una dualidad en el transporte ferroviario de largo recorrido, con líneas modernas y rápidas y otras obsoletas y a menudo deficitarias. Además, la alta velocidad se centra en el transporte de viajeros, quedando el de mercancías ligado a la carretera.

Se han propuesto diversas medidas para reducir la contribución al cambio climático en el sector del transporte, como un cambio comportamental (p.e. evitar viajes innecesarios o conducir de forma eficiente), desplazamiento hacia modos de transporte más eficientes (en especial el ferrocarril), mejorar la eficiencia energética de trenes y vehículos, emplear combustibles bajos en carbono o con menores emisiones de GEI, impuestos en los combustibles, movilidad sostenible en la planificación urbana, mayor ocupación de los vehículos o criterios ambientales y tasas en la gestión del aparcamiento urbano (MMA 2007, Sims et al. 2014, MAGRAMA 2015b). Varía mucho el grado de compromiso con estas medidas en los distintos países, dependiendo de la voluntad política. Por ejemplo, Suecia ha apostado por el uso de biocarburantes; Noruega por reducir la movilidad y fomentar el vehículo eléctrico (Singh et al. 2015); y Alemania por los vehículos de hidrógeno. En España las apuestas son globales, pero con menos resultados concretos, probablemente debido a la coyuntura de los últimos años, con un descenso de emisiones de GEI en el transporte a consecuencia de la crisis.

Aparte de estas grandes políticas, aún con limitados frutos, existe una falta de consideración del cambio climático en los proyectos de infraestructuras de transporte. El cambio climático se entiende como un problema global, que debe afrontarse en las más altas instancias, con poco o ningún margen de actuación en los proyectos concretos. Smith (2010) recoge algunas excusas para no considerarlo en la EIA en Estados Unidos, como que es demasiado especulativo, el proyecto es sólo una pequeña parte del problema o no se puede resolver un problema global, un diagnóstico aplicable también al caso español. Estas excusas pretenden eludir la responsabilidad en el cambio climático de los proyectos concretos; cada actuación es una pequeña parte del problema, pero al sumarlas surge la realidad del cambio climático. El cambio climático se combate en las conferencias internacionales, pero también en la vida diaria; es posible combatir el cambio climático a todos los niveles, variando el tipo de medidas y su alcance. En consecuencia, es posible y necesario luchar contra el cambio climático en el diseño, ejecución y explotación de proyectos concretos, como las carreteras y los ferrocarriles.

Las infraestructuras de transporte son elementos planificados; parten de políticas que apuesta por un tipo de movilidad, que se plasman en planes, y estos en proyectos concretos. Hasta finales del siglo XX la planificación de nuevos desarrollos se centraba en aspectos técnicos, funcionales o económicos. La ley de política ambiental estadounidense (NEPA) de 1969 estableció la EIA, como mecanismo para incorporar los aspectos ambientales a la toma de decisiones, extendiéndose a la mayor parte de países del mundo, y siendo en la actualidad uno de los instrumentos clave en la protección del medio ambiente. De acuerdo con la normativa de EIA (BOE 2013), la mayoría de proyectos de carreteras y ferrocarriles están sometidos a este procedimiento, y por ello deberían incorporar los aspectos ambientales a la toma de decisiones.

Sin embargo, el cambio climático, pese a ser un problema ambiental de primer orden, no ha llegado a la EIA hasta hace apenas unos años. Esta falta de relación se debe a un desarrollo de la EIA alejado del ámbito del cambio climático, que además tenía una elevada incertidumbre inicial. Christopher (2008) considera probable que gran parte de la resistencia al uso de la EIA como medio para hacer frente al cambio climático sea un "choque de lo nuevo". Ha sido preciso que ambas disciplinas tuvieran madurez para que se entendiera la necesidad de integrarlas. El primer antecedente que relaciona ambos conceptos es un borrador de directrices sobre cambio climático y EIA elaborado en Estados Unidos en 1997, actualizado en 2010 (CEQ 1997, 2010), ninguno de los cuales llegó a aprobarse. Canadá aprobó unas breves directrices en 2003 (CEAA 2003), y la UE una guía generalista sobre consideración de la biodiversidad y el cambio climático en la EIA una década después (EC 2013c). Hasta 2010 el cambio climático no comienza a incluirse en congresos sobre EIA. Aparte de las directrices, otra solución es que la normativa de EIA obligue a considerar el cambio climático, medida adoptada por España en la Ley 21/2013 (BOE 2013) y por la UE en su última Directiva de EIA (EU 2014). Sin embargo, los dos países más avanzados en esta materia, Canadá y Estados Unidos, no tienen incorporada esta obligación legal, que varios autores consideran innecesaria, al quedar implícita en la propia EIA (Pyke & Batten 2008, Smith 2010).

En España la consideración del cambio climático en la EIA a nivel estatal, desde su implantación en 1986 hasta el presente, ha sido muy escasa, y sorprendentemente baja en las infraestructuras lineales de transporte, pese a su destacable contribución. La exigencia de considerar el cambio climático incluida en la Ley 21/2013 y las directrices de la UE (EC 2013c), que al ser tan ambiciosas resultan poco útiles, apenas unas directrices, no han ayudado mucho, si bien es cierto que el número de infraestructuras lineales de transporte planificado en los últimos años ha sido escaso. Es preciso completar estas directrices con guías sectoriales, como la presente tesis, donde se detalle a evaluadores, promotores y consultores como de debe considerar cada uno de los elementos que componen la relación entre cambio climático y actuaciones humanas.

Las infraestructuras lineales de transporte y el cambio climático tienen una relación recíproca, siendo ambos factores causantes y receptores de impactos. Las

infraestructuras contribuyen al cambio climático y el cambio climático genera nuevos escenarios que pueden afectar a las infraestructuras. Cada enfoque tiene una forma diferente de afrontar los impactos. Para hacer frente a la contribución se deben aplicar medidas de mitigación, para prevenir, corregir o compensar los efectos negativos, y para hacer frente a los impactos del cambio climático son necesarias medidas de adaptación. Estas dos líneas de relación, contribución al cambio climático/mitigación e impactos del cambio climático/adaptación, tienen un ámbito espacial y temporal diferente. La contribución al cambio climático y su mitigación son problemas globales, que se prestan a excusas para no considerarlos en la EIA, como se ha señalado. Por el contrario, el impacto del cambio climático en las infraestructuras afecta tramos concretos, en función de su vulnerabilidad, exigiendo medidas de adaptación locales, más fácil de defender ante la ciudadanía por sus beneficios tangibles, frente a los beneficios globales pero menos tangibles de la mitigación (Wilbanks et al. 2007, Klein 2011).

Se plantean por tanto cuatro ámbitos de estudio en la relación entre cambio climático e infraestructuras de transporte: contribución, mitigación, impactos del cambio climático y adaptación; todos ellos deben incorporarse a la EIA.

El primer paso para considerar la contribución al cambio climático de una infraestructura de transporte es conocer su huella de carbono, tanto en la fase de construcción, como en la explotación y el mantenimiento. Aunque existen estudios de la huella de carbono en proyectos concretos, esta metodología no se está aplicando a la EIA al precisar un conocimiento detallado del proyecto, del que no se dispone al realizar la evaluación. En esta tesis se proponen indicadores basados en el cálculo de la huella de carbono pero específicamente adaptados al nivel de detalle de la EIA.

En la fase de construcción hay dos impactos esenciales, las emisiones de GEI en las obras y la destrucción de sumideros de carbono, comunes a carreteras y ferrocarriles. Las emisiones de GEI se producen por el empleo de maquinaria y el consumo de materiales y energía. Aunque el detalle de la actuación al hacer la EIA sea limitado, hay datos que son conocidos, como la longitud y sección del trazado, una aproximación al movimiento de tierras o una estimación de obras de drenaje, pasos y estructuras. Aplicando factores de emisión a estos elementos es posible hacer una estimación bastante ajustada de las emisiones de GEI en esta fase. También es posible cuantificar la vegetación afectada para valorar la destrucción de sumideros, cuantificando tanto el stock de carbono eliminado como la pérdida de capacidad de secuestro.

En la fase de explotación de las carreteras la contribución al cambio climático se debe a las emisiones de GEI del tráfico rodado, calculándose en base a las prognosis de tráfico y a las previsiones de emisión de GEI de los vehículos, desarrolladas en esta tesis, considerando tanto el tráfico canalizado por la nueva carretera como el tráfico residual que se mantendrá en las carreteras existentes, y comparándolo con la alternativa de no actuación. Habitualmente las nuevas carreteras tienen una contribución al cambio climático, ya que no solo captan tráfico local sino que inducen nuevo. Sin embargo, no

necesariamente es así; algunos trazados implican acortar trayectos (como ocurre con muchos túneles) lo que puede dar lugar a una reducción global en las emisiones de GEI del tráfico, y con ello a un impacto positivo, que también deberá considerarse en la EIA.

En los ferrocarriles existe la percepción de que su impacto sobre el cambio climático es positivo, lo que solo es cierto cuando se compara con otros medios de transporte con mayores emisiones de GEI. Aunque su contribución al total de emisiones de GEI es mucho menor que en las carreteras, cualquier circulación ferroviaria implica un consumo de energía eléctrica o gasoil, y por tanto emisiones de GEI. No obstante, al ser un transporte colectivo, siempre que tenga un grado de utilización razonable las emisiones por usuario son muy inferiores al transporte por carretera, tanto en viajeros como en mercancías. En consecuencia, el consumo bruto de energía del ferrocarril es un indicador de escaso interés, siendo más útil la ratio de emisiones por usuario o tonelada de mercancía, que relaciona consumo y utilización. Otro indicador interesante es la captación de usuarios de otros modos de transporte más contaminantes, como el avión o el vehículo privado; en este caso, el impacto de un ferrocarril puede valorarse calculando la reducción de emisiones de GEI por cambio modal de transporte.

En la operación y mantenimiento de las infraestructuras hay diversas operaciones que generan emisiones de GEI como iluminación, ventilación de túneles, limpieza, reposiciones o vialidad invernal, que de acuerdo a su peso en la huella de carbono global (Berzosa 2013) pueden calcularse como un 0,21% anual de las emisiones de GEI en la construcción, o del 1,95% de las emisiones anuales en la explotación en carreteras.

El cálculo de la contribución al cambio climático en la construcción, explotación y mantenimiento de infraestructuras de transporte es necesario, pero no suficiente; es precisa su consideración en la toma de decisiones. Los escasos intentos de incluir el cambio climático en la EIA se han limitado a calcular emisiones de GEI, en general de forma parcial, incorporando esa información a los EsIA, sin ninguna aplicación práctica, un problema que no se presente solo en España. El reto es lograr que esa información se considere en la evaluación ambiental y se incorpore a la toma de decisiones. Un valor global de emisiones aporta poca información, pero si se dispone de ese dato para diferentes alternativas es un criterio de comparación; no el único, ni probablemente el más importante, pero estará influyendo en la valoración ambiental de las opciones.

Es importante considerar en conjunto la contribución al cambio climático en la construcción, explotación y mantenimiento, para evitar resultados erróneos. Por ejemplo, una alternativa puede tener una mayor contribución al cambio climático en su construcción, pero por el contrario que resulte menor en la explotación; un análisis parcial de una sola etapa daría lugar a un diagnóstico parcial y que podría ser erróneo.

Otro aspecto esencial es considerar la contribución al cambio climático en la EIA de forma sistemática y no a partir de un umbral, como establece las directrices

estadounidenses (CEQ 2010), ya que se podría utilizar como excusa para no evaluar este impacto si no se alcanza el umbral, o recurrir a la fragmentación de los proyectos para evitarlo (Enríquez de Salamanca 2016). Se trata de un impacto acumulativo (Smith 2010), que debería considerarse en la EIA de todos los proyectos.

Una vez evaluada la contribución, el siguiente paso para considerar el cambio climático en la EIA es plantear soluciones, por medio de la mitigación. Como se señaló anteriormente se han propuesto diversas medidas para reducir la contribución al cambio climático en el sector del transporte, pero se trata de grandes objetivos o políticas, con una ausencia de medidas concretas aplicables a los proyectos. Como consecuencia, la mitigación del cambio climático ha quedado fuera de la EIA al no ser abordables las soluciones propuestas; sin embargo, existen medidas realmente aplicables.

Siguiendo la jerarquía de la mitigación, los impactos ambientales deben evitarse en primer lugar, si resultan inevitables corregirse o minimizarse y, finalmente, si no es posible, compensarse. En consecuencia, surgen tres tipos de mitigación, preventiva, correctiva y compensatoria, ordenados de una forma jerárquica.

El tipo de mitigación más importante frente al cambio climático es la prevención. La fase de diseño tiene enormes posibilidades, infravaloradas, mediante decisiones sobre la geometría de los trazados, soluciones constructivas, materiales o evitando la destrucción de sumideros; la EIA ha logrado incorporar aspectos como la biodiversidad o la población al diseño, y de igual manera, se debe lograr con el cambio climático. En la explotación es posible reducir las emisiones de GEI mediante la gestión de tráficos, rodado o ferroviario, y en el mantenimiento con un aumento de la eficiencia, sobre todo en la iluminación. No obstante, estas medidas suelen sobrepasar el alcance de la EIA.

La mitigación correctiva del cambio climático es limitada, porque una vez emitido un GEI no hay corrección posible. No obstante, es posible recuperar los daños a sumideros durante las obras mediante la restauración de la cubierta vegetal, cosa que ya se hace por la afección a la biodiversidad, aunque sin que se tenga conciencia de que también se puede lograr una mitigación del cambio climático.

En el último nivel de la jerarquía de la mitigación se encuentra la compensación de la afección al cambio climático, aspecto actualmente ignorado pero con un enorme potencial tanto en proyectos sometidos a EIA como ya ejecutados. La mitigación compensatoria del cambio climático tiene dos facetas, la compensación por sumideros destruidos, fácilmente asumible, y la compensación por la emisión de GEI, mucho más ambiciosa. Ambos tipos de compensación son técnicamente viables mediante actividades de gestión del uso del suelo y reforestación, que pueden ligar las ventajas climáticas con la mejora del paisaje, la biodiversidad y el desarrollo rural. Las regiones más densamente pobladas y con mayor tráfico tienen más limitaciones para la compensación, pero España es un país grande, por lo que con una visión territorial amplia la compensación sería viable. El gran reto, es la financiación. La compensación

del cambio climático en la infraestructuras de transporte abre un horizonte esperanzador para un transporte más sostenible y puede ser una herramienta esencial para cumplir los objetivos de emisiones de GEI comprometidos por España, ya que a partir de 2030 (EC 2015a) el sector LULUCF se incluirá en la contabilidad nacional de emisiones; actualmente se incluye en los inventarios, pero no en los cómputos globales. El empleo conjunto de mecanismos como bancos de conservación y mercados de carbono puede ayudar al desarrollo de estas compensaciones (Enríquez de Salamanca et al. 2016c).

Aplicando el principio de "quien contamina paga" (EFTEC et al. 2010), básico en la normativa ambiental de la UE, el responsable de sufragar los gastos de mitigación del cambio climático debería ser quien genere las emisiones de GEI o destruya los sumideros. En la construcción de carreteras y ferrocarriles, y en su mantenimiento la responsabilidad es del promotor o gestor, quien debería aplicar y financiar las medidas. Sin embargo, en la fase explotación la situación varía.

En la explotación de carreteras las emisiones de GEI proceden del tráfico rodado, compuesto por gran número de usuarios, cuya contribución varía según el uso que hagan de la infraestructura, el tipo de vehículo, la eficiencia y la forma de conducción, que se traducen en mayor o menor consumo de carburante. Una forma posible de financiar la mitigación, al menos en parte, sería un impuesto a los carburantes, que además serviría para desincentivar su consumo (Buñuel 2009, Liu & Cirilo 2016) y para corregir desequilibrios, como la contribución al cambio climático derivada del tráfico a través de un país de bienes que ni produce ni usa (Bastianoni et al. 2004).

En los ferrocarriles las emisiones de GEI son prácticamente fijas para un trayecto; aunque la eficiencia media es elevada, existe una gran disparidad, con trayectos de rentabilidad y eficiencia inmensa y otros deficitarios con eficiencia muy baja. Un análisis individualizado de cada línea y franja horaria permitiría establecer la eficiencia en carbono por pasajero, pero hay otros factores a considerar como el servicio público, la accesibilidad y la vertebración territorial, que pueden llevar a mantener líneas con escasa demanda. Los costes de mitigación se podrían sufragar con tasas en los billetes para viajeros, o por unidad de peso transportando en mercancías, pero al ser un modo de transporte eficiente con respecto a la emisión de GEI parece recomendable no gravarlo con impuestos, para que resulte más competitivo.

Si la integración de la mitigación del cambio climático en proyectos sometidos a EIA es un reto importante, más aún lo es en carreteras y ferrocarriles ya operativos; si no se actúa en ellos será difícil alcanzar las metas de reducción de GEI comprometidas. Esto puede hacerse mediante regulación del tráfico, cambios en la iluminación y origen de la energía, optimización de la frecuencia y eficiencia del mantenimiento, y mediante la compensación de emisiones de GEI creando nuevos sumideros. También es importante lograr una reducción en la movilidad por carretera, potenciando el transporte público y el trasvase modal al ferrocarril, unido a políticas de desincentivación o

penalización del uso del vehículo privado. En este sentido, la EIA no es el final del camino en la consideración del cambio climático, sino el punto de partida.

Hasta aquí se han discutido los aspectos globales de las infraestructuras con respecto al cambio climático, la contribución y mitigación. Pero como se ha señalado, existen también impactos recíprocos, del cambio climático sobre las infraestructuras, de carácter local; de hecho, hay países vulnerables que ya están sufriendo estos impactos.

Los impactos del cambio climático sobre las infraestructuras de transporte no se están considerando en la EIA por una dificultad para su encaje; no son el tipo de impactos habitualmente considerados, derivados del propio proyecto, sino factores que influyen en él, y por ello son considerados aspectos de diseño y no objeto de evaluación.

En España los principales efectos del cambio climático son un incremento de las temperaturas máximas estivales y las olas de calor, una reducción de las precipitaciones y un aumento de su irregularidad. Las infraestructuras de transporte se diseñan para perdurar adaptadas a las condiciones climáticas existentes, preveyendo su conservación para alargar la vida útil. Por eso, los impactos del cambio climático no son fácilmente detectables, al suponer una mayor recurrencia de fenómenos habituales, que produce una degradación más acelerada de elementos de por si duraderos. Además no todos los impactos son negativos; frente a problemas como la deformación de firmes o el pandeo de raíles por el calor, o el socavamiento de puentes por precipitaciones extremas, se prevé un ahorro de costes de mantenimiento por unos inviernos más suaves.

La magnitud de estos impactos presenta una gran incertidumbre, dependiendo de los esfuerzos por mitigar el cambio climático. Por ejemplo el incremento de la temperatura media en España en 2081-2010 (OECC 2013) puede variar desde 0,3-1,7ºC en un escenario favorable (RCP2.6) a 2,6-4,8ºC en uno desfavorable (RCP8.5).

Centrándose en la EIA, la consideración de los impactos del cambio climático tiene dos sentidos fundamentales. Por una parte, determinar si los criterios de diseño de la carretera o ferrocarril son adecuados para alcanzar la durabilidad prevista. Para ello se debe considerar como afecta actualmente la climatología a la infraestructura y como el cambio climático puede alterar la frecuencia y magnitud de esos impactos (Jaroszweski et al. 2014), referido a unos escenarios concretos en función del riesgo y garantía asumidos. Por otra parte, los impactos del cambio climático son la base para diseñar medidas de adaptación; si no se conoce el impacto, difícilmente podrá adaptarse a él.

El clima está cambiando y va a seguir haciéndolo en mayor o menor medida, con regiones que sufren ya sus efectos y requieren actuaciones (Pielke et al. 2007, Klein 2011). Por eso, en la actualidad existe consenso sobre la necesidad de adoptar medidas de adaptación, de forma conjunta a la mitigación (Klein et al. 2005, Warren et al. 2012), y no como una alternativa, como se veía en el pasado (Yohe 2001, Buob & Stephan 2011). Sin embargo, la adaptación al cambio climático es difusa. La adaptación no es un proceso específicamente ligado al cambio climático, ya que el clima es variable de

forma natural; el cambio climático acrecienta los fenómenos adversos, pero no existe una clara línea definitoria entre adaptación al "cambio climático" o al "clima cambiante" (Kiem & Austin 2013, Cox et al. 2015). A medio o largo plazo podrían detectarse cambios a nivel estadístico, pero es difícil evaluarlos *ex ante*. Tampoco procesos catastróficos como las inundaciones pueden achacarse al cambio climático, al ser recurrentes; varía la probabilidad de ocurrencia, pero no el que se produzcan o no.

El actual esquema asocia excesivamente impactos del cambio climático y medidas de adaptación como respuesta, de forma análoga a la contribución del cambio climático y su mitigación. Sin embargo, la adaptación puede aplicarse de muchas maneras, o no aplicarse. En las infraestructuras de transporte los impactos del cambio climático afectan a su estado de conservación y funcionalidad, por lo que su análisis se asume habitualmente desde la perspectiva económica: cuáles son los costes de adaptación, y cuáles los derivados del cambio climático, tanto en los referente a reparaciones como a costes de oportunidad en caso de interrupción del servicio.

En algunos estudios coste-beneficio, en países en desarrollo, se obtiene que la adaptación no es rentable, siendo preferible reparar los daños (Twerefou et al. 2015). También en España existen infinidad de carreteras locales que cruzan cauces, no adaptadas al régimen pluviométrico; en lugar de construir puentes se opta por cortarlas al tráfico durante las crecidas, por motivos de proporcionalidad de la inversión. También en infraestructuras no estratégicas puede ser más rentable reparar que adaptar. Aún optando por la adaptación, no existe una respuesta adaptativa única, pudiendo afrontarse un mismo problema de diferentes maneras, con una efectividad, costes y repercusiones ambientales variables. Esta visión económica de la adaptación hace que no todas las infraestructuras tengan las mismas prioridades; los recursos son limitados, por lo que se debe priorizar. Un riesgo de priorizar la red troncal es generar una mayor vulnerabilidad en zonas rurales, donde las infraestructuras tienen menor uso pero pueden ser esenciales para la población (Schweikert et al. 2014a, Taylor & Philp 2015).

El actual enfoque sectorial de la adaptación limita la posibilidad de afrontarla de forma global, ya que es un problema transversal, ligado al uso del territorio. La mejor forma de afrontar problemas hidrometeorológicos, por ejemplo, es actuar en la gestión de las cuencas y no solo reforzando cimentaciones de puentes. No obstante, existen obstáculos competenciales para abordar la adaptación a nivel global.

En una nueva infraestructura la adaptación se puede afrontar en la fase de diseño, adecuando las normas de aplicación a los escenarios previsibles, y considerando su ubicación, para evitar zonas de riesgo. En este sentido ya se está avanzando; por ejemplo la actual norma de drenaje (BOE 2016a) establece mayores caudales de cálculo, aportando también mayor garantía. Además, estos proyectos se someten a EIA, pudiendo verificarse la inclusión de la adaptación. Sin embargo, hay una gran cantidad de infraestructuras existentes, construidas con normas menos exigentes, o sin ellas, y no sometidas a EIA. Existe el riego de que su adaptación, en caso de hacerse, se aborde de

forma progresiva, como mejoras sucesivas, quedando fuera del ámbito de la EIA, y excluyendo los aspectos ambientales de la toma de decisiones.

La adaptación es una respuesta a los impactos del cambio climático, por lo que tiende a considerarse positiva en sí misma, y deseable. Sin embargo, no tiene por qué ser así; cualquier medida de adaptación puede producir impactos ambientales no deseados (Adger et al. 2005). Por ejemplo, la reducción de precipitaciones afectará a la agricultura o la población; si la adaptación se basa en obtener recursos hídricos adicionales, se generarán nuevos impactos sobre los ecosistemas acuáticos. Esta situación se repite en la mayoría de sectores, donde los impactos de la adaptación son ignorados, infravalorados o considerados superficialmente, sin considerarse en la toma de decisiones. Las causas parecen ser un una visión excesivamente sectorial de la adaptación, dominada por enfoques técnicos, sociales y económicos, confusión entre los impactos primarios del cambio climático y los impactos secundarios de las medidas de adaptación y esa tendencia a considerar la adaptación como buena en sí misma.

En las infraestructuras de transporte los impactos asociados a la adaptación pueden derivarse de la construcción de nuevos trazados, ocupación de terrenos, afección a la movilidad, consumo de recursos, materiales, energía y generación de emisiones, variación en los niveles sonoros, efectos sobre cauces y biodiversidad, acumulación de infraestructuras, modificación de la seguridad, afección a la dinámica litoral y otros impredecibles. Algunas propuestas de adaptación pueden tener repercusiones ambientales notables, y por ello deberían analizarse en el marco de la EIA. Un problema importante es la adaptación en infraestructuras existentes. Cuando las obras son de gran envergadura, como reubicar una infraestructura, estarán sometidas a EIA, pero de forma tardía y con escasas alternativas. En otros casos la adaptación se acomete mediante mejoras parciales no sometidas a EIA pero con potenciales efectos ambientales. Además, la urgencia en actuar puede limitar mucho las opciones de adaptación.

Es por tanto necesario considerar los potenciales impactos ambientales de la adaptación, e integrarlos en la toma de decisiones, para evitar opciones poco deseables, o incluso una maladaptación, generando más impactos de los que se corrigen. Sin embargo, este aspecto se ignora en las directrices existentes sobre cambio climático y EIA, y en general el debate académico y técnico. Existe consenso sobre la necesidad de incorporar a la EIA los cuatro pilares tratados en esta tesis, contribución, mitigación, impactos del cambio climático y adaptación, pero sin embargo no se presta atención a los impactos inducidos por la adaptación.

9.2. Aportaciones de la tesis doctoral

Como se ha señalado, hasta el momento se ha prestado muy poca atención en España a la consideración del cambio climático en la EIA en general, y en las infraestructuras lineales de transporte en particular. Esto parece deberse a una escasa atención a esta problemática por los agentes implicados en la EIA, que no solo afecta a España, sino a muchos otros países; incluso en los más avanzados en esta materia, siguen produciéndose carencias y disfuncionalidades, como una evaluación muy dispar, falta de consideración de la adaptación o escasa influencia en la toma de decisiones.

Las directrices existentes sobre cambio climático y EIA son documentos breves y muy genéricos, aplicados a todo tipo de proyectos, e incluso en la UE abarcando de forma conjunta la consideración de la biodiversidad y el cambio climático. Aunque son referencias interesantes, tienen poca utilidad práctica para promotores, consultores y evaluadores. Son precisos, por tanto, documentos concretos sectoriales, mucho más profusos y prácticos. Esta es una de las aportaciones esenciales de esta tesis.

Una herramienta útil para la EIA debe reunir varios requisitos. Por una parte debe tener un soporte técnico y científico sólido, evitando que sea especulativa o poco rigurosa. Debe ser concreta, abordando la problemática específica de las actividades a evaluar, en este caso las infraestructuras lineales de transporte; abarcar todos los tipos de proyectos sometidos a EIA implica un documento enorme o, de no ser así, un documento demasiado general, y poco útil. Debe ser transversal, abordando todos los temas que intervienen en la EIA. Finalmente, debe ser aplicable; no puede limitarse a enfoques o hipótesis meramente teóricas, que en la práctica no sea posible aplicar a la EIA. Todos estos enfoques se han adoptado en la presente tesis.

Para lograr un sólido soporte técnico y científico, en la elaboración de la tesis se ha consultado una gran cantidad de bibliografía, académica y gris. En total se recogen cerca de 800 referencias seleccionadas y citadas, con un número de documentos consultados, aunque finalmente no citados, muy superior. Esta labor sería imposible de asumir en la realización de un EsIA. Asimismo, cuando han surgido cuestiones sobre las que no existía información, como el grado de consideración del cambio climático en la EIA o de los impactos ambientales de la adaptación, se han realizado investigaciones específicas, cuyos resultados se recogen en la tesis y se han publicado. También se han publicado, o está en proceso, varios artículos sobre temas importantes donde se han detectado carencias de información.

La especificidad es otro aspecto esencial. Plantear un documento general sobre cambio climático y EIA haría que resultase poco concreto o enormemente extenso. La EIA abarca proyectos tan diversos como el transporte, la minería, energía, gestión del agua, industria o transformación de usos del suelo. Cada materia tiene una problemática diferente en cuanto a su relación con el cambio climático, por lo que un alcance

demasiado ambicioso puede conducir a un documento poco sistemático. Un trabajo de investigación exige acotar el ámbito de estudio para lograr resultados concretos, y por ello en este caso se ha limitado a las infraestructuras lineales de transporte.

La transversalidad es también un aspecto inherente a la EIA, lo que exige manejar información dispersa y procedente de sectores profesionales distantes. Se ha hecho un esfuerzo para reunir todas estas fuentes y para adaptarlas a las necesidades de la EIA. No basta con recopilar información en bruto; hay que analizarla, valorarla y adecuarla al objetivo final, que es la consideración del cambio climático en la EIA.

Un riesgo de un documento de este tipo es caer en un enfoque excesivamente teórico, que aunque técnica y científicamente sea muy sólido, en la práctica resulte inaplicable. Es preciso partir de que la EIA es un procedimiento técnico y administrativo concreto y práctico, en el cual es preciso elaborar una serie de estudios que, entre otras cosas, consideren el cambio climático. Por ello, todo ese riguroso soporte teórico debe ponerse al servicio de la EIA mediante herramientas prácticas que sean utilizables. En este sentido, es esencial conocer en detalle cómo se realiza la EIA de las infraestructuras de transporte, para saber en qué fase de planificación se acomete y con qué información se puede contar. Además, no basta con hacer algunos cálculos de la huella de carbono para incorporar el cambio climático en la EIA; es precisa una consideración global, y además que eso repercuta en la toma de decisiones, por ejemplo para determinar las alternativas más o menos desfavorables. Por ello, se ha considerado muy interesante no solo proponer herramientas concretas para evaluar la contribución al cambio climático, para su mitigación y compensación, o para analizar los problemas derivados de la adaptación, o de sus impactos, sino que también se han incluido casos prácticos que demuestran la viabilidad de lo propuesto. No se pretende establecer un método único de valoración a seguir, sino proponer una metodología viable.

Al avanzar en el desarrollo de la tesis se ha detectado la dificultad para incorporar los impactos del cambio climático y la adaptación en la EIA, por considerarse un problema de diseño más que una materia objeto de evaluación ambiental. Sin embargo, este problema se debe también en gran medida a que no se están considerando los impactos ambientales asociados a la adaptación, considerada como buena o positiva en sí misma. Por ello se ha dedicado un capítulo específico a este aspecto.

El diagnóstico de la situación actual, la escasa consideración del cambio climático en la EIA, es un punto de partida necesario, pero no un objetivo. Es necesario superar esas carencias, y lograr que en adelante este aspecto se incorpore a la EIA y a la toma de decisiones de forma efectiva. Esta tesis pretende ser una herramienta útil para ello.

En la Tabla 59 se resume la situación actual y las aportaciones de esta tesis en cada uno de sus capítulos.

Tabla 59 Situación actual de la consideración del cambio climático en la EIA de infraestructuras lineales de transporte y aportaciones de este trabajo

Capítulo	Situación actual	Aportaciones de este trabajo
Capítulo 3. Consideración del cambio climático en la EIA	- El cambio climático y la EIA se han desarrollado de forma independiente; solo de forma reciente ha surgido la idea de integrar ambos aspectos - Existe directrices sobre cambio climático y EIA en algunos países, pero son documentos breves y genéricos donde se indican criterios generales de integración - La normativa de España (2013) y al UE (2014) obliga a considerar el cambio climático en la EIA, pero la experiencia acumulada es escasa - Faltan guías sectoriales sobre integración del cambio climático en la EIA - En España la consideración del cambio climático en la EIA se presume muy escasa en general, y en especial en las infraestructuras lineales de transporte	- Análisis de la situación internacional sobre la consideración del cambio climático en la EIA, como marco previo de referencia - Análisis en detalle de la situación en España. La consideración del cambio climático en la EIA ha sido muy escasa, y especialmente en las infraestructuras lineales de transporte, pese a su gran desarrollo en las últimas tres décadas - La obligación legal de considerar el cambio climático en España, muy avanzada a nivel internacional, no responde a la situación real - Son precisas guías prácticas sectoriales, como es el caso de esta tesis para las infraestructuras lineales de transporte
Capítulo 4. Contribución al cambio climático de las infraestructuras lineales de transporte	- Su consideración en la EIA es muy escasa, y sin influir en la toma de decisiones - Existen herramientas para calcular la huella de carbono de proyectos y actividades, pero no adaptadas a la EIA. Están pensadas para fases de planificación más detalladas; de hecho, prácticamente no se han empleado en la EIA - Aparte de las emisiones de GEI también se debe valorar la destrucción de sumideros, aspecto al que se presta casi nula atención - El gran reto es no solo calcular la contribución al cambio climático, si no que esa información se incorpore realmente a la EIA e influya en la toma de decisiones	- Análisis sistemático de los aspectos que contribuyen al cambio climático en las infraestructuras de transporte, en las fases de construcción, explotación y mantenimiento - Propuesta de indicadores específicos para la evaluación de la contribución al cambio climático en la EIA, en las fases de construcción, explotación y mantenimiento, de manera que pueda incorporarse a la comparación de alternativas y a la toma de decisiones - Casos prácticos donde se demuestra la viabilidad de estos indicadores, tanto para la fase de construcción (común a carreteras y ferrocarriles) como para la explotación de una carretera y de un ferrocarril
Capítulo 5. Mitigación del cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte	- La contribución al cambio climático del sector del transporte es notable, sobre todo en carreteras, por lo que su mitigación es esencial para alcanzar las metas asumidas por España en materia de cambio climático - Su consideración en la EIA en España es nula; se considera que supera la EIA - Las medidas de mitigación propuestas en el sector del transporte son globales, grandes políticas o estrategias, con una ausencia de medidas concretas aplicables a los proyectos, y que puedan por tanto integrarse en la EIA - La mitigación compensatoria está claramente infravalorada, y tiene problemas prácticos para su aplicación	- Propuesta sistemática de medidas de mitigación preventiva, correctiva y compensatoria para infraestructuras de transporte, aplicables en la fase de proyecto, y que por tanto deberían incorporarse a la EIA - Énfasis en la necesidad de un diseño mitigativo, como mejor herramienta para lograr infraestructuras con una menor contribución al cambio climático - Demostración de la viabilidad de la compensación de las emisiones de GEI en las carreteras - Propuesta de mecanismos posibles para una aplicación efectiva de las medidas de compensación por emisiones de GEI

Tabla 59 (cont.) Situación actual de la consideración del cambio climático en la EIA de infraestructuras lineales de transporte y aportaciones de este trabajo

Capítulo	Situación actual	Aportaciones de este trabajo
Capítulo 6. Impactos del cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte	- Las directrices internacionales indican la necesidad de incorporarlos a la EIA - Existe información muy dispersa y sectorial, a menudo no relacionada con el cambio climático, sino con los efectos en general del clima - Desconocimiento de estos impactos por los agentes implicados en la EIA, e incluso por los ingenieros civiles. La información está dispersa, y faltan guías de referencia - Su consideración en la EIA en España es nula, salvo en algunas obras hidráulicas donde se analiza la reducción de aportaciones por menor precipitación - Se perciben como un problema de diseño, y no como un aspecto propio de la EIA	- Relación sistemática de impactos del cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte, mediante la integración de fuentes muy diversas, que permita determinar cuáles son aplicables a cada caso concreto - Necesidad de asociar los impactos del cambio climático a escenarios concretos - Aunque a menudo estos impactos se relacionan con cuestiones de diseño, son la base para el diseño de las medidas de adaptación; por ello, es esencial incluirlos en la EIA, para entender dichas medidas
Capítulo 7. Adaptación al cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte	- Las directrices internacionales indican la necesidad de incorporarlas a la EIA - Su consideración internacional en la EIA es muy escasa, y nula en España - Existen distintas alternativas de adaptación, con repercusiones ambientales muy diferentes, por lo que deberían integrarse en la EIA - Se perciben como un problema de diseño, y no como un aspecto propio de la EIA. La mayoría de medidas son constructivas en las propias infraestructuras - En España el sector del transporte no se considera prioritario de cara a la adaptación, prestándose poco interés - Existe una escasa relación entre adaptación y escenarios climáticos; la necesidades de unos a otros escenarios varían mucho	- Relación sistemática de medidas de adaptación al cambio climático en las infraestructuras lineales de transporte. Algunas medidas están siendo infravaloradas, pese a su necesidad - Se ponen de manifiesto todas las posibilidades de adaptación, que no son únicamente actuaciones en la propia infraestructura, y pueden ser ex situ - Las opciones de adaptación pueden dar lugar a alternativas diferentes, que deberían ser evaluadas en la EIA - Se incluye un caso práctico de adaptación al cambio climático en un país vulnerable, para evidenciar las repercusiones que puede tener el cambio climático y las necesidades de adaptación
Capítulo 8. Impacto ambiental de la adaptación al cambio climático	- La adaptación se considera globalmente buena en sí misma, y parece no valorarse sus potenciales impactos ambientales - Cualquier medida de adaptación puede causar impactos indeseados, que incluso puede hacer que sea inadecuada - Este aspecto no se incluye en ninguna directriz sobre cambio climático y EIA, ni en planes o estrategias globales - La falta de consideración de la adaptación en la EIA hace que tampoco se evalúen sus impactos, como sería deseable	- Análisis de la consideración del impacto ambiental de la adaptación a nivel global, donde se verifica su escasa atención - Análisis sistemático del impacto ambiental de la adaptación en infraestructuras de transporte, actualmente inexistente - Propuesta de medidas de mitigación de los impactos de la adaptación en las infraestructuras de transporte, actualmente inexistente - Caso práctico de análisis de los impactos de la adaptación en firmes de carreteras

9.3. Conclusiones finales

El cambio climático es un problema ambiental de primera magnitud; el clima está cambiando, y va a seguir cambiando, con una intensidad que dependerá de los esfuerzos que se hagan por mitigar la contribución humana a este proceso. Numerosas actuaciones humanas contribuyen al cambio climático, principalmente por la emisión de GEI, y con una importancia apreciable pero menor por la destrucción de sumideros. Entre ellas, el sector del transporte tiene una importancia considerable, siendo responsable de la cuarta parte de las emisiones de GEI en España, en un 95% en las carreteras. La contribución de los ferrocarriles es muy inferior, pero tienen muchas características similares a las carreteras y una gran complementariedad, formando ambas el grupo de las infraestructuras lineales de transporte.

La infraestructuras lineales de transporte son actuaciones planificadas, mediante políticas, planes y proyectos concretos. La práctica totalidad de proyectos de carreteras y ferrocarriles están sometidos a EIA, un procedimiento técnico y administrativo para garantizar la consideración de los aspectos ambientales en la toma de decisiones. Teniendo en cuenta la contribución al cambio climático de estas infraestructuras, resulta lógico que este aspecto se incorpore a la EIA, cosa que hasta el momento ha ocurrido de forma escasa. La EIA y el cambio climático se han desarrollado de forma independiente, y solo de forma reciente se ha planteado la necesidad de integrarlos. En España la consideración del cambio climático en los últimos 25 años ha sido muy escasa, y sobre todo en carreteras y ferrocarriles, pese a su gran desarrollo en ese periodo. Aunque a partir de 2013 se ha incorporado la obligatoriedad de considerar el cambio climático en la EIA, y hay directrices generales, es precisa una mayor concienciación de los agentes implicados en este procedimiento, así como guías sectoriales, actualmente inexistentes.

Las infraestructuras de transporte y el cambio climático tienen una relación recíproca, siendo ambos factores causantes y receptores de impactos. Las infraestructuras contribuyen al cambio climático, sobre todo por la emisión de GEI, precisando medidas de mitigación para paliar esos impactos, pero a su vez, el cambio climático puede afectar a las infraestructuras, requiriendo medidas de adaptación. Además, las propias medidas de adaptación también pueden generar impactos indeseados. Todos estos aspectos deben considerarse en la EIA.

El análisis de la contribución al cambio climático se basa en el cálculo de las emisiones de GEI en las fases de construcción, explotación y mantenimiento, así como las procedentes de la destrucción de sumideros durante la construcción; se han planteado indicadores para todas estas etapas, adecuados al nivel de detalle de la EIA. En los ferrocarriles otros indicadores útiles son la ratio de emisiones por viajero o tonelada de mercancía, o la reducción de emisiones por trasvase modal. No basta con

calcular estos indicadores, u otros similares; es preciso incorporarlos a la toma de decisiones, haciendo que sean útiles para la comparación de alternativas.

Las medidas de mitigación del cambio climático propuestas en el sector del transporte son en general grandes objetivos, sin actuaciones concretas aplicables a nivel de proyecto, lo que ha llevado a que queden fuera de la EIA; sin embargo, también es posible actuar en esta fase. Las medidas principales son preventivas, sobre todo aplicadas en el diseño, para lograr infraestructuras con menor huella de carbono en la construcción y explotación. También es posible una mitigación preventiva en la explotación y mantenimiento, aunque suele exceder el ámbito de la EIA. La mitigación compensatoria es posible mediante el secuestro de carbono y la compensación de sumideros destruidos. Sin embargo, está infravalorada, pese a ser viable, y a poder incorporar al secuestro de carbono otras ventajas, como la mejora de la biodiversidad y el paisaje, el desarrollo rural, o un apoyo para lograr las metas de reducción de GEI, y a ser aplicable tanto a nuevas infraestructuras como a la ya existentes. Sus mayores retos son la voluntad política y la financiación.

El cambio climático implica una modificación de las condiciones actuales que repercute sobre las infraestructuras de transporte, de forma positiva o negativa. Su consideración en la EIA debe buscar determinar si los criterios de diseño son adecuados para alcanzar la durabilidad prevista de la obra, y servir de base para diseñar medidas de adaptación, si fueran precisas.

Cuando se prevean impactos negativos asociados al cambio climático pueden ser precisas medidas de adaptación. Sin embargo, no es un relación automática; la adaptación puede aplicarse de muchas maneras, o no aplicarse. En las infraestructuras de transporte estas decisiones están muy relacionadas con la funcionalidad y los costes. El enfoque de la adaptación, excesivamente sectorial, limita la posibilidad de afrontarla de forma global como sería deseable; el principal obstáculo es competencial. Una revisión de las normas de diseño, que actualmente está en marcha, permite que las nuevas infraestructuras estén cada vez mejor adaptadas a los escenarios futuros. Sin embargo, hay muchas infraestructuras existentes mal adaptadas, que precisarían actuaciones, y que pueden quedar fuera del ámbito de la EIA.

La adaptación es una respuesta a los impactos del cambio climático, por lo que tiende a considerarse positiva en sí misma, y deseable. Sin embargo, cualquier medida de adaptación puede producir impactos ambientales no deseados, precisando una adecuada evaluación, e incluso la aplicación de medidas de mitigación. Este aspecto está siendo muy poco considerado, precisando una mayor atención y conciencia.

En conclusión, en esta tesis se aportan conocimientos y herramientas para hacer frente a la escasa consideración actual del cambio climático en las infraestructuras de transporte, solventando ese vacío, quedando solo pendiente una mayor concienciación de todos los agentes involucrados en la EIA.

Bibliografía

Abegg B, Agrawala S, Crick F, de Montfalcon A. 2007. Climate change impacts and adaptation in winter tourism. En: Agrawala S. (Ed.) *Climate change in the European Alps*. OECD, Paris, pp 25–60.

Abid M, Schilling J, Scheffran J, Zulfiqar F. 2016. Climate change vulnerability, adaptation and risk perceptions at farm level in Punjab, Pakistan. *Science of the Total Environment* 547: 447–460.

ACC. 2010. *Adapting to the Impacts of Climate Change. America's Climate Choices*. National Academy Press. http://www.nap.edu/download.php?record_id=12783 (14.1.16).

ACT. 2012. *Triple Bottom Line assessment for the Act Government. Framework and templates*. Australian Capital Territory Government. http://www.cmd.act.gov.au/__data/assets/word_ doc/0019/331372/TBL_ Assessment_Framework.doc (7.10.14).

Adepetu A, Berthe A. 2007. *Vulnerability of rural Sahelian households to drought: options for adaptation. Final report submitted to assessments of impacts and adaptations to climate change*. The International Start Secretariat. http://www.start.org/Projects/AIACC_Project/Final Reports/Final Reports/FinalRept_AIACC_AF92.pdf (17.1.2016).

Adger WN, Arnell NW, Tompkins EL. 2005a. Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change* 15: 77–86.

Adger WN, Arnell NW, Tompkins EL. 2005b. Adapting to climate change: perspectives across scales. *Global Environmental Change* 15: 75–76.

ADIF. 2011. *Base de precios tipo general para los proyectos de plataforma (BPGP)*. Administrador de Infraestructuras Ferroviarias.

AEC. 2016. La Asociación Española de la Carretera examina el estado de la red viaria. Asociación Española de la Carretera. http://www.aecarretera.com/np/NP Auditoria estado carreteras AEC 2015 2016_v3.pdf (3.6.2016).

AESF. 2016a. Borrador de Orden FOM por la que se aprueba la "instrucción ferroviaria para el proyecto y construcción del subsistema de infraestructura (IFI-2016)". Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria. Ministerio de Fomento. http://www.seguridadferroviaria.es/NR/rdonlyres/945C8FC1-59F7-4F1E-B0A1-699E1637728B/135327/BorradorIFIINFRAESTRUCTURA.pdf (4.6.16).

AESF. 2016b. Borrador de Orden FOM por la que se aprueba la "instrucción ferroviaria para el proyecto y construcción del subsistema de energía (IFE-2016)". Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria. Ministerio de Fomento. http://www.seguridadferroviaria.es/NR/rdonlyres/077D3731-4D46-423A-BEDC-C5B3C73C15B0/135326/BorradorIFEENERGIA.pdf (4.6.16).

AESF. 2016c. Borrador de Orden FOM, por la que se aprueba la "instrucción ferroviaria: especificaciones técnicas de material rodante ferroviario para la entrada en servicio de unidades autopropulsadas, locomotoras y coches (IF MR ALC-2016)". http://www.seguridadferroviaria.es/NR/rdonlyres/B82BC3F5-9616-47D3-8155-2076FE94DDA5/135328/BORRADORIFIMATERIALRODANTE.pdf (4.6.16).

Agard J, Schipper ELF, Birkmann J, Campos M, Dubeux C, Nojiri Y, Olsson L, Osman-Elasha B, Pelling M, Prather MJ, Rivera-Ferre MG, Ruppel OC, Sallenger A, Smith KR, St. Clair AL. 2014. Glossary. En: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge-New York. 1757-1776.

Agrawala S, Kramer AM, Prudent-Richard G, Sainsbury M. 2010. *Incorporating climate change impacts and adaptation in Environmental Impact Assessments: Opportunities and Challenges*. OECD Environmental Working Paper No. 24. OECD. http://www.oecd-ilibrary.org (4.10.14).

Agudo R, Muñoz M, Pino O. 2007. *Primer inventario de sumideros de CO_2 de Andalucía*. Junta de Andalucía, Sevilla.

Ahouissoussi N, Neumann JE, Srivastava JP, Boehlert B, Sharrow S. 2014a. *Reducing vulnerability of Armenia's agricultural systems to climate change*. World Bank, Washington, DC.

Ahouissoussi N, Neumann JE, Srivastava JP, Okan C, Droogers P. 2014b. *Reducing vulnerability of Georgia's agricultural systems to climate change*. World Bank, Washington, DC.

Ahouissoussi N, Neumann JE, Okan C, Boehlert B, Strzepek K. 2014c. *Reducing vulnerability of Azerbaijan's agricultural systems to climate change*. World Bank, Washington, DC.

Aizpurúa N. 2010. *Medidas preventivas, correctoras y compensatorias del impacto ecológico en carreteras*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

Alaswadko N, Hassan R. 2016. Rutting progression models for light duty pavements. *International Journal of Pavement Engineering.* http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2016.1155123.

Alías JC, García M, Valares C, Sosa T, Chaves N. 2009. El matorral como sumidero de carbono. *5º Congreso Forestal Español. 5CFE01-016.* http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos/article/view/7613 (12.10.15).

Alley RB, Menocal PB. 1998. Abrupt Climate Changes Revisited: How Serious and How Likely? *U.S. Global Change Research Program Seminar*. Washington DC, 23 de febrero de 1998.

Almazán D. 2007. Rehabilitación estructural de firmes, mediante técnicas de reciclado "in situ" con emulsión. *V Congreso de la Ingeniería Civil.* Sevilla 26- 28 de noviembre de 2007. http://www.ciccp.es/biblio_digital/V_Congreso/congreso/pdf/010301.pdf (20.4.16).

Almazán F. 2013. Experiencia en el empleo de cenizas para la construcción de teraplenes y explanadas en el enlace de acceso al Hospital Universitario de Asturias. *Revista Carreteras* 187: 95–104.

Alonso S, Aramburu MP, Hooper C, Martínez J. 1996. Spain. En: Wood C, Barker A, Jones C, Hughes J. (Eds.) *Evaluation of the performance of the EIA process. Final Report. Volume 2. Member State Reports,* pp. 54–77. European Commission. http://ec.europa.eu/environment/archives/eia/eia-studies-and-reports/pdf/eiaperform2.pdf (7.7.15).

Álvaro-Fuentes J, Cantero-Martínez C. 2010. Potential to mitigate anthropogenic CO_2 emissions by tillage reduction in dryland soils of Spain. *Spanish Journal of Agricultural Research* 8(4): 1271–1276.

Álvaro-Fuentes J, Plaza-Bonilla D, Arrúe JL, Lampurlanés J, Cantero-Martínez C. 2014. Soil organic carbon storage in a no-tillage chronosequence under Mediterranean conditions. *Plant Soil* 376: 31–41.

Amankwah E. 2013. Environmental Impact Assessment (EIA): a useful tool to address climate change in Ghana. *International Journal of Environmental Protection and Policy* 1(4): 94–100.

Anderson B, Lawson W, Owens I. 2008. Response of Franz Josef Glacier Ka Roimata o Hine Hukatere to climate change. *Global and Planetary Change* 63(1): 23–30.

Andrey J, Kertland P, Warren FJ. 2014. Water and transportation infrastructure. En: Warren FJ, Lemmen DS (Eds.) *Canada in a changing climate: sector perspectives on impacts and adaptation*. Government of Canada. Ottawa. http://publications.gc.ca (4.10.14).

Anadón R, Duarte CM, Fariña AC. 2005. Impacts on marine ecosystems and the fisheries sector. En: Moreno JM. (Ed.) *A preliminary general assessment of the impacts in Spain due to the effects of climate change*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 143–177.

Angers DA, Eriksen-Hamel NS. 2008. Full inversion tillage and organic carbon distribution in soil profiles: a meta-analysis. *Soil Science Society of America Journal* 72: 1370–1374.

Arrouays D, Balesdent J, Germon JC, Jayet PA, Soussana JF, Stengel P. 2002. *Contribution à la lutte contre l'effet de serre. Stocker du carbone dans les sols agricoles de France?* Institute National de la Recherche Agronomique, Paris.

Arntsen ØA, Tørum A. 2007. Climate change - an assessment of the impacts on coastal engineering in Norway. *Proceedings of the 5th Coastal Structures International Conference*.

Artur L, Hilhorst D. 2012. Everyday realities of climate change adaptation in Mozambique. *Global Environmental Change* 22: 529–536.

Australian Government. 2012. *Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999 Environmental Offsets Policy.* http://www.environment.gov.au/system/files/resources/12630bb4-2c10-4c8e-815f-2d7862bf87e7/files/offsets-policy_2.pdf (23.3.16).

Australian Government. 2013. *Matters of national environmental significance. Significant impact guidelines 1.1. Environment Protection and Biodiversity Conservation Act 1999*. http://www.environment.gov.au/ epbcpublications/significant-impact-guidelines-11-matters-national-environmental-significance (14.11.14).

Auto Alliance. 2008. *The EcoDriver's manual. A Guide to Increasing Your Mileage & Reducing Your Carbon Footprint.* Auto Alliance. http://www.fs.fed.us/sustainableoperations/documents/TheEcoDriversManual.pdf (7.7.16).

Baker JM, Ochsner TE, Venterea RT, Griffis TJ. 2007. Tillage and soil carbon sequestration - What do we really know? *Agriculture, Ecosystems and Environment* 118: 1–5.

Balderas A, Marchant R, Lovett JC, Smart JCR, Tipper R. 2010. Analysis of the carbon sequestration costs of afforestation and reforestation agroforestry practices and the use of cost curves to evaluate their potential for implementation of climate change mitigation. *Ecological Economics* 6: 469–477.

Banar M, Özdemir A. 2015. An evaluation of railway passenger transport in Turkey using life cycle assessment and life cycle cost methods. *Transportation Research Part D* 41: 88–105.

Barber DC, Dyke A, Hillaire-Marcel C, Jennings AE, Andrews JT, Kerwin MW, Bilodeau G, McNeely R, Southon J, Morehead MD, Gagnon JM. 1999. Forcing of the cold event of 8.200 years ago by catastrophic drainage of Laurentide lakes. *Nature* 400: 344–348.

Barbier B, Yacouba H, Karambiri H, Zorome M, Some B. 2009. Human vulnerability to climate variability in the Sahel: farmers' adaptation strategies in northern Burkina Faso. *Environmental Management* 43: 790-803.

Barbone L, Reva A, Zaidi S. 2010. *Tajikistan: key priorities for climate change adaptation*. World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/3969 (17.1.16).

Baritz R, de Neve S, Barancikova G, Gronlund A, Leifeld J, Katzensteiner K, Koch HJ, Palliere C, Romanya J, Schaminee J. 2004. Organic matter and biodiversity. Land use practices and SOM. En: Van-Camp L, Bujarrabal B, Gentile AR, Jones RJA, Montanarella L, Olazábal C, Selvaradjou SK. (Eds.) *Reports of the Technical Working Groups. Established under the thematic strategy for soil protection. Volume III. Organic Matter.* European Community, Luxembourg.

Barreca A, Clay K, Deschenes O, Greenstone M, Shapiro JS. 2016. Adapting to climate change: the remarkable decline in the US temperature-mortality relationship over the twentieth century. *Journal of Political Economy* 124(1).

Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Cambridge-New York.

Barth M, Boriboonsomsin K. 2009. Traffic congestion and greenhouse gases. *Access* 35: 2–9.

Bastianoni S, Pulselli FM, Tiezzi E. 2004. The problem of assigning responsibility for greenhouse gas emissions. *Ecological Economics* 49(3): 253–257.

Bawa KS, Seidler R. 1998.Natural forest management and conservation of biodiversity in tropical forests. *Conservation Biology* 12(1): 46–55.

Bell A, Collins N, Young R. 2003a. *Practitioner's guide to incorporating climate change into the environmental impact assessment process.* ClimAdapt. Nova Scotia's Climate Change Adaptation Initiative. http://www.iaia.org/IAIA-Climate-Symposium-DC/documents/Canada_ClimateChangeGuide.pdf (11.11.14).

Bell A, Collins N, Ells C, de Romily G, Rossiter A, Young R. 2003b. *Evaluation of the ClimAdapt Guide to Incorporate Climate Change into the Environmental Impact Assessment Process*. Canadian Environmental Assessment Agency. https://www.iaia.org/IAIA-Climate-Symposium-DC/documents/Canada_CC_CaseStudiesReport.pdf (11.11.14).

Benítez PC, McCallum I, Obersteiner M, Yamagata Y. 2007. Global potential for carbon sequestration: Geographical distribution, country risk and policy implications. *Ecological Economics* 60: 572–583.

Berkessy SA, Wintle BA. 2008. Using carbon investment to grow the biodiversity bank. *Conservation Biology* 22(3): 510–513.

Bermejo JM, Gallego J, Saiz L. 2014. *Guía para la fabricación de betunes con polvo de neumático*. SIGNUS, Sistema Integrado de Gestión de Neumáticos Usados. http://www.signus.es/documentos_web/es/descarga?h=Guia_betunes_SIGNUS_def.pdf (16.4.16).

Berrang-Ford L, Ford JD, Paterson J. 2011. Are we adapting to climate change? *Global Environmental Change* 21: 25–33.

Berrang-Ford L, Pearce T, Ford JD. 2015. Systematic review approaches for climate change adaptation research. *Regional Environmental Change* 15: 755–769.

Berzosa A. 2013. *Análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero a lo largo del ciclo de vida de las carreteras*. Tesis doctoral. Universidad Complutense de Madrid, Madrid.

Beyer S. 2006. Environmental law and policy in the People's Republic of China. *Chinese Journal of International Law* 5(1): 185–211.

Bhaktikul K. 2012. State of knowledge on climate change and adaptation activities in Thailand. *Procedia. Social and Behavioral Sciences* 40: 701–708.

Bicknell S, McManus P. 2006. The canary in the coalmine: Australian ski resorts and their response to climate change. *Geographical Research* 44(4): 386–400.

Biesbroek GR, Swart RJ, Carter TR, Cowan C, Henrichs T, Mela H, Morecroft MD, Rey D. 2010. Europe adapts to climate change: comparing national adaptation strategies. *Global Environmental Change* 20: 440–450.

Biligiri KP, Way GB. 2014. Noise-damping characteristics of different pavement surface wearing courses. *Road Materials and Pavement Design* 15(4): 925–941.

Bina O, Jurkeviciute A, Hui Z. 2009. *Transition from Plan Environmental Impact Assessment to Strategic Environmental Assessment. Recommendations of the project "Policy instruments for a Chinese Sustainable Future"*. Stockholm Environment Institute. Stockholm. http://wupperinst.org/uploads/tx_wupperinst/China-EPI-SEA_final.pdf (11.10.14).

Bing H, Xiaoke W, Zhiyun O, Fei L. 2006.Estimation of soil carbon saturation and carbon sequestration potential of an agro-ecosystem in China. *International Journal of Sustainable Development & World Ecology* 13(6): 459–468.

Bizikova L, Neale T, Burton I. 2008. *Canadian communities' guidebook for adaptation to climate change*. Environment Canada. http://www.fcm.ca/Documents/tools/PCP/canadian_communities_guidebook_for_ adaptation_to_climate_change_EN.pdf (13.11.14).

Blinman E. 2008. 2000 Years of Cultural Adaptation to Climate Change in the Southwestern United States. *Ambio Special Report* 14: 489–497.

Boakye-Agyei K. 2010. *Background Document for the November 2010 IAIA Climate Change and Impact Assessment Symposium.* IAIA. http://www.iaia.org/IAIA-Climate-Symposium-DC/background-material.aspx (5.10.14).

BOE. 1986. Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental. Boletín Oficial del Estado. http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1986-17240 (20.3.15).

BOE. 1988. Real Decreto 1131/1988, de 30 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de Evaluación de Impacto Ambiental. Boletín Oficial del Estado. http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1988-23079 (20.3.15).

BOE. 2001a. Ley 6/2001, de 8 de mayo, de modificación del Real Decreto legislativo 1302/1986, de 28 de junio, de evaluación de impacto ambiental. Boletín Oficial del Estado. http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2001-8866 (20.3.15).

BOE. 2001b. Resolución de 8 de octubre de 2001, de la Secretaría General de Medio Ambiente, por la que se dispone la publicación del Acuerdo del Consejo de Ministros de 5 de octubre de 2001, por el que se aprueba el Plan Nacional de Neumáticos Fuera de Uso, 2001-2006. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2001-20185 (16.4.16).

BOE. 2003a. Orden FOM/3460/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.1-IC "Secciones de firme", de la Instrucción de Carreteras. http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2003-22787 (10.7.16).

BOE. 2003b. Orden FOM/3459/2003, de 28 de noviembre, por la que se aprueba la norma 6.3-IC: "Rehabilitación de firmes", de la Instrucción de carreteras. http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2003-22786 (10.7.16).

BOE. 2005. Ley 1/2005, de 9 de marzo, por la que se regula el régimen del comercio de derechos de emisión de gases de efecto invernadero. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2005-3941 (21.2.16).

BOE. 2006a. Ley 9/2006, de 28 de abril, sobre evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente. Boletín Oficial del Estado. http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2006-7677 (20.3.15).

BOE 2006b. Real Decreto 1370/2006, de 24 de noviembre, por el que se aprueba el Plan Nacional de Asignación de derechos de emisión de gases de efecto invernadero, 2008-2012. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2006-20530 (21.2.16).

BOE. 2008a. Real Decreto Legislativo 1/2008, de 11 de enero, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos. Boletín Oficial del Estado http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2008-1405 (20.3.15).

BOE. 2008b. Real Decreto 1890/2008, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el Reglamento de eficiencia energética en instalaciones de alumbrado exterior y sus Instrucciones técnicas complementarias EA-01 a EA-07. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2008-18634 (10.4.16).

BOE. 2010. Orden FOM/3317/2010, de 17 de diciembre, por la que se aprueba la Instrucción sobre las medidas específicas para la mejora de la eficiencia en la ejecución de las obras públicas de infraestructuras ferroviarias, carreteras y aeropuertos del Ministerio de Fomento. Boletín Oficial del Estado. http://www.boe.es/boe/dias/2010/12/23/pdfs/BOE-A-2010-19708.pdf (6.2.16).

BOE. 2011a. Real Decreto Legislativo 3/2011, de 14 de noviembre, por el que se aprueba el texto refundido de la Ley de Contratos del Sector Público. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-17887 (13.4.16).

BOE. 2011b. Real Decreto 1274/2011, de 16 de septiembre, por el que se aprueba el Plan estratégico del patrimonio natural y de la biodiversidad 2011–2017, en aplicación de la Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. Boletín Oficial del Estado. http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-15363 (25.1.16).

BOE.2011c. Ley 2/2011, de 4 de marzo, de Economía Sostenible. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2011-4117 (27.4.16).

BOE. 2011d. Real Decreto 1494/2011, de 24 de octubre, por el que se regula el Fondo de Carbono para una Economía Sostenible. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-17631 (27.4.16).

BOE. 2011e. Orden FOM/2842/2011, de 29 de septiembre, por la que se aprueba la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11). http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-16559 (11.7.16).

BOE. 2013. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Boletín Oficial del Estado. http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2013-12913 (20.3.15).

BOE. 2014a. Resolución de 1 de agosto de 2014, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto Extensión de la red de cercanías de Madrid hasta Soto del Real. Boletín Oficial del Estado. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-8957 (21.2.16).

BOE. 2014b. Resolución de 23 de julio de 2014, de la Secretaría de Estado de Medio Ambiente, por la que se formula declaración de impacto ambiental del proyecto Vilaboa-A Ermida, autovía A-57 (Pontevedra). Boletín Oficial del Estado. http://www.boe.es/boe/dias/2014/08/08/pdfs/BOE-A-2014-8600.pdf (6.2.16).

BOE. 2015a. Orden FOM/1631/2015, de 14 de julio, por la que se aprueba la instrucción para el proyecto y construcción de obras ferroviarias IF-3. Vía sobre balasto. Cálculo de espesores de capas de la sección transversal. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-8766 (4.6.16).

BOE. 2015b. Orden FOM/2523/2014, de 12 de diciembre, por la que se actualizan determinados artículos del pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes, relativos a materiales básicos, a firmes y pavimentos, y a señalización, balizamiento y sistemas de contención de vehículos. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2015-48 (20.5.16).

BOE. 2016a. Orden FOM/298/2016, de 15 de febrero, por la que se aprueba la norma 5.2 - IC drenaje superficial de la Instrucción de Carreteras. http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/2482CE5B-4577-4E8D-81CF-C5E18DA53679/136083/ORDENFOM_298_2016.pdf (20.5.16).

BOE. 2016b. Orden FOM/273/2016, de 19 de febrero, por la que se aprueba la Norma 3.1-IC Trazado, de la Instrucción de Carreteras. https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2016-2217 (4.6.16).

Boisvert V. 2015. Conservation banking mechanisms and the economization of nature: An institutional analysis. *Ecosystem Services* 15: 134–142.

Bolla GL, Viviana P, Facendini SR. 2010. Hormigón para carreteras con áridos reciclados. *Revista Carreteras* 174: 53–62.

Bond G, Kromer B, Beer J, Muscheler R, Evans MN, Showers W, Hoffmann S, Lotti-Bond R, Hajdas I, Bonani G. 2001. Persistent solar influence on North Atlantic climate during the Holocene. *Science* 294: 2130–2135.

Bond A, Pope J. 2012. The state of the art of impact assessment in 2012. *Impact Assessment and Project Appraisal* 30(1): 1–4.

Boodihal MA, Chethan A, Swamya R, Sahu R, Biligiri KB. 2014. Development of tyre/road noise assessment methodology in India. *Case Studies in Construction Materials* 1: 115–124.

Bowron B, Davidson G. 2011. *Climate change adaptation planning: a handbook for small canadian communities.* Canadian Institute of Planners. http://www.fcm.ca/Documents/tools/PCP/climate_change_adaptation_planning_handbook_for_small_canadian_communities_EN.pdf (12.11.14).

Boyle J, Cunningham M, Dekens J. 2013. *Climate change adaptation and Canadian infrastructure. A review of the literature.* International Institute for Sustainable Development, Winnipeg. http://www.iisd.org/pdf/2013/adaptation_can_infrastructure.pdf (1.5.16).

Bradley BA, Estes LD, Hole DG, Holness S, Oppenheimer M, Turner WR et al. 2012. Predicting how adaptation to climate change could affect ecological conservation: secondary impacts of shifting agricultural suitability. *Diversity and Distributions* 18: 425–437.

Briggs BDJ, Hill DA, Gillespie R. 2009. Habitat banking—how it could work in the UK. *Journal of Nature Conservation* 17: 112–122.

Briggs S, Hudson MD. 2013. Determination of significance in Ecological Impact Assessment: Past change, current practice and future improvements. *Environmental Impact Assessment Review* 38: 16–25.

Broecker W. 2001. Was the Medieval Warm Period Global? *Science* 291: 1497–1499.

Bryan E, Deressa TT, Gbetibouo GA, Ringler C. 2009. Adaptation to climate change in Ethiopia and South Africa: options and constraints. *Environmental Science & Policy* 12: 413–426.

Bryan BA, Nolan M, Harwood TD, Connor JD, Navarro-Garcia J, King D, Summers DM, Newth D, Cai Y, Grigg N, Harman I, Crossman ND, Grundy MJ, Finnigan JJ, Ferrier S, Williams KJ, Wilson KA, Law EA, Hatfield-Dodds S. 2014. Supply of carbon sequestration and biodiversity services from Australia's agricultural land under global change. *Global Environmental Change* 28: 166–181.

Buñuel M. 2009. La tributación del transporte como instrumento frente al cambio climático. *Papeles del Trabajo del Instituto de Estudios Fiscales* 8.

Buob S, Stephan G. 2011. To mitigate or to adapt: how to confront global climate change. *European Journal of Political Economy* 27: 1–16.

Burney J, Cesano D, Russell J, Lèvre E, Corral T, Segala N, Santos L. 2014. Climate change adaptation strategies for smallholder farmers in the Brazilian Sertão. *Climatic Change* 126: 45–59.

Burzaco, M. 2014. *Evaluación de impacto ambiental: esquemas. Ley 21-2013, de 9 de diciembre, de evaluación de impacto ambiental.* Dykinson, Madrid.

Byer P, Yeomans JS. 2007. Methods for addressing climate change uncertainties in project environmental impact assessments. *Impact Assessment and Project Appraisal* 25(2): 85–99.

Byer P, Lalani M, Yeomans JS. 2009. Addressing and communicating climate change and its uncertainties in project environmental impact assessments. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 11(1): 29–50.

Byer P, Colombo AF, Sabelli A, Ches C. 2011. *Decision making under uncertainties for adapting to climate change in project environmental assessments.* CEAA. http://publications.gc.ca/ collections/collection_2011/ec/En106-98-2011-eng.pdf (15.11.14).

Cabello L, González R, Kroebel E, Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2016. *Estudio de impacto ambiental. Variante ferroviaria entre La Ola y Sondika*. Esteyco-Euskal Trenbide Sarea. Inédito.

Cámara de Diputados. 2012. *Reglamento de la Ley General del equilibrio ecológico y la protección al ambiente en materia de evaluación del impacto ambiental. DOF 30 de mayo de 2000. Última reforma publicada DOF 26-04-2012*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/regley/ Reg_LGEEPA_MEIA.pdf (11.10.14).

Cámara de Diputados. 2014a. *Ley General del equilibrio ecológico y la protección al ambiente. DOF 28 de enero de 1988*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/148.pdf (11.10.14).

Cámara de Diputados. 2014b. *Ley General de cambio climático. DOF 6 de junio de 2012. Última reforma publicada DOF 07-05-2014*. http://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/ LGCC.pdf (11.10.14).

Canadell JG, Raupach MR. 2008. Managing forests for climate change mitigation. *Science* 320 (5882): 1456–1457.

Capano N. 2013. City of Toronto climate change risk assessment. *Transportation Association of Canada Conference and Exhibition*, Winnipeg, September 24, 2013. http://tac-atc.ca/english/annualconference/tac2013/session24/capano.pdf (5.10.14).

Caparrós A, Jacquemont F. 2003. Conflicts between biodiversity and carbon sequestration programs: economic and legal implications. *Ecological Economics* 46: 143–157.

CARICOM-SPREP. 2004. *Adapting to a changing climate in the Caribbean and South Pacific regions. Guide to the integration of climate change adaptation into the Environmental Impact Assessment (EIA) process*. Caribbean Community-South Pacific Regional Environment Programme. http://dms.caribbeanclimate.bz/M-Files/openfile.aspx?objtype=0&docid=2358 (14.1.16).

Carlson K, McCormick S. 2015. American adaptation: social factors affecting new developments to address climate change. *Global Environmental Change* 35: 360–367.

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2004. Determinación de la capacidad de acogida del territorio frente a infraestructuras lineales. *II Congreso Internacional de ingeniería civil, territorio y medio ambiente*, Santiago de Compostela, noviembre de 2014. Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á. 2010. *Evaluación de impacto ambiental de infraestructuras. Redacción y tramitación de documentos.* AENOR, Madrid.

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á, Varela JM. 2004. Seguimiento de la eficacia de la restauración vegetal de los taludes de autovías. *Ingeniería Civil* 134: 27-36.

Carrasco MJ, Enríquez de Salamanca Á, García MR, Ruiz S. 2013. Evolución de las medidas compensatorias en los procedimientos de evaluación de impacto ambiental. *Ingeniería Civil* 172: 73–80.

Carsten O, Tate F. 2000. *External Vehicle Speed Control*. University of Lees-UK Motor Industry Research Association. www.its.leeds.ac.uk/projects/evsc/del17.pdf (16.4.16).

Carter MR. 2005. Long-term tillage effects on cool-season soybean in rotation with barley, soil properties and carbon and nitrogen storage for fine sandy loams in humid climate of Atlantic Canada. *Soil & Tillage Research* 81: 109–120.

CEF-CBCL. 2005. *A guide for incorporating adaptation to climate change into land-use planning.* CEF Consultants-CBCL. http://www.cefconsultants.ns.ca/CCGuideLandUseNov05.pdf (11.11.14).

CEAA. 2003. *Incorporating climate change considerations in environmental assessment. General guidance for practitioners.* The Federal-Provincial-Territorial Committee on Climate Change and Environmental Assessment. http://www.ceaa-acee.gc.ca/default.asp?lang=En&n=A41F45C5-1 (21.3.15).

CEAA. 2010. *Cabinet Directive on the Environmental Assessment of Policy, Plan and Program Proposals. Guidelines for implementing de cabinet directive.* http://www.ceaa-acee.gc.ca/default.asp?lang=en&n=B3186435-1 (28.10.14).

CEAA. 2012. *Canadian Environmental Assessment Act, 2012.* https://www.ceaa-acee.gc.ca/default.asp?lang=en&n=16254939-1 (28.10.14).

CEDEX. 2007. *Manual de empleo de caucho de NFU en mezclas bituminosas*. CEDEX, Madrid.

CEDEX. 2013. CO2TA. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. http://www.cedex.es/cedex/lang_castellano/organismo/centylab/ceta/lineas/04_cambioclima.htm (20.6.15).

CEDEX, Ministerio de Fomento, ADIF, RENFE, Puertos del Estado, Aena Aeropuertos, INECO, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, OECC, AEMET, European Environment Agency. 2013. *Grupo de trabajo para el análisis de las necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España. Informe final.* http://www.cedex.es/NR/rdonlyres/6F1C362C-B25F-47AB-8E80-AA57FB8144B7/121124/ACCITInformeFinalSeptiembre2013.pdf (7.2.16).

CEF-CBCL. 2005. *A guide for incorporating adaptation to climate change into land-use planning.* CEF Consultants Ltd. - CBCL Ltd. http://www.cefconsultants.ns.ca/ CCGuideLandUseNov05.pdf (11.11.14):

Cendrero A, Sánchez-Arcilla A, Zazo C. 2005. Impacts on coastal areas. En: Moreno JM. (Ed.) *A preliminary general assessment of the impacts in Spain due to the effects of climate change*. Ministerio de Medio Ambiente, Madrid, pp. 451–504.

CEQ. 1997. *Draft guidance regarding consideration of global climate change in environmental documents prepared pursuant to the National Environmental Policy Act*. Council on Environmental Quality. http://www.boem.gov/uploadedFiles/BOEM/Environmental_Stewardship/Environmental_Assessment/ceqmemo.pdf (5.10.14).

CEQ. 2010. *Draft NEPA guidance on consideration of the effects of climate change and greenhouse gas emissions.* Council on Environmental Quality. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/microsites/ceq/20100218-nepa-consideration-effects-ghg-draft-guidance.pdf (8.10.14).

CETMO. 2006. *Buenas prácticas y recomendaciones para la mejora de la satisfacción del cliente de transporte público de viajeros por carretera*. Fundación CETMO-Ministerio de Fomento. http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/17F39277-0D0A-4C48-B06A-1C9F1AC037AA/25579/cap3Recomendaciones1.pdf (7.7.16).

Chang IS, Wu J. 2013. Integration of climate change considerations into environmental impact assessment - implementation, problems and recommendations for China. *Frontiers of Environmental Science & Engineering* 7(4): 598–607.

Charchalac S. 2012. Experiencias en compensación por servicios ambientales en América Latina (PSA o REDD+). Descripción de casos relevantes. Forest Trends. http://www.forest-trends.org/documents/files/doc_3263.pdf (15.12.16).

Cheesman S, Thierfelder C, Eash NS, Kassie GT, Frossard E. 2016. Soil carbon stocks in conservation agriculture systems of Southern Africa. *Soil & Tillage Research* 156: 99–109

Chinowsky PS, Price JC, Neumann JE. 2013. Assessment of climate change adaptation costs for the U.S. road network. *Global Environmental Change* 23: 764–773

Chinowsky PS, Schweikert AE, Strzepek NL, Strzepek K. 2015. Infrastructure and climate change: a study of impacts and adaptations in Malawi, Mozambique, and Zambia. *Climatic Change* 130: 49–62.

Christopher CW. 2008. Success by a thousand cuts: the use of environmental impact assessment in addressing climate change. *Vermont Journal of Environmental Law* 9(3): 549–613.

CIER. 2006. Climate Change Planning Tools for First Nations Guidebooks. Centre for Indigenous Environmental Resources. http://www.yourcier.org/climate-change-planning-tools-for-first-nations-guidebooks-2006.html (10.11.14).

CIP. 2011. *Model Standard of Practice for Climate Change Planning*. Canadian Institute of Planners. https://www.cip-icu.ca/Files/Resources/cip-standard-of-practice-english.aspx (13.11.14).

Ciscar JC, Feyen L, Soria A, Lavalle C, Raes F, Perry M, Nemry F, Demirel H, Rozsai M, Dosio A, Donatelli M, Srivastava A, Fumagalli D, Niemeyer S, Shrestha S, Ciaian P, Himics M, Van Doorslaer B, Barrios S, Ibáñez N, Forzieri G, Rojas R, Bianchi A, Dowling P, Camia A, Libertà G, San Miguel J, de Rigo D, Caudullo G, Barredo JI, Paci D, Pycroft J, Saveyn B, Van Regemorter D, Revesz T, Vandyck T, Vrontisi Z, Baranzelli C, Vandecasteele I, Batista e Silva F, Ibarreta D. 2014. *Climate impacts in Europe. The JRC PESETA II Project*. JRC Scientific and Policy Reports, European Union, Luxemburgo.

CITAA. 2008. *Estudio sobre la funcionalidad de la vegetación leñosa de Aragón como sumidero de CO_2: existencias y potencialidad (estimación cuantitativa y predicciones de fijación)*. Centro de Investigación y Tecnología Agroalimentaria de Aragón, Gobierno de Aragón, Zaragoza.

Clark PU, Dyke AS, Shakun JD, Carlson AE, Clark J, Wohlfarth B, Mitrovica JX, Hostetler SW, Marshall McCabe A. 2009. The last glacial maximum. *Science* 325: 710–714.

Crnčević T, Marić I, Josimović B. 2011. Strategic environmental assessment and climate change in the republic of Serbia. Support to development and adjustment process. *Spatium* 26: 14–16.

Coles AR, Scott CA. 2009. Vulnerability and adaptation to climate change and variability in semi-arid rural southeastern Arizona, USA. *Natural Resources Forum* 33(4): 297–309.

Colombo A, Byer P. 2012. Adaptation, flexibility and project decision-making with climate change uncertainties. *Impact Assessment and Project Appraisal* 30(4): 229–241.

CORES. 2015. *Boletín Estadístico de Hidrocarburos. Nº 217. Diciembre 2015*. Corporación de Reservas Estratégicas de Productos Petrolíferos. http://www.cores.es/sites/default/files/archivos/publicaciones/boletin-est-hidrocarburos-217-diciembre-2015.pdf (12.3.16).

Cornaro A, Correia MR, Dallhammer E, Hilding-Rydevik T, Lexer W, Mayer S, Pinho P, Santos S. 2005. *IMP3 Policy Options. D 5.2. Final Report. Improving the Implementation of Environmental Impact Assessment. Sixth Framework Program*. Österreichisches Institut für Raumplanung- European Union. http://ec.europa.eu/environment/archives/eia/eia-studies-and-reports/pdf/D5_2-IMP3-FinalReport.pdf (27.3.16).

Corti T, Muccione V, Köllner-Heck P, Bresch D, Seneviratne SI. 2009. Simulating past droughts and associated building damages in France. *Hydroloy and Earth System Sciences* 13: 1739–1747.

COSE. 2008. *Guía de buenas prácticas para mitigar el cambio climático*. http://selvicultor.net/wp–content/uploads/ 2012/01/GuiaBBPP_20081222.pdf (7.10.15).

Cowell R. 1996. *Environmental compensation in theory and practice: an instrument for more sustainable development?* Department of City and Regional Planning, Cardiff.

Cowell R. 2000. Environmental compensation and the mediation of environmental change: making capital out of Cardiff Bay. *Journal of Environmental Planning and Management* 43: 689–710.

Cox M, Gardner WC, Fraser LH. 2015. A survey-based assessment of cattle producers' adaptation to climate change in British Columbia, Canada. *Rangeland Ecology & Management* 68: 119–130.

Craik N. 2010. *The International law of environmental impact assessment. Process, substance and integration*. Cambridge Studies in International and Comparative Law, Cambridge.

Crespo L, Jiménez F, Montané MM. 2011. La adaptación de las infraestructuras de transporte al cambio climático. Taller técnico sobre escenarios climáticos y regionalización. *Seminario sectorial del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático.* CEDEX. Valsaín, 27-29 de Abril de 2011. http://www.magrama.gob.es/es/ceneam/grupos-de-trabajo-y-seminarios/seminarioPNACC/16-Infraestructuras_transporte-CETA-CEDEX_tcm7-158552.pdf (7.2.16).

Cruickshank MM, Tomlinson RW, Trew S. 2000. Application of CORINE land-cover mapping to estimate carbon stored in the vegetation of Ireland. *Journal of Environmental Management* 58: 269–87.

Crutzen PJ, Stoermer EF. 2000. The Anthropocene. *Global Change Newsletter* 41: 17–18.

Crutzen PJ. 2002. Geology of mankind. *Nature* 415: 23.

Cruz M, Klein A, Steiner V. 2016. Sustainability assessment of road marking systems. *Transportation Research Procedia* 14: 869–875.

Cuperus R, Canters KJ, Udo de Haes HA, Friedman DS. 1999. Guidelines for ecological compensation associated with highways. *Biological Conservation* 90: 41–51.

Cuperus R. 2004. Ecological compensation of highway impacts. Negotiated trade-off or no-net-loss? Strapatz, Delft.

Darbi M, Ohlenburg H, Herberg A, Wende W, Skambracks D, Herbert M. 2009. *International approaches to compensation for impacts on biological diversity. Final report.* Leibniz Institute of Ecological and Regional Development-Berlin University of Technology, Berlín.

Dave EV, Buttlar WG. 2011. Low temperature cracking prediction with consideration of temperature dependent bulk and fracture properties. *Road Materials and Pavement Design* 11(1): 33–59.

Dave EV, Hoplin C. 2015. Flexible pavement thermal cracking performance sensitivity to fracture energy variation of asphalt mixtures. *Road Materials and Pavement Design* 16(1): 423–441.

Dawson RJ. 2015. *Infrastructure climate change impacts. Report Card 2015. Living With Environmental Change.* http://www.nerc.ac.uk/research/partnerships/lwec/products/report-cards/infrastructure/report-card (15.5.16).

Dawson D, Shaw J, Gehrels WR. 2016. Sea-level rise impacts on transport infrastructure: The notorious case of the coastal railway line at Dawlish, England. *Journal of Transport Geography* 51: 97–109.

DCCEE. 2011. *Adaptation of Melbourne's Metropolitan Rail Network in response to climate change*. Department of Climate Change and Energy Efficiency, Melbourne.

DEFRA. 2009. *Adapting to climate change: helping key sectors to adapt to climate change. Statutory Guidance to Reporting Authorities 2009*. Department for Environment, Food, Rural Affairs. https://www.gov.uk/government/publications/adapting-to-climate-change-in-the-infrastructure-sectors (4.10.14).

DEFRA. 2010a. *Adapting to climate change in the infrastructure sectors. Maintaining robust and resilient infrastructure systems in the energy, transport, water and ICT sectors*. PwC LLP-Department for Environment, Food & Rural Affairs. https://www.gov.uk/government/publications/adapting-to-climate-change-in-the-infrastructure-sectors (4.10.14).

DEFRA. 2010b. *Adapting energy, transport and water infrastructure to the long-term impacts of climate change*. URS-Department for Environment, Food, Rural Affairs. https://www.gov.uk/ government/publications/adapting-to-climate-change-in-the-infrastructure-sectors (4.10.14).

DEFRA. 2011. *Climate resilient infrastructure: Preparing for a changing climate*. Department for Environment, Food, Rural Affairs. https://www.gov.uk/government/publications/ adapting-to-climate-change-in-the-infrastructure-sectors. (4.10.14).

Delgado S. 2009. *Revisión histórica y tipificación dasométrica de los rebollares (Quercus pyrenaica Willd.) del monte de U.P. nº 1 'Matas de Valsaín' de la provincia de Segovia. Influencia de la cepa en el crecimiento del árbol individual.* Universidad Politécnica de Madrid. http://oa.upm.es/11008/2/PFC_SAUL_DELGADO_GALA.pdf (6.3.16).

Den Boer E, Brouwer F, Smokers R, Verbeek M. 2010. *Speed limiters for vans in Europe*. Delft. https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/4218_defeindrapportFBMV.pdf (16.4.16).

Deng B, Wang H. 2014. Integrating climate change consideration into strategic environmental assessment within the context of China. *Advanced Materials Research* 955–959: 1657–1660.

Department for Transport. 2009. *Freight best practice. The fuel efficient truck drivers' handbook*. Department for Transport, London.

Department for Transport. 2014. *Transport resilience review. A review of the resilience of the transport network to extreme weather events*. Secretary of State for Transport. http://www.gov.uk/government/publications (4.10.14).

Department for Transport. 2016. *Efficient Driving A Rapid Evidence Assessment for the Department for Transport.* Department for Transport. https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/509972/efficient-driving-rapid-evidence-assessment.pdf (7.7.16).

Department of Conservation. 2010. *New Zealand Coastal Policy Statement 2010*. http://www.doc.govt.nz/publications/conservation/marine-and-coastal/new-zealand-coastal-policy-statement/new-zealand-coastal-policy-statement-2010 (28.10.14).

Deressa TT, Hassan RM, Ringler C, Alemu T, Yesuf M. 2009. Determinants of farmers' choice of adaptation methods to climate change in the Nile Basin of Ethiopia. *Global Environmental Change* 19: 248–255.

DGT. 2013. *Anuario estadístico general. Año 2012. Series históricas - Parque de vehículos*. Dirección General de Tráfico. http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/series-historicas (14.12.15).

DGT. 2014. Conducción eficiente. Dirección General de Tráfico. http://www.dgt.es/PEVI/documentos/catalogo_recursos/didacticos/did_adultas/Conduccion_eficiente.pdf (7.7.16).

DGT. 2015. *Anuario estadístico general. Año 2014. Series históricas - Parque de vehículos*. Dirección General de Tráfico. http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/series-historicas (19.12.15).

Díaz S, Hector A, Wardle DA. 2009. Biodiversity in forest carbon sequestration initiatives: not just a side benefit. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 1: 55–60.

Díaz Sierra R, Enríquez de Salamanca A, Martín Aranda RM, Monreal JI. 2015. La contaminación lumínica. Efectos, retos y soluciones. *100cias@uned* 8: 62-68.

Dikgwatlhe SD, Chen ZD, Lal R, Zhang HL, Chen F. 2014.Changes in soil organic carbon and nitrogen as affected by tillage and residue management under wheat–maize cropping system in the North China Plain. *Soil & Tillage Research* 144: 110–118.

Dobney K. 2010. *Quantifying the effects of an increasingly warmer climate with a view to improving the resilience of the gb railway network: is a new stressing regime the answer?* Tesis doctoral. University of Birmingham, Birmingham.

Donner SD, Webber S. 2014. Obstacles to climate change adaptation decisions: a case study of sea-level rise and coastal protection measures in Kiribati. *Sustainability Science* 9: 331–345.

Dooley JJ. 2013. Estimating the supply and demand for deep geologic CO_2 storage capacity over the course of the 21st Century: A meta analysis of the literature. *Energy Procedia* 37: 5141–5150.

Draaijers G, van der Velden A. 2009. The NCEA's recommendations on Climate Change in Environmental. En: NCEA. (Ed.) *Views and experiences from the Netherlands Commission for Environmental Assessment 2009*. http://api.commissiemer.nl/docs/mer/diversen/views_experiences_2009_p16-19.pdf (12.9.15).

Du YD, Cheng XH, Wang WX, Ai H, Duan HL, He J, Wu XX. 2013. A review of assessment and adaptation strategy to climate change impacts on the coastal areas in South China. *Advances in Climate Change Research* 4(4): 201–207.

Duque A, Pardo MP, Rubiano DJ, Gómez JA, López LF, Alzate L et al. 2013. Compensaciones de gases de efecto invernadero (GEI) en paisajes cafeteros de Colombia. Diseño del esquema de pago o compensaciones por servicio ambiental de carbono. Federación Nacional de Cafeteros de Colombia-GEF-PNUD. http://www.biotrade.org/congress/BackgroundDocs2/S2_ABS/CorpBioComSost-Colomb_PSAH%2520carbono%2520final.pdf (25.10.16).

Dwyer JM, Fensham RJ, Butler DW, Buckley YM. 2009. Carbon for conservation: Assessing the potential for win–win investment in an extensive Australian regrowth ecosystem. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 134: 1–7.

EASA, EEA, EUROCONTROL. 2016. *European Aviation Environmental Report 2016*. http://www.easa.europa.eu/eaer/system/files/usr_uploaded/European Aviation Environmental Report 2016 -72dpi.pdf (6.2.16).

ECLAC. 2012. *An assessment of the economic impact of climate change on the water sector in Saint Vincent and the Grenadines.* Economic Commission for Latin America and the Caribbean. http://dms.caribbeanclimate.bz/M-Files/openfile.aspx?objtype=0&docid=4711 (27.3.16).

EC. 2003. *Report from the Commission to the European Parliament and the Council on the application and effectiveness of the EIA Directive (Directive 85/337/EEC as amended by Directive 97/11/EC). How successful are the Member States in implementing the EIA Directive. COM/2003/0334*. European Commission, Brussels.

EC. 2007. COM(2007) 354 final. Green Paper from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. Adapting to climate change in Europe – options for EU action. European Commission. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52007DC0354&from=GA (12.9.15).

EC. 2008. *Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo y al Consejo - Medidas de reducción del ruido ferroviario aplicables a la flota existente [SEC(2008) 2203] [SEC(2008) 2204]*. Comisión Europea. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=CELEX%3A52008DC0432 (9.7.16).

EC. 2009a. *COM(2009) 147 final. White Paper. Adapting to climate change: Towards a European framework for action*. European Commission. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:52009DC0147&from=EN (12.9.15).

EC. 2009b. *Report from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions on the application and effectiveness of the EIA Directive (Directive 85/337/EEC, as amended by Directives 97/11/EC and 2003/35/EC). COM/2009/0378*. European Commission, Brussels.

EC. 2009c. *Study concerning the report on the application and effectiveness of the EIA Directive. Final report*. DG ENV. European Commission, Brussels.

EC. 2012. *Report from the Commission to the European Parliament and the Council. Progress towards achieving the Kyoto objectives*. SWD(2012) 353 final. European Commission. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52012DC0626 (30.10.15).

EC. 2013a. *The EU Strategy on adaptation to climate change*. European Commission. http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/what/documentation_en.htm (14.1.16).

EC. 2013b. *Adapting infrastructure to climate change. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. An EU Strategy on adaptation to climate change*. SWD(2013) 137 final. European Commission. http://ec.europa.eu/clima/policies/adaptation/what/docs/swd_2013_137_en.pdf (14.1.16).

EC. 2013c. *Guidance on Integrating Climate Change and Biodiversity into Environmental Impact Assessment*. European Commission. http://ec.europa.eu/environment/eia/pdf/EIA Guidance.pdf. 12.9.15.

EC. 2013d. *Guidance on Integrating Climate Change and Biodiversity into Strategic Environmental Assessment*. European Commission. http://ec.europa.eu/environment/eia/pdf/SEA Guidance.pdf. (12.9.15).

EC. 2015a. *Roadmap. Initiative: Addressing greenhouse gas emissions from agriculture and LULUCF in the context of the 2030 EU climate and energy framework*. European Commission. http://ec.europa.eu/smart-regulation/roadmaps/docs/2015_clima_003_lulucf-2030_en.pdf (13.11.15).

EC. 2015b. EU ETS Handbook. https://ec.europa.eu/clima/sites/clima/files/docs/ets_handbook_en.pdf (7.12.16).

EC. 2016. The CAP. European Commission. http://ec.europa.eu/agriculture/cap-overview_en (12.12.16).

Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC. 2014. *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge-New York.

EEA. 2008. *European forests–ecosystem conditions and sustainable use*. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/publications/eea_report_2008_3/at_download/file (12.12.15).

EEA. 2014a. *Monitoring CO_2 emissions from new passenger cars in the EU: summary of data for 2013*. European Environment Agency. Copenhagen. http://www.eea.europa.eu/publications/monitoring-co2-emissions-from-new-1/at_download/file (14.12.15).

EEA. 2014b. *Trends and projections in Europe 2014. Tracking progress towards Europe's climate and energy targets for 2020*. EEA Report. No 6/2014. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/ publications/trends-and-projections-in-europe-2014 (13.11.15).

EEA. 2014c. *Annual European Union greenhouse gas inventory 1990–2012 and inventory report 2014. Submission to the UNFCCC Secretariat*. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/ publications/european-union-greenhouse-gas-inventory-2014 (27.10.15).

EEA. 2015a. National *emissions reported to the UNFCCC and to the EU Greenhouse Gas Monitoring Mechanism*. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/national-emissions-reported-to-the-unfccc-and-to-the-eu-greenhouse-gas-monitoring-mechanism-9 (26.7.15).

EEA. 2015b. *Copert*. European Environment Agency. http://emisia.com/copert (20.6.15).

EEA. 2015c. New cars' CO_2 emissions well below Europe's 2015 target, New cars sold in 2014 emit on average 2. Copenhagen. European Environment Agency. http://www.eea.europa.eu/highlights/new-cars2019-co2-emissions-well (19.12.15).

EFTEC, IEEP, Stratus & UICN. 2010. The use of market-based instruments for biodiversity protection – The case of habitat banking. Technical Report. http://ec.europa.eu/environment/enveco/pdf/eftec_habitat_technical_report.pdf (24.10.15).

Ejsmont JA, Goubert L, Ronowski G, Swieczko-Zurek B. 2016. Ultra low noise poroelastic road surfaces. *Coatings* 6(2): 18.

Elwakil E, Eweda A, Zayed T. 2014. Modelling the effect of various factors on the condition of pavement marking. *Structure and Infrastructure Engineering: Maintenance, Management, Life-Cycle Design and Performance* 10(1): 93-105.

EMB. 2011. *Environmental Impact Assessment (EIA) Technical Guidelines Incorporating Disaster Risk Reduction (DRR) and Climate Change Adaptation (CCA) Concerns Under the Philippine Environmental Impact Statement (EIS) System (EIA DRR/CCA Technical Guidelines)*. Environmental Management Bureau. http://www.emb.gov.ph/portal/Portals/21/EIA LAWS/DRR-CCA EIA Technical Guidelines.pdf (18.11.14).

Engel S, Pagiola S, Wunder S. 2008. Designing payments for environmental services in theory and practice: An overview of the issues. *Ecological Economics* 65: 663–674.

Enríquez de Salamanca, A. 2009. Conservación de los paisajes áridos. *Foresta* 46: 52-58.

Enríquez de Salamanca Á. 2011. El ocaso de los glaciares. *Foresta* 53: 46–54.

Enríquez de Salamanca Á. 2014a. Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. *Foresta* 60: 82–87.

Enríquez de Salamanca Á. 2014b. Reducción de la vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. El caso de San Vicente y las Granadinas. *Foresta* 62: 18–29.

Enríquez de Salamanca Á. 2014c. *Environmental Management Plans. Disaster Vulnerability Reduction Project. South River. Warrawarrow River. Fenton to Green Hill Road.* INHA-Vigiconsult-Euroconsult-Government of St Vincent and the Grenadines-World Bank. Inédito

Enríquez de Salamanca Á. 2014d. Los bancos de conservación. *Foresta* 60: 26–35.

Enríquez de Salamanca Á. 2015. Consideración del cambio climático en la evaluación ambiental de infraestructuras. Casos prácticos. En: Casermeiro MA, Vázquez A (Eds.) *Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental. Nuevos retos de la Evaluación Ambiental. Madrid, 11, 12 y 13 de marzo de 2015. Libro de actas (VIII CONEIA)*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental, Madrid, pp. 355-363.

Enríquez de Salamanca Á. 2016. Project splitting in environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal* 34(2): 152-159.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, García F, Varela JM. 2004. Seguimiento de la revegetación de taludes en autovías. En: CONAMA (Ed.) *VII Congreso Nacional de Medio Ambiente. Madrid, 22-26 de noviembre de 2004*. Fundación CONAMA.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2009. *Manual de gestión y restauración de préstamos y vertederos en obras civiles*. CEDEX, Madrid.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2011. Procedimientos abreviados. Los límites de la evaluación de impacto ambiental. En: CONEIA (Ed.) *Evaluación de impacto ambiental: responsabilidad, vigilancia, eficacia. Libro de Actas del VI Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental (VI CONEIA). Albacete, abril 2011*. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, Madrid, pp. 59-66.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ. 2015. Evaluación ambiental en proyectos de adaptación al cambio climático en San Vicente y las Granadinas. En: Casermeiro MA, Vázquez A (Eds.) *Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental. Nuevos retos de la Evaluación Ambiental. Madrid, 11, 12 y 13 de marzo de 2015. Libro de actas (VIII CONEIA).* Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental, Madrid, pp. 365-369.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Cebrián A. 2007. *Estudio de impacto ambiental. Estudio informativo. Autovía del Este (A-3). Tramo: Madrid-Arganda del Rey. Plataformas reservadas para el transporte público, vías de servicio y ampliación a tres carriles por calzada*. Vigiconsult-Dirección General de Carreteras. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Varela JM, Magdaleno F. 2009a. Gestión y restauración de préstamos y vertederos en obras civiles. *Ingeniería Civil* 155: 31-48**.**

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Cebrián A, Fernández ME. 2009b. *Estudio de impacto ambiental. Estudio informativo. Tramo La Robla - León de la Carretera N-630, y conexión con la Red de Carreteras al suroeste de León*. Vigiconsult-Dirección General de Carreteras. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Marcos A, Aguilar A. 2011. *Estudio de impacto ambiental. Estudio informativo. Extensión de la red de cercanías de Madrid hasta Soto del Real*. PROSER-Dirección General de Ferrocarriles. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Cebrián A, Fernández ME. 2012a. *Estudio de impacto ambiental. Estudio informativo. Estudio de alternativas para las Autovías Palencia-Paredes de Nava y Palencia – Carrión de los Condes y Estudio de Viabilidad de la autovía Paredes de Nava-Sahagún, siguiendo los corredores de la CL-613 y CL-615*. Vigiconsult-Provilsa. Inédito.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, Rogríguez JJ, Sánchez M, Ruíz S. 2012b. *Evaluación, corrección y seguimiento ambiental en el diseño, construcción y explotación de los proyectos de infraestructuras lineales de transporte*. CEDEX, Madrid

Enríquez de Salamanca A, Carrasco MJ. 2013. Evolución de las medidas compensatorias en los procedimientos de evaluación de impacto ambiental. En: Casermeiro MA, Espluga AP (Coord.) *VII Congreso Nacional de Evaluación de Impacto Ambiental: Gestión, Seguimiento, Innovación. Libro de actas (VII CONEIA). Oviedo, marzo 2013*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente-Asociación Española de Evaluación de Impacto Ambiental, Madrid, pp. 211-224.

Enríquez de Salamanca Á, Carrasco MJ, García MR, Ruiz S. 2014. Medidas compensatorias ligadas a la compra y gestión del territorio. Experiencias y propuestas para su aplicación. *Ingeniería Civil* 173: 23–31.

Enríquez de Salamanca Á, Iglesias S. 2012. El chopo híbrido *(Populus x canadensis* Moench), una especie olvidada. *Foresta* 56: 28-37.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016a. Consideration of climate change on the environmental impact assessment in Spain. *Environmental Impact Assessment Review* 57: 31–39.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016b. El cambio climático en la evaluación de impacto ambiental de infraestructuras de transporte: contribución, impactos, mitigación y adaptación. *VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.* Colegio de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Madrid, 2-3 de marzo de 2016.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016c. Hacia un esquema integrado de compensación ambiental: la unificación de los bancos de conservación y los mercados de carbono. 13º Congreso Nacional de Medio Ambiente CONAMA 2016. Madrid, 28 de noviembre a 1 de diciembre de 2016. http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2016/CT%202016/1998971791.pdf.

Enríquez de Salamanca Á, Martín-Aranda RM, Díaz-Sierra R. 2016d. Impacto ambiental de la adaptación al cambio climático. *XI Congreso Internacional de Geomática y Ciencias de la Tierra TOPCART 2016.* Toledo, 26 a 30 de octubre de 2016. Colegio de Ingeniería Geomática y Topográfica.

Environment Agency. 2008. *Climate change impacts and spatial planning decision support guidance.* http://www.espace-project.org/publications/Extension Outputs/EA/Espace Final_ Guidance_Finalv5.pdf (14.11.14).

Environment Agency. 2011. *Strategic environmental assessment and climate change: guidance for practitioners.* https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/297039/geho0811buca-e-e.pdf (13.11.14).

Environment Canada. 2013. *Planning for a Sustainable Future: A Federal Sustainable Development Strategy for Canada 2013–2016.* http://www.ec.gc.ca/dd-sd/default.asp?lang= En&n=A22718BA-1 (28.10.14).

EPA. 2005. *Average carbon dioxide emissions resulting from gasoline and diesel fuel. Emission facts*. United States Environmental Protection Agency. http://nepis.epa.gov (12.3.16).

EPA. 2006. *Environmental offsets. Position Statement 9.* Environmental Protection Authority, Western Australia. http://edit.epa.wa.gov.au/EPADocLib/1863_PS9.pdf (26.3.16).

EPA. 2009. *Review of the Environmental Impact Assessment Process in Western Australia*. Environmental Protection Authority, Western Australia.. http://epa.wa.gov.au/EPADocLib/2898_EIAReviewReportFinal30309.pdf (8.1.16).

EPA. 2010. *Guide to EIA environmental principles, factors and objectives*. Environment Protection Authority. http://www.epa.wa.gov.au/EPADocLib/EAG 8 Factors and objectives2013.pdf (16.11.14).

EPA. 2015. *SEA and Climate Change. Integrating Climate Change into Strategic Environmental Assessment in Ireland. A Guidance Note.* Environmental Protection Agency. https://www.epa.ie/pubs/advice/ea/Climate-Change-SEA-Ireland-Guide-Note.pdf (3.3.16).

EPL. 2014. *Climate Change and Environmental Impact Assessment (EIA) in Ukraine*. Environment, People, Law. http://epl.org.ua (4.10.14).

ERC. 2006. *Quick Hits. 2. Limiting speed*. UK Energy Research Centre. http://www.ukerc.ac.uk/publications/quick-hit-limiting-speed.html

EU. 1985. Council Directive 85/337/EEC of 27 June 1985 on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. European Union. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/ ?uri=CELEX:31985L0337 (20.3.15).

EU. 1992. Directiva 92/43/CEE del Consejo, de 21 de mayo de 1992, relativa a la conservación de los hábitats naturales y de la fauna y flora silvestres. Unión Europea. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=CELEX:31992L0043:ES:HTML (15.4.16).

EU. 1997. Council Directive 97/11/EC of 3 March 1997 amending Directive 85/337/EEC on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. European Union. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:31997L0011 (20.3.15).

EU. 2001. Directive 2001/42/EC of the European Parliament and of the Council of 27 June 2001 on the assessment of the effects of certain plans and programmes on the environment. European Union. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/ALL/?uri=CELEX:32001L0042 (20.3.15).

EU. 2003. Directive 2003/87/EC of the European Parliament and of the Council of 13 October 2003 establishing a scheme for greenhouse gas emission allowance trading within the Community and amending Council Directive 96/61/EC. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A02003L0087-20140430 (10.12.2016).

EU. 2006. Judgment of the Court (Third Chamber) of 16 March 2006. Commission of the European Communities v Kingdom of Spain. Failure of a Member State to fulfil its obligations - Directive 85/337/EEC as amended by Directive 97/11/EC - Assessment of the effects of projects on the environment - Inter-action between factors likely to be directly and indirectly affected - Obligation to publish the impact statement - Assessment limited to urban development projects outside urban areas - Construction project for a leisure complex at Paterna. Case C-332/04. European Union. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1426869452226&uri=CELEX:62004CJ0332 (20.3.15).

EU.2009. Decisión 406/2009/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 23 de abril de 2009 sobre el esfuerzo de los Estados miembros para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero a fin de cumplir los compromisos adquiridos por la Comunidad hasta 2020. European Union. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0136:0148:ES:PDF (14.5.16).

EU. 2013. Regulation (EU) No 525/2013 of the European Parliament and of the Council of 21 May 2013 on a mechanism for monitoring and reporting greenhouse gas emissions and for reporting other information at national and Union level relevant to climate change and repealing Decision No 280/2004/EC. http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2013:165:0013:0040:en:PDF (15.12.16).

EU. 2014. Directive 2014/52/EU of the European Parliament and of the Council of 16 April 2014 amending Directive 2011/92/EU on the assessment of the effects of certain public and private projects on the environment. European Union. http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=celex:32014L0052 (20.3.15).

EC. 2016. Emission Database for Global Atmospheric Research (EDGAR). European Commission, Joint Research Centre. http://edgar.jrc.ec.europe.eu (12.11.16).

EuropeAid. 2009. *Guidelines on the integration of environment and climate change in development cooperation*. EuropeAid-European Commission. https://ec.europa.eu/europeaid/sites/devco/files/methodology-tools-and-methods-series-integration-environment-in-development-200911_en_2.pdf (14.1.16)

EUROSTAT. 2015. Population density by NUTS 3 region. http://ec.europa.eu/eurostat/web/regions/data/database (30.10.15).

Eve MD, Sperow M, Howerton K, Paustian K, Follett RF. 2002. Predicted impact of management changes on soil carbon storage for each cropland region of the conterminous United States. *Journal of Soil and Water Conservation* 57(4): 196–204.

FAA. 2012. Considering greenhouse gases and climate under the National Environmental Policy Act (NEPA): interim guidance. Federal Aviation Administration. http://www.faa.gov/ air_traffic/environmental_ issues/media/Memo-AEE-400_GuidncMem3_GHG_Climate_NEPA_Intrm_ 12JAN2012.pdf (10.10.14).

FAO. 2001. *Soil carbon sequestration for improved land management*. ftp://ftp.fao.org/agl/agll/docs/wsrr96e.pdf (20.12.15).

FAO. 2003. State of the World's forests 2003. FAO, Rome.

FAO. 2008. Climate change and biodiversity for food and agriculture. Technical background document from the expert consultation held on 13 to 14 February 2008. http://www.fao.org/uploads/media/FAO_2008a_climate_change_and_biodiversity_02.pdf (14.12.16).

FAO. 2010. Biodiversity for Food and Agriculture. Contributing to food security and sustainability in a changing world. Platform fro Agrobiodiversity Research-FAO. http://agrobiodiversityplatform.org/files/2011/04/PAR-FAO-book_lr.pdf (14.12.16).

Farbotko C, Waitt G. 2011. Residential air-conditioning and climate change: Voices of the vulnerable. *Health Promotion Journal of Australia* 22: 13–16.

Fenix. 2011. *Monografía 2. Reducción de los impactos ambientales durante la construcción y explotación de firmes asfálticos.* Proyecto FENIX. http://www.proyectofenix.es/

Fensham RJ, Guymer GP. 2009. Carbon accumulation through ecosystem recovery. *Environmental Science & Policy* 12: 367–372.

FER. 2013. *Experiencia española del caucho NFU en las mezclas asfálticas*. Federación Española de la Recuperación y el Reciclaje. http://www.recuperacion.org/proyecto/verdocumento.ashx?IdDocumento=275 (16.4.16).

Ferdinand IMA. 2006. *Hurricane risk reduction strategies in the Windward Islands: Public and practitioner's perspectives.* Tesis. Coventry University, Coventry.

Fernández-Sánchez G, Berzosa Á, Barandica JM, Cornejo E, Serrano JM. 2015. Opportunities for GHG emissions reduction in road projects: a comparative evaluation of emissions scenarios using CO2NSTRUCT. *Journal of Cleaner Production* 104: 156–167

Ferrovial. 2016. Autopista LBJ Express. http://www.ferrovial.com/es/proyectos/autopista-lbj-express (3.7.16).

Fezzi C, Harwood AR, Lovett AA, Bateman IJ. 2015. The environmental impact of climate change adaptation on land use and water quality. *Nature Climate Change* 5: 255–260.

FHWA. 2010. *Climate change. Model language in transportation plans*. US Federal Highway Administration. http://www.fhwa.dot.gov/environment/climate_change/mitigation/ublications_and_tools/model_language (10.10.14).

Field CB, Barros VR, Mach KJ, Mastrandrea MD, van Aalst M, Adger WN, Arent DJ, Barnett J, Betts R, Bilir TE, Birkmann J, Carmin J, Chadee DD, Challinor AJ, Chatterjee M, Cramer W, Davidson DJ, Estrada YO, Gattuso JP, Hijioka Y, Hoegh-Guldberg O, Huang HQ, Insarov GE, Jones RN, Kovats RS, Romero-Lankao P, Larsen JN, Losada IJ, Marengo JA, McLean RF, Mearns LO, Mechler R, Morton JF, Niang I, Oki T, Olwoch JM, Opondo M, Poloczanska ES, Pörtner HO, Redsteer MH, Reisinger A, Revi A, Schmidt DN, Shaw MR, Solecki W, Stone DA, Stone JMR, Strzepek KM, Suarez AG, Tschakert P, Valentini R, Vicuña S, Villamizar A, Vincent KE, Warren R, White LL, Wilbanks TJ, Wong PP, Yohe GW. 2014. Technical summary. En: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. 2014a. *Climate Change 2014: Impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 35-94

Fleming GG, Knauer HS, Lee CSY, Pedersen S. 2011. *FHWA Highway Noise Barrier Design Handbook.* U.S. Department of Transportation-Federal Highway Administration (FHWA). http://www.fhwa.dot.gov/ENVIRONMENT/noise/noise_barriers/design_construction/design (6.7.16).

Flugge F, Abadi A. 2006. Farming carbon: an economic analysis of agroforestry for carbon sequestration and dryland salinity reduction in Western Australia. *Agroforetry Systems* 68: 181–192.

Folland CK, Karl TR, Christy JR, Clarke RA, Gruza GV, Jouzel J, Mann ME, Oerlemans J, Salinger MJ, Wang SW. 2001. Observed Climate Variability and Change. En: IPCC. (Ed.) *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge-New York.

Forestry Commission. 2011. *Forests and biodiversity. UK Forestry Standard Guidelines*. Forestry Commission, Edimburgo.

Fox J, Nino-Murcia A. 2005. Status of species conservation banking in the United States. *Conservation Biology* 19: 996–1007.

Freedman B, Stinson G, Lacoul P. 2009. Carbon credits and the conservation of natural areas. *Environmental Reviews* 17: 1–19.

Freibauer A, Rounsevell MDA, Smith P, Verhagen J. 2004. Carbon sequestration in the agricultural soils of Europe. *Geoderma* 122: 1–23.

Freitas E, Pereira P, de Picado-Santos L, Santos A. 2009. Traffic noise changes due to water on porous and dense asphalt surfaces. *Road Materials and Pavement Design* 10(3): 587–607.

Frey B. 2010. Integrating climate change adaptation tools in an SEA: lessons learned in Mali. *IAIA Symposium on Climate Change and Impact Assessment.* Washington DC, 15-16 de noviembre de 2010. http://www.iaia.org/iaia-climate-symposium-dc/proceedings.aspx (12.10.14).

Fuentes-Bargues JL. 2014. Analysis of the process of environmental impact assessment for seawater desalination plants in Spain. *Desalination* 347: 166-174.

Funk JM, Field CB, Kerr S, Daigneault A. 2014. Modeling the impact of carbon farming on land use in a New Zealand landscape. *Environmental Science & Policy* 37: 1–10.

Furgal C, Prowse TD. 2008. Northern Canada. En: Lemmen DS, Warren FJ, Lacroix J, Busch E. (Eds.) *From impacts to adaptation: Canada in a changing climate 2007.* Government of Canada. Ottawa. http://publications.gc.ca (4.10.14).

Garbe T, Dorenkamp R, Kahrstedt J. 2011. Fuel Strategies for short and long distance transport. *IEA Bioenergy Workshop.* Helsinki, Finland 10–12 May 2011. http://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2013/09/6864.pdf (19.12.15).

García JA. 2006. ¿Qué hacer con el suelo agrícola?: arar o no arar, una cuestión clave para el futuro. *Agricultura de Conservación* 4: 12–13.

García A, Martín, MP. 2009. *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril*. Monografías EnerTrans 16. Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García A, Martín, MP. 2012. *Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril español.* Monografías ElecRail 1. Fundación de los Ferrocarriles Españoles.

García A, Palacio I, Mesa LE, Táuler A, Caballero C, González I. 2015. *Observatorio del Ferrocarril en España. Informe 2014.* Fundación de los Ferrocarriles Españoles-Ministerio de Fomento. http://www.fomento.gob.es/ferrocarriles/OBSFERRO/Informe_OFE2014.pdf (29.4.16).

García-Montero, L.G., López, E., Monzón, A. & Otero, I. 2010. Environmental screening tools for assessment of infrastructure plans based on biodiversity preservation and global warming (PEIT, Spain). *Environmental Impact Assessment Review* 30: 158–168.

García-Vega A, Sanz-Ronda FJ, Fuentes-Pérez JF, Navarro-Hevia J, Martínez-Rodríguez A. 2014. Bases metodológicas para el cálculo de muros entramados de madera con vegetación o muros Krainer. *Informes de la Construcción* 66(533).

Gardziejczyk W. 2016. The effect of time on acoustic durability of low noise pavements – The case studies in Poland. *Transportation Research Part D* 44: 93–104.

Gerrard MB. 2008. SEQRA and climate change. NYSBA Government. *Law and Policy Journal* 10(1): 68–73.

Gese J. 2015. Motorways of the Sea in the EU Maritime Transport. *TrainMoS II. Port Energy Operations and Clean Power Investment Analysis, Madrid, November 2015*. http://www.onthemosway.eu/wp-content/uploads/2015/07/TrainMoS-II-.-MoS-in-EU-Maritime-Transport.compressed.pdf?58f0fb (6.2.16).

GFDRR. 2010. *Disaster Risk Management in Latin America and the Caribbean Region: GFDRR Country Notes. St. Vincent and the Grenadines.* GFDRR - World Bank.

Gilder A, Warburton C, Parramon M. 2011. *Climate change and environmental impact assessment in South Africa*. http://uk.practicallaw.com/8-508-7112?q=*&qp=&qo=&qe= (12.10.14).

Gómez, A. 2007. *Análisis de la eficacia de las medidas preventivas, correctoras y compensatorias de suelos, hidrología, ruido y patrimonio histórico para los proyectos de autovías en España y propuesta de indicadores de sostenibilidad correspondientes*. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

Gómez-Baggethun E, Muradian R. 2015. In markets we trust? Setting the boundaries of Market–Based Instruments in ecosystem services governance. *Ecological Economics* 117: 217–224.

Gonzales J, Cusicanqui J, Aparicio M. 2006. *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en las regiones del lago Titicaca y los Valles Cruceños de Bolivia. Sistematización de los resultados de la investigación participativa, consultas y estudios de caso*. Ministerio de Planificación del Desarrollo. http://www.infoandina.org/sites/default/files/publication/files/Bolivia_V_A_REPORT01_02_06.pdf (17.1.16)

Goosen H, de Groot-Reichwein MAM, Masselink L, Koekoek A, Swart R, Bessembinder J, Witte JMP, Stuyt L, Blom-Zandstra G, Immerzeel W. 2014. Climate adaptation services for The Netherlands: an operational approach to support spatial adaptation planning. *Regional Environmental Change* 14(3):1035–1048.

GPO. 2016. An Act to amend the Federal Water Pollution Control Act. Public Law 92-500-Oct. 18, 1972. U.S. Government Publishing Office. https://www.gpo.gov/fdsys/pkg/STATUTE-86/pdf/STATUTE-86-Pg816.pdf (6.12.16).

Government Gazette. 1998. *National Environmental Management Act, (No 107 of 1998) G 19519*. Republic of South Africa. https://www.environment.gov.za/legislation/actsregulations (11.10.14).

Government Gazette. 2010. *National Environmental Management Act: Environmental Impact Assessment Regulations (G 33306).* Republic of South Africa. https://www.environment.gov.za/ legislation/actsregulations (11.10.14).

Government Gazette. 2014. *Act No.25 of 2014: National Environmental Management Laws Amendment Act, 2014.* Republic of South Africa. https://www.environment.gov.za/legislation/ actsregulations (11.10.14).

Government of Ireland. 2004. *Implementation of SEA Directive (2001/42/EC): Assessment of the Effects of Certain Plans and Programmes on the Environment. Guidelines for Regional Authorities and Planning Authorities. http://www.environ.ie/en/Publications/DevelopmentandHousing/Planning/FileDownLoad,1616,en.pdf (3.5.15).*

Government of Western Australia. 2014. *WA Environmental Offsets Guidelines*. http://www.epa.wa.gov.au/EPADocLib/WA Environmental Offsets Guideline August 2014.pdf (23.3.16).

Graham PJ. 2003. Potential for climate change mitigation through afforestation: an economic analysis of fossil fuel substitution and carbon sequestration benefits. *Agroforestry Systems* 59(1): 85–95.

Grieg-Gran M, Porras I, Wunder S. 2005. How can market mechanisms for forest environmental services help the poor? Preliminary lessons from Latin America. *World Development* 33(9): 1511–1527.

GS. 2013. *Afforestation/Reforestation (A/R) Requirements*. The Gold Standard. http://www.goldstandard.org/resources/afforestation-reforestation-requirements (10.1.16).

GS. 2014. *The Gold Standard Agriculture Requirements.* The Gold Standard. http://www.goldstandard.org/resources/ agriculture-requirements (10.1.16).

Gschösser F, Wallbaum H, Boesch M. 2012. Life-Cycle Assessment of the Production of Swiss Road Materials. *Journal of Materials in Civil Engineering* 24(2): 168–176.

GSVG. 2010a. *Disaster Vulnerability Reduction Project (DVRP). Environmental Assessment Report.* Government of Saint Vincent and the Grenadines, Kingstown.

GSVG. 2010b. *Disaster Vulnerability Reduction Project (DVRP). Social Assessment Report.* Government of Saint Vincent and the Grenadines, Kingstown.

GSVG. 2011. *Saint Vincent and the Grenadines. Pilot Program for Climate Resilience (PPCR).* Government of Saint Vincent and the Grenadines, Kingstown.

GSVG. 2014a. *Rapid Damage and LossAssessment (DaLA). December 24-25, 2013 Floods.* Government of Saint Vincent and the Grenadines, Kingstown.

GSVG. 2014b. *Environmental Management Framework (EMF) for Regional Disaster Vulnerability Reduction Project (RDVRP). St. Vincent and the Grenadines Component*. Central Planning Division. Government of St. Vincent and the Grenadines, Kingstown.

Guyot G, Elejabeitia P. 1970. *Los cortavientos en agricultura.* Centro Experimental del Aula Dei-Centro de Investigación y Desarrollo Agrario del Ebro, Zaragoza

Haines A, Kovats RS, Campbell-Lendrum D, Corvalan C. 2006. Climate change and human health: Impacts, vulnerability and public health. *Public Health* 120: 585–596.

Hall JM, Van Holt T, Daniels AE, Balthazar V, Lambin EF. 2012. Trade–offs between tree cover, carbon storage and floristic biodiversity in reforesting landscapes. *Landscape Ecology* 27: 1135–1147.

Hallegatte S, Lecocq F, de Perthuis C. 2011. *Designing climate change adaptation policies. An economic framework*. World Bank. https://openknowledge.worldbank.org/bitstream/handle/10986/3335/WPS5568.pdf?sequence=1&isAllowed=y (15.1.16).

Hamada Y. 2008. *Reviewing the treatment of climate change in EISs, and estimating development of the awareness of certain sections of the EIA community on climate change in the UK. How does climate change influence EIA?* University of East Anglia, Norwich

Hamisi HI, Tumbo M, Kalumanga E, Yanda P. 2012. Crisis in the wetlands: combined stresses in a changing climate – experience from Tanzania. *Climate and Development* 4(1): 5–15.

Hands S, Hudson MD. 2016. Incorporating climate change mitigation and adaptation into environmental impact assessment: a review of current practice within transport projects in England. *Impact Assessment and Project Appraisal* 34(4): 330–345.

Hanson CS, Noland RB. 2015. Greenhouse gas emissions from road construction: An assessment of alternative staging approaches. *Transportation Research Part D* 40: 97–103.

Harper RJ, Beck AC, Ritson P, Hill MJ, Mitchell CD, Barrett DJ, Smettem KRJ, Mann SS. 2007. The potential of greenhouse sinks to underwrite improved land management. *Ecological Engineering* 29: 329–341.

Hartmann I, Sugulle AJ. 2009. *The impact of climate change on pastoral societies of Somaliland.* Candlelight for Health, Education & Environment. http://www.preventionweb.net/files/13863_FinaldraftEffectsofclimatechangeonp.pdf (30.1.16)

Hasan MRM, Hiller JE, You Z. 2016. Effects of mean annual temperature and mean annual precipitation on the performance of flexible pavement using ME design. *International Journal of Pavement Engineering* 17(7): 647–658.

Hazell S. 2010. Improving the effectiveness of environmental assessment in addressing federal environmental priorities. *Journal of Environmental Law and Practice* 20: 213–232.

He X. 2013. Integrating climate change factors within China's environmental impact assessment legislation: new challenges and developments. *Law, Environment and Development Journal* 9(1): 52–67.

Helbron H, Schmidt M, Glasson J, Downes N. 2011. Indicators for strategic environmental assessment in regional land use planning to assess conflicts with adaptation to global climate change. *Ecological Indicators* 11: 90–95.

Hendrikx J, Hreinsson EÖ. 2012. The potential impact of climate change on seasonal snow in New Zealand: part II-industry vulnerability and future snowmaking potential. *Theoretical and Applied Climatology* 110: 619–630.

Hennessey KJ, Whetton PH, Walsh K, Smith IN, Bathols JM, Hutchinson M, Sharples J. 2008. Climate change effects on snow conditions in mainland Australia and adaptation at ski resorts through snowmaking. *Climate Research* 35: 255–270.

Hewitson B, Janetos AC, Carter TR, Giorgi F, Jones RG, Kwon WT, Mearns LO, Schipper ELF, van Aalst M. 2014. Regional context. En: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 1133–1197.

Hijioka Y, Lin E, Pereira JJ, Corlett RT, Cui X, Insarov GE, Lasco RD, Lindgren E, Surjan A. 2014. Asia. En: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 1327–1370.

Hill N, Norris J, Kirsch F, Dun C, McGregor N, Pastori E, Skinner I. 2015. *Light weighting as a means of improving Heavy Duty Vehicles' energy efficiency and overall CO_2 emissions. Heavy Duty Vehicles Framework Contract.* DG Climate Action. CLIMA.C.2/FRA/2013/0007. http://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/heavy/docs/hdv_lightweighting_en.pdf (19.12.15).

Hobbs TJ, Neumann CR, Meyer WS, Moon T, Bryan BA. 2016. Models of reforestation productivity and carbon sequestration for land use and climate change adaptation planning in South Australia. *Journal of Environmental Management* 181: 279–288.

Holderieath J, Valdivia C, Godsey L, Barbieri C. 2012. The potential for carbon offset trading to provide added incentive to adopt silvopasture and alley cropping in Missouri. *Agroforestry Systems* 86(3): 345–353.

Houghton RA, Skole DL. 1990. Carbon. En: Turner BL, Clark WV, Kates RW, Richards JF, Mathews JT, Meyer WB. (eds.) *The Earth as transformed by human action.* pp. 393–408. Cambridge University Press, Cambridge.

Houghton JT, Ding Y, Griggs DJ, Noguer M, van der Linden PJ, Dai X, Maskell K, Johnson CA. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Asessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridege University Press, Cambridge-New York.

Howard C, Springer M, Sharif Y. 2015. Pavement marking life cycle cost analysis. North Carolina Department of Transportation. https://connect.ncdot.gov/resources/safety/Signing and Delineation Library/Pavement_Marking_Cost_Analysis.pdf (8.7.16).

Huang Y, Bird R, Heidrich O. 2009. Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. *Journal of Cleaner Production* 17: 283–296.

Huang Y, Hakim B, Zammataro S. 2013. Measuring the carbon footprint of road construction using CHANGER. *International Journal of Pavement Engineering* 14(6): 590–600.

Huang L, Bohne RA, Bruland A, Jakobsen PD, Lohne J. 2015. Life cycle assessment of Norwegian road tunnel. *International Journal of Life Cycle Assessment* 20(2):174–184.

Huberman D. 2008. *A gateway to PES: Using payments for ecosystem services for livelihoods and landscapes.* Markets and Incentives for Livelihoods and Landscapes Series No. 1. IUCN, Gland.

Huston MA, Marland G. 2003. Carbon management and biodiversity. *Journal of Environmental Management* 67: 77–86.

IAIA. 2011. *Día de Iberoamérica. Conferencia IAIA 2011, 30 de mayo de 2011, Puebla, México.* IAIA-BID-IFC-Banco Mundial. http:// www.ifc.org/publications (5.10.14).

ICLEI. 2010. *Changing climate, changing communities: municipal climate adaptation guide and workbook.* ICLEI Canada. http://www.fcm.ca/Documents/tools/PCP/changing_climate_changing_communities_guide_for_municipal_climate_adaptation_EN.pdf (12.11.14).

IDAE. 2002. *Manual de conducción eficiente para conductores del parque móvil del Estado*. Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_manualPME_6bc54e20.pdf (7.7.16).

IDAE.2005. *La conducción eficiente. Proyecto Treatise.* Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10297_TREATISE_ConduccionEficiente_A2005_A_f3817bad.pdf (7.7.16)

IDAE. 2013. *Guía de vehículos turismo de venta en España, con indicación de consumos y emisiones de CO_2.* Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía. http://coches.idae.es/PDF/GuiaFinalN.pdf (20.6.15).

IDAE. 2014. Factores de emisión de CO_2 y coeficientes de paso a energía primaria de diferentes fuentes de energía final consumidas en el sector de edificios en España. Versión 20/07/2014. http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EficienciaEnergetica/RITE/Reconocidos/Reconocidos/C _ 20140720_Factores emision CO2 y E Final_Primaria-CorrErrata_con portada.pdf (10.4.16).

IEA. 2015. *Energy Policies of IEA Countries. Spain. 2015 review*. International Energy Agency, Paris.

IECA. 2013. *Reciclado de firmes in situ con cemento*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones. https://www.ieca.es/Uploads/docs/Reciclado_de_firmes_in_situ_con_cemento_mayo.pdf (20.4.16).

IEMA. 2010a. IEMA *Principles Series: Climate Change Mitigation, EIA*. http://www.iema.net/eia-climate-change (14.11.14).

IEMA. 2010b. IEMA *Principles Series: Climate Change Adaptation, EIA*. http://www.iema.net/eia-climate-change (14.11.14).

IFAD. 2009. *IFAD's response to climate change through support to adaptation and related actions. Comprehensive report: Final version.* International Fund for Agricultural Development. http://www.ifad.org/climate/resources/adaptation.pdf (29.1.16).

Iglesias A, Garrote L, Flores F, Moneo M. 2007. Challenges to manage the risk of water scarcity and climate change in the Mediterranean. *Water Resources Management* 21: 775–788.

IMPEL. 2012. *The implementation of the Environmental Impact Assessment on the basis of precise examples.* Final Report: 12.11.2012. http://impel.eu/wp-content/uploads/2013/01/IMPEL-EIA-Report-final.pdf (29.11.15).

INE. 2014. Castilla y León. Encuesta sobre la estructura de las explotaciones agrícolas año 2013. Instituto Nacional de Estadística. http://www.ine.es (6.3.16).

INE. 2015. España en cifras. 2015. Instituto Nacional de Estadística. http://www.ine.es/prodyser/espa_cifras/2015/index.html (16.12.15).

Infrastructure Canada. 2006. *Adapting infrastructure to climate change in Canada's cities and communities. A literature review*. Research & Analysis Division. Infrastructure Canada

Ingham A, Ma J, Ulph AK. 2013. Can adaptation and mitigation be complements? *Climatic Change* 120: 39–53.

IPCC. 2007. *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC, Ginebra.

IPCC. 2013. Summary for Policymakers. En: Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. (Eds.) *Climate Change 2013: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 3–29.

IPCC. 2014a. *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC, Ginebra.

IPCC. 2014b. *Cambio climático 2014. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Resumen para responsables de políticas*. IPCC, Ginebra. 40 pp.

IPCC. 2014c. Summary for policymakers. En: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 1–32.

Ireland P. 2012. Climate change adaptation. Business-as-usual aid and development or an emerging discourse for change*? International Journal of Development Issues* 11(2): 92–110.

Isaac M, van Vuuren DP. 2009. Modelling global residential sector energy demand for heating and air conditioning in the context of climate change. *Energy Policy* 37(2): 507–521.

ITA. 2015. *Edafología. Muestras de suelos*. Instituto Tecnológico Agrario. http://ftp.itacyl.es/cartografia/06_Edafologia/Muestras_Suelos/ (24.12.15).

ITT. 2009. *Estudio sobre la gestión variable de la velocidad en las vías de acceso a las áreas urbanas*. Instituto del Transporte y Territorio-Cambra Oficial de Comerc, Industria i Navegacio de Barcelona, Barcelona.

IUCN. 2010. Forestry sector and biodiversity conservation. Best practice benchmarking. The European Union Business and Biodiversity Platform. http://ec.europa.eu/environment/archives/business/assets/pdf/sectors/Forestry_Best%20Pratice%20Benchmarking_Final.pdf (13.12.16).

IUCN. 2011. Agriculture sector and biodiversity conservation. Best practice benchmarking. The European Union Business and Biodiversity Platform. http://ec.europa.eu/environment/archives/business/assets/pdf/sectors/FINAL_Agriculture.pdf (13.12.16).

Jackson RB, Baker JS. 2010. Opportunities and constraints for forest climate mitigation. *BioScience* 60(9): 698–707.

Jacobs JW. 1996. Adjusting to climate change in the Lower Mekong. *Global Environmental Change* 6: 7–22.

Jaroszweski D, Hooper E, Chapman L. 2014. The impact of climate change on urban transport resilience in a changing world. *Progress in Physical Geography* 38(4): 448–463.

JCYL. 2007. Tercer inventario forestal nacional (1997–2006). Castilla y León. Junta de Castilla y León, Valladolid.

JCYL. 2015a. Anuario de Estadística Agraria. Junta de Castilla y León. http://www.agriculturaganaderia.jcyl.es/ (23.12.15).

JCYL. 2015b. Mapas de tráfico y velocidades. Junta de Castilla y León. http://www.carreterasytransportes.jcyl.es (12.12.15)

Jenkins K, Gilbey M, Hall J, Glenis V, Kilsby C. 2014. Implications of climate change for thermal discomfort on underground railways. *Transportation Research Part D* 30: 1–9

Jiricka A, Pröbstl U. 2009. One common way - The strategic and methodological influence on environmental planning across Europe. *Environmental Impact Assessment Review* 29: 379–389.

Jiricka A, Formayer H, Schmidt A, Völler S, Leitner M, Fischer TB, Wachter TF. 2016. Consideration of climate change impacts and adaptation in EIA practice - Perspectives of actors in Austria and Germany. *Environmental Impact Assessment Review* 57: 78–88.

Jo HK. 2002. Impacts of urban greenspace on offsetting carbon emissions for middle Korea. *Journal of Environmental Management* 64: 115–126.

Joffre R, Vacher J, de los Llanos C, Long G. 1988. The dehesa: an agrosilvopastoral system of the Mediterranean region with special reference to the Sierra Morena area of Spain. *Agroforestry Systems* 6(1): 71–96.

Joffre R, Rambal S, Ratte JP. 1999. The dehesa system of southern Spain and Portugal as a natural ecosystem mimic. *Agroforestry Systems* 45(1): 57–79.

Jones M, Morrison-Saunders A. 2016. Making sense of significance in environmental impact assessment. *Impact Assessment and Project Appraisal* 34(1): 87–93.

Jones RN, Patwardhan A, Cohen SJ, Dessai S, Lammel A, Lempert RJ, Mirza MMQ, von Storch H. 2014. Foundations for decision making. En: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 195–228.

Jose S, Bardhan S. 2012. Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. *Agroforestry Systems* 86(2): 105–111.

J&E. 2006. *EIA and transport infrastructure. Position paper.* Justice and Environment. http://www.justiceandenvironment.org/_files/file/wp-upload/JE2006EITPositionpaper.pdf (24.11.15).

J&E. 2012. *The EIA in Selected Member States. Report and Case Studies*. Justice and Environment. http://www.justiceandenvironment.org/_files/file/2012/EIA comprehensive report 2012_1.pdf (29.11.15).

J&E. 2013. *Implementation of the Environmental Impact Assessment Directive in the EU Member States. Case-law examples from the practice of the European environmental impact assessment legislation. Legal Analysis*. Justice and Environment. http://www.justiceandenvironment.org/_files/file/2013/EIA Implementation Legal Analysis 2013.pdf (29.11.15).

Kabir SMZ, Momtaz S. 2012. The quality of environmental impact statements and environmental impact assessment practice in Bangladesh. *Impact Assessment and Project Appraisal* 30(2): 94–99.

Kabubo-Mariara J. 2008. Climate change adaptation and livestock activity choices in Kenya: an economic analysis. *Natural Resources Forum* 32: 131–141.

Kamau JW, Mwaura F. 2013. Climate change adaptation and EIA studies in Kenya. *International Journal of Climate Change Strategies and Management* 5(2): 152–165.

Kågeson P. 2005. *Reducing CO_2 emissions from new cars.* Transport & Environment. http://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/05-1_te_co2_cars.pdf (16.4.16).

Kates RW, Travis WR, Wilbanks TJ. 2012. Transformational adaptation when incremental adaptations to climate change are insufficient. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109(19): 7156–7161.

Keijzer EE, Leegwater GA, de Vos-Effting SE, de Wit MS. 2015. Carbon footprint comparison of innovative techniques in the construction and maintenance of road infrastructure in The Netherlands. *Environmental Science & Policy* 54: 218–225.

Kern JS, Johnson MG. 1993. Conservation tillage impacts on national soil and atmospheric carbon levels. *Soil Science Society of America Journal* 57: 200–210.

Keshavarz M, Karami E, Zibaei M. 2014. Adaptation of Iranian farmers to climate variability and change. *Regional Environmental Change* 14: 1163–1174.

Kibbassa J. 1997. Towards 'sustainable development' in the Southern African Development Community (SADC). En: McCabe M, Sadler B (Eds.) *Studies of EIA practice in developing countries*. United Nations Environment Programme, pp. 193–202. http://www.unep.ch/etb/publication/compendium/introMat.pdf (19.9.15).

Kiem AS, Austin EK. 2013. Drought and the future of rural communities: opportunities and challenges for climate change adaptation in regional Victoria, Australia. *Global Environmental Change* 23: 1307–1316.

Kimble, JM, Lal R, Follett RR. 2002. Agricultural practices and policy options for carbon sequestration: what we know and where we need to go. En: Kimble, JM, Lal R, Follett RR. (Eds.) *Agricultural Practices and Policies for carbon sequestration in soil*. CRC Press, Florida, pp. 495–502.

Kinsella J. 1995. The effects of various tillage systems on soil compaction. En: SWCS (ed.) *Farming for a better environment: a white paper*. Soil and Water Conservation Society, Iowa, pp. 15–17.

Kirshen P, Ruth M, Anderson W. 2008a. Interdependencies of urban climate change impacts and adaptation strategies: a case study of Metropolitan Boston USA. *Climatic Change* 86: 105–122.

Kirshen P, Knee K, Ruth M. 2008b. Climate change and coastal flooding in Metro Boston: impacts and adaptation strategies. *Climatic Change* 90: 453–473.

Klein RJT, Nicholls RJ, Mimura N. 1999. Coastal adaptation to climate change: can the IPCC technical guidelines be applied? *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 4: 239–252.

Klein RJT, Schipper ELF, Dessai S. 2005. Integrating mitigation and adaptation into climate and development policy: three research questions. *Environmental Science & Policy* 8: 579–588.

Klein RJT. 2011. Adaptation to climate change. More than technology. En: Linkov I, Bridges TS (Eds.) *Climate: global change and local adaptation*. NATO Science for Peace and Security Series. Springer, Dordrecht, pp. 157–168.

Koetse MJ, Rietveld P. 2009. The impact of climate change and weather on transport: An overview of empirical findings. *Transportation Research Part* D 14: 205–221.

Kostka SL, Zischke MH. 2015. *Practice under the California Environmental Quality Act. Second edition*. Ceb, Oakland.

Kraus D, Krumm F. 2013 *Integrative approaches as an opportunity for the conservation of forest biodiversity.* European Forest Institute, Joensuu.

Kreske DL. 1996. *Environmental impact statements. A practical guide for Agencies, citizens and consultants.* John Wiley & Sons, New York.

Kuiper G. 1997. Compensation of environmental degradation by highways: a dutch case study. *European Environment* 7: 118-125.

Kukla G. 2000. The last interglacial. *Science* 287: 987–988

Kumar S, Sood V, Singh Y, Channiwala SA. 2016. Real world vehicle emissions: Their correlation with driving parameters. *Transportation Research Part D* 44: 157–176.

Kwadwo W, Asantewaa E. 2016. Climate change and rural communities in Ghana: social vulnerability, impacts, adaptations and policy implications. *Environmental Science & Policy* 55: 208–217.

Kørnøv L, Wejs A. 2013. SEA screening of voluntary climate change plans: A story of non-compliant discretion. *Environmental Impact Assessment Review* 41: 64–69.

Lacasta C, Meco R. 2004. Costes energéticos y económicos de agrosistemas de cereales considerando manejos convencionales y ecológicos. *IV Congreso de la Sociedad Española de Agricultura Ecológica.* Córdoba, Spain. September 2000. http://fci.uib.es/Servicios/libros/conferencias/seae/Costes-energeticos-y-economicos-de-agrosistemas-de.cid221658 (27.12.15).

Lacasta C. 2014. Eficiencia en el cultivo del cereal de secano. Una visión crítica de la situación actual. *Tierras-Agricultura* 220: 30–42.

Lal R. 1999. Global carbon pools and fluxes and the impact of agricultural intensification and judicious land use. En: Zinck JA. (ed.) *Prevention of land degradation, enhancement of carbon sequestration and conservation of biodiversity through land use change and sustainable land management with a focus on Latin America and the Caribbean*. World Soil Resources Report 86. FAO, Rome, pp. 45–52.

Lal R. 2004. Soil carbon sequestration to mitigate climate change*. Geoderma* 123: 1–22.

Larney FJ, Lindwall CW. 1994. Winter wheat performance in various cropping systems in southern Alberta. *Canadian Journal of Plant Science* 74: 79–86.

Landell–Mills N. 2002. Developing markets for forest environmental services: an opportunity for promoting equity while securing efficiency?. *Philosophical Transactions of the Royal Society A* 360: 1817–1825.

Larsen SV, Kørnøv L, Driscoll P. 2013. Avoiding climate change uncertainties in Strategic Environmental Assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 43: 144–150.

Larsen SV. 2014. Is environmental impact assessment fulfilling its potential? The case of climate change in renewable energy projects. *Impact Assessment and Project Appraisal* 32(3): 234–240.

Lassaletta L, Aguilera E. 2015. Soil carbon sequestration is a climate stabilization wedge: Comments on Sommer and Bossio (2014). *Journal of Environmental Management* 153: 48–49.

Lawrence DP. 2007. Impact significance determination–Back to basics. *Environmental Impact Assessment Review* 27: 755–769.

Lee N, Colley R. 1992. *Reviewing the quality of Environmental Assessments.* University of Manchester. http://www.sed.manchester.ac.uk/planning/research/publications/wp/eia/documents/OP24PARTA.pdf (7.7.15).

Lee RJ. 2001. *Climate Change and Environmental Assessment. Part 1: Review of Climate Change Considerations in Selected Past Environmental Assessments*. CEAA. http://publications.gc.ca/site/eng/241785/publication.html (21.3.15).

Leibel N. 2011. Protecting biodiversity by working with agribusiness supply chains. UNDP, New York.

Lewis SL, Maslin MA. 2015. Defining the Anthropocene. *Nature* 519: 171-180.

Li WC, Ding J, Xu H. 2013. Integrating climate change into strategic environmental assessment within the context of China. *Advanced Materials Research Vols* 726–731: 1151–1154.

Li P, Jones S. 2015. Vehicle restrictions and CO_2 emissions in Beijing – A simple projection using available data. *Transportation Research Part D* 41: 467–476.

Lieffering M, Newton PCD, Vibart R, Li FY. 2016. Exploring climate change impacts and adaptations of extensive pastoral agriculture systems by combining biophysical simulation and farm system models. *Agricultural Systems* 144: 77–86.

Lioubimtseva E, Henebry GM. 2009. Climate and environmental change in arid Central Asia: impacts, vulnerability, and adaptations. *Journal of Arid Environments* 73(11): 963–977.

Liu TK, Sheu HY, Tseng CN. 2013. Environmental impact assessment of seawater desalination plant under the framework of integrated coastal management. *Desalination* 326: 10–18.

Liu M, Huang X, Xue G. 2016. Effects of double layer porous asphalt pavement of urban streets on noise reduction. *International Journal of Sustainable Built Environment* 5: 183–196.

Liu Y, Cirillo C. 2016. Evaluating policies to reduce greenhouse gas emissions from private transportation. *Transportation Research Part D* 44: 219–233.

Logan R. 2007. *Conserving biodiversity through sustainable forestry. A guide to applying NCSSF research*. National Council for Science and the Environment, Washington.

López-Bellido L, López-Bellido FJ, Fuentes M, Castillo JE, Fernández EJ. 1997. Influence of tillage, crop rotation and nitrogen fertilization on soil organic matter and nitrogen under rainfed Mediterranean conditions. *Soil & Tillage Research* 43: 277–293.

López-Bellido RJ, Fontán JM, López-Bellido FJ, López-Bellido L. 2010. Carbon sequestration by tillage, rotation, and nitrogen fertilization in a Mediterranean Vertisol. *Agronomy Journal* 102(1): 310–318.

López-Fando C, Almendros G. 1995. Interactive effects of tillage and crop rotations on yield and chemical properties of soils in semi-arid central Spain. *Soil & Tillage Research* 36: 45–57.

Loveland P, Webb J. 2003. Is there a critical level of organic matter in the agricultural soils of temperate regions: a review. *Soil & Tillage Research* 70: 1–18.

Lozano B, Sánchez A, Pernas JJ. 2012. *Evaluaciones de impacto ambiental y autorización ambiental integrada: doctrina, textos legales anotados y jurisprudencia.* La Ley, Madrid.

Lubowski RN, Plantinga AJ, Stavins RN. 2006. Land-use change and carbon sinks: Econometric estimation of the carbon sequestration supply function. *Journal of Environmental Economics and Management* 51: 135–152.

Lund-Iversen M, Mete S. 2013. *EIA Screening. Norwegian Institute for Urban and Regional Research*. http://www.nibr.no/filer/2013-105.pdf (7.12.15).

Luo Z, Wang E, Sun OJ. 2010. Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139: 224–231.

Mackenzie AF, Fan MX, Cardin F. 1998. Nitrous oxide emission in three years as affected by tillage, corn – soybeans– alfalfa rotations, and nitrogen fertilization. *Journal of Environmental Quality* 27: 698–703.

MAGRAMA. 2014. *Inventarios nacionales de emisiones a la atmósfera 1990-2012*. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/Documento_Resumen_Inventario_1990-2012_tcm7-336746.pdf (13.12.14).

MAGRAMA. 2015a. *Inventario de gases de efecto invernadero de España. Serie 1990-2013. Sumario de resultados.* Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. http://www.magrama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/2__Sumario_inventario_GEI_España_-_Serie_1990-2013_Def_tcm7-362874.pdf (26.8.15).

MAGRAMA. 2015b. *Cambio climático. Mitigación: políticas y medidas. Instrumentos y opciones tecnológicas. Sectores de actividad.* Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/instrumentos-y-opciones-tecnologicas/sectores-de-actividad/default.aspx (27.7.15)

MAGRAMA. 2016. *Estadísticas de incendios forestales.* Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/estadisticas/Incendios_default.aspx#para0 (13.5.16).

Mallick RB, Jacobs JM, Miller BJ, Daniel JS, Kirshen P. 2016. Understanding the impact of climate change on pavements with CMIP5, system dynamics and simulation. *International Journal of Pavement Engineering*. http://dx.doi.org/10.1080/10298436.2016.1199880.

Manitoba Government. 2011. *Planning resource guide climate change adaptation through land use planning.* Manitoba. http://www.gov.mb.ca/ia/plups/pdf/cca.pdf (12.11.14).

Mansur ET, Mendelsohn R, Morrison W. 2008. Climate change adaptation: A study of fuel choice and consumption in the US energy sector. *Journal of Environmental Economics and Management* 55: 175–193.

MAPAMA. 2016a. *Inventario de gases de efecto invernadero de España. Serie 1990-2014. Informe resumen.* Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. http://www.mapama.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/1sumarioinventariogeiespana-serie1990-2014_tcm7-417912.pdf (12.11.16).

MAPAMA. 2016b. *Comunicación al Secretariado de la Convención Marco de NNUU sobre Cambio Climático. España. Inventario nacional de emisiones de gases de eefecto invernadero. 1990 - 2014. Edición 2016*. Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medio Ambiente. Madrid.

Marland G, Fruit K, Sedjo R. 2001. Accounting for sequestered carbon: the question of permanence. *Environmental Science & Policy* 4: 259–268.

Maron M, Hobbs RJ, Moilanen A, Matthews JW, Christie K, Gardner TA, Keith DA, Lindenmayer DB, McAlpine CA. 2012. Faustian bargains? Restoration realities in the context of biodiversity offset policies. *Biological Conservation* 155: 141–148.

Martin JC, Point P. 2012. Road project opportunity costs subject to a regional constraint on greenhouse gas emissions. *Journal of Environental Management* 112: 292-303.

Martínez-Zurimendi P, Domínguez-Domínguez M, Juárez-García A, López-López LM, de-la-Cruz-Arias V, Álvarez-Martínez J. 2015Índice de sitio y producción maderable en plantaciones forestales de Gmelina arborea en Tabasco, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38(4): 415–425.

Matthews S, O'Connor R, Plantinga AJ. 2002. Quantifying the impacts on biodiversity of policies for carbon sequestration in forests. *Ecological Economics* 40: 71–87.

Matute JM, Chester MV. 2015. Cost-effectiveness of reductions in greenhouse gas emissions from High-Speed Rail and urban transportation projects in California. *Transportation Research Part D* 40: 104–113.

Mbow C, Mertz O, Diouf A, Rasmussen K, Reenberg A. 2008. The history of environmental change and adaptation in eastern Saloum-Senegal - Driving forces and perceptions. *Global and Planetary Change* 64: 210–221.

McAfee K. 2012. The contradictory logic of global ecosystem services markets. *Development & Change* 43: 105–131.

McEvoy J, Wilder M. 2012. Discourse and desalination: potential impacts of proposed climate change adaptation interventions in the Arizona-Sonora border region. *Global Environmental Change* 22: 353–363.

McSweeney C, New M, Lizcano G. 2010. *UNDP Climate Change Country Profiles. St Vincent and the Grenadines.* http://country-profiles.geog.ox.ac.uk (17.10.14).

Melero S, López-Bellido RJ, López-Bellido L, Muñoz-Romero V, Moreno F, Murillo JM, Franzluebbers AJ. 2012. Stratification ratios in a rainfed Mediterranean Vertisol in wheat under different tillage, rotation and N fertilisation rates. *Soil & Tillage Research* 119: 7–12.

Menocal P, Ortiz J, Guilderson T, Sarnthein M. 2000. Coherent High and low latitude climate variability during the Holocene warm period. *Science* 288: 2198–2202.

Mertz O, Halsnæs K, Olesen JE, Rasmussen K. 2009. Adaptation to climate change in developing countries. *Environmental Management* 43: 743–752.

Metz B, Davidson O, de Coninck H, Loos M, Meyer L. 2005. *La captación y el almacenamiento de dióxido de carbono. Resumen para responsables de políticas y resumen técnico*. OMM-IPCC-PNUMA. https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srccs/srccs_spm_ts_sp.pdf (29.4.16).

MFOM. 2001. *Orden Circular 8/2001 sobre reciclado de firmes*. http://www.fomento.es/nr/rdonlyres/65470704-e0de-41cb-b883-ff983160c047/55678/1620100.pdf (20.4.16).

MFOM. 2005. *PEIT. Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte. 2005-2020*. Ministerio de Fomento. http://www.fomento.gob.es/mfom/lang_castellano/_especiales/peit (21.2.16).

MFOM. 2014. *Informe de la comisión técnico-científica para el estudio de mejoras en el sector ferroviario.* Ministerio de Fomento.http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/F2306101-F215-4C10-A121-6D6AF083D453/125370/InformeComisiónTécnicoCientificaSectorFerroviario1.pdf (4.6.16).

MFOM. 2015a. *Observatorio del transporte y la logística en España. Informe Anual 2014.* Ministerio de Fomento. http://observatoriotransporte.fomento.es/NR/rdonlyres/86194B1E-887A-4C21-AC95-8F6F8227840B/129597/INFORME_OTLE_2014.pdf (29.3.16).

MFOM. 2015b. *Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. Serie normativas. Tomo I. Recomendaciones para la iluminación de carreteras a cielo abierto*. Ministerio de Fomento, Madrid.

MFOM. 2015c. *Orden circular 36/2015 sobre criterios a aplicar en la iluminación de carreteras a cielo abierto y túneles. Serie normativas. Tomo II. Recomendaciones para la iluminación de túneles*. Ministerio de Fomento, Madrid.

MFOM. 2015d. *Carreteras. Tráfico, velocidades y accidentes. Mapa, estimación y evolución*. Ministerio de Fomento. http://www.fomento.gob.es/mfom/lang_castellano/direcciones_generales/carreteras/ (1.3.16).

MFOM. 2016. *Orden Circular 37/2016. Base de precios de referencia de la Dirección General de Carreteras.* Ministerio de Fomento. http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/B5DCAB2E-7ED1-4262-B897-957C484E7966/136078/ORDEN_CIRCULAR_372016.pdf (19.4.16).

MHAP. 2016. *Presentación de los Proyectos de Presupuestos Generales del Estado. 1996-2015*. Ministerio de Hacienda y Administraciones Públicas. http://www.sepg.pap.minhap.gob.es (10.2.16).

Midgley GF, Bond WJ, Kapos V, Ravilious C, Scharlemann JPW, Woodward FI. 2010. Terrestrial carbon stocks and biodiversity: key knowledge gaps and some policy implications. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 2: 264–270.

Milachowski C, Stengel T, Gehlen C. 2011. Análisis de ciclo de vida de una carretera durante las etapas de construcción y uso. *Carreteras: Revista técnica de la Asociación Española de la Carretera* 179: 48-62.

Milder J, Scherr S, Bracer C. 2010. Trends and future potential of payment for ecosystem services to alleviate rural poverty in developing countries. *Ecology and Society* 15(2): 4.

Miliutenko S, Kluts I, Lundberg K, Toller S, Brattebø H, Birgisdóttir H, Potting J. 2014. Consideration of life cycle energy use and greenhouse gas emissions in road infrastructure planning processes: examples of Sweden, Norway, Denmark and The Netherlands. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 16(4) 1450038

Miljković M, Radenberg M. 2011. Thin noise-reducing asphalt pavements for urban areas in Germany. *International Journal of Pavement Engineering* 13(6): 569–578.

MINETUR. 2015. *Precios de carburantes y combustibles. 2015*. Ministerio de Industria, Energía y Turismo. http://www.minetur.gob.es/energia/petroleo/Precios/Informes/InformesMensuales/ (12.3.16).

Ministry for the Environment. 1991. *Resource Management Act 1991. New Zealand.* http://www.mfe.govt.nz/rma/index.html (28.10.14).

Ministry for the Environment. 2008. *Climate change effects and impacts assessment: a guidance manual for local government in New Zealand*. http://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/climate-change-effect-impacts-assessment-may08.pdf (13.11.14).

MMA. 2007. *Estrategia española de cambio climático y energía limpia. Horizonte 2007-2012-2020*. Ministerio de Medio Ambiente. http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/publicaciones/documentacion/ est_cc_energ_limp_tcm7-12479.pdf (27.7.15).

Mock P, Tietge U, Franco V, German J, Bandivadekar A, Ligterink N, Lambrecht U, Kühlwein J, Riemersma I. 2014. *From laboratory to road. A 2014 update of official and "real-world" fuel consumption and CO_2 values for passenger cars in Europe. International Council on Clean Transportation*. http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_LaboratoryToRoad_2014_Report_English.pdf (19.12.15).

Modrego MP, Cisneros O. 2008. Relación entre incremento diametral y parámetros ecológicos para Fraxinus excelsior L. en el noroeste de Castilla y León. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 25: 301–308.

Montagnini F, Nair P. 2004. Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 61: 281-295.

Montebello D, Schroeder J. 2000. *Cost of pavement marking materials. Minnesota* Local Road Research Board. http://www.lrrb.org/pdf/200011.pdf (8.7.16).

Montero G, Ruiz–Peinado R, Muñoz M. 2005. *Producción de biomasa y fijación de CO_2 por los bosques españoles*. INIA, Madrid.

Moors EJ, Groot A, Biemans H, van Scheltinga CT, Siderius C, Stoffel M, Huggel C, Wiltshire A, Mathison C, Ridley J, Jacob D, Kumar P, Bhadwal S, Gosain A, Collins DN. 2011. Adaptation to changing water resources in the Ganges basin, northern India. *Environmental Science & Policy* 14: 758–769

Mora J, Menéndez I, Sanz E. 2016. Consideraciones sobre la hidrología de los procesos de acumulación/fusión de nieve y su incidencia en el régimen de caudales de estiaje ante escenarios de cambio climático. *VII Congreso Nacional de Ingeniería Civil.* Madrid, 2-3 marzo 2016.

Moreno-Navarro F, Rubio-Gamez MC, Miro R, Perez-Jimenez F. 2015. The influence of temperature on the fatigue behaviour of bituminous materials for pavement rehabilitation. *Road Materials and Pavement Design* 16(1): 300–313.

Morgan RK. 2012. Environmental impact assessment: the state of the art. *Impact Assessment and Project Appraisal* 30(1): 5–14.

Morris RKA, Alonso I, Jefferson RG, Kirby KJ. 2006. The creation of compensatory habitat—Can it secure sustainable development? *Journal of Nature Conservation* 14: 106–116.

Morrison-Saunders A, Annandale D, Cappelluti J. 2001. Practitioner perspectives on what influences EIA quality. *Impact Assess Project Appraisal* 19(4): 321–325.

Mounir ZM. 2015. Evaluation of the quality of environmental impact assessment reports using Lee and Colley package in Niger Republic. *Modern Applied Science* 9(1): 89–95.

Moyano A, Escudero F, Gallardo JF. 1986. Calculo del déficit de materia orgánica en Castilla y León. I. Sudoeste de la provincia de Valladolid. *2º Congreso Nacional sobre Recuperación de los Residuos*. Soria, Spain. 14–20 October 1984, pp 379–488.

Muñoz-Rojas M, De la Rosa D, Zavala LM, Jordán A, Anaya-Romero M. 2011. Changes in land cover and vegetation carbon stocks in Andalusia, Southern Spain (1956–2007). *Science of the Total Environment* 409: 2796–2806.

Muradian R, Corbera E, Pascual U, Kosoy N, May P. 2010. Reconciling theory and practice: an alternative conceptual framework for understanding payments for environmental services. *Ecological Economics* 69: 1202–1208.

Nabuurs GJ, Schelhaas MJ. 2002. Carbon profiles of typical forest types across Europe assessed with CO2FIX. *Ecological Indicators* 1: 213–223.

Nabuurs GJ, Lindner M, Verkerk PJ, Gunia K, Deda P, Michalak R, Grassi G. 2013. First signs of carbon sink saturation in European forest biomass. *Nature Climate Change* 3: 792–796.

Naciones Unidas. 1992. *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático.* http://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf (14.7.15).

Nemry F, Demirel H. 2012. *Impacts of climate change: A focus on road and rail transport infrastructures*. JRC Scientific and Policy Reports, European Union, Luxemburgo.

Newsham AJ, Thomas DSG. 2011. Knowing, farming and climate change adaptation in North-Central Namibia. *Global Environmental Change* 21: 761–770.

Ngugi MR, Johnson RW, McDonald WJF. 2011. Restoration of ecosystems for biodiversity and carbon sequestration: Simulating growth dynamics of brigalow vegetation communities in Australia. *Ecological Modelling* 222: 785–794.

Niang I, Ruppel OC, Abdrabo MA, Essel A, Lennard C, Padgham J, Urquhart P. 2014. Africa. En: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 1199–1265.

Nicholls RJ, Lowe JA. 2004. Benefits of mitigation of climate change for coastal areas. *Global Environmental Change* 14(3): 229–244.

Nielsen JØ, Reenberg A. 2010. Cultural barriers to climate change adaptation: a case study from Northern Burkina Faso. *Global Environmental Change* 20: 142–152.

Nogueira A. 2009. *Evaluación de impacto ambiental. Evolución normativo-jurisprudencial, cuestiones procedimentales y aplicación sectorial*. Atelier, Barcelona.

Nova Scotia Environment. 2011. *Guide to considering climate change in environmental assessment in Nova Scotia. Nova Scotia Environment.* https://www.novascotia.ca/nse/ea/docs/EA.Climate.Change.Guide.pdf (11.11.14).

NRC. 2001. *Compensating for wetland losses under the Clean Water Act. Committee on Mitigating Wetland Losses*. Board on Environmental Studies and Toxicology. Water Science and Technology Board. Division on Earth and Life Studies. National Research Council.

NRC. 2016. Fuel-efficient Driving Techniques. Natural Resources Canada. http://www.nrcan.gc.ca/energy/efficiency/transportation/cars-light-trucks/fuel-efficient-driving-techniques/7507 (7.7.16).

NT. 2009. *NT environmental impact assessment guide: greenhouse gas emissions and climate change.* Northern Territory Government. Australia. http://www.iaia.org/IAIA-Climate-Symposium-DC/countries-procedures.aspx (28.10.14).

OCCC. 2012. Guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Oficina Catalana del Canvi Climatic. http://canviclimatic.gencat.cat/web/.content/home/olitiques/politiques_catalanes/la_mitigacio_del_canvi_climatic/guia_de_calcul_demissions_de_co2/120301_guia_practica_calcul_emisions_rev_es.pdf (20.6.15).

O'Connor D. 2008. Governing the global commons: Linking carbon sequestration and biodiversity conservation in tropical forests. *Global Environmental Change* 18: 368–374.

OECC. 2006. *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Oficina Española de Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente. http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/pna_v3_tcm7-12445_tcm7-197092.pdf (17.1.16)

OECC. 2013. *Cambio climático: bases físicas. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC grupo de trabajo I.* Oficina Española del Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Fundación Biodiversidad, Madrid.

OECC. 2014. *Cambio climático: Impactos, adaptación y vulnerabilidad. Guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC grupo de trabajo II.* Oficina Española del Cambio Climático, Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Fundación Biodiversidad, Madrid.

OECD. 2001. Agriculture and biodiversity: Developing indicators for policy analysis. *Proceedings from an OECD expert meeting. Zurich, Switzerland, November 2001.* http://www.oecd.org/tad/sustainable-agriculture/40339227.pdf (12.12.16).

Ogbonna CU, Albrecht E. 2015. Strategic Environmental Assessment as a tool to integrate climate change adaptation: a perspective for Nigeria. En: Leal Filho W (Ed.) *Handbook of climate change adaptation* 1–19. Springer, Dordrecht.

Ohsawa T, Duinker P. 2014. Climate-change mitigation in Canadian environmental impact assessments. *Impact Assessment and Project Appraisal* 32(3): 222–233.

Olea L, San Miguel A. 2006. The Spanish dehesa. A Mediterranean silvipastoral system linking production and nature conservation. *Grassland Science in Europe* 11: 3–13.

Olesen JE, Trnka M, Kersebaum KC, Skjelvåg AO, Seguin B, Peltonen-Sainio P, Rossi F, Kozyra J, Micale F. 2011. Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. *European Journal of Agronomy* 34(2): 96–112.

Ongel A, Harvey J. 2010. Pavement characteristics affecting the frequency content of tire/pavement noise. *Noise Control Engineering Journal* 58(6): 563–571.

Ongel A, Kohler E, Lu Q, Harvey J. 2011. Comparison of surface characteristics and pavement/tire noise of various thin asphalt overlays. *Road Materials and Pavement Design* 9(2): 333–344.

Ono Y, Arai H, Fujita H. 2012. *Lightning risk analysis for railway signalling systems from observation of lightning overvoltages on signalling cables and rails*. Institution of Railway Signal Engineers (IRSE). http://www.irse.org/knowledge/publicdocuments/3.13 Ono - Lightning risk analysis from observation of overvoltages.pdf (8.7.16).

OSPAR. 2009. *Assessment of the impact of coastal defence structures*. OSPAR Commission. http://qsr2010.ospar.org/media/assessments/p00435_Coastal_defence.pdf (28.2.16)

Ouranos. 2010. *Élaborer un plan d'adaptation aux changements climatiques. Guide destiné au milieu municipal québécois*. http://ouranos.ca/media/publication/111_PlanadaptationCC-Guidemunicipalites-Ouranos.pdf (12.11.14).

Ovando P, Caparrós A. 2009. Land use and carbon mitigation in Europe: A survey of the potentials of different alternatives. *Energy Policy* 37: 992–1003.

Pagiola S, Arcenas A, Platais G. 2005. Can payments for environmental services help reduce poverty? An exploration of the issues and the evidence to date from Latin America. *World Development* 33(2): 237–253.

Paje SE, Bueno M, Terán F, Miró R, Pérez-Jiménez F, Martínez AH. 2010. Acoustic field evaluation of asphalt mixtures with crumb rubber. *Applied Acoustics* 71: 578–582.

Pakeman RJ. 2011. *Biodiversity and farming. A summary of research outputs from the Scottish Government's "Environment – Land Use and Rural Stewardship" research programme.* Macaulay Land Use Research Institute, Aberdeen.

Palin EJ, Thornton HE, Mathison CT, McCarthy RE, Clark RT, Dora J. 2013. Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain. *Climatic Change* 120: 71–93.

Palmer MA, Filoso S. 2009. Restoration of ecosystem services for environmental markets. *Science* 325(5940): 575–576.

Panayotou T. 1994. Conservation of biodiversity and economic development: the concept of transferable development rights. *Environmental and Resource Economics* 4(1): 91–110.

Pardo M. 1994. El impacto social en las evaluaciones de impacto ambiental: su conceptualización y práctica. *Revista Española de Investigaciones Sociológicas* 66: 141–167.

Pardos JA. 2010. *Los ecosistemas forestales y el secuestro de carbono ante el calentamiento global*. INIA, Madrid.

Paul KI, Reeson A, Polglase P, Crossman N, Freudenberger D, Hawkins C. 2013. Economic and employment implications of a carbon market for integrated farm forestry and biodiverse environmental plantings. *Land Use Policy* 30: 496–506.

Pawson SM, Brin A, Brockerhoff EG, Lamb D, Payn TW, Paquette A, Parrotta JA. 2013. Plantation forests, climate change and biodiversity. *Biodiversity Conservation* 22: 1203–1227.

PB Americas, Perkins Coie. 2009. *Guidelines on the Use of Tiered Environmental Impact Statements for Transportation Projects.* American Association of State Highway and Transportation Officials. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/docs/NCHRP25-25(38) _FR.pdf (8.1.16).

Petkova M, Gil-Negrete N. 2015. *D.6.4. Engineering Guidelines for Tracks.* ECUC. Eddy Currentbrake Compatibility. http://www.ecuc-project.eu/wp-content/uploads/2015/10/ECUC_D6.4.pdf (14.5.16).

PIARC. 2011. *Adaptación al cambio climático para los puentes. Comité técnico D.3 - Puentes de carretera*. World Road Association (PIARC), Paris. http://www.piarc.org/ressources/publications/7/18986,2011R08ES.pdf (4.6.16).

PIARC. 2012. *Dealing with the effects of climate change on road pavements*. World Road Association (PIARC), Paris. http://www.piarc.org/ressources/publications/5/16872,WEB-2012R06EN.pdf (4.6.16).

PIARC. 2013a. *Impacts of changes in winter severity on winter maintenance. Technical Comittee B.5 - Winter Service.* World Road Association (PIARC), Paris. http://www.piarc.org/ressources/publications/7/21151,2013R13-EN.pdf (4.6.16).

PIARC. 2013b. *Quiet pavement technologies*. World Road Association, Paris. http://media.cygnus.com/files/base/FCP/whitepaper/2013/09/quieter-pavements_11179329.pdf (10.10.16).

PIARC. 2015. *International climate change adaptation framework for road infrastructure*. World Road Association (PIARC), Paris. http://www.piarc.org/ressources/publications/8/23557,SpecialProject-ClimateChange-EN.pdf (4.6.16).

Pielke RA, Marland G, Betts RA, Chase TN, Eastman JL, Niles JO, Niyogi DS, Running SW. 2003. The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. En: Swingland IR (Ed.) *Capturing carbon and conserving biodiversity. The market approach.* Earthscan Publications, London, pp. 155–170.

Pielke R, Prins G, Rayner S, Sarewitz D. 2007. Lifting the taboo on adaptation. *Nature* 445: 597–598.

Pinho P, McCallum S, Santos Cruz S. 2010. A critical appraisal of EIA screening practice in EU Member States. *Impact Assessment and Project Appraisal* 28(2): 91–107.

Pirard R. 2012. Market–based instruments for biodiversity and ecosystem services: a lexicon. *Environmental Science & Policy* 19–20: 59–68.

Pizarro D, Soca N. 2001. Análisis del cumplimiento de la normativa estatal sobre la evaluación de impacto ambiental para proyectos de grandes presas. *Informes de la Construcción* 53(476): 21–26.

Poland JF. 1984. Review of methods to control or arrest subsidence. En: Poland JF. (Ed.) *Guidebook to studies of land subsidence due to ground-water withdrawal.* UNESCO, Paris, pp. 127–130.

Poland JF, Davis GH. 1988. Subsidence associated with the abstraction of fluids *Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications* 5: 363–376.

Pölönen I, Hokkanen P, Jalava K. 2010. The effectiveness of the Finnish EIA system - What works, what doesn't and what could be improved?. *Environmental Impact Assessment Review* 31: 120–128.

Pons M, López-Moreno JI, Rosas-Casals M, Jover E. 2015. The vulnerability of Pyrenean ski resorts to climate-induced changes in the snowpack. *Climatic Change* 131: 591–605.

Porter CD, Brown A, DeFlorio J, McKenzie E, Tao W, Vimmerstedt L. 2013. *Effects of travel reduction and efficient driving on transportation: energy use and greenhouse gas emissions*. U.S. Department of Energy, Washington, DC. www.nrel.gov/docs/fy13osti/55635.pdf (7.7.16).

Potti JJ, Peña JL. 2013. ¿Residuos en las mezclas bituminosas? Consideraciones y posibilidades actuales sobre su empleo en la construcción y conservación de los firmes flexibles. *Revista Carreteras* 187: 31–39.

Powlson DS, Whitmore AP, Goulding KWT. 2011. Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science* 62: 42–55.

Praticò FG, Anfosso-Lédée F. 2012. Trends and issues in mitigating traffic noise through quiet pavements. *Procedia Social and Behavioral Sciences* 53: 203–212.

PRC. 1998. *Decree No. 253 of the State Council on November 29, 1998. Regulations on Environmental Management of Construction Project. People's Republic of China* http://faolex.fao.org/docs/pdf/chn52694E.pdf (11.10.14).

PRC. 2002. *Law of the People's Republic of China On Environmental Impact Assessments. October 28, 2002. People's Republic of China*. http://faolex.fao.org/docs/texts/ chn40204.doc (11.10.14).

PRC. 2009. The Netherlands. The economics of climate change adaptation in EU coastal areas. Policy Research Corporation. http://ec.europa.eu/maritimeaffairs/documentation/studies/climate_change_en.htm (28.2.16)

PRC. 2014. Environmental *Protection Law of the People's Republic of China. 24 April 2014.People's Republic of China*. http://www.ecegp.com/english/news/shownews.asp?ID=842 (11.10.14).

Pribyl DW. 2010. A critical review of the conventional SOC to SOM conversion factor. *Geoderma* 156: 75–83.

Pritchard OG, Hallett SH, Farewell TS. 2013. *Soil movement in the UK – Impacts on critical infrastructure*. Infrastructure Transitions Research Consortium. NSRI, Cranfield University. http://www.itrc.org.uk/wp-content/PDFs/Soil-movement-impacts-UK-infrastructure.pdf (15.5.16).

Pyke C, Batten K. 2008. *An executive order to require consideration of global warming under the National Environmental Policy Act*. Center for American Progress. http://cdn.americanprogress.org/wp-content/uploads/issues/2008/05/pdf/nepa.pdf (5.10.14).

Qiao Y, Dawson AR, Parry T, Flintsch GW. 2015. Evaluating the effects of climate change on road maintenance intervention strategies and Life-Cycle Costs. *Transportation Research Part D* 41: 492–503.

Querol N.2013. Emulsiones modificadas con polvo de neumático fuera de uso. NFU-Emulsiones. *Revista Carreteras* Nº Extraordinario Noviembre 2013.

Quétier F, Lavorel S. 2001. Assessing ecological equivalence in biodiversity offset schemes: Key issues and solutions. *Biological Conservation* 144: 2991–2999.

RAE. 2011. *Infrastructure, engineering and climate change adaptation – Ensuring services in an uncertain future*. The Royal Academy of Engineering, London.

Rajabu K, Kashaigili JJ, Masolwa P. 2009. Freshwater conservation and climate change adaptation - a case study of the Great Ruaha River Catchment in Tanzania. IOP Conf. Series. *Earth and Environmental Science* 6: 402005.

Rajvanshi A. 2008. Mitigation and compensation in environmental assessment. En: Fischer TB, Gazzola P, Jha-Thakur U, Belčakova I, Aschemann R (Eds.) *Environmental Assessment. Lecturers' Handbook*. Bratislava Press, Bratislava.

Ramírez A, García JL. 2013. Ejemplos de obras con empleo de residuos. *Revista Carreteras* 187: 64–78.

Rasmussen PE, Collins HP. 1991. Long-term impacts of tillage, fertilizer and crop residue on soil organic matter in temperate semiarid regions. *Advances in Agronomy* 45: 93–134.

Rasmussen K, May W, Birk T, Mataki M, Mertz O, Yee D. 2009. Climate change on three Polynesian outliers in the Solomon Islands: impacts, vulnerability and adaptation. *Geografisk Tidsskrift – Danish Journal of Geography* 109(1): 1–13.

Regeringskansliet. 2000. *Swedish Environmental Code* (with amendments entered into force up to 1 August 2000). http://www.government.se/sb/d/574/a/22847 (15.10.14).

Regmi MB, Hanaoka S. 2011. A survey on impacts of climate change on road transport infrastructure and adaptation strategies in Asia. *Environmental Economics and Policy Studies* 13: 21–41

Reisinger A, Kitching RL, Chiew F, Hughes L, Newton PCD, Schuster SS, Tait A, Whetton P. 2014. Australasia. En: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 1371–1438.

Ren Z, Chen Z, Wang X. 2011. Climate change adaptation pathways for Australian residential buildings. *Building and Environment* 46: 2398–2412.

Renfe. 2015. *El ferrocarril y la cumbre de Cambio Climático 2015 COP21 París*. http://traintoparis.org/IMG/pdf/el_transporte_y_el_ cambio_clim_tico_train_to_paris_uic.pdf (6.2.16).

Renwick AR, Robinson CJ, Martin TG, May T, Polglase P, Possingham HP, Carwardine J. 2014. Biodiverse planting for carbon and biodiversity on indigenous land. *PLoS One* 9(3): e91281. doi:10.1371/journal.pone.0091281

Rey JM, Gómez JI, Mesa AV. 2016. *Guía para la plantación de setos e islotes forestales en campos agrícolas mediterráneos.* Fundación Internacional para la Restauración de Ecosistemas, Madrid

Richardson GRA, Otero J. 2012. *Land use planning tools for local adaptation to climate change.* Government of Canada. Ottawa. http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/earthsciences/files/landuse-e.pdf (12.11.14).

Rieger S, Richner W, Streit B, Frossard E, Liedgens M. 2008. Growth, yield, and yield components of winter wheat and the effects of tillage intensity, preceding crops, and N fertilisation. *European Journal of Agronomy* 28: 405–411.

Río M, López E, Montero G. 2006. *Manual de gestión para masas procedentes de repoblación de Pinus pinaster Ait., Pinus sylvestris L. y Pinus nigra Arn. en Castilla y León*. Junta de Castilla y León, Valladolid.

Rittenhouse CD, Rissman AR. 2012. Forest cover, carbon sequestration, and wildlife habitat: policy review and modeling of tradeoffs among land–use change scenarios. *Environmental Science & Policy* 21: 94–105.

Rivera-Ferre MG, Di Masso M, Miele M, López-i-Gelats F, Gallar D, Vara I, Cuellar M. 2013. *Understanding the role of local and traditional agricultural knowledge in a changing world climate: the case of the Indo-Gangetic Plains*. CGIAR-CCAFS, Barcelone.

Rixen C, Teich M, Lardelli C, Gallati D, Pohl M, Pütz M, Bebi P. 2011. Winter tourism and climate change in the Alps: an assessment of resource consumption, snow reliability, and future snowmaking potential. *Mountain Research and Development* 31(3): 229–236.

Roberts DA, Johnston EL, Knott NA. 2010. Impacts of desalination plant discharges on the marine environment: a critical review of published studies. *Water Research* 44(18): 5117–5128.

Robertson REA. 2005. *Volcanic hazard atlas of the Lesser Antilles - St. Vincent and The Grenadines.* W.I. Seismic Research Unit, 241-273. University of the West Indies, Trinidad y Tobago.

Robertson M. 2004. The neoliberalization of ecosystem services: wetland mitigation banking and problems in environmental governance. *Geoforum* 35(3): 361–373.

Robertson M, Hayden N. 2008. Evaluation of a market in wetland credits: entrepreneurial wetland banking in Chicago. *Conservation Biology* 22(3): 636–646.

Robertson M. 2009. The work of wetland credit markets: two cases in entrepreneurial wetland banking. *Wetland Ecology Management* 17(1): 35–51.

Rochette R. 2008. No-till only increases N_2O emissions in poorly-aerated soils. *Soil & Tillage Research* 101: 97–100.

Rodríguez J. 2013. *Estudio del uso de materiales reciclados en firmes de carreteras.* Universidad de Cantabria. http://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/2842/J Rodríguez Torres.pdf (20.4.16).

Rodríguez MJ, Agrela F, Pérez A, Cabrera M, Carvajal MD, Ramírez A. 2015. Empleo potencial de cenizas de fondo de biomasa como material estabilizador aplicado a suelo arcilloso expansivo. *Revista Carreteras* 202: 34–41.

Rodríguez JA, Álvaro-Fuentes J, Gonzalo J, Gil V, Ramos-Miras JJ, Grau JM, Boluda R. 2016. Assessment of the soil organic carbon stock in Spain. *Geoderma* 264: 117–125.

Rodríguez-Entrena M, Barreiro-Hurlé J, Gómez-Limón JA, Espinosa-Goded M, Castro-Rodríguez J. 2012. Evaluating the demand for carbon sequestration in olive grove soils as a strategy toward mitigating climate change. *Journal of Environmental Management* 112: 368–376.

Rodt S, Georgi B, Huckestein B, Mönch L, Herbener R, Jahn H, Koppe K, Lindmaier J. 2010. CO2-*Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. Mögliche Maßnahmen und ihre Minderungspotenziale - Ein Sachstandsbericht des Umweltbundesamtes*. Umweltbundesamt. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/3773.pdf (16.4.16).

Romanyà J, Rovira P, Vallejo R. 2007. Análisis del carbono en los suelos agrícolas de España. Aspectos relevantes en relación a la reconversión a la agricultura ecológica en el ámbito mediterráneo. *Ecosistemas* 16(1): 50–57.

Romero-Lankao P, Smith JB, Davidson DJ, Diffenbaugh NS, Kinney PL, Kirshen P, Kovacs P, Villers Ruiz L. 2014. North America. En: Barros VR, Field CB, Dokken DJ, Mastrandrea MD, Mach KJ, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part B: Regional aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge- New York, pp. 1439–1498.

Rosa H, Kandel S, Dimas L. 2004. *Compensación por servicios ambientales y comunidades rurales: lecciones de las Américas y temas críticos para fortalecer estrategias comunitarias.* Programa Salvadoreño de Investigación sobre Desarrollo y Medio Ambiente (PRISMA), San Salvador.

Rowland B, Davey J, Freeman J, Wishart D. 2007. Road transport sensitivities to weather and climate change in Australia. *30th Australasian Transport Research Forum*. Melbourne. http://atrf.info/papers/2007/index.aspx (1.5.16).

Royal Academy of Engineering. 2011. *Infrastructure, engineering and climate change adaptation. Ensuring services in an uncertain future*. The Royal Academy of Engineering. https://www.gov.uk/government/publications/adapting-to-climate-change-in-the-infrastructure-sectors (4.10.14).

Ruhl JB. 2009. Climate change adaptation and the structural transformation of environmental law. *Environmental Law* 40: 363–431.

Salas M, Cembrero P, Jiménez N.2013. Empleo de áridos reciclados RCD's normativa técnica andaluza y certificación de materiales. *Revista Carreteras* 187: 79–94.

Sampedro A, Miralles E, de la Peña E, del Real E, Aizpurua N. 2009. Reducción de las emisiones contaminantes del transporte por carretera a través de un diseño y explotación eficiente. *Estudios de construcción y transportes* 111: 75–90.

Sampedro A. 2011. *Desarrollo de una metodología de análisis de ciclo de vida integral específica para carreteras*. Plataforma Tecnológica de la Carretera-Universidad Alfonso X el Sabio.

Sánchez M, Ballarín D, Mora D, Ollero A, Serrano R, Saz MA. 2015. Las crecidas del Ebro medio en el comienzo del siglo XXI. En: Riva J de la, Ibarra P, Montorio R, Rodrigues M. (Eds.) *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Universidad de Zaragoza, Zaragoza, pp. 1853-1862.

Sánchez-Triana E, Enríquez S. 2007. *A comparative analysis of environmental. impact analysis systems in Latin America.* http://www.ifc.org/wps/wcm/connect/topics_ext_content/ifc_external_corporate_site/ifc+sustainability/learning+and+adapting/knowledge+products/publications/publications_report_ibero (11.10.14).

Sandberg U, Ejsmont JA. 2002. *Tyre/Road Noise Reference Book*. Informex, Kisa.

Sandham LA, van Heerden AJ, Jones CE, Retief FP, Morrison-Saunders A. 2013. Does enhanced regulation improve EIA report quality? Lessons from South Africa. *Environmental Impact Assessment Review* 38: 155–162.

Scarlett L. 2011. Climate adaptation. Science and collaborative decision making. En: Linkov I, Bridges TS. (Eds.) *Climate: global change and local adaptation*. NATO Science for Peace and Security Series. Springer, Dordrecht, pp. 9–17.

Scherr SJ, McNeely JA. 2008. Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of 'ecoagriculture' landscapes. *Philosophical Transactions of The Royal Society B* 363, 477–494.

Schlesinger WH, Andrews JA. 2000. Soil respiration and the global carbon cycle. *Biogeochemistry* 48: 7–20.

Schroeder P. 1994. Carbon storage benefits of agroforestry systems. *Agroforestry Systems* 27(1): 89-97.

Schweikert A, Chinowsky P, Espinet X, Tarbert M. 2014a. Climate change and infrastructure impacts: comparing the impact on roads in ten countries through 2100. *Procedia Engineering* 78: 306 – 316

Schweikert A, Chinowsky P, Kwiatkowski K, Espinet X. 2014b. The infrastructure planning support system: Analyzing the impact of climate change on road infrastructure and development. *Transport Policy* 35: 146–153

Scott D, McBoyle G, Mills B. 2003. Climate change and the skiing industry in southern Ontario (Canada): exploring the importance of snowmaking as a technical adaptation. *Climate Research* 23: 171–181.

Scott D, McBoyle G, Minogue A. 2007. Climate change and Quebec's ski industry. *Global Environmental Change* 17(2): 181–190.

Scott D, Amelung B, Becken S, Ceron JP, Dubois G, Gössling S, Peeters P, Simpson MC. 2008. Part II: Technical report. En: Cabrini L, Vereczi G, Fotiou S, Malone L. (Eds.) *Climate change and tourism: Responding to global challenges.* United Nations World Tourism Organization (UNWTO) - United Nations Environment Programme (UNEP), Madrid, pp. 23–256.

Secretary of the Interior. 2009. *Order No. 3226, Amendment No. 1. January 16, 2009. Climate Change and the Department of the Interior.* http://www.blm.gov/pgdata/etc/medialib/blm/wy/programs/science.Par.46189.File.dat/SO_3226A1.pdf (10.10.14).

Secretary of the Interior. 2010. *Order No. 3289, Amendment No. 1. February 22, 2010. Addressing the Impacts of Climate Change on America's Water, Land, and Other Natural and Cultural Resources.* http://www.usbr.gov/WaterSMART/docs/so3289A1.pdf. (10.10.14).

Siikamäki J, Newbold SC. 2012. Potential biodiversity benefits from international programs to reduce carbon emissions from deforestation. *Ambio* 41: 78–89.

Simpson MC. 2012. *CARIBSAVE Climate Change Risk Profile for St. Vincent and the Grenadines*. CARIBSAVE, Barbados.

Sims R, Schaeffer R, Creutzig F, Cruz-Núñez X, D'Agosto M, Dimitriu D, Figueroa MJ, Fulton L, Kobayashi S, Lah O, McKinnon A, Newman P, Ouyang M, Schauer JJ, Sperling D, Tiwari G. 2014. Transport. En: Edenhofer O, Pichs-Madruga R, Sokona Y, Farahani E, Kadner S, Seyboth K, Adler A, Baum I, Brunner S, Eickemeier P, Kriemann B, Savolainen J, Schlömer S, von Stechow C, Zwickel T, Minx JC (eds*.). Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 599–670.

Sirin O. 2016. State-of-the-art review on sustainable design and construction of quieter pavements—Part 2: Factors affecting tire-pavement noise and prediction models. *Sustainability* 8: 692.

Smit B, Burton I, Klein RJT, Wandel J. 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic Change* 45: 223–251.

Singh B, Ellingsen LAW, Strømman AH. 2015. Pathways for GHG emission reduction in Norwegian road transport sector: Perspective on consumption of passenger car transport and electricity mix. *Transportation Research Part* D 41: 160–164.

Smit, B., Burton, I., Klein, R.J.T., Wandel, J., 2000. An anatomy of adaptation to climate change and variability. *Climatic Change* 45: 223–251.

Smith P, Powlson DS, Glendining MJ. 1996. Establishing a European soil organic matter network (SOMNET). In: Powlson DS, Smith P, Smith JU. (eds.) *Evaluation of soil organic matter models using existing, long-term datasets*. NATO ASI Series I, vol. 38. Springer-Verlag, Berlin, pp. 81– 98.

Smith P, Goulding KW, Smith KA, Powlson DS, Smith JU, Falloon PD, Coleman K, 2001. Enhancing the carbon sink in European agricultural soils: Including trace gas fluxes in estimates of carbon mitigation potential. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 60: 237–252.

Smith MD. 2010. U.S. climate change and the National Environmental Policy Act (NEPA). *IAIA Symposium on Climate Change and Impact Assessment. Washington, DC, November 15-16, 2010*. http://www.iaia.org/iaia-climate-symposium-dc/proceedings.aspx (6.10.14).

Sok V, Boruff BJ, Morrison-Saunders A. 2011. Addressing climate change through environmental impact assessment: international perspectives from a survey of IAIA members. *Impact Assessment and Project Appraisal* 29 (4): 317–325.

Sok V. 2014. *An examination of environmental impact assessment (EIA) practices for effectively addressing climate change issues*. Tesis. University of Western Australia. https://repository.uwa.edu.au/R/-?func=dbin-jump-full&object_id=40306&local_base= GEN01-INS01 (12.10.14).

Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL. 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge-New York.

Sommer R, Bossio D. 2014. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. *Journal of Environmental Management* 144: 83–87

Sovacool BK. 2011. Hard and soft paths for climate change adaptation. *Climate Policy* 11: 1177–1183.

Sovacool BK. 2012. Expert views of climate change adaptation in the Maldives. *Climatic Change* 114(2): 295–300.

Sowers J, Vengosh A, Weinthal E. 2011. Climate change, water resources, and the politics of adaptation in the Middle East and North Africa. *Climatic Change* 104: 599–627.

Speybroeck J, Bonte D, Courtens W, Gheskiere T, Grootaert P, Maelfait JP, Mathys M, Provoost S, Sabbe K, Stienen EWM, Van Lancker V, Vincx M, Degraer S. 2006. Beach nourishment: an ecologically sound coastal defence alternative? A review. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 16(4): 419–435.

Steffen W, Grinevald J, Crutzen P, McNeill J. 2011. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* 369(1938): 842–867.

Steiger R, Mayer M. 2008. Snowmaking and climate change: future options for snow production in Tyrolean ski resorts. *Mountain Research and Development* 28(3-4): 292–298.

Steiger R. 2010. The impact of climate change on ski season length and snowmaking requirements in Tyrol, Austria. *Climate Research* 43: 251–262.

Stiller C, Svensson AM, Rosenberg E, Møller-Holst S, Bünger U. 2009. Building a hydrogen infrastructure in Norway. *World Electric Vehicle Journal* 3: 104–113.

Stinson D. 2010. Integrating climate change and environmental assessment: Canadian experiences. *IAIA Symposium on Climate Change and Impact Assessment. Washington, DC, November 15-16, 2010*. https://www.iaia.org/IAIA-Climate-Symposium-DC/proceedings.aspx (4.10.14).

Stocker TF, Qin D, Plattner GK, Tignor M, Allen SK, Boschung J, Nauels A, Xia Y, Bex V, Midgley PM. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge-New York.

Stringer LC, Dyer JC, Reed MS, Dougill AJ, Twyman C, Mkwambisi D. 2009. Adaptations to climate change, drought and desertification: local insights to enhance policy in southern Africa. *Environmental Science & Policy* 12: 748–765.

Stripple H. 2001. *Life cycle assessment of road: a pilot study for inventory analysis. Second revised edition*. IVL Svenska Miljoeinstitutet, Stockholm.

Sudo T. 2010. Climate change policy making and SEA in Indonesia. *IAIA Symposium on Climate Change and Impact Assessment. Washington, DC, November 15-16, 2010*. http://www.iaia.org/iaia-climate-symposium-dc/proceedings.aspx (12.10.14).

Sukhija BS. 2008. Adaptation to climate change: strategies for sustaining groundwater resources during droughts. En: Drangoni W, Sukhija BS. (Eds.) *Climate change and groundwater*. Geological Society Special Publications, London, pp. 169–181.

Sutton WR, Srivastava JP, Neumann JE, Strzepek KM, Droogers P. 2013a. *Reducing the vulnerability of Albania's agricultural systems to climate change: impact assessment and adaptation options*. World Bank, Washington, DC.

Sutton WR, Srivastava JP, Neumann JE, Droogers P, Boehlert BB. 2013b. *Reducing the vulnerability of Uzbekistan's agricultural systems to climate change: impact assessment and adaptation options*. World Bank, Washington, DC.

Sutton WR, Srivastava JP, Neumann JE, Iglesias A, Boehlert BB. 2013c. *Reducing the vulnerability of Moldova's agricultural systems to climate change: impact assessment and adaptation options*. World Bank, Washington, DC.

Sutton WR, Srivastava JP, Neumann JE, Strzepek KM, Boehlert BB. 2013d. *Reducing the vulnerability of the Former Yugoslav Republic of Macedonia's agricultural systems to climate change: impact assessment and adaptation options*. World Bank, Washington, DC.

Swain S, Therivel R. 2014. Environmental impacts of civil emergency plans and their exemption from SEA. *Journal of Environmental Assessment, Policy and Management* 16, 1450027.

SwissRe. 2011. *The hidden risks of climate change: An increase in property damage from soil subsidence in Europe*. Swiss Reinsurance Company Ltd, Zurich.

TaeWoo R, Ja-Choon K., Dong-Sung C, Yeo-Chang Y. 2014. Contingent feasibility for forest carbon credit: Evidence from firms. *Journal of Environmental Management* 144: 297–303.

Tambo JA. 2016. Adaptation and resilience to climate change and variability in north-east Ghana. *International Journal of Disaster Risk Reduction* 17: 85–94.

Tanaka SK, Tingju Z, Lund JR, Howitt RE, Jenkins MW, Pulido MA, Tauber M, Ritzema RS, Ferreira IC. 2006. Climate warming and water management adaptation for California. *Climatic Change* 76: 361–387.

Taylor MAP, Philp ML. 2015. Investigating the impact of maintenance regimes on the design life of road pavements in a changing climate and the implications for transport policy. *Transport Policy* 41: 117–135

Tecniberia. 2015. *HueCO2. Huella de carbono de la construcción de obras públicas*. http://hueco2.tecniberia.es/descargas (6.2.16).

Tejeda JC, Alfaro de la Torre MC, Medellín P. 2014. Present status of the implementation of strategic environmental assessment in Mexico. *Journal of Environmental Assessment Policy and Management* 16(2): 1450021.

Tekelemichael Y. 1997. Current status of the environmental impact assessment system in Ethiopia. En: McCabe M, Sadler B. (Eds.) *Studies of EIA practice in developing countries*. United Nations Environment Programme, pp. 17-25. http://www.unep.ch/etb/publication/compendium/introMat.pdf (19.9.15).

Tendall DM, Gaillard G. 2015. Environmental consequences of adaptation to climate change in Swiss agriculture: an analysis at farm level. *Agricultural Systems* 132: 40–51.

Thomas CD, Anderson BJ, Moilanen A, Eigenbrod F, Heinemeyer A, Quaife T, Roy DB, Gillings S, Armsworth PR, Gaston KJ. 2013. Reconciling biodiversity and carbon conservation. *Ecology Letters* 16: 39–47.

TrainMoS. 2013. *Motorways of the Sea. Ten-T Program. TrainMoS Presentation (Project nº: 2011-EU-21004-S)*. http://www.trainmos.eu (6.2.16).

TRB. 2008. *Potential Impacts of Climate Change on U.S. Transportation*. Transportation Research Board. National Research Council of the National Academies. http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/sr/sr290.pdf (30.4.16).

Treloar GJ, Love PED, Crawford RH. 2004. Hybrid life-cycle inventory for road construction and use. *Journal of Construction Engineering snd Management* 130: 43–49.

Trines E. 2006. *Second informal dialogue on the role of LULUCF in the climate change response*. http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mecanismos-de-flexibilidad-y-sumideros/lulucf_02_tcm7-12392.pdf (13.08.15).

Twerefou DW, Chinowsky P, Adjei-Mantey K, Strzepek NL. 2015. The economic impact of climate change on road infrastructure in Ghana. *Sustainability* 7: 11949-11966.

Tyler S, Fajber L. 2009. *Land and water resource management in Asia. Challenges for climate adaptation*. Background paper for the Asia Regional Meeting of the Dialogue on Climate Change Adaptation for Land and Water Management, 19-21 January 2009, Hanoi. https://www.iisd.org/pdf/2009/asia_background_landwater.pdf (17.1.16)

T&E. 2005. *Road transport speed and climate change*. A note from Transport and Environment (T&E) for CARS21 WP on Integrated Approach. http://www.transportenvironment.org/publications/road-transport-speed-and-climate-change (16.4.16).

UIC. 2016. *Ecopassenger*. International Union of Railways. http://ecopassenger.org (6.2.15).

UICN. 2007. *Lineamientos para la aplicación de la Evaluación Ambiental Estratégica en Centroamérica*. Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza. San José.

UIP. 2010. *La Reducción del Riesgo de Desastres: Un instrumento para alcanzar los objetivos de desarrollo del milenio. Kit de Cabildeo para Parlamentarios*. Unión Interparlamentaria (UIP) - Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNISDR), Ginebra.

UN. 1992. *United Nations Framework Convention on Climate Change.* United Nations. https://unfccc.int/resource/docs/convkp/conveng.pdf (7.12.16).

UN. 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. United Nations. http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpeng.pdf (26.10.15).

UN. 2016. UN-REDD Programme. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)-United Nations Development Programme (UNDP)-United Nations Environment Programme (UNEP). http://www.un-redd.org (7.12.16).

Unbehaun W, Pröbstl U, Haider W. 2008. Trends in winter sport tourism: challenges for the future. *Tourism Review* 63(1): 36–47.

UNEP. 2008. Biodiversity and agriculture. Safeguarding biodiversity and securing food for the world. https://www.cbd.int/doc/bioday/2008/ibd-2008-booklet-en.pdf (12.12.16).

UNFCCC. 2006. *Technologies for adaptation to climate change.* United Nations Framework Convention on Climate Change. http://unfccc.int/resource/docs/publications/tech_for_adaptation_06.pdf (7.1.16).

UNFCCC. 2007. *Report on the African regional workshop on adaptation*. United Nations Framework Convention on Climate Change. http://www.fao.org/nr/climpag/pub/advance_unedited_african_wkshp_report.pdf (29.1.16)

UNFCCC. 2015. *Conference of the Parties. Twenty-first session. Paris, 30 November to 11 December 2015.* United Nations Framework Convention on Climate Change. https://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/l09r01.pdf (13.3.16).

Uriarte-Cantolla A. 2003. *Historia del clima de la Tierra*. Gobierno Vasco, Vitoria. 306 pp.

USACE. 2013. *Regulation No. 1100-2-8162. 31 December 2013. Incorporating sea level change in civil works programs*. US Army Corps of Engineers. Washington. http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerRegulations/ER_1100-2-8162.pdf (10.10.14).

USACE. 2014. *Technical Letter 1100-2-1. 30 June 2014. Procedures to evaluate sea level change: impacts, responses, and adaptation.* US Army Corps of Engineers. Washington DD. http://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerTechnicalLetters/ETL_1100-2-1.pdf (10.10.14).

USAID. 2013. *Addressing climate change impacts on infrastructure. Preparing for change*. United States Agency for International Development, Washington, DC.

USFS. 2009. *Climate change considerations in project level NEPA analysis*. U.S. Forest Service. http://www.fs.fed.us/emc/nepa/climate_change/includes/cc_nepa_guidance.pdf (10.10.14).

Vaissière AC, Levrel H. 2015. Biodiversity offset markets: What are they really? An empirical approach to wetland mitigation banking. *Ecological Economics* 110: 81–88.

Vajda A, Tuomenvirta H, Jokinen P. 2012. Observed and future changes of extreme winter events in Europe with implications for road transportation. *Proceedings of SIRWEC, May 22-25*. http://www.sirwec2012.fi/Extended_Abstracts/040_Vajda.pdf (16.10.14).

Van de Giesen N, Liebe J, Jung G. 2010. Adapting to climate change in the Volta Basin, West Africa. *Current Science* 98(8): 1033–1037.

Vandanjon PO, Coiret A, Muresan B, Fargier A, Dauvergne M, Bosquet R, Jullien A, Francois F, Labarthe F. 2012. Practical guidelines for Life Cycle Assessment applied to railways project. *International Symposium Life Cycle Assessment and Construction,* pp.144–153. Francia, julio de 2012.

Vandenberghe I, Berthet E. 2005. Life cycle assessment of acrylic road marking paints. *Double Liaison* 544: 37–43.

Van Teeffelen AJA, Opdam P, Wätzold F, Hartig F, Johst K, Drechsler M, Vos CC, Wissel S, Quétier F. 2014. Ecological and economic conditions and associated institutional challenges for conservation banking in dynamic landscapes. *Landscape and Urban Planning* 130: 64–72.

Vázquez OG. 2014. Derecho real de conservación ambiental: los bancos de conservación de la naturaleza. *12º Congreso Nacional de Medio Ambiente*. Madrid, 24–27 November 2014. http://www.conama11.vsf.es/conama10/download/files/conama2014/CT 2014/1896711802 Vazquez Asenjo.pdf (24.10.15).

VCS. 2013. *Agriculture, Forestry and Other Land Use (AFOLU) Requirements v3.4*. Verified Carbon Standard. http://www.v-c-s.org/sites/v-c-s.org/files/AFOLU Requirements, v3.4.pdf (30.10.15).

VCS. 2015. *VCS Standard. Requirements v3.5.* Verified Carbon Standard. http://www.v-c-s.org/sites/v-c-s.org/files/VCS Standard, v3.5(0).pdf (30.10.15).

Vega A, Calzada MA, Pascual I, Hernández A. 2008. Compactación y capacidad portante de cenizas de central térmica en terraplenes de carretera. *Revista Carreteras* 161: 45–53.

Vélez E. 2012. *Efectos del viento lateral en catenarias de trenes de alta velocidad.* Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI), Madrid. http://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/4fc8e634de6e3.pdf (6.7.16).

Verner D. 2012. *Adaptation to a changing climate in the Arab countries*. World Bank, Washington, DC.

Verocai I. 2011. Evolución de las prácticas de evaluación de impacto ambiental en América Latina. *Día de Iberoamérica. Conferencia IAIA 2011*. IAIA-BID-IFC-Banco Mundial. Puebla, 30 de mayo de 2011. http:// www.ifc.org/publications (5.10.14).

Vickers B, Trines E, Pohnan E. 2012. *Community guidelines for accessing forestry voluntary carbon markets*. FAO. http://www.fao.org/3/a-i3033e.pdf (26.07.15).

Villarroya A, Puig J. 2010. Ecological compensation and Environmental Impact Assessment in Spain. *Environmental Impact Assessment Review* 30: 357–362.

Villarroya A, Puig J. 2013. A proposal to improve ecological compensation practice in road and railway projects in Spain. *Environmental Impact Assessment Review* 42: 87–94.

VROM. 2007. *National programme for spatial adaptation to climate change.* Ministry of Housing, Spatial Planning and the Environment, Ministry of Transport, Public Works and Water Management, Ministry of Agriculture, Nature and Food Quality, Ministry of Economic Affairs. http://www.climatechangesspatialplanning.nl/gfx_content/documents/documentation/National_ Adaptation_ Strategy_The_Netherlands.pdf (14.11.14).

Walker S, Brower AL, Stephens RTT, Lee WG. 2009. Why bartering biodiversity fails. *Conservation Letters* 2(4): 149–157.

Walker M, Gibbard P, Lowe J. 2015. Comment on "When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary is stratigraphically optimal" by Jan Zalasiewicz et al., Quaternary International, 383, 196–203. *Quaternary International* 383: 204–207.

Wang Y, Morganand RK, Cashmore M. 2003. Environmental Impact Assessment of projects in the People's Republic of China: new law, old problems. *Environmental Impact Assessment Review* 23(5): 543–579.

Warren R, Benzie M, Arnell N, Nicholls R, Hope C, Klein R, Watkiss P. 2012. *Scoping study: Modelling the interaction between mitigation and adaptation for decision making*. UEA/Tyndall Centre, Stockholm Environment Institute, Walker Institute, University of Southampton, University of Cambridge. http://www.metoffice.gov.uk/media/pdf/t/9/AVOID_WS2_D1_39.pdf (7.6.16).

Warren FJ, Lemmen DS. 2014. *Canada in a changing climate: sector perspectives on impacts and adaptation*. Government of Canada. http://www.nrcan.gc.ca/sites/www.nrcan.gc.ca/files/ earthsciences/pdf/assess/2014/pdf/Full-Report_Eng.pdf (12.11.14).

Waters CN, Zalasiewicz J, Summerhayes C, Barnosky AD, Poirier C, Gałuszka A, Cearreta A, Edgeworth M, Ellis EC, Ellis M, Jeandel C, Leinfelder R, McNeill JR, Richter DB, Steffen W, Syvitski J, Vidas D, Wagreich M, Williams M, Zhisheng A, Grinevald J, Odada E, Oreskes N, Wolfe AP. 2016. The Anthropocene is functionally and stratigraphically distinct from the Holocene. *Science* 351: 6269.

Watkins J, Durning B. 2012. Carbon definitions and typologies in environmental impact assessment: greenhouse gas confusion? *Impact Assessment and Project Appraisal* 30(4): 296–301.

Watson RT, Noble IR, Bolin B, Ravindranath NH, Verardo DJ, Dokken DJ. 2000. *Land Use, Land Use Change, and Forestry.* IPCC. Cambridge University Press, Cambridge.

Wen L, Eglese R. 2016. Minimizing CO_2e emissions by setting a road toll. *Transportation Research Part D* 44: 1–13.

Wende W, Bond A, Bobylev N, Stratmann L. 2012. Climate change mitigation and adaptation in strategic environmental assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 32: 88–93.

West TO, Post WM. 2002. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: A global data analysis. *Soil Science Society of America Journal* 66: 1930–1946.

White P, Golden JS, Biligiri KP, Kaloush K. 2010. Modeling climate change impacts of pavement production and construction. *Resources, Conservation & Recycling* 54(11): 776–782.

White House. 2009. *Executive Order 13514. October 5, 2009. Federal leadership in environmental, energy and economic performance*. http://www.whitehouse.gov/assets/documents/2009fedleader_eo_rel.pdf (8.10.14).

White House. 2013. *The President's Climate Action Plan. June 2013*. Executive Office of the President. http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/image/president27sclimateactionplan.pdf (10.10.14).

Wiesmeier M, von Lützow M, Spörlein P, Geuß U, Hangen E, Reischl A, Schilling B, Kögel-Knabner I. 2015. Land use effects on organic carbon storage in soils of Bavaria: The importance of soil types. *Soil & Tillage Research* 146: 296–302.

Wilbanks TJ, Leiby P, Perlack R, Ensminger JT, Wright SB. 2007. Toward an integrated analysis of mitigation and adaptation: some preliminary findings. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change* 12(5): 713–725.

Wilby RL, Dessai S. 2010. Robust adaptation to climate change. *Weather* 65(7): 180–185.

Willekens M. 2011. Adaptation to climate change and strategic environmental assessment. IMCORE. https://imcore.files.wordpress.com/2009/10/adaptation-to-climate-change-and-sea-draft1.pdf (3.5.15).

Wistuba MP, Walther A. 2013. Consideration of climate change in the mechanistic pavement design. *Road Materials and Pavement Design* 14(1): 227–241.

Witta GB, Noëla MV, Birdb MI, Beetona RJS, Menziesc NW. 2011. Carbon sequestration and biodiversity restoration potential of semi–arid mulga lands of Australia interpreted from long–term grazing exclosures. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141: 108–118.

Wong PP, Losada IJ, Gattuso JP, Hinkel J, Khattabi A, McInnes KL, Saito Y, Sallenger A. 2014. Coastal systems and low-lying areas. En: Field CB, Barros VR, Dokken DJ, Mach KJ, Mastrandrea MD, Bilir TE, Chatterjee M, Ebi KL, Estrada YO, Genova RC, Girma B, Kissel ES, Ley AN, MacCracken S, Mastrandea PR, White LL. (Eds.) *Climate Change 2014: impacts, adaptation and vulnerability. Part A: Global and sectoral aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge-New York, pp. 361–409.

Woolsey P. 2012. *Consideration of Climate Change in Federal EISs, 2009-2011*. Center for Climate Change Law. Columbia Law School. https://web.law.columbia.edu/sites/default/files/microsites/climate-change/files/Publications/Students/Woolsey NEPA report.pdf (10.10.14).

World Bank. 2010a. *Economics of Adaptation to Climate Change: Mozambique.* World Bank, Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12748 (12.1.16)

World Bank. 2010b. *Economics of Adaptation to Climate Change: Samoa.* World Bank, Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12746 (12.1.16)

World Bank. 2010c. *Economics of Adaptation to Climate Change: Ethiopia*. World Bank, Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12504 (14.1.16)

World Bank. 2010d. *Economics of Adaptation to Climate Change: Vietnam*. World Bank, Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12747 (14.1.16)

World Bank. 2010e. *Economic of Adaptation to Climate Change: Bangladesh*, *Volume 1. Main Report*. World Bank, Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12837 (16.1.16)

World Bank. 2010f. *Economics of Adaptation to Climate Change: Ghana, Volume 1. Main Report.* World Bank, Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/13212 (16.1.16)

World Bank. 2010g. *Adaptation to Climate Change - Vulnerability Assessment and Economic Aspects: Plurinational State of Bolivia.* World Bank, Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/12744 (16.1.16)

World Bank. 2013a. Turkmenistan: overview of climate change activities. Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17551 (5.10.14).

World Bank. 2013b. Uzbekistan: overview of climate change activities. Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17550 (5.10.14).

World Bank. 2013c. Kazakhstan: overview of climate change activities. Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17549 (5.10.14).

World Bank. 2013d. Kyrgyz Republic: overview of climate change activities. Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17548 (5.10.14).

World Bank. 2013e. Tajikistan: overview of climate change activities. Washington. https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/17552 (5.10.14).

World Bank. 2014. OP 4.01 Environmental Assessment. http://web.worldbank.org (17.10.14).

Wreford A, Moran D, Adger N. 2010. *Climate change and agriculture. Impacts, adaptation and mitigation*. OECD, Paris, 135 pp.

WSDOT. 2011. *Climate impacts vulnerability assessment. Report.* Washington State. Department of Transportation. http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/B290651B-24FD-40EC-BEC3-EE5097ED0618/ 0/WSDOTClimateImpactsVulnerabilityAssessmentforFHWAFinal.pdf (18.11.14).

WSDOT. 2013a. *Guidance. project-level greenhouse gas evaluations under NEPA and SEPA*. Department of Transportation, Washington State. http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/8F4C392F-1647-45A7-A2CD-37FB79D45D62/0/ProjectGHGguidance.pdf (18.11.14).

WSDOT. 2013a. *Guidance for project-level climate change evaluations.* Washington State. Department of Transportation. http://www.wsdot.wa.gov/NR/rdonlyres/52471A20-C6FA-48DF-B1A2-8BB96271D755/ 0/WSDOT_Climate_Guidance_Mar_2013.pdf (18.11.14).

Wu J. Chang IS, Bina O, Lam KC, Xu H. 2011. Strategic environmental assessment implementation in China - Five-year review and prospects. *Environmental Impact Assessment Review* 31: 77–84.

Wunder S. 2008. Payments for environmental services and the poor: concepts and preliminary evidence. *Environment and Development Economics* 13: 279–297.

Ximénez de Embún J. 1963. *Diez temas sobre los árboles.* Servicio de Extensión Agraria. Ministerio de Agricultura, Madrid.

Xiong X, Grunwald S, Brenton D, Wade C, Harris WG, Comerford NB. 2014. Interaction effects of climate and land use/land cover change on soil organic carbon sequestration. *Science of the Total Environment* 493: 974–982.

Xu X, Tan Y, Yang G. 2013. Environmental impact assessments of the Three Gorges Project in China: Issues and interventions. *Earth-Science Reviews* 124: 115–125.

Xue JF, Pu C, Liu SL, Chen ZD, Chen F, Xiao XP, Lal R, Zhang HL. 2015. Effects of tillage systems on soil organic carbon and total nitrogen in a double paddy cropping system in Southern China. *Soil & Tillage Research* 153: 161–168.

Yi J, Hacking T. 2011. Incorporating climate change into environmental impact assessment: perspectives from urban development projects in South Korea. *Procedia Engineering* 21: 907–914.

Yi J, Hacking T. 2012. Gaps in EIA Incorporating Climate Change. *32nd Annual Conference of the International Association for Impact Assessment. Energy Future. The Role of Impact Assessment.* Oporto, 27 de mayo - 1 junio de 2012. http://www.iaia.org/conferences/iaia12/Final_Paper_Review.aspx (2.5.15).

Yohe GW. 2001. Mitigative capacity: the mirror image of adaptive capacity on the emissions side. *Climatic Change* 49: 247–262.

Young G, Zavala H, Wandel J, Smit B, Salas S, Jimenez E, Fiebig M, Espinoza R, Diaz H, Cepeda J. 2010. Vulnerability and adaptation in a dryland community of the Elqui Valley, Chile. *Climatic Change* 98(1–2): 245–276.

Yue Y, Wang T, Liang S, Yang J, Hou P, Qu S, Zhou J, Jia X, Wang H, Xu M. 2015. Life cycle assessment of High Speed Rail in China. *Transportation Research Part D 41*: 367–376.

Zalasiewicz J, Williams M, Smith A, Barry TL, Coe AL, Bown PR, Brenchley P, Cantrill D, Gale A, Gibbard P, Gregory FJ, Hounslow MW, Kerr AC, Pearson P, Knox R, Powell P, Waters C, Marshall J, Oates M, Rawson P, Stone P. 2008. Are we now living in the Anthropocene? *GSA Today* 18 (2): 4–8.

Zalasiewicz J, Williams M, Steffen W, Crutzen P. 2010. The new world of the Anthropocene. *Environmental Science & Technology* 44: 2228–2231.

Zalasiewicz J, Waters CN, Williams M, Barnosky AD, Cearreta A, Crutzen P, Ellis E, Ellis MA, Fairchild IJ, Grinevald J, Haff PK, Hajdas I, Leinfelder R, McNeill J, Odada EO, Poirer C, Richter D, Steffen W, Summerhayes C, Syvitski JPM, Vidas D, Wagerich M, Wing SL, Wolfe AP, Zhisheng A, Oreskes N. 2015. When did the Anthropocene begin? A mid-twentieth century boundary level is stratigraphically optimal. *Quaternary International* 383: 196–203.

Zapata CE, Andrei D, Witczak MW, Houston WN. 2007. Incorporation of environmental effects in pavement design. *Road Materials and Pavement Design* 8(4): 667–693.

Zayed T, Shahata K, Fares H, Chughtai F, Rahman S, Al-Braqawi H. 2014. Pavement marking. Concordia University-Infraestructure Canada. http://users.encs.concordia.ca/~zayed/pavement.html (8.7.16).

Zhang J, Kørnøv L, Christensen P. 2013. Critical factors for EIA implementation: Literature review and research options. *Journal of Environmental Management* 114: 148–157.

Zhang L, Zhuang Q, He Y, Liu Y, Yu D, Zhao Q, Shi X, Xing S, Wang G. 2016. Toward optimal soil organic carbon sequestration with effects of agricultural management practices and climate change in Tai-Lake paddy soils of China. *Geoderma* 275: 28–39.

Zhao M, Kong ZH, Escobedo FJ, Gao J. 2010. Impacts of urban forests on offsetting carbon emissions from industrial energy use in Hangzhou, China. *Journal of Environmental Management* 91: 807–813.

Zhu D, Ru J. 2008. Strategic Environmental Assessment in China: motivations, politics and effectiveness. *Journal of Environmental Management* 88(4): 615–626.

Anexos

Anexo 1. Consideración del cambio climático en la EIA en el ámbito internacional

Índice

1. Consideraciones generales 369
2. África 369
2.1. África Meridional 369
2.2. África Occidental 369
2.3. África Oriental 370
3. América del Norte 370
3.1. Canadá 370
3.2. Estados Unidos de América 375
4. Latinoamérica y el Caribe 382
4.1. Centroamérica 382
4.2. Caribe 384
5. Asia 384
5.1. Asia Central 384
5.2. Asia Oriental 385
5.3. Este de Asia 386
5.4. Sudeste de Asia 387
6. Europa 388
6.1. Europa comunitaria 388
6.2. Europa no comunitaria 396
7. Oceanía 396
7.1. Australia 396
7.2. Nueva Zelanda 399
7.3. Pacífico Sur 400

1. Consideraciones generales

En este Anexo se recoge el análisis de la consideración del cambio climático en la EA a nivel internacional, con la excepción de España, que es objeto de un análisis independiente y más detallado. Se ha optado por incluir esta información en un anexo para facilitar la lectura de la tesis, dejando en ella únicamente un resumen y conclusiones de este anexo.

2. África

2.1. África Meridional

La normativa de EIA de **Sudáfrica** es la Ley Nacional de Gestión Ambiental (NEMA) de 1998 (Government Gazette 1998). Aunque ha sido modificada en 2010 y 2014 (Government Gazette 2010, 2014), sigue sin incluir referencias directas al cambio climático. En 2008, una enmienda a la NEMA planteaba considerar el cambio climático en el procedimiento de evaluación, pero finalmente no fue incluida en la modificación de 2010 (Gilder et al. 2011, Boakye-Agyei 2010)

Gilder et al. (2011) analizan la incorporación del cambio climático a la EIA en Sudáfrica. Aunque en algunos procedimientos de EIA se está tomando en cuenta la mitigación y adaptación al cambio climático, sería preciso un reconocimiento formal de la importancia del cambio climático, incorporándolo a la normativa de EIA. Aunque no se incluya expresamente en la normativa, no quiere decir que el cambio climático pueda ser omitido en la EIA, al ser parte de la gestión ambiental integrada y base de un desarrollo sostenible, que debe ser respetuoso con el clima. Partiendo de que es un requerimiento implícito de la EIA, se proponen cuatro recomendaciones para su incorporación al procedimiento:

- Incluir el cambio climático cuando sea relevante en los EIS
- Identificar actividades que precisan EIA por sus impactos relacionados con el cambio climático.
- Incluir el cambio climático en instrumentos de gestión ambiental integrada.
- Desarrollar directrices nacionales o provinciales para facilitar la integración de consideraciones sobre mitigación y adaptación al cambio climático en la EIA.

2.2. África Occidental

La Agencia de Protección Ambiental (EPA) es desde su creación en 1994 la responsable de la aplicación de la EIA en **Ghana**. La EIA se ha aplicado a grandes proyectos de minería, presas o gas, pero sin considerar la mitigación de las emisiones de

dióxido de carbono. Amankwah (2013) analiza la situación en el país y propone la extensión de las regulaciones de EIA a pequeños proyectos o actividades como la deforestación, desbroces, minería de pequeña escala y las emisiones de los vehículos que pueden influir en el cambio climático.

Frey (2010) expone el caso de la EAE del Programa Nacional de Riego a Pequeña Escala de **Mali**, donde se ha incorporado la adaptación al cambio climático.

Ogbonna & Albrecht (2015) analizan el potencial de la EAE para la toma de decisiones en programas de adaptación al cambio climático en **Nigeria**.

2.3. África Oriental

Kamau & Mwaura (2013) estudian la consideración de la adaptación al cambio climático en los EsIA en **Kenia**. Concluyen que la integración del cambio climático en todos los EsIA se limita principalmente a la mera consideración de la información histórica sobre cambio climático en las áreas del proyecto y es muy escasa en cuanto a escenarios de predicción y probables impactos en los proyectos. La mayoría de profesionales indican que la integración de la adaptación al cambio climático en la EIA es una cuestión relevante, pero la forma de ejecución no está clara.

3. América del Norte

3.1. Canadá

El cambio climático es una prioridad ambiental en Canadá. Agrawala et al. (2010) consideraban que era probablemente el país más avanzado en cuanto a la incorporación de las consideraciones del cambio climático en la EA, si bien en los últimos años también Estados Unidos ha avanzado notablemente.

Gobierno Federal

Evaluación de impacto ambiental

Aunque la normativa de EIA (CEAA 2012) no incluye requisitos específicos, existen trabajos y directrices para la incorporación del cambio climático a la EIA. La Agencia Canadiense de Evaluación Ambiental (CEAA) considera que la EA es una herramienta que puede ayudar a reducir las emisiones canadienses de GEI. Por ello, elaboró un informe sobre cambio climático y EA (Lee 2001), que sirvió de base para las posteriores directrices de incorporación de las consideraciones del cambio climático en la EA (CEAA 2003), elaboradas por un comité federal-provincial-territorial presidido y apoyado por la CEAA. El documento proporciona a los profesionales directrices para la incorporación de las consideraciones del cambio climático en la EA de proyectos. Se

incluyen tanto las repercusiones del proyecto sobre las emisiones de GEI como la consideración de los impactos del cambio climático en el proyecto.

Las directrices surgen del reconocimiento por parte de las autoridades federales, provinciales y territoriales de la importancia de integrar los conocimientos y prácticas existentes en la planificación de los proyecto en su etapa más temprana. Con ello, se pretende aumentar la atención y sensibilización sobre las emisiones de GEI, estimular la búsqueda de métodos menos intensivos en emisiones para realizar los proyectos, ayudar a los promotores a minimizar el riesgo asociado a los impactos del cambio climático en los proyectos y asegurar al público que las consideraciones del cambio climático se están tomando en cuenta. Además, la incorporación de las consideraciones del cambio climático en la EIA puede ayudar a determinar si los proyectos son consistentes con las normas e iniciativas para la gestión de las emisiones de GEI, y pueden ayudar a los promotores en el uso de las mejores prácticas. Las tres principales cuestiones a considerar en la EA en referencia al cambio climático son:

1 ¿Cómo contribuirá el proyecto a la generación de GEI y al cambio climático?
2 ¿Cómo impactarán los efectos del cambio climático en el proyecto?
3 ¿Se ajusta el proyecto a los compromisos canadienses o provinciales en materia de cambio climático, tales como el Protocolo de Kioto de la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, el Plan Nacional de Cambio Climático de Canadá o el Plan de Acción de Cambio Climático de Alberta?

Existen otros documentos gubernamentales sobre cambio climático que prestan atención a la consideración de este tema en las infraestructuras de transporte y en la EA (Furgal 2008, Andrey et al. 2014)

Hazell (2010) analiza la efectividad de las evaluaciones ambientales realizadas por la CEAA como herramienta para abordar las prioridades ambientales federales, entre ellas el cambio climático. Concluye que la CEAA no ha actuado de de manera muy eficaz para abordar algunas de la prioridades ambientales del gobierno, como el caso de las emisiones de GEI, a las que se les ha prestado poca atención en la EA. Además el sistema no es eficaz al dejar fuera del procedimiento de evaluación ciertos proyectos que emiten grandes cantidades de GEI.

Stinson (2010) analiza la experiencia canadiense en relación a la integración del cambio climático en la EA.

1 Mejorar y promover el uso de las directrices. El uso de las Directrices de 2003 es poco fiable. Hay varias áreas en las se podrían mejorar:
- Relación con los escenarios climáticos actualizados
- Resultados de la reducción a escala regional
- Tratamiento de las incertidumbres en las proyecciones del cambio climático
- Incorporación de las mejores prácticas para cuantificación de GEI
- Orientación para calcular la significación de los impactos
- Forma de tratar la reducción de las emisiones globales

2 *Determinación de significación.* Los GEI tienen efecto a nivel global, no local, con una amplia gama de fuentes dispersas. Se podría argumentar que las emisiones de un solo proyecto tienen una contribución insignificante al cambio climático global. Podría utilizarse como punto de partida el umbral establecido como requisito para informar sobre las emisiones. No es realmente un umbral para saber si los efectos son significativos, pero si un nivel mínimo de emisiones que pueden justificar que se le preste atención.

3 *Mitigación o adaptación. ¿Cuál es el mecanismo correcto?* Quizá la EIA de proyectos sea más adecuada para abordar la adaptación a los impactos del cambio climático que la reducción de las emisiones de GEI. La EIA puede ser una oportunidad para garantizar que las medidas de adaptación están integradas en el proyecto Es preciso considerar si las metas de reducción de GEI pueden lograrse a través de la EIA o por medio de políticas generales de cambio climático.

4 *Cambios legislativos y reglamentarios.* La futura revisión parlamentaria de la *Canadian Environmental Assessment Act* puede servir para reformar la EIA, considerando aspectos como el uso de marcos de sostenibilidad para las evaluaciones, la incorporación de consideraciones socioeconómicas o la inclusión de los proyectos sujetos a las regulaciones de GEI a la lista de supuestos sometidos a EIA federal.

La EIA de infraestructuras puede entrar dentro de la jurisdicción federal, provincial o de ambas. Cuando están bajo jurisdicción federal o compartida es un requisito considerar los efectos del medio ambiente sobre el proyecto, que incluye los fenómenos meteorológicos extremos y el cambio climático. Para ello se siguen las directrices de la CEAA (2003). En proyectos bajo jurisdicción provincial también puede ser necesario considerar los efectos del cambio climático, en función de su naturaleza. Cuando se hace, por lo general se siguen las directrices CEAA (2003), según indica Thomas White (com. pers.), del Ministerio de Medio Ambiente de Columbia Británica (*British Columbia Ministry of Environment*) en la consulta realizada al respecto.

Un grupo de investigadores canadienses, con P. Byer a la cabeza, han abordado las incertidumbres a la hora de abordar el cambio climático en la EA.

Byer et al. (2007) presentan tres enfoques analíticos básicos, análisis de escenarios, análisis de sensibilidad, y análisis probabilístico, que los promotores podrían usar para la integración de los impactos del cambio climático y sus incertidumbres en sus evaluaciones ambientales, junto con un marco de referencia para juzgar las circunstancias que determinan qué método sería aplicable. El uso de estos tres enfoques se ilustra con un proyecto hidroeléctrico.

Byer et al. (2009) trata un tema similar. Consideran que aunque el cambio climático se ha convertido en una preocupación importante a nivel regional y mundial, sus incertidumbres a menudo se han citado como razón principal para retrasar muchas acciones de mitigación. Las revisiones de las EA han demostrado que los impactos del cambio climático se han tratado de forma inadecuada y que las incertidumbres se han abordado aún peor. Este artículo describe varios enfoques básicos para abordar y analizar el cambio climático dentro de las EA con un enfoque en sus incertidumbres.

El posterior informe de Byer et al. (2011) presenta los conceptos y metodologías para ayudar a los proponentes de proyectos a tomar decisiones sobre cómo adaptarse al cambio climático teniendo en cuenta las incertidumbres sobre el grado de cambio durante la planificación del proyecto. Recoge una investigación sobre 15 EA recientes de varios tipos de proyectos, encontrando que la mayoría se refieren a los impactos potenciales del cambio climático en sus respectivos proyectos, pero si abordarlos de una manera sistemática ni homogénea.

Se revisa también la literatura reciente relacionada con la incertidumbre de cómo se puede abordar en la toma de decisiones, tales como los modelos de decisión clásicos y análisis Bayesiano. El informe explica e ilustra el uso de estos métodos, junto con el manejo adaptativo para los problemas de uno y múltiples atributos. Se sugieren directrices para la incorporación de esta investigación a la práctica de EA. Colombo & Byer (2012) es un resumen del anterior informe.

Ohsawa & Duinker (2014) analizan la mitigación del cambio climático en la EIA en Canadá. El país dispone de directrices para evaluar el cambio climático desde hace más de una década (CEAA 2003), siendo frecuente que en la EIA se evalúen las emisiones de GEI y se proponga cierta mitigación. Los grandes emisores de GEI han propuesto medidas sustanciales, por lo general las últimas tecnologías para reducir las emisiones. Sin embargo, otras ideas propuestas son ambiguas y difíciles de analizar en términos de efectos reales. Además hay definiciones ambiguas y/o inconsistentes de los niveles de emisión de GEI y su significación. También es difícil de comprender la expresión de las emisiones de GEI utilizando porcentajes. Muchos promotores señalan que no es posible evaluar el impacto de las emisiones de GEI de cada proyecto sobre el cambio climático.

La vinculación entre políticas o planes y mitigación pertinente en cada proyecto es crucial para alcanzar los objetivos internacionales para estabilizar el clima. No se debe confundir esta vinculación con que sea irrelevante el impacto de un proyecto individual. El uso de inventarios regionales puede ser útil para superar esa idea de efectos irrelevantes. También el análisis de las emisiones por unidad de producto en la misma industria es útil para determinar la importancia del impacto de las emisiones de GEI.

Evaluación ambiental estratégica

Según señala Tara Frezza (com. pers.), de la CEAA, la normativa de EAE (CEAA 2010) requiere que la evaluación de las políticas, planes y programas analice como podrían afectar a cualquiera de los componentes del medio ambiente o a las metas y objetivos de la Estrategia Federal de Desarrollo Sostenible (FSDS) 2013-2016 (Environment Canada 2013). Uno de los cuatro temas prioritarios de la FSDS es abordar el cambio climático y la calidad del aire. En consecuencia, cualquier política de gobierno, plan o programa que pueda dar lugar a emisiones de GEI requiere un análisis de su impacto así como propuestas para la mitigación.

Las Directrices para la aplicación de la Directiva de Consejo de Ministros especifican que la EAE debe considerar si la propuesta afecta de forma directa o indireca a cualquiera de los componentes del medio ambiente o a las metas y objetivos de la Estrategia de Desarrollo Sostenible Federal, una de las cuales es hacer frente al cambio climático y calidad del aire.

De acuerdo con Thomas White (com. pers.), del Ministerio de Medio Ambiente de Columbia Británica, en la práctica la integración del cambio climático en la EAE de planes y programas está menos desarrollada que en la EIA.

Existen numerosas guías dedicadas a la incorporación de la adaptación al cambio climático en la planificación territorial:

- CEF-CBCL (2005). La guía tiene como objetivo ayudar a los planificadores a incorporar la adaptación al cambio climático en la planificación territorial de terrenos de propiedad municipal.
- Climate Change Planning Tools for First Nations Guidebooks (CIER 2006). Conjunto de seis guías que abarcan los impactos del cambio climático en la comunidad, vulnerabilidad, soluciones, acciones de adaptación y seguimiento.
- Bizikova et al. (2008). Guía para ayudar a los responsables de tomar decisiones a incorporar el cambio climático, los impactos, y las soluciones de adaptación y mitigación en sus iniciativas.
- ICLEI (2010). Marco basado en Canadá para ayudar a los gobiernos locales a desarrollar planes de adaptación que consideren los riesgos climáticos y las oportunidades para la comunidad.
- Ouranos (2010). Esta guía utiliza cinco pasos para ayudar a los municipios a identificar los riesgos climáticos, establecer prioridades de adaptación y aplicar estrategias eficaces de adaptación.
- Bowron & Davidson (2011). El objeto del manual es ayudar a las pequeñas comunidades canadienses a preparar y poner en marcha un Plan de Adaptación al Cambio Climático.
- Manitoba Government (2011). Guía para ayudar a la planificación del uso del suelo y asegurar que las comunidades se adaptan a los efectos más probables del cambio climático.
- CIP. 2011. Esta norma incluye dos elementos, una declaración que establece los principios de la práctica profesional responsable de la lucha contra el cambio climático y un marco que servirá de modelo para los planificadores en su práctica profesional.
- Richardson & Otero (2012). Describe los instrumentos de planificación que se utilizan en Canadá para ayudar a las comunidades a prepararse para el cambio climático, aumentar la capacidad de adaptación y aumentar la resiliencia. Está dirigido a personas y grupos interesados en la adaptación al cambio climático a nivel local, incluyendo planificadores, funcionarios de gobiernos locales, cargos electos, organizaciones comunitarias, residentes locales y líderes empresariales.
- Warren & Lemmen (2014). Este informe, una actualización de otro previo de 2008, se centra en la nueva información y conocimiento, la evaluación de los avances en la comprensión de los impactos del cambio climático y la adaptación desde una perspectiva sectorial, basándose principalmente en la literatura publicada hasta finales de 2012
- Adaptation Resource Kit (http://adaptationresourcekit.squarespace.com). Página web del *Columbia Basin Trust* donde se comparten experiencias y lecciones aprendidas en un proceso de adaptación en Columbia Británica.

Entre los casos concretos, Capano (2013) expone el marco de evaluación del riesgo por el cambio climático en la ciudad de Toronto.

Gobierno de Nueva Escocia (*Nova Scotia Government*)

El gobierno de Nueva Escocia, a través de su iniciativa ClimAdapt, ha generado varios documentos sobre consideración del cambio climático en la EA. El primero de ellos, una guía práctica para incorporar el cambio climático en la EA (Bell et al. 2003a), es similar al documento federal (CEAA 2003) y se redactó en paralelo. Aunque sus objetivos son similares, se destacan como diferencias que la guía federal (CEAA 2003) se centra en si el proyecto propuesto puede contribuir a las emisiones de GEI, y en si el cambio climático puede afectar negativamente al proyecto o influir en algunos aspectos del mismo, mientras que la guía ClimAdapt (Bell et al. 2003a) no se ocupa de cuestiones de mitigación de GEI y hace hincapié en la incorporación de consideraciones de cambio climático en el proceso de EIA, con énfasis en los efectos del proyecto sobre el medio ambiente.

Bell et al. (2003b) hacen una evaluación de su guía (Bell et al. 2003a) aplicándola a seis casos prácticos, para poner a prueba los procedimientos establecidos, la eficacia de la gestión del riesgo para hacer frente a la incertidumbre científica en lo que respecta al impacto del cambio climático, evaluar la eficacia de la guía en la utilización de modelos de cambio climático existentes, identificar deficiencias o limitaciones prácticas en la aplicación de la guía, identificar mejoras en que puedan ser necesarias, evaluar si la guía se puede utilizar como un marco genérico capaz de adaptarse a otros procesos de EA y examinar las oportunidades para incluir la guía como un recurso para la formación o como una referencia aprobada.

El Gobierno de Nueva Escocia ha publicado otra guía posterior (Nova Scotia Environment 2011), cuyo objetivo es complementar la guía anterior (Bell et al. 2003) y ayudar a los promotores a determinar si la consideración del cambio climático sería beneficiosa para su proyecto, y cómo y dónde incorporar el cambio climático en la EA de un proyecto.

3.2. Estados Unidos de América

Gobierno Federal

La norma que regula la EIA a nivel federal es la Ley Nacional de Política Ambiental (NEPA) de 1969, la primera norma que se dictó sobre EIA a nivel internacional. Su parte 1502 se dedica al EIS, no indicando nada sobre cambio climático. La NEPA es de aplicación a todas las agencias federales, mientras que los Estados disponen de normas propias basadas en esta ley.

En 1997 el Consejo de Calidad Ambiental (CEQ 1997) publicó un borrador de directrices para la incorporación del cambio climático en los documentos asociados a la NEPA.

En 2007 la Oficina Ejecutiva de Energía y Asuntos Ambientales de Massachusetts anunció una nueva política de emisiones de GEI para proyectos sometidos a examen en virtud de su Ley de Política Ambiental, que requiere que los proyectos cuantifiquen las emisiones de GEI e identifiquen medidas para evitarlas, minimizarlas o mitigarlas. Ese mismo año la Asamblea General de California aprobó la propuesta de ley SB 97, que reconoce el cambio climático como un factor ambiental importante que debe tenerse en cuenta en la EA. Ambas experiencias demostraron que era factible considerar las implicaciones de los proyectos sobre el calentamiento global a través de los procedimientos de EA existentes (Pyke & Batten 2008).

La edición anual del Código de Regulaciones Federales (CFR) recopila las normas generales y permanentes publicadas por los departamentos y agencias del Gobierno Federal. Se divide en 50 títulos que representan amplias áreas sujetas a regulación federal. El título 40 se dedica a protección del medio ambiente, y su capítulo V (partes 1500 a 1518) al CEQ.

En febrero de 2008 varias organizaciones (*International Center for Technology Assessment, Natural Resources Defense Council, Sierra Club*) presentaron una petición solicitando que se modificase el reglamento del CEQ para aclarar que el cambio climático debía incluirse en los documentos de EA.

Pyke & Batten (2008) consideran que el análisis de los efectos de las proyectos federales sobre el calentamiento global, tanto las emisiones resultantes como las implicaciones del cambio en las condiciones climáticas sobre el proyecto, debe ser una parte obligatoria de cualquier proceso de evaluación de acuerdo con la NEPA. Según estos autores la NEPA proporciona la autoridad y mecanismos necesarios para incluir inmediatamente la consideración de los efectos del calentamiento global, junto con otras cuestiones ambientales importantes ya consideradas en la EIA.

La Orden Ejecutiva 13514 (White House 2009) establece que se debe avanzar en la planificación integrada regional y local a través de varios mecanismos, entre ellos la identificación y análisis de los impactos del uso de la energía y sus fuentes alternativas en los EsIA de nuevas instalaciones federales, o su ampliación, bajo la NEPA.

En 2010 el CEQ presentó un proyecto de directrices para la consideración de los efectos en el cambio climático y las emisiones de GEI en de conformidad con la NEPA y el Reglamento CEQ. Este documento (CEQ 2010) explica cómo deben analizar las agencias federales los impactos ambientales de las emisiones de gases de efecto invernadero y el cambio climático cuando evalúan los impactos ambientales de una acción propuesta en virtud de la NEPA.

Las directrices proponen que se realice un análisis cualitativo y cuantitativo de las emisiones directas e indirectas de GEI cuando se estime una emisión superior a 25.000 toneladas de CO_2 equivalente al año o en proyectos a largo plazo con menores emisiones. Este valor no es un umbral que implique que los efectos son significativos,

sino un indicador de un nivel mínimo de emisiones de GEI que puede justificar un análisis detallado de los impactos por parte de la agencia responsable del proyecto. Las directrices no incluyen orientaciones o recomendaciones para las actividades de manejo del territorio.

El análisis ambiental y los documentos generados en el procedimiento de EIA de acuerdo con la NEPA deben proporcionar información relevante para la toma de decisiones sobre los efectos ambientales de la alternativa propuesta y las opciones razonables para mitigar esos impactos. Para ello se debe considerar:

- Los efectos derivados de las emisiones de GEI del proyecto.
- Los efectos del cambio climático sobre el proyecto, incluyendo su relación con el diseño, el impacto generado y las medidas de mitigación y adaptación propuestas.

No se pretende que la incorporación del cambio climático sea un nuevo componente a incorporar al análisis de los proyectos sometidos a evaluación, sino que es un factor más, potencialmente importante, a considerar.

Cuando una Agencia determine que es precisa una evaluación de los impactos asociados al cambio climático deberá proponer medidas tanto para la adaptación del proyecto como para mitigar las emisiones de GEI. El análisis realizado deberá reflejar la información científica disponible y el contexto jurídico y político. En este sentido, las directrices proporcionan herramientas prácticas y recogen el marco legal.

Una vez que estas directrices se publiquen de forma definitiva, el CEQ tiene la intención de revisarlas periódicamente, para reflejar la evolución de la legislación, la política y la ciencia en relación con el cambio climático.

Aunque el proyecto de directrices no es vinculante, las agencias federales han comenzado a incorporar la consideración del cambio climático y las emisiones de GEI en sus EsIA (Woolsey 2012). No obstante, el peso otorgado a estas directrices queda a discreción de cada agencia. La ausencia de directrices vinculantes ha llevado a varias agencias federales a desarrollar procedimientos propios para analizar el cambio climático en los EsIA. Los impactos específicos considerados y la metodología utilizada en el análisis varían mucho entre estas agencias Dada la ausencia de directrices vinculantes, al ser las del CEQ una propuesta, algunas agencias federales han preparado guías interna para evaluar el cambio climático en los estudios de impacto ambiental. Entre estas se pueden destacar:

- El **Departamento de Interior** cuenta con dos órdenes que abordan los impactos del cambio climático:
  - Orden 3226, de enero de 2009, sobre cambio climático y el Departamento de Interior, que requiere que todas las agencias del Departamento incluyan el análisis del cambio climático en sus EsIA y planes de gestión de recursos (Secretary of the Interior 2009).
  - Orden 3289, para abordar los impactos del cambio climático sobre el agua, tierra y otros recursos naturales y culturales de América (Secretary of the Interior 2010).

- **Directrices del Servicio Forestal** (USFS 2009), denominadas "consideraciones del cambio climático en el análisis NEPA a nivel de proyecto". Es una guía sobre la forma de considerar el cambio climático en proyectos donde se aplica la NEPA. Entre sus conceptos básicos están:

  - Los impactos del cambio climático incluyen los efectos del proyecto sobre el cambio climático global y los efectos del cambio climático sobre el proyecto propuesto.
  - La Agencia podrá proponer proyectos para aumentar la capacidad de adaptación de los ecosistemas que gestiona, mitigar los efectos del cambio climático sobre los ecosistemas, o para secuestrar carbono.
  - Actualmente no es posible cuantificar los efectos indirectos de los proyectos individuales o múltiples sobre el cambio climático global y, por lo tanto no se pueden determinar los efectos significativos de esos proyectos o alternativas sobre el cambio climático global.
  - Algunas propuestas de proyectos pueden presentar alternativas basadas en diferencias cuantificables en el almacenamiento de carbono y las emisiones GEI.

  Se deben considerar dos tipos de efectos del cambio climático:

  - Efecto del proyecto sobre el cambio climático (emisiones de GEI y ciclo del carbono).
  - El efecto del cambio climático en un proyecto propuesto

  Además de los reglamentos del CEQ y de los requerimientos de la NEPA, es importante considerar que algunas leyes y programas estatales pueden requerir una reducción, regulación o control de las emisiones de GEI. Estas directrices consideran que se puede reconocer que el cambio climático global podría afectar a la salud humana, que hay riesgos inciertos y desconocidos asociados al cambio climático global, y que los efectos finales sobre el cambio climático son el resultado de efectos incrementales acumulativos de muchas acciones, la mayor parte fuera del control de la USFS. Sin embargo también se debe reconocer que no se pueden discernir los efectos significativos sobre el cambio climático de las propuestas del USFS, dado el contexto de los proyectos y planes y la falta de efectos que pueden evaluarse adecuadamente con la actual ciencia, modelos y políticas. Por ello, sería difícil determinar directamente la importancia de los efectos de los GEI de un proyecto, y por lo tanto indirectamente en el cambio climático, ya que no hay actualmente leyes federales, normas regulatorias, directrices políticas o de gestión sobre la importancia de dichos efectos. Hasta que se adopten umbrales significativos aceptados con los que comparar las emisiones de GEI de un proyecto, no será factible determinar si tiene un efecto significativo en este factor.

- **Directrices de la Administración Federal de Aviación** (FAA 2012), actualizadas en enero de 2012, para la consideración de los GEI y el clima en proyectos sometidos a la NEPA. Esta guía indica que los EsIA elaborados por la FAA deben calcular las emisiones de GEI, pero no requiere ningún análisis sustantivo de los impactos potenciales de estas emisiones en el cambio climático. En su lugar, sugiere que el EsIA recoja las emisiones del proyecto como un porcentaje de las de Estados Unidos sin proporcionan una mayor discusión sobre el cambio climático, dada la falta de métodos científicos para determinar el impacto de una acción específica sobre el clima global

- La **Administración Federal de Carreteras** (FHWA 2010) tiene una guía provisional que indica que los departamentos estatales de transporte (DOT) deben incorporar los impactos del cambio climático cuando se realice un proceso de EIA bajo la NEPA, pero sin proporcionar criterios específicos para hacerlo. Este documento señala que los proyectos incluidos Programas de Mejora del Transporte (TIP) pueden ser seleccionados por su potencial para ayudar a reducir las emisiones de GEI del transporte o hacer que los sistemas de transporte sean más resilientes a los impactos del cambio climático. En este sentido los TIP también pueden considerar el cambio climático. De acuerdo con este documento, no hay Organizaciones de Planificación Metropolitana (MPO) o DOT que hayan utilizado formalmente las emisiones de GEI o la resiliencia al cambio climático

como criterios de selección de proyectos en los TIP. Algunas MPO están experimentando con el uso de las emisiones de GEI como medida para evaluar proyectos o paquetes de proyectos en el proceso de toma de decisiones. La Comisión Metropolitana de Transporte de San Francisco o el Consejo Regional de *Puget Sound* utilizan las emisiones de GEI en la evaluación de proyectos en sus Planes de Transporte a Largo Plazo. Otros organismos han considerado el uso de los impactos de las emisiones de GEI como factor en la evaluación de programas de subvenciones, como el Programa de Manejo de la Congestión y Mejora de la Calidad de Aire.

- El **Cuerpo de Ingenieros del Ejército** (USACE) tiene en marcha el programa de Evaluación Integral de Proyectos con Respecto los Cambios en el Nivel del Mar (CESL), que lleva a cabo una evaluación por etapas de la vulnerabilidad de los proyectos costeros de este organismo a los impactos derivados del cambio en el nivel del mar y las mareas y marejadas asociadas. Este tema ha pasado a considerarse prioritario para el USACE tras los daños causados por el huracán Katrina. Este organismo cuenta con dos documentos normativos al respecto, uno sobre la incorporación de los cambios del nivel del mar en los programas de obras civiles (USACE 2013) y otro sobre procedimientos para evaluar el cambio del nivel del mar (USACE 2014).

El Plan de Acción para el Clima (White House 2013) pretende reducir la contaminación por carbono, mover la economía hacia fuentes de energía limpia de fabricación estadounidense, y comenzar a disminuir los efectos del cambio climático. Se estructura en tres partes: (i) Reducir la contaminación de carbono en América; (ii) Preparar a los Estados Unidos para los impactos del cambio climático; (iii) Liderar los esfuerzos internacionales para enfrentar el cambio climático global.

Smith (2010) analiza la consideración del cambio climático en la NEPA, incluyendo un estudio de casos, análisis de normativa y documentos oficiales y jurisprudencia. Señala algunas excusas para no considerar el cambio climático como:

- No es necesario
- Lo hemos considerado fuera del documento
- No es previsible
- Es demasiado especulativo
- Somos sólo una pequeña parte del problema
- No podemos resolver el problema global ¿por qué hablar de ello?
- ¿Por qué preocuparnos por los osos polares si nuestro proyecto está situado en el desierto?

La parte 1508.7 del CFR define impacto acumulativo como el generado sobre el medio ambiente que resulta de los efectos incrementales de una acción cuando se añade a otras acciones pasadas, presentes o futuras razonablemente previsibles, independientemente de quien las realice. Los impactos acumulativos pueden derivarse de acciones individualmente menores pero colectivamente significativas, que tienen lugar durante un período de tiempo.

Smith (2010) considera que el impacto de las emisiones de GEI sobre el cambio climático es precisamente el tipo de análisis de impactos acumulativos que requiere la NEPA. Cita como ejemplo los estándares CAFE (normas de eficiencia de combustibles), que tienen un efecto individual escaso en el medio ambiente pero su efecto colectivo es significativo. Considera que los análisis de impactos acumulativos

en referencia al cambio climático suelen ser inadecuados, y plantea dos líneas de trabajo, ya señaladas en las directrices del CEQ (CEQ 2010):

- *Pregunta básica:* ¿Cuál es la contribución de GEI de mi proyecto?
  Resultado deseado: Analizar la contribución de GEI y analizar la reducción de la contribución al cambio climático mediante la mitigación de las emisiones.
- *Preguntas básicas:* ¿Cómo puede el cambio climático afectar a mi proyecto? ¿Cómo puede el cambio climático afectar a recursos afectados por mi proyecto?
  Resultados deseados: Preparar adecuadamente un área de proyecto/plan ante el carácter inevitable del cambio climático (por ejemplo adaptación); analizar adecuadamente los impactos del cambio climático sobre los recursos.

El Centro de Derecho del Cambio Climático (CCCL) ha elaborado una base de datos con información de 227 EsIA que incluyen impactos relacionados con el cambio climático, que abarca los años 2009 a 2011 (Woolsey 2012). La base de datos registra los datos del proyecto y analizan y clasifica los impactos relacionados con el cambio climático considerados en cada EsIA. La base de datos identifica varias categorías de impactos relacionados con el cambio climático, que se basan en Gerrard (2008):

- *Impactos operacionales directos.* Incluye las emisiones de GEI de las chimeneas de las centrales eléctricas, las emisiones de calefacción de los edificios, las emisiones de los procesos de minería y perforación, y las emisiones resultantes de los impactos sobre los sumideros de carbono, como los bosques, los suelos y tierras agrícolas.
- *Electricidad adquirida.* Incluye los GEI emitidos en la generación de electricidad que se produce fuera del lugar, y que es comprada por la instalación.
- *Viajes inducidos.* Abarca las emisiones de vehículos y cualquier viaje asociado a la construcción y operación del proyecto, o el transporte de mercancías desde y hacia el proyecto.
- *Impactos en la construcción*: Cubre las emisiones de extracción y fabricación de los materiales de construcción, y de los equipos utilizados en la obra.
- *Impacto del cambio climático sobre el proyecto*. Incluye los efectos del aumento del nivel del mar y las capas freáticas, el aumento de las inundaciones, fenómenos meteorológicos extremos, mayores variaciones de temperatura o escasez de agua, y las actuaciones necesarias para adaptarse a los cambios climáticos.

La mayoría de las agencias federales están considerando ya el cambio climático en sus EsIA, pero los impactos específicos evaluados y la metodología utilizada en su análisis varían mucho entre ellas. Mientras que algunas agencias calculan exhaustivamente las emisiones utilizando datos concretos, otros ofrecen sólo estimaciones muy generales o concluyen que las emisiones no son lo suficientemente importantes como para justificar su cálculo. Algunas agencias incluyen los impactos indirectos, como la electricidad comprada y los viajes inducidos, pero muchas otras no lo hacen. El análisis de los impactos del cambio climático también es muy variable. Mientras que algunos EsIA destacan la incertidumbre científica sobre el alcance y la naturaleza de los futuros impactos climáticos, otros proporcionan proyecciones de potenciales impactos a largo plazo en el nivel local, regional y nacional.

El USBR presta más atención a los impactos climáticos sobre el suministro de agua que a las emisiones, mientras que el USFS Servicio Forestal se centra en los sumideros de carbono y pasa por encima los viajes inducidos. La investigación revela una gran variabilidad en el alcance y metodología aplicada en los EsIA al abordar los impactos del cambio climático. Difieren los métodos utilizados por las agencias para calcular las emisiones y para evaluar su importancia, los tipos de impactos indirectos abordados y el grado en el que se incluyen los impactos del cambio climático sobre el proyecto. Aunque el tratamiento del cambio climático en la EIA se encuentra todavía en las primeras etapas de desarrollo, muchas agencias federales están empezando a incluir un análisis más exhaustivo de los impactos del proyecto sobre el cambio climático y de los impactos del cambio climático sobre el proyecto.

Christopher (2008) analiza como la EIA, un proceso de toma de decisiones ambientales, puede analizar y discutir las cuestiones del cambio climático, centrándose en las leyes de los Estados Unidos y en su jurisprudencia, aunque con conclusiones aplicables con carácter general. Señala la ambigüedad del concepto "significativo" al referirse a un impacto ambiental, concepto que a menudo es más un reflejo de la realidad política que de un umbral científico preciso. No existe una fórmula o un conjunto de estándares objetivos para determinar cuando un impacto es significativo. Señala una sentencia donde se indica que se producen impactos significativos siempre que exista una probabilidad razonable de que se produzcan efectos sobre la calidad del medioambiente más que moderados.

Los impactos generalizados del cambio climático y el enorme volumen de emisiones de GEI a escala mundial impiden un cálculo preciso de la significación de los impactos. Sin embargo, esto no debe impedir la consideración del cambio climático en la EIA. Desde un punto de vista matemático hay una probabilidad razonable de que un aumento de las emisiones de GEI produce un cierto grado de cambio climático, aunque es menos seguro si el impacto es "más que moderado" únicamente debido al plan o proyecto analizado.

La determinación de si un impacto ambiental es significativo también debe tener en cuenta el deber de la EIA de evaluar los impactos acumulativos, que pueden ser individualmente menores pero colectivamente significativos.

Este autor (Christopher 2008) considera probable que gran parte de la resistencia al uso de la EIA como medio para hacer frente al cambio climático sea un "choque de lo nuevo". El escepticismo administrativo puede surgir porque el cambio climático no es local y no resulta familiar para muchos profesionales de la EIA. Sin embargo, con el desarrollo de casos prácticos y orientaciones técnicas, su aplicación puede ser similar al de cualquier otra área de estudio de la EIA.

Estado de Washington

El Departamento de Transportes del Estado de Washington (WSDOT) presta especial atención a la adaptación y preparación al cambio climático. Su objetivo es la construcción de un sistema de transportes más resiliente y sostenible, clave para mantener la infraestructura de Washington segura y fiable. Existen varios documentos de interés preparados por este organismo:

- WSDOT (2011). Informe de evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático.
- WSDOT (2013a). Guía para la evaluación de GEI a nivel de proyecto, de acuerdo con la NEPA y la SEPA (*State Environmental Policy Act*).
- WSDOT (2013b). Guía para evaluación del cambio climático a nivel de proyecto.

4. Latinoamérica y el Caribe

Todos los países de América Latina disponen de sistemas institucionales y normativa de EIA, algunos desde los años 1970. En la década 2001-2011 la EIA avanzó significativamente en algunos países de la región, con una tendencia general a complementar la normativa y revisar o perfeccionar los procedimientos, en base a la práctica adquirida (Verocai 2011). Sánchez-Triana & Enríquez (2007) recogen un análisis comparativo de los sistemas de EIA en Latinoamérica.

4.1. Centroamérica

En los lineamientos para la aplicación de la EAE en Centroamérica (UICN 2007) se incluyen algunas recomendaciones para la consideración del cambio climático. Señalan que para los impactos globales y regionales (como el cambio climático) se podrá hacer un pronóstico de los flujos de tráfico y de las emisiones en relación con las metas de las políticas nacionales e internacionales. En el caso de los locales, se podrá hacer una optimización, de manera aproximada, del trazado de la infraestructura a través de estudios de campo. Entre los impactos estratégicos más importantes en el diseño y evaluación de alternativas a considerar en la planificación del transporte están el cambio climático, uso de energía y emisiones de carbono, que puede variar según la decisión estratégica tomada (por ejemplo fomento del transporte por carreteras o ferrocarril).

México

La EIA está regulada en la Sección V de la Ley General del equilibrio ecológico y la protección al ambiente (Cámara de Diputados 2014a). La ley se promulgó en 1988, pero ha sufrido modificaciones a lo largo del tiempo. En los años 2011 y 2012 se incorporaron algunas modificaciones con referencias al cambio climático, ninguna específicamente en la Sección V.

El Reglamento de esta Ley en materia de EIA (Cámara de Diputados 2012) no incluye ninguna alusión concreta al cambio climático.

La Ley General de Cambio Climático (Cámara de Diputados 2014b) no cita la EA, pero incluye numerosas referencias a las infraestructuras, estableciendo medidas de adaptación y mitigación. Entre las políticas y acciones de mitigación para el **s**ector transporte (artículo 34) están:

a) Promover la inversión en la construcción de ciclovías o infraestructura de transporte no motorizado, así como la implementación de reglamentos de tránsito que promuevan el uso de la bicicleta.

b) Diseñar e implementar sistemas de transporte público integrales, y programas de movilidad sustentable en las zonas urbanas o conurbadas para disminuir los tiempos de traslado, el uso de automóviles particulares, los costos de transporte, el consumo energético, la incidencia de enfermedades respiratorias y aumentar la competitividad de la economía regional.

c) Elaborar e instrumentar planes y programas de desarrollo urbano que comprendan criterios de eficiencia energética y mitigación de emisiones directas e indirectas, generadas por los desplazamientos y servicios requeridos por la población, evitando la dispersión de los asentamientos humanos y procurando aprovechar los espacios urbanos vacantes en las ciudades.

d) Crear mecanismos que permitan mitigar emisiones directas e indirectas relacionadas con la prestación de servicios públicos, planeación de viviendas, construcción y operación de edificios públicos y privados, comercios e industrias.

e) Establecer programas que promuevan el trabajo de oficina en casa, cuidando aspectos de confidencialidad, a fin de reducir desplazamientos y servicios de los trabajadores.

f) Coordinar, promover y ejecutar programas de permuta o renta de vivienda para acercar a la población a sus fuentes de empleo y recintos educativos.

g) *Desarrollar instrumentos económicos para que las empresas otorguen el servicio de transporte colectivo a sus trabajadores hacia los centros de trabajo, a fin de reducir el uso del automóvil.*

En las sesiones de trabajo de Día de Iberoamérica (IAIA 2011) se analizó el papel de la EA como instrumento de cara al cambio climático. Entre las conclusiones más destacables están:

- En México el tema central en cuanto al cambio climático es la adaptación.
- Se debe impulsar que los promotores internalicen las externalidades ambientales a través de la implementación de medidas de compensación y mitigación.
- Desde sus inicios en 1972, la CEPAL ha evaluado los impactos económicos, ambientales y sociales de los desastres naturales, que año tras año parecen ser mayores. Por esta razón se considera que la gestión del riesgo-desastre debería incorporarse en forma sistemática en las evaluaciones de impacto ambiental
- Se expuso un caso de una EAE realizada por el SEMARNAT sobre la estrategia de desarrollo sustentable y cambio climático del Estado de Michoacán,

Respecto a la EAE, Tejeda et al.(2014) analizan su implementación en México, pero sin referencias específicas al cambio climático.

4.2. Caribe

El CARICOM y el SPREP han realizado una guía sobre la integración de la adaptación al cambio climático en la EIA en las regiones del Caribe y Sur del Pacífico (CARICOM-SPREP 2004). De acuerdo con este documento, la incorporación de las consideraciones del cambio climático en el proceso de EIA en los Estados de la CARICOM se puede lograr a través de la adopción de las siguientes medidas:

- Revisión de la definición de la EIA incluyendo la consideración del cambio climático.
- Establecimiento de procedimientos formales de EIA cuando no existan.
- Criterios claros para las fases se *screening* y *scoping*, que aseguren la identificación de los impactos significativos del cambio climático.
- Directrices claras de EIA para la preparación de los EsIA, que pueden incluir unos términos de referencia para abordar consideraciones de adaptación al cambio climático.
- Criterios claros sobre la cualificación, habilidades, conocimientos y experiencia que deben poseer las personas que llevan a cabo las EIA.

En este mismo documento se analiza cada uno de los países del Caribe y su normativa de EIA.

5. Asia

5.1. Asia Central

Turkmenistán aprobó su Estrategia Nacional de Cambio Climático en 2012, donde establece el marco normativo para lograr una resiliencia climática y economía de bajas emisiones, y recoge medidas para garantizar la mitigación y adaptación en sectores económicos clave. Pese a los avances hay retos como la falta de coordinación, armonización y aplicación de la normativa (World Bank. 2013a). **Uzbekistán** no tiene política sobre cambio climático (World Bank. 2013b). **Kazajstán** tiene una serie de estrategias clave y planes de acción que resumen las orientaciones estratégicas para las acciones nacionales de mitigación y adaptación al cambio climático. El gobierno ha aprobado recientemente la Estrategia de Kazajstán 2050, enfocada principalmente al sector de la energía (World Bank. 2013c). La Estrategia Nacional para el Desarrollo Sostenible 2013-17 de **Kirguistán** recoge la necesidad de asegurar la EIA de proyectos de desarrollo y comerciales. No existe suficiente coordinación entre documentos legislativos, y hay una falta de aplicación y cumplimiento de las políticas y leyes (World Bank. 2013d). **Tayikistán** aprobó en 2003 un Plan de Acción Nacional para la Mitigación y Adaptación al Cambio Climático, que es actualmente la única política a este respecto. La Entidad Estatal de Hidrometeorología está desarrollando una estrategia de adaptación al cambio climático para el período hasta 2030 y ha formado un grupo de trabajo al respecto (World Bank. 2013e).

5.2. Asia Oriental

China

China introdujo el concepto de EIA en 1973. La Ley de Protección Ambiental, aprobada provisionalmente en 1979 y definitivamente en 1989 (modificada en 2014), dio estatus legal a la EIA. En 1998 se establecieron las bases legales de la EIA de proyectos (PRC 1998), mientras que la EAE de planes se incorporó en la Ley de EIA de 2002 (PRC 2002), que unifica todas las regulaciones altamente dispersas y superpuestas sobre EIA (Beyer 2006, He 2013). Se ha criticado esta ley por los requisitos poco concretos para la participación pública y la escasa voluntad de analizar la política ambiental a nivel estratégico (Boakye-Agyei 2010). El Reglamento de EIA en la Planificación entró en vigor en 2009. Sobre la base de este marco legal, en las últimas décadas se ha producido un importante desarrollo en la aplicación de la EA.

Wang et al. (2003) señalan como principales problemas de la EIA la escasa atención a la contaminación del aire, agua y suelo, el que los organismos de protección del medio ambiente estén financiados por gobiernos locales orientados al desarrollo, la falta de consideración de alternativas y la falta de participación pública eficaz. Las políticas burocráticas y tensiones entre ministerios ambientales y no ambientales han limitado la aplicación de la EAE; los ministerios no ambientales no han realizado EAE o las han realizado por su cuenta sin la participación de la Administración Estatal de Protección Ambiental (Zhu & Ru 2008). Además hay escasa participación pública y falta de énfasis en el análisis social.

He (2013) considera que la actual Ley de EIA es un compromiso entre la teoría original y las condiciones políticas y sociales específicas de China. Sus limitaciones afectan al eficaz funcionamiento de la EIA en China y dificultan la integración del cambio climático. Las principales barreras para esta integración son:

- Ausencia de EIA a nivel de políticas y de ciertos planes, como los elaborados por el Consejo de Estado y los gobiernos a nivel de condado.
- Ausencia de alternativas. El sistema legal chino de EIA presta poca atención a las alternativas. Aunque no se excluyen, en la práctica el número de EIS tramitados que incluyen alternativas es muy bajo (el 20,83% de EIS tramitados en Shanghai entre 2003 y 2005).
- Ausencia de participación pública efectiva. Aunque la normativa requiere participación pública en la EIA su aplicación es escasa, existiendo una brecha entre las normas legales y la práctica.

La nueva Ley de Protección Ambiental (PRC 2014), vigente desde el 1 de enero de 2015, indica en su artículo 14 que en el desarrollo de políticas económicas y técnicas los departamentos pertinentes del Consejo de Estado y los gobiernos de las provincias, regiones autónomas y municipios directamente subordinados al Gobierno Central deberá tener en cuenta su impacto ambiental, y solicitar opiniones de expertos y partes interesadas pertinentes. No implica un procedimiento de EIA, pero si incorpora la idea de la evaluación de impacto en políticas. El artículo 19 indica que la elaboración de

planes de desarrollo y proyectos de construcción con impactos ambientales estará sujeta a EIA, sin establecer excepciones. Respecto a la participación pública, puede destacarse la reciente celebración (marzo de 2014) de una conferencia sobre promoción de la participación pública en la evaluación del impacto ambiental, y un seminario internacional sobre la participación pública ambiental (agosto de 2014).

Bina et al. (2009) señalan la necesidad calcular los contaminantes a escala local, regional o global según los casos, en especial con relación al cambio climático, que no es habitualmente considerado en la EIA de planes. Recomienda incluir en este tipo de EIA (en realidad una EAE) el cambio climático, indicando que eso requiere un cambio en la ley de protección ambiental y la ley de EIA.

Hasta el momento no existe una consideración del cambio climático en la EIA, pero se avanza en la eliminación de las barreras (He 2013). El país ha hecho progresos significativos para integrar las consideraciones del cambio climático en los programas de desarrollo socioeconómico nacionales (Boakye-Agyei 2010). De acuerdo con Wu et al. (2011), la EAE sólo ha cumplido con el objetivo de plantear medidas para prevenir o mitigar los impactos ambientales negativos, estando lejos de su objetivo primordial declarado en el artículo 1 de la Ley de EIA, prevenir cualquier impacto ambiental adverso resultado de los planes y proyectos propuestos y promover y facilitar el desarrollo armónico y equilibrado entre la economía, la sociedad y el medio ambiente.

Afectan a la eficacia de la EAE en China los procedimientos legislativos, administrativos, de gestión y de toma de decisiones. Con el rápido ritmo de desarrollo económico y social, cuestiones como el desarrollo sostenible, producción limpia, bajas emisiones de carbono, conservación de energía, construcción verde o energía renovable y limpia, deberán incluirse en el marco teórico de la EAE.

Li et al. (2013) proponen mecanismos para incluir la consideración del cambio climático en la EAE en China. Por su parte Deng & Wang (2014) proponen un marco e indicadores para incorporar el cambio climático a la EAE. Chang & Wu (2013) indican que la consideración del cambio climático se hace principalmente en la EAE, pero presenta problemas por falta de regulaciones, estándares, criterios y experiencia.

5.3. Este de Asia

República de Corea (Corea del Sur)

Yi & Hacking (2011) analizan la incorporación del cambio climático a la EIA en la República de Corea**.** En 2009 el Ministerio de Medio Ambiente publicó una primera guía para la evaluación de GEI, modificada en 2011 para permitir una evaluación más precisa del cambio climático y las emisiones de estos gases. Esta guía establece que:

- Los promotores son los responsables de la evaluación de las emisiones de GEI del proyecto y las medidas adecuadas para reducirlas al mínimo.

- La evaluación de emisiones de GEI asociadas al proyecto, los objetivos de reducción y el efecto de cada medida de reducción deben ser presentados de la forma más cuantitativa posible.
- La metodología para calcular las emisiones, citas, referencias, etc., se debe presentar con claridad.

Estos principios se pueden aplicar a proyectos de desarrollo, urbanismo, parques industriales, transporte o turismo. La inclusión de la evaluación de emisiones de GEI en los EsIA no es un requisito legal, pero el comité de *scoping* puede decidir su inclusión, dependiendo de la naturaleza del proyecto, su tamaño y su importancia estratégica. Si la evaluación se considera innecesaria, debe ser justificada por escrito por el comité.

El contenido recomendado de la evaluación incluye una inspección del lugar, la estimación de las emisiones de GEI del proyecto, los objetivos de reducción de GEI, y las medidas propuestas. Se debe hacer hincapié en el estudio de la situación inicial del lugar donde se desarrollará el proyecto, ya que no sólo proporciona una lista de fuentes y sumideros de GEI sino que también sirve para poner de relieve la capacidad del proyecto para cumplir con las estrategias locales o regionales de cambio climático. Las directrices reconocen la importancia de la relación entre el nivel estratégico (políticas, planes y programas) y el nivel operacional (proyectos individuales)

5.4. Sudeste de Asia

Sok (2014) analiza la inclusión del cambio climático en **Camboya**. El marco legal de la EIA está establecido por la Ley de Protección del Medioambiente y Gestión de los Recursos Naturales de 1996, y el Sub-Decreto del Procedimiento de EIA de 1999. El cambio climático se ha considerado en algunos EIS pero en general solo se ha citado, sin análisis en profundidad. A menudo los EIS tienen falta de detalle y escasa calidad.

El sistema de EIA en **Filipinas** se estableció por el Decreto Presidencial 1586 de 1978, que establece que ninguna persona, sociedad o empresa podrá realizar u operar un proyecto o área crítica para el medio ambiente sin antes contar con un Certificado de Cumplimiento Ambiental. La plena aplicación de la EIA tuvo lugar a partir de la Proclama Presidencial 2146 de 1981, que define Proyectos Ambientalmente Críticos y Áreas Ambientalmente Críticas. En 2011 se publicaron las Directrices Técnicas de incorporación de la Reducción del Riesgo de Desastres y Adaptación al Cambio Climático (EMB 2011). En septiembre de 2014 tuvieron lugar unas jornadas para analizar la aplicación de estas Directrices.

Sudo (2010) analiza la situación de la política de cambio climático en **Indonesia** y destaca el interés de la EAE como herramienta para promover un desarrollo sostenible. Bhaktikul (2012) analiza el estado de conocimientos sobre cambio climático y adaptación en **Tailandia**, sin citar la relación con la EA.

6. Europa

6.1. Europa comunitaria

Unión Europea

Evaluación Ambiental Estratégica

La Directiva 2001/42/CE del Parlamento Europeo y del Consejo de 27 de junio de 2001 relativa a la evaluación de los efectos de determinados planes y programas en el medio ambiente no recoge ninguna alusión específica al cambio climático.

El Libro verde sobre adaptación al cambio climático en Europa (EC 2007) señala que la adaptación al cambio climático tiene que integrarse en la Directiva sobre EIA y en la Directiva sobre EAE, y el Libro blanco de la adaptación al cambio climático (EC 2009a) indica que la Comisión va a trabajar con los Estados miembros y las partes interesadas en el establecimiento de orientaciones y el intercambio de buenas prácticas para garantizar que se tengan en cuenta los impactos del cambio climático al aplicar la Directiva de EIA y la Directiva de EAE, así como las políticas de ordenación territorial.

El año 2009 la Comisión remite un informe al Consejo, al Parlamento Europeo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones sobre la aplicación y efectividad de la Directiva de EAE [COM(2009) 469 final] donde se incluyen varias referencias al cambio climático. A este respecto, se indica:

> "*Muchos Estados miembros indican que la falta de una metodología bien establecida para determinar impactos es un problema de importancia crucial. En la Directiva EAE, las cuestiones relacionadas con el cambio climático se consideran por separado, caso por caso, y sobre todo en relación con planes y programas que en principio pueden tener un impacto significativo sobre el clima, como son los relacionados con la energía o el transporte. No obstante, existe una tendencia creciente a conceder más importancia a las cuestiones relacionadas con el cambio climático en otros tipos de planes y programas.*
>
> *Algunos Estados miembros están desarrollando metodologías específicas para medir la emisión potencial de gases de efecto invernadero en determinados planes y programas; otros establecen un objetivo de "neutralidad en las emisiones de carbono" (es decir, la aplicación de planes y programas no debe tener como resultado un aumento de estas emisiones), o identifican los impactos en el cambio climático en términos de una reducción prevista de emisiones.*
>
> *Dada la falta de orientaciones específicas sobre la consideración de las cuestiones relacionadas con el cambio climático en la Directiva EAE, deberían desarrollarse directrices en ese sentido".*

Entre las posibilidades de mejora de la directiva, se propone la posibilidad de introducir algunas modificaciones de manera que se aborden mejor ciertas cuestiones como el cambio climático. También sería precisa una mayor orientación sobre la interpretación de la Directiva, que en las cuestiones relacionadas con el cambio climático pueden elaborarla la Comisión en colaboración con los Estados miembros.

Dentro del marco del proyecto IMCORE *(Innovative Management for Europe's Changing Coastal Resource)*, donde participan diversos países de la UE (Francia, Reino Unido, Bélgica, Irlanda y Holanda) se ha elaborado un documento sobre adaptación al cambio climático y EAE (Willekens 2011). Las conclusiones por países se detallan en los epígrafes dedicados a cada uno de ellos.

La Comisión Europea publicón en 2013 una guía para la integración del cambio climático y la biodiversidad en la EAE (EC 2013d), que plantea como recomendaciones clave comenzar a identificar los temas clave de forma temprana, con ayuda de las partes interesadas, y entender las cuestiones clave sobre el cambio climático, y cómo interactúa con los otros temas que deben evaluarse en la EAE.

Evaluación de impacto ambiental

De acuerdo con el Libro verde sobre adaptación al cambio climático en Europa (EC 2007), la adaptación al cambio climático tiene que integrarse en la Directiva sobre EIA y en la Directiva sobre EAE. El Libro blanco de la adaptación al cambio climático (EC 2009a) indica que la Comisión va a trabajar con los Estados miembros y las partes interesadas en el establecimiento de orientaciones y el intercambio de buenas prácticas para garantizar que se tengan en cuenta los impactos del cambio climático al aplicar la Directiva de EIA y la Directiva de EAE, así como las políticas de ordenación territorial.

La consideración del cambio climático en la EIA se ha incluido a partir de la Directiva 2014/52/UE del Parlamento Europeo y del Consejo de 16 de abril de 2014 por la que se modifica la Directiva 2011/92/UE, relativa a la evaluación de las repercusiones de determinados proyectos públicos y privados sobre el medio ambiente. En varios apartados recoge alusiones específicas a este tema, que no existían en la anterior Directiva 2011/92/UE. En las consideraciones que justifican la Directiva, existen dos alusiones concretas:

> *"En la última década, cuestiones medioambientales, como la eficiencia en el uso de los recursos y la sostenibilidad de los mismos, la protección de la biodiversidad,* ***el cambio climático*** *y los riesgos de accidentes y catástrofes, han adquirido mayor importancia en la elaboración de las políticas. Por tanto, deberían constituir también elementos importantes en los procesos de evaluación y toma de decisiones.*
>
> *El* ***cambio climático*** *seguirá perjudicando al medio ambiente y comprometiendo el desarrollo económico. A este respecto, procede evaluar el impacto de los proyectos en el clima (por ejemplo, emisiones de gases de efecto invernadero) y su vulnerabilidad ante el cambio climático".*

En el Anexo III, sobre criterios para determinar si ciertos proyectos han de someterse a EIA, el último apartado corresponde a:

> *"los riesgos de accidentes graves y/o catástrofes relevantes para el proyecto en cuestión incluidos los provocados por el* ***cambio climático****, de conformidad con los conocimientos científicos"*

Finalmente, en el Anexo IV, sobre información para el informe de EIA (estudio de impacto ambiental), se incluyen otra referencia:

> *"Una descripción de los posibles efectos significativos del proyecto en el medio ambiente, derivados, entre otras cosas, de lo siguiente:... el impacto del proyecto en el clima (por ejemplo, la naturaleza y magnitud de las emisiones de gases de efecto invernadero) y la vulnerabilidad del proyecto con respecto al cambio climático".*

La normativa comunitaria es de obligado cumplimiento para todos los estados miembros, lo que supone la obligatoriedad de incorporar la consideración del cambio climático en la EIA, de acuerdo con la Directiva 2014/52/UE, que deberá ser traspuesta a sus ordenamientos jurídicos. En la actualidad existen ya algunos estados miembros cuya normativa incluye referencias concretas a esta materia, como es el caso de España.

La Comisión Europea publicó en 2013 una guía para la integración del cambio climático y la biodiversidad en la EIA (EC 2013c), similar a la citada para la EAE. Destaca como cuestiones clave relacionadas: (i) identificar las cuestiones clave desde el principio, con la participación de autoridades y actores relevantes; (ii) determinar si el proyecto puede cambiar significativamente las emisiones de GEI y definir el alcance de las evaluaciones necesarias de GEI; (iii) ser claro acerca de los escenarios de cambio climático utilizados en la EIA e identificar las principales preocupaciones de adaptación y cómo interactúan con los otros temas que deben evaluarse en la EIA.

Con respecto a la mitigación, las principales preocupaciones se centran en los GEI. Un proyecto puede generar: (i) un incremento directo de las emisiones de GEI; (ii) un incremento en la demanda de energía, que produzca un incremento indirecto de las emisiones de GEI; (iii) unas emisiones de GEI inducidas, por ejemplo por el consumo de energía en la producción de materiales o su transporte; (iv) una pérdida de hábitats que proporcionan secuestro de carbono, por cambios de usos del suelo.

La EIA debe considerar tanto el impacto de un proyecto sobre el cambio climático (mitigación) como el impacto del cambio climático en el proyecto (adaptación), considerando cómo puede verse afectada la ejecución del proyecto por el cambio climático o cómo debería adaptarse el proyecto a un clima cambiante y a posibles eventos extremos. Esta guía destaca tres cuestiones fundamentales que se deben considerar al abordar el cambio climático y la biodiversidad:

- Largo plazo y naturaleza acumulativa de los efectos. Los enfoques para evaluar los efectos acumulativos del cambio climático en la EIA son:
  - Reconocer los efectos acumulativos desde el principio en el proceso de EIA.
  - Prestar atención a la evolución de la línea de base.
  - Distinguir entre magnitud e importancia y usar criterios de significación.
  - Siempre que sea posible, utilizar cadenas causales o análisis de redes.
- Complejidad de las cuestiones y relaciones causa-efecto
- Incertidumbre de las proyecciones.

Alemania

La Ley de EIA (*Gesetz über die Umweltverträglichkeits-prüfung* - UVPG) estipula que determinados proyectos públicos y privados, así como planes y programas deben someterse a EIA o EAE respectivamente. Estas evaluaciones ambientales están diseñadas para identificar, describir y evaluar los impactos de los proyectos, planes y programas en el medio ambiente de una manera adecuada y completa.

El Dr. Ritter, del Ministerio Federal de Medio Ambiente, Conservación de la Naturaleza, la Construcción y la Seguridad Nuclear (com. pers.) expone en la consulta realizada que la consideración del cambio climático no se toman en cuenta en la EIA, pero si en la EAE. Indica que al decidir sobre la aprobación de los proyectos, la autoridad competente debe tener en cuenta la EIA con miras a la protección del medio ambiente pero sólo en la medida prevista por la ley aplicable. Esto significa que el examen se lleva a cabo en la medida permitida por las leyes específicas. Los impactos sobre el clima no pueden ser tomados en cuenta, ya que es principalmente la legislación sectorial la que define las condiciones previas para la aprobación de proyectos. Esta opinión no concuerda con el actual marco legal definido por la Directiva 2014/52/UE, que obliga a incorporar el cambio climático a la EIA.

Este mismo consultado indica que en el marco de la EAE se realiza un informe ambiental que describe los impactos esperados sobre el medio ambiente, incluyendo el clima, así como las medidas previstas para evitar, mitigar o compensar en la medida de lo posible, los efectos adversos significativos debido a la aplicación de un plan o un programa. Entre los diferentes tipos de planes que requieren EAE se incluyen los planes regionales; su preparación a menudo incluye los aspectos de acción por el clima y mitigación del cambio climático. También señala que la consideración de los aspectos climáticos en la EAE influye en la aprobación de proyectos individuales y por lo tanto la aplicación de la EIA.

Helbron et al. (2011) plantean el empleo de indicadores para considerar la adaptación al cambio climático en el planeamiento territorial regional en Alemania.

Wende et al. (2012) analizan la consideración de los impactos del cambio climático en la EAE de planes de uso de la tierra en el estado alemán de Sajonia, y el este de Inglaterra. Indican que los países están poniendo en práctica objetivos de reducción de emisiones de CO_2 para limitar el calentamiento global pero esos objetivos nacionales de reducción no se traducen a la planificación regional, y no se consideran a través de la EAE, para cumplir con las obligaciones de reducción de emisiones del transporte, la energía, la vivienda, la agricultura o el sector forestal. En las regiones analizadas las EAE no tuvieron en cuenta los efectos del cambio climático a escalas mayores que el límite espacial del plan, y no se consideraron los objetivos de reducción de CO_2. Esto sugiere la necesidad de una mayor claridad en las obligaciones legales respecto a la consideración del cambio climático en la Directiva de EAE, de un

seguimiento de las emisiones de carbono, una orientación metodológica para incorporar los objetivos mundiales sobre el cambio climático a nivel regional y local, y una orientación sobre la buena ejecución de la consideración del cambio climático en la EA.

Estos autores consideran que la UE debería definir el concepto de "factores climáticos" con mayor claridad en la Directiva de EAE, sin plantear extensos nuevos requisitos en referencia al cambio climático. Destacan la necesidad de directrices para integrar los objetivos de protección del clima mundial a nivel regional y local, que contengan indicaciones prácticas para el planteamiento de alternativas "amigables con el clima" y para el desarrollo de medidas de prevención, reducción y compensación que garanticen un bajo impacto climático. La ordenación territorial y urbana y el sector del transporte tienen un enorme potencial en referencia a la energía y la reducción de GEI.

Jiricka et al. (2016) analizan la consideración del cambio climático en Alemania y Austria por medio de entrevistas a diferentes grupos de actores implicados.

Austria

Como se ha señalado, Jiricka et al. (2016) analizan la consideración del cambio climático en Alemania y Austria mediante entrevistas a diferentes actores implicados.

Dinamarca

Larsen et al. (2013) analizan como se consideran las incertidumbres en referencia al cambio climático en la EAE en Dinamarca. Concluyen que la EAE en este país no parece reconocer adecuadamente los problemas asociados a la incertidumbre con respecto al cambio climático, existiendo una brecha significativa entre la concepción teórica y la práctica real en relación con el reconocimiento y manejo de la incertidumbre de las consideraciones climáticas en los planes territoriales y sectoriales daneses.

Kørnøv & Wejs (2013) analizan los planes de adaptación al cambio climático, planes voluntarios adoptados por algunos municipios, y que no se están sometidos a EAE de acuerdo con la normativa danesa, según exponen por una confusión en la interpretación de la Directiva de EAE.

España

La situación en España se analiza de forma detallada en un capítulo independiente de la tesis, no incluyéndose en consecuencia en este anexo.

Francia

El Código de Medio Ambiente (*Code de l'environnement*) francés unifica en una sola norma la regulación de todos los aspectos ambientales. Como consecuencia, aunque no exista una alusión específica al cambio climático en los apartados dedicados

a EA, si existen numerosas referencias a este tema a lo largo del texto legal; de hecho, la lucha contra el efecto invernadero y la prevención de los riesgos asociados con el cambio climático se reconocen como prioridades nacionales.

El artículo R122-3 señala que el EsIA de infraestructuras de transporte deberá contener un análisis de los costos sociales de la contaminación y otros efectos nocivos y beneficios inducidos a la comunidad y los resultados del análisis requerido por el Código de los Transportes, y una evaluación del consumo de energía resultante de la explotación del proyecto, sobre todo de los viajes que entraña o evita.

El Código de los Transportes (*Code des transports*) señala en su artículo 1511-2 que los grandes proyectos de infraestructuras se evalúan en base a criterios que integran el impacto sobre el medio ambiente, la salud y la seguridad, permitiendo comparaciones dentro de el mismo modo de transporte y entre modos o combinaciones de modos.

La Ley 2010-788 crea los esquemas regionales de clima, aire y energía (SRCAE), para unificar en un solo documento los temas de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la adaptación al cambio climático, la lucha contra la contaminación del aire y la mejora de la calidad del aire mejora. En los SRCAE se debe incluir un análisis de la vulnerabilidad de la región al cambio climático, identificando los territorios y sectores de actividad más vulnerables y las necesidades de adaptación. También deben incluir orientaciones para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, lograr una mejora en la eficiencia energética y controlar la demanda de energía en el transporte (entre otros sectores), y directrices para la adaptación de los territorios y actividades al cambio climático.

La instrucción del Gobierno de 29 de julio de 2011 (DEVR1118472J) indica que los SRCAE no se deberán someter a EAE, para evitar cargas de trabajo adicionales.

Irlanda

El Departamento de Medio Ambiente, Patrimonio y Gobierno Local ha elaborado unas directrices para las autoridades regionales y las autoridades de planificación (Government of Ireland 2004) para la aplicación de la Directiva de EAE, con pocas referencias al cambio climático. Posteriormente se ha elaborado una guía específica de integración del cambio climático en la SEA (EPA 2015).

Malta

El Ministerio de Desarrollo Sostenible, Medio Ambiente y Cambio Climático (*Ministry for Sustainable Development, the Environment and Climate Change*) aprobó en julio de 2015 la Ley XVII de 2015 de Acción Climática (*Climate Action Act*), que no incluye referencias a la EA.

Países Bajos

Draaijers & van der Velden (2009) analizan la forma en que la Comisión Holandesa para la Evaluación Ambiental (NCEA) recomienda que se considere el cambio climático en la EA. La NCEA requiere que la EA preste atención a la mitigación, si las actuaciones propuestas contribuyen significativamente a la emisión de GEI, como por ejemplo proyectos industriales, centrales eléctricas, infraestructuras, cultivos en invernaderos, edificación, procesado de basuras, extracción de agua o aeropuertos. Se deben aportar datos de:

- Emisiones de GEI (no solo CO_2, también CH_4, N_2O y gases fluorados)
- Eficiencia energética y posibilidad de unir funciones, como reutilizar calor residual.
- Contribución para lograr los objetivos de reducción de emisiones de GEI.
- Emisiones relacionadas con entradas y salidas.

Respecto a la adaptación, si resulta un factor significativo, se solicita información sobre como la actuación puede responder a los impactos del cambio climático, como puede limitarse el riesgo de daños y como puede a la vez mantenerse o mejorarse la calidad de vida, la calidad ambiental y la seguridad. También se solicitan que medidas de adaptación podrían requerirse en el futuro. Es importante conocer como el proyecto puede agravar las consecuencias del cambio climático. Se recogen medidas específicas de adaptación por zonas de los Países Bajos. Se establecen tres horizontes de planificación, de 20, 50 y 100 años, para investigar los efectos del cambio climático.

Con respecto a la presentación, se aconseja que la EA contenga un apartado específico de cambio climático, ya que la mitigación y adaptación funcionan en una escala espacial y temporal diferente al del resto de temas considerados en la EIA, y exigen una integración de materias.

Para facilitar el proceso de adaptación climática en los Países Bajos, el Estado tomó la iniciativa de elaborar un programa nacional interministerial para la adaptación espacial al cambio climático (VROM 2007), que involucra al Estado y las partes cuyo compromiso es necesario y deseado. Todas las partes, es decir, los organismos gubernamentales, la comunidad empresarial, científicos y organizaciones de la sociedad civil, deben compartir la responsabilidad de desarrollar las actividades del programa, de manera que la protección contra el clima de los Países Bajos sea un reto colectivo.

Goosen et al. (2014) sostienen que para llegar a los profesionales de la ordenación del territorio, los aspectos climáticos deben asumir una perspectiva más amplia y prestarse más atención a la traducción de las consecuencias del cambio climático en los usos del suelo, para que puedan desempeñar un papel en los procesos de ordenación del territorio, donde gran parte de la adaptación al cambio climático se lleva a cabo. Desarrollan un Atlas Climático de Adaptación como herramienta para apoyar la toma de decisiones y los procesos de planificación.

Reino Unido

La EIA está regulada por la *"Town and Country Planning (Environmental Impact Assessment) Regulations 2011"*. En su apéndice 4 se recoge la información que deben incluir los EIS, donde no se indica nada específicamente sobre cambio climático. No obstante, el gobierno británico dispone de numerosos informes y documento sobre infraestructuras y cambio climático, dedicados principalmente a la adaptación y aumento de la resiliencia (DEFRA 2009, 2010a, 2010b, 2011, Royal Academy of Engineering 2011, Department for Transport 2014). La Agencia de Medio Ambiente dispone de varias guías relacionadas con el cambio climático, la planificación y la EAE:

- Environment Agency (2008). Guía sobre impactos del cambio climático y toma de decisiones en la planificación espacial. Se centra en la adaptación al cambio climático (en oposición a la mitigación del cambio climático), y presenta herramientas para ayudar a los planificadores en la realización de su propia evaluación del riesgo del cambio climático para las opciones de desarrollo.
- Environment Agency (2011). Guía práctica sobre EAE y cambio climático. Se plantea para responsables de planes, autoridades y consultores que participan en la EAE, y sugiere cómo las cuestiones del cambio climático pueden ser consideradas en la EAE en Inglaterra y Gales. Presenta información sobre causas y efectos del cambio climático y cómo pueden ser descritos y evaluados en la EAE. También describe cómo se pueden desarrollar medidas de adaptación y mitigación.

El Instituto de Gestión y Evaluación Ambiental (IEMA) ha elaborado dos concisos documentos sobre cambio climático y EA.

- Mitigación del cambio climático y EIA (IEMA 2010a). Se centra en la consideración de las emisiones de GEI: alcance, evaluación y mitigación, presentación de informes y seguimiento.
- Adaptación al cambio climático y EIA (IEMA 2010b). Proporciona información sobre principios de evaluación incluyendo opciones de desarrollo, adaptación del cambio climático, alcance, evaluación, significación, informes y seguimiento.

Hamada (2008) analiza el tratamiento que se da al cambio climático en los EsIA en el Reino Unido, indicando que si bien estas cuestiones han sido consideradas en el EIA, no influyen en la toma de decisiones; la mayoría de referencias no van más allá de una mención general, por ejemplo al objetivo de reducción de las emisiones de CO_2 en el Reino Unido. Por tipo de proyectos, los EsIA de carreteras y otras infraestructuras de transporte consideran más el cambio climático que otros. Las consultas realizadas a autoridades y consultores muestran como barreras el que consideran el cambio climático demasiado amplio e incierto para evaluarlo en la EIA, no solo por la naturaleza del aspecto a evaluar sino también por la utilidad de la EIA. Destaca como limitaciones de la EIA al considerar el cambio climático la evaluación de la incertidumbre o el impacto acumulativo. Algunas autoridades y consultores sugieren que el cambio climático debe ser tenido en cuenta en todos los niveles de la planificación como la EAE.

Wende et al, (2012) analizan la consideración de los impactos del cambio climático en la EAE de planes de uso de la tierra en el estado alemán de Sajonia, y el este de Inglaterra (véase el apartado dedicado a Alemania). Yi & Hacking (2012) analizan proyectos de desarrollo urbanístico en Reino Unido, concluyendo que la

incorporación del cambio climático en la EIA se encuentra todavía en su infancia. Los resultados de su revisión revelan que el cambio climático no ha sido debidamente abordado en los EsIA, que carecen de rigor científico y no logran predecir y evaluar las emisiones de GEI de los proyectos ni la influencia del cambio climático. Además, hay una falta de coherencia en el tratamiento del cambio climático en los EsIA. Plantean establecer protocolos y directrices para ayudar a los profesionales en la evaluación.

Suecia

El Código de Medio Ambiente sueco (Regeringskansliet 2000) incluye entre los aspectos a considerar en la EIA el clima, sin referencias concretas a la consideración del cambio climático. En las consultas realizadas, Michael Nordenberg, del Ministerio de Medio Ambiente (*Miljödepartementet*) señala que pueden ser necesarios cambios en el capítulo 6 de este Código, de acuerdo con la Directiva 2014/52/UE, para asegurar que se establece claramente que las EIA deberán considerar el cambio climático.

6.2. Europa no comunitaria

Crnčević et al. (2011) consideran que el sistema de planificación en **Serbia** debería tender hacia un mayor desarrollo de la EAE mediante la formulación de directrices especiales que consideren en particular el cambio climático.

En opinión de la ONG ucraniana *Environment-People-Law* (EPL 2014), dedicada al derecho ambiental, en **Ucrania** no se está teniendo en cuenta el impacto de las actividades sobre el cambio climático en la EIA. Se considera el impacto sobre el microclima, pero no sobre el cambio climático global. Según indica esta agrupación, las autoridades estatales consideran que una actividad concreta, aunque sea una gran empresa, no puede influir en el cambio climático global.

7. Oceanía

7.1. Australia

Gobierno de Australia

La EA se rige por la Ley de Protección de Medio Ambiente y Conservación de la Biodiversidad de 1999 (*Environment Protection and Biodiversity Conservation Act*). Los proyectos, desarrollos o actividades que tengan o sea probable que tengan impactos significativos deben contar con la aprobación del Ministerio de Medio Ambiente. Existe una guía sobre asuntos de importancia ambiental nacional (Australian Government 2013) donde no se incluye ninguna referencia al cambio climático.

Existe un exhaustivo informe de la dedicado al cambio climático en Australia elaborado por la *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO 2007), que dedica su capítulo 6 a la aplicación de las proyecciones climáticas en las evaluaciones de impacto y de riesgo, aunque sin referirse expresamente a la EIA.

El gobierno australiano ha elaborado un informe (Australian Government 2009) que evalúa la vulnerabilidad de la biodiversidad de Australia al cambio climático, cómo ayuda para la adaptación. Concluye que la biodiversidad de Australia está en riesgo por el cambio climático, incluso moderado y ya bajo estrés, por ejemplos la degradación de hábitats, el cambio en los regímenes de incendios y las especies invasoras. El cambio climático es probable que exacerbe estos factores estresantes existentes y añada tensiones adicionales, como la disminución de la disponibilidad de agua.

Australia Occidental (*Western Australia*)

La Autoridad de Protección Medioambiental (EPA) publicó una guía para ayudar en la elaboración de EsIA, dedicada a principios, factores y objetivos (EPA 2010). Entre los factores se incluyen los GEI, siendo el objetivo asociado minimizar las emisiones a niveles tan bajos como sea posible y considerar compensaciones para reducir las emisiones acumuladas. Sok (2014) analiza la forma en que se considera el cambio climático en la EIA en Australia Occidental. El principal aspecto considerado son las emisiones de GEI; aunque figuran en la guía citada, esto no garantiza su consideración, ni se aportan detalles de cómo deben hacerse. La consideración del cambio climático es discrecional, dependiendo de cada caso, y con juicios muy diferentes entre unas propuestas y otras. Propone cuatro líneas clave para que la EIA en Australia Occidental sea más efectiva en cuanto a consideración del cambio climático:

- Nuevas iniciativas políticas y legislativas
- Directrices específicas sobre cómo se debe considerar el cambio climático
- Formación de acuerdo con las nuevas políticas y directrices
- Empleo de la EAE, que permite una mejor consideración del cambio climático

Nueva Galés del Sur (*New South Wales*)

La Oficina de Medio Ambiente y Patrimonio (L. Roy, com. pers.) remite al documento sobre cambio climático en Australia citado anteriormente (CSIRO 2007).

Territorio de la Capital Australiana (*Australian Capital Territory*)

De acuerdo con A. Mozqueira (com. pers.), del Departamento de Medio Ambiente y Planificación del Gobierno del ACT (*Australian Capital Territory*), existe una serie de políticas y regulaciones que requieren EIA, donde se incorporan los problemas del cambio climático. Este gobierno dispone de unas directrices para aplicación la evaluación TBL (*Triple Bottom Line*), basada en triple resultado, social, ambiental y económico para el desarrollo de políticas y toma de decisiones (ACT 2012). Este

documento dedica su Anexo D a la evaluación del impacto del cambio climático, que se debe realizar en proyectos de ley y propuestas políticas, mediante un Marco de Evaluación del Impacto del Cambio Climático, con tres partes:

- Parte A. Evaluación global de las implicaciones en el clima
- Parte B. Evaluación de la mitigación
- Parte C. Evaluación de impactos y adaptación

Este Marco de Evaluación de Impacto del Cambio Climático es escalable para adaptarse a los tipos de propuestas.

- Cuando no se prevén impactos sobre el cambio climático, la evaluación TBL y la exposición de motivos de los proyectos de ley deben indicar que se han considerado los impactos del cambio climático y no se han identificados impactos.
- Cuando se identifican impactos menores sobre el cambio climático se debe completar la Parte A e incluirlo en la evaluación TBL y la exposición de motivos del proyecto de ley.
- Cuando se identifiquen impactos importante sobre el cambio climático se deben completar las partes A, B y C e incluirlas en la evaluación TBL y la exposición de motivos del proyecto de ley.

Territorio del Norte (*Northern Territory*)

El Gobierno del Territorio del Norte tiene una breve pero exhaustiva guía dedicada a la consideración de las emisiones de GEI y el cambio climático en la EIA (NT 2009). Su objetivo es considerar el futuro cambio climático en los procesos de evaluación, para asegurar que los proyectos y desarrollos se han planificado tomando en cuenta los datos científicos del cambio climático y las proyecciones existentes, para minimizar futuros costes ambientales y sociales y aprovechar posibles oportunidades. La guía pretende ayudar a los promotores a facilitar la información que precisará el NRETAS (*Department of Natural Resources, Environment, the Arts and Sport*) para evaluar el impacto de las emisiones de GEI de los proyectos propuestos así como otros impactos potenciales bajo las futuras condiciones climáticas, de acuerdo con la Ley de Evaluación Ambiental de 1984. Los apartados considerados son:

- **Cálculo de emisiones.** Se deberán detallas en la documentación aportada para la EIA lo siguiente:
  - Estimación de los GEI para las fases de construcción y operación, de acuerdo con las metodologías del Comité Nacional del Inventario de GEI, el Sistema Nacional de Contabilidad de Carbono (para el desbroce) u otras metodologías aceptadas nacional o internacionalmente. Se determinarán en valor absoluto y en CO_2 equivalente para cada año del proyecto, identificando gas por gas y por fuente, incluyendo fuentes *in situ* y externas como emisiones derivadas del desbroce de tierras o producción y suministro de energía al lugar.
  - Detalle del ciclo de vida del proyecto en cuanto a GEI y su eficiencia (por unidad y/o con otros indicadores agregados). Se deberá comparar con tecnologías similares que produzcan productos similares.
- **Medidas para minimizar las emisiones de GEI.** Los promotores deberán demostrar que se han considerado una amplia gama de opciones e indicar las medidas y tecnologías eficientes adoptadas, para minimizar las emisiones de GEI, incluyendo:

  - Identificación de medidas de conservación de la energía, oportunidades de mejora de la eficiencia energética y vía para reducir las emisiones fugitivas.
  - Indicación de donde se pueden ahorrar emisiones de GEI mediante energías renovables, teniendo en cuenta los combustibles fósiles empleados como fuente suplementaria de energía.
  - Compromiso de compensar las emisiones de GEI.

- **Compensación de emisiones.** Actividades que eliminan carbono de la atmósfera o reducen la intensidad de los GEI (producción por unidad de producto). Se realizará de acuerdo con el NCOS (National Carbon Offset Standard) de 2010, en fase de elaboración cuando se hizo la revisión de 2009 de esta guía.
- **Vigilancia y notificación de emisiones.** El Plan de Gestión Medioambiental (EMP) del promotor deberá incluir el seguimiento continuo, investigación, revisión y notificación de las emisiones de GEI y las medidas de reducción.
- **Impactos del cambio climático.** Se prevé que el cambio climático producirá cambios en el nivel del mar, la temperatura marina y terrestre, la intensidad de los ciclones, la frecuencia de incendios y fenómenos meteorológicos extremos como tormentas, sequías e inundaciones. Los promotores deben indicar cómo se han tomado en cuenta las previsiones de cambio climático en la planificación, y cómo se espera que el cambio climático afecte al proyecto durante su vida útil, indicando cómo se gestionarán los riesgos relacionados con el cambio climático.

7.2. Nueva Zelanda

En Nueva Zelanda, la Ley de Gestión de Recursos de 1991 (Ministry for the Environment 1991) requiere que se preste especial atención a los efectos del cambio climático. Con respecto a los procedimientos de EIA, pueden ser competencia de los gobiernos locales o de la Autoridad de Protección Ambiental.

M. Carrington, del Ministerio de Medio Ambiente (com. pers.) considera difícil evaluar la integración del cambio climático en la EIA de infraestructuras, ya que los redactores de los EsIA y los responsables de tomar las decisiones necesitan una visión más amplia que el contexto de esa infraestructura. Un caso particular es la elevación del nivel del mar, que debe abordarse en los planes y políticas, en cumplimiento de la Declaración sobre Política Costera de 2010 (Department of Conservation 2010).

Ministry for the Environment (2008) es un manual que proporciona las últimas proyecciones de los impactos previstos del cambio climático, tanto a nivel nacional como para las regiones alrededor de Nueva Zelanda. Está diseñado para ayudar a los gobiernos locales a identificar y cuantificar las oportunidades y riesgos que el cambio climático supone para sus funciones, responsabilidades e infraestructura. También muestra cómo incorporar la evaluación del riesgo climático en los procesos de evaluación, planificación y reguladores del gobierno local para reducir la vulnerabilidad a los impactos del cambio climático.

7.3. Pacífico Sur

El CARICOM y el SPREP han realizado una guía sobre la integración de la adaptación al cambio climático en la EIA en las regiones del Caribe y Sur del Pacífico (CARICOM-SPREP 2004). Para la mayoría de los países insulares del Pacífico, el proceso de EIA se ha establecido en una forma u otra. A pesar de estar operativos durante un cierto número de años se reconoce que hay oportunidades de mejora. Se recomiendan los siguientes instrumentos para la incorporación de las consideraciones del cambio climático en el proceso de EIA:

- Términos de referencia
- Hoja de revisión y listas de verificación
- Sistemas de cumplimiento y supervisión
- Establecimiento de procedimientos formales de EIA
- Listas de expertos en EIA

Anexo 2. Casos prácticos de evaluación de la contribución al cambio climático

Índice

1. Autovía Palencia-Paredes de Nava-Carrión de los Condes 405
1.1. Antecedentes 405
1.2. Descripción del proyecto 406
1.3. Emisiones de GEI durante la construcción 406
1.4. Destrucción de sumideros de carbono 407
1.5. Contribución total al cambio climático en la fase de construcción 409
2. Autovía A-66 La Robla - León y Ronda Noroeste de León 410
2.1. Antecedentes 410
2.2. Descripción del proyecto 410
2.3. Consideración del cambio climático en la evaluación ambiental 411
3. Prolongación del ferrocarril de cercanías a Soto del Real 416
3.1. Antecedentes 416
3.2. Descripción del proyecto 416
3.3. Consideración del cambio climático en la evaluación ambiental 418

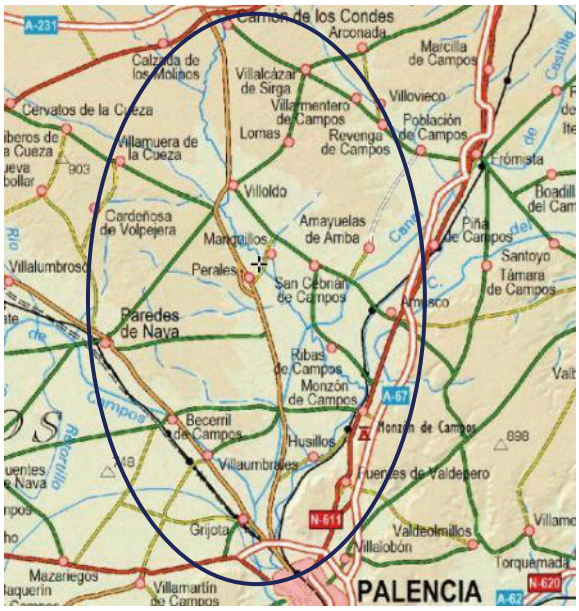
1. Autovía Palencia-Paredes de Nava-Carrión de los Condes

1.1. Antecedentes

El Plan Regional de Carreteras 2008 - 2020 de la Junta de Castilla y León, incluye dentro de las actuaciones a ejecutar la conversión en autovía o el desdoblamiento de las carreteras CL-613 y CL-615 en los tramos Palencia-Paredes de Nava y Palencia-Carrión de los Condes

Como desarrollo de dicho Plan, se planteó el estudio informativo "Estudio de alternativas para las Autovías Palencia-Paredes de Nava y Palencia – Carrión de los Condes y Estudio de Viabilidad de la autovía Paredes de Nava-Sahagún, siguiendo los corredores de la CL-613 y CL-615". El proyecto se localiza en la provincia de Palencia (Figura 116). El promotor es Provilsa, ente público dependiente de la Consejería de Fomento y Medio Ambiente de la Junta de Castilla y León. El órgano ambiental es el Servicio Territorial de Medio Ambiente.

Figura 116 Área de estudio de la Autovía Palencia - Paredes de Nava - Carrión de los Condes



Fuente: Elaboración propia. Cartografía Iberpix (http://www.ign.es)

En una primera fase se analizaron las características del medio desde el punto de vista ambiental, físico, territorial y cultural, planteando posibles corredores. A partir de esta información se realizó una fase de scoping. Tras ello, se elaboró el estudio informativo y el EsIA (Enríquez de Salamanca et al. 2012a). Como resultado de los análisis muticriterio se concluyó que los trazados de la carretera no alcanzaba los umbrales mínimos de rentabilidad necesarios, por lo que se abandonó el proyecto, no llegando a someterse a información pública el estudio informativo ni el EsIA.

Se ha utilizado este proyecto para plantear un caso práctico de consideración de la contribución al cambio climático en la fase de construcción, siguiendo los criterios expuestos en el capítulo 4.2. En primer lugar se ha considerado la emisión de GEI durante la construcción, y en segundo lugar la destrucción de sumideros.

1.2. Descripción del proyecto

Se plantea la construcción de una autovía, de nuevo trazado o por desdoblamiento de las actuales carreteras, con sección de doble calzada con dos carriles de 3,5 m, arcén exterior de 2,5 m e interior de 1,0 m y anchura de mediana variable. La velocidad de proyecto es 100 ó 120 km/h en función del coste por kilómetro que resulte.

Después del estudio de corredores, y de una selección inicial de alternativas, desestimando la que no cumplían los objetivos buscados o eran claramente desfavorables ambientalmente, se mantienen cinco alternativas, la opción 0 o de no actuación, una opción 0 mejorada, que supone actuaciones de mejora en las carreteras actuales, y tres alternativas que contemplan autovías a Paredes de Nava y Carrión de los Condes, separadas o en un solo trazado (Figura 117).

En la alternativa 0 el trayecto Palencia-Paredes de Nava se hace por la carretera CL-613, Palencia-Carrión de los Condes por la CL-615, y Paredes de Nava-Carrión de los Condes por la P-961 y CL-615. La alternativa 0 Mejorada es una autovía Palencia-Paredes de Nava, de nuevo trazado hasta Becerril de Campos, duplicando carreteras hasta Villafolfo y sin actuar en el tramo final. La alternativa 1 son dos autovías, una a Paredes de Nava y otra a Carrión de los Condes, siguiendo la CL-613 y CL-615 y duplicando donde es factible. La alternativa 2 es una autovía Palencia-Paredes de Nava-Carrión de los Condes. La alternativa 3 contempla una autovía igual a la 0 Mejorada hasta Becerril, y a partir de ahí igual a la alternativa 2.

Figura 117 Alternativas de la Autovía Palencia - Paredes de Nava - Carrión de los Condes

Fuente: Enríquez de Salamanca et al. (2012a)

1.3. Emisiones de GEI durante la construcción

Para el cálculo de las emisiones de GEI de las alternativas en la fase de construcción se han utilizado los indicadores descritos en el apartado 4.2.1. Se parte de los datos sobre las alternativas de que se dispone en esta fase de planificación, que son su longitud, balance de tierras, pasos inferiores, viaductos y pasos superiores. La superficie de firmes se obtiene a partir de la longitud y la sección tipo (Tabla 60).

Tabla 60 Datos básicos de las alternativas de la Autovía Palencia-Paredes-Carrión

Parámetro		Alternativa			
		0 Mejorada	1	2	3
Longitud alternativa		18 000 m	52 425 m	41 296 m	41 324 m
Excavación en desmonte		528 272 m³	1 481 951 m³	1 244 702 m³	1 231 866 m³
Terraplén		2 118 493 m³	6 073 860 m³	4 774 324 m³	4 332 323 m³
Tierra de préstamo		2 118 493 m³	6 073 860 m³	4 774 324 m³	4 332 323 m³
Tierra a vertedero		442 272 m³	1 206 951 m³	1 024 702 m³	1 011 866 m³
Distancia media a préstamos		15 km	15 km	15 km	15 km
Distancia media a vertederos		15 km	15 km	15 km	15 km
Pasos inferiores		330 m	1 165 m	925 m	730 m
Estructuras	Viaducto de 11,5 m	1 265 m²	11 121 m²	2 590 m²	3 290 m²
	Pasos superiores de 10 m	0 m²	2 200 m²	1 000 m²	0 m²
	Pasos superiores de 7 m	1 960 m²	2 100 m²	9 396 m²	6 923 m²
Firme asfálticos		378 000 m²	1 100 925 m²	867 216 m²	867 804 m²

Fuente: Elaboración propia. Basado en datos de Enríquez de Salamanca et al. (2012a)

Con estos datos, se procede a calcular los indicadores simplificados de impacto (Tabla 61) que se definen en la Tabla 12, con excepción del relativo a drenaje, al no contarse con información detallada, y la excavación en túneles, al no existir ninguno.

Tabla 61 Indicadores de impacto simplificados de emisiones de CO_2

Indicador de impacto		Alternativas (t CO_2)			
		0 Mejorada	1	2	3
E_{des}	Emisiones por excavación en desmontes	798	2 238	1 880	1 860
E_{ter}	Emisiones por formación de terraplenes	1 186	3 401	2 674	2 426
E_{tra}	Emisiones por transporte de tierras	7 298	20 750	16 527	15 231
E_{est}	Emisiones por construcción de estructuras	4 882	23 342	19 656	15 460
E_{inf}	Emisiones por construcción de pasos inferiores	776	2 741	2 176	1 718
E_{fir}	Emisiones por construcción de firmes	10 909	31 773	25 028	25 045
EC	**Emisiones simplificadas en la construcción**	**25 849**	**84 245**	**67 941**	**61 739**

Fuente: Elaboración propia. Basado en datos de Enríquez de Salamanca et al. (2012a)

Como es previsible, la alternativa 0 Mejorada, de mucha menor longitud, presenta las menores emisiones globales. La alternativa 1, construir dos autovías independientes, es notablemente peor en lo referente a la contribución al cambio climático, lo que debe pesar en su contra. Las alternativas 2 y 3 son similares, más favorable la segunda.

1.4. Destrucción de sumideros de carbono

Para el cálculo de las emisiones de GEI asociadas a la destrucción de sumideros de carbono (Tabla 62), tanto por pérdida de stock como por pérdida de capacidad de secuestro, se han utilizado los criterios descritos en el apartado 4.2.2. Se parte de la

información sobre afección a la vegetación incluida en el capítulo de identificación y valoración de impactos del EsIA (Enríquez de Salamanca et al. 2012a).

Tabla 62 Afección a la vegetación de las alternativas de la Autovía Palencia-Paredes-Carrión

Vegetación	Alternativas			
	0 Mejorada	**1**	**2**	**3**
Cauces	0,149 ha	0,333 ha	0,083 ha	0,149 ha
Choperas	0 ha	3,724 ha	3,404 ha	1,935 ha
Matorrales	0,181 ha	0 ha	0 ha	0,181 ha
Dehesas de encina	0 ha	0,727 ha	0 ha	0 ha
Herbazales	0 ha	0,932 ha	0,016 ha	0,016 ha
Cultivos de regadío	18,070 ha	103,574 ha	68,434 ha	52,019 ha
Cultivos herbáceos de secano	44,572 ha	72,170 ha	59,624 ha	69,761 ha
Cultivos leñosos de secano	0 ha	0,185 ha	0 ha	0 ha
Vegetación de ribera	0 ha	0,660 ha	0,786 ha	0,786 ha
Vegetación hidrófita degradada	0,497 ha	3,799 ha	2,727 ha	1,845 ha
Zonas sin vegetación	15,111 ha	63,631 ha	56,865 ha	59,447 ha
	78,580 ha	**249,735 ha**	**191,939 ha**	**186,139 ha**

Fuente: Elaboración propia. Basado en datos de Enríquez de Salamanca et al. (2012a)

Conocidas las formaciones vegetales afectadas, es preciso establecer el stock de carbono y la capacidad de secuestro de cada una de ellas (Figura 61). A efectos de estos cálculos, para los cultivos herbáceos, tanto de secano como de regadío, se considera un stock nulo, ya que anualmente se eliminan en su totalidad, aunque si tienen capacidad de secuestro. Los cauces y zonas sin vegetación no se consideran en los cálculos. Los cultivos leñosos de secano en la zona corresponden a viñedos.

Tabla 63 Stock de C y capacidad de secuestro en la vegetación afectada por las alternativas

Vegetación	ST_{Cva} [1] tC/ha	SQ_{Cva} [1] tC/ha/año	$ST_{CO2perdido}$ tC				$SQ_{CO2perdido}$ tCO_2/20 años			
			0 Mej	**1**	**2**	**3**	**0 Mej**	**1**	**2**	**3**
Choperas	36,00	3,00	0,00	134,06	122,54	69,66	0,00	223,44	204,24	116,10
Matorrales	17,74	0,34	3,21	0,00	0,00	3,21	1,23	0,00	0,00	1,23
Dehesas de encina	8,22	0,10	0,00	5,98	0,00	0,00	0,00	1,45	0,00	0,00
Herbazales	0,88	0,09	0,00	0,82	0,01	0,01	0,00	1,68	0,03	0,03
Cultivos de regadío	0	2,00[2]	0,00	0,00	0,00	0,00	36,14	207,15	136,87	104,04
Cultivos herb. secano	0	1,23[2]	0,00	0,00	0,00	0,00	54,82	88,77	73,34	85,81
Cultivos leñosos secano	21,00	0,88	0,00	3,89	0,00	0,00	0,00	3,26	0,00	0,00
Vegetación de ribera	26,00	0,50	0,00	17,16	20,44	20,44	0,00	6,60	7,86	7,86
Vegetación hidr. degr.	3,04	0,09	1,51	11,55	8,29	5,61	0,89	6,84	4,91	3,32
			4,72	173,45	151,28	98,93	93,09	539,18	427,24	318,38

Fuente: Elaboración propia. [1] Valores obtenidos a partir de datos de Agudo et al. (2007), Alías et al. (2009), Cruickshank et al (2000), CITAA (2008), JCYL (2015a), Muñoz-Rojas et al. (2011) y Pardos (2010). [2] Para los cultivo anuales el secuestro se valora una sola vez; no se considera acumulación de secuestro, al destruirse cada año.

Los valores resultantes por alternativas (Tabla 64) muestran de nuevo que la alternativa 0 Mejorada es la más adecuada, con una mínima afección a sumideros, y la alternativa 1 la más desfavorable, con una afección más de siete veces superior. De las dos restantes, la alternativa 3 es bastante más adecuada que la 2.

Tabla 64 Resumen del total de CO_2-eq perdido en las alternativas

Indicador	Alternativa			
	0Mejorada	**1**	**2**	**3**
Stock perdido - $ST_{CO2perdido}$ (t CO_2)	9,44	346,91	302,57	197,86
Secuestro perdido - $SQ_{CO2perdido}$ (t CO_2)	186,18	1 078,37	854,49	636,77
Balance global CO_2 - B_{CO2} (t CO_2)	**195,62**	**1 425,27**	**1 157,05**	**834,63**

Fuente: Elaboración propia. Basado en datos de Enríquez de Salamanca et al. (2012a)

1.5. Contribución total al cambio climático en la fase de construcción

La contribución total al cambio climático en las alternativas estará determinada tanto por la emisión directa de GEI durante las obras como por la contribución derivada de la destrucción de sumideros (Tabla 65).

Tabla 65 Contribución al cambio climático durante la construcción y jerarquización de alternativas

Nº orden	Alternativa	Emisiones en la construcción EC (t CO_2)	Balance de CO_2 de sumideros B_{CO2} (t CO_2)	Contribución global (t CO_2)	Diferencia con la anterior	Diferencia con la mejor
1	0 Mejorada	25 849	196	26 045	0%	0%
2	3	61 739	835	62 574	140%	140%
3	2	67 941	1 157	69 098	10%	165%
4	1	84 245	1 425	85 670	24%	229%

Fuente: Elaboración propia. Basado en datos de Enríquez de Salamanca et al. (2012a)

La alternativa 0 Mejorada, que se limita a mejorar las actuales carreteras, es notablemente mejor que cualquiera de las restantes por su contribución al cambio climático en la fase de construcción, por lo que es claramente la preferible desde este punto de vista. En el extremo opuesto, la alternativa 1, construir dos autovías, es claramente desfavorable, y solo debería adoptarse si las otras opciones no son viables funcionalmente. Las alternativas 2 y 3 son similares, pero más favorable la segunda.

2. Autovía A-66 La Robla - León y Ronda Noroeste de León

2.1. Antecedentes

Este caso se desarrolla en el EsIA de la autovía La Robla-León y Ronda Noroeste (Enríquez de Salamanca et al. 2009b) y se ha presentado en el VIII Congreso Nacional de Evaluación Ambiental, y publicado en sus actas (Enríquez de Salamanca 2015).

El Plan Estratégico de Infraestructuras de Transporte (MFOM 2005) contempla la posibilidad de construir una carretera entre León y Oviedo paralela a la autopista AP-66, siguiendo la N-630. El corredor de la N-630, al norte de León y hasta la localidad de La Robla (Figura 118) atraviesa zonas con potencial desarrollo de demanda de transporte por carretera. Existen polígonos industriales, urbanizaciones y una central térmica, donde es preciso asegurar la sostenibilidad del transporte con León. Para ello se planteó una autovía entre León y La Robla. Además en la zona noroeste de León no existe de un cierre de la circunvalación de la ciudad.

Figura 118 Área de estudio de la autovía La Robla-León y Ronda Noroeste.

Fuente: Elaboración propia. Cartografía Iberpix (http://www.ign.es)

2.2. Descripción del proyecto

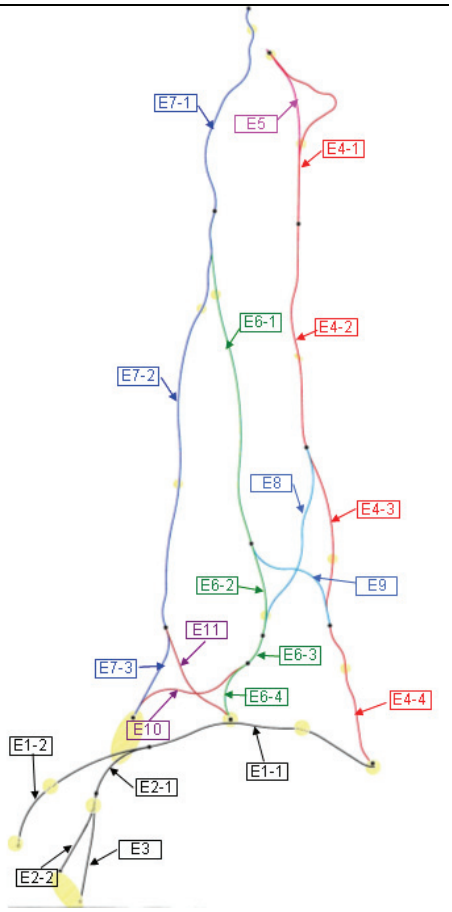
Para desarrollar estas actuaciones se elaboró un estudio informativo con su correspondiente EsIA (Enríquez de Salamanca et al. 2009b). El promotor y órgano sustantivo es la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento, y el órgano ambiental la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. El estudio contempla dos actuaciones, la conversión en autovía de la N-630 de León a la Robla, en 21 km y la construcción de una Ronda Noroeste de León, de 10 km, que cierre la circunvalación de la ciudad.

En una primera fase se realizó una caracterización del territorio desde el punto de vista ambiental, físico y socioeconómico, planteando corredores de trazado: (i) En la autovía La Robla - León se plantean tres corredores, Este siguiendo la N-630, Bernesga por el valle de este río y Oeste al oeste de la carretera C-623; (ii) en la Ronda Noroeste

se plantean dos corredores, Ronda 1, previsto en las Normas Subsidiarias de San Andrés del Rabanedo y Ronda 2 al norte de esa localidad. Además, se definen conexiones entre los corredores. Sobre los corredores se plantean alternativas, realizando un análisis preliminar para desechar las menos deseables, quedando las alternativas analizadas en el EsIA (Figura 119). Las actuaciones son complementarias pero independientes, seleccionándose una alternativa para la Ronda y otra para la autovía La Robla-León.

Figura 119 Alternativas planteadas para la autovía y la ronda de León

Alternativa	Ejes	Longitud
Ronda 1	1-1, 1-2	11 255 m
Ronda 2	1-1, 2-1, 2-2	11 012 m
Ronda 3	1-1, 2-1, 3	11 630 m
Opción 1	4-1, 4-2, 4-3, 4-4	20 551 m
Opción 2	4-1, 4-2, 8, 6-3, 6-4	19 693 m
Opción 3	4-1, 4-2, 8, 6-3, 10, 7-4	21 586 m
Opción 4	5, 4-2, 4-3, 4-4	19 380 m
Opción 5	5, 4-2, 8, 6-3, 6-4	18 522 m
Opción 6	5, 4-2, 8, 6-3, 10, 7-4	20 415 m
Opción 7	7-1, 7-2, 7-3, 7-4	19 344 m
Opción 8	7-1, 7-2, 11	19 752 m
Opción 9	7-1, 6-1, 6-2, 6-3, 6-4	19 505 m
Opción 10	7-1, 6-1, 6-2, 6-3, 10, 7-4	21 398 m
Opción 11	7-1, 6-1, 9, 4-4	22 500 m



Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca et al. (2009b)

2.3. Consideración del cambio climático en la evaluación ambiental

Se considera como criterio para comparar alternativas la contribución al cambio climático en la fase de explotación. La nueva autovía tendrá unas emisiones de CO_2, en función del tráfico que capte cada alternativa, la longitud de su trazado y su influencia en el tráfico residual. En la actualidad, el tráfico se canaliza por la N-630, una carretera convencional. La construcción de la autovía entre León y La Robla captará parte de ese tráfico, pero dependiendo de la proximidad de la alternativa a la N-630, el tráfico residual variará. La metodología se cálculo se expone en 4.3.1.

Emisiones asociadas a los nuevos trazados

Las emisiones de CO_2 están condicionadas por el tráfico, que varía por tramos, la longitud de cada tramo, el porcentaje de vehículos ligeros y pesados y el factor de emisión de CO_2 de los vehículos pesados y ligeros (Tabla 66).

Tabla 66 Emisiones de CO_2 para las alternativas de trazado estudiadas

Opción	Tramo		Vehículos		Emisión (t CO_2/año)	
	Designación	Longitud	Ligeros	Pesados	Parcial	Total
Ronda-1	LE-20 - C-623 y aeropuerto	2,65 km	30 576	2 492	5 937	19 471
	C-623 - Autovía La Robla	1,95 km	19 510	2 304	3 042	
	Autovía La Robla - Base Militar	5,05 km	19 510	2 304	7 877	
	Base Militar - AP-66	1,61 km	19 850	2 546	2 614	
Ronda-2	LE-20 - C-623 y aeropuerto	2,65 km	30 576	2 492	5 937	19 097
	C-623 - Autovía La Robla	1,95 km	19 510	2 304	3 042	
	Autovía La Robla León - LE-441	4,55 km	19 510	2 304	7 097	
	LE-441 - AP-66	1,86 km	19 850	2 546	3 020	
Ronda-3	LE-20 - C-623 y aeropuerto	2,65 km	30 576	2 492	5 937	20 103
	C-623 - Autovía La Robla	1,95 km	19 510	2 304	3 042	
	Autovía La Robla - LE-441	4,55 km	19 510	2 304	7 097	
	LE-441 - AP-66	2,48 km	19 850	2 546	4 027	
Opc-1	La Robla - El Rabizo	3,70 km	11 229	1 568	3 485	19 529
	El Rabizo - Venta La Tuerta	5,75 km	11 187	1 563	5 397	
	Venta La Tuerta- Monteleón	5,18 km	11 336	1 573	4 916	
	Monteleón - Pol. Industrial	3,37 km	11 314	1 570	3 192	
	Polígono Industrial - León	2,55 km	12 014	1 608	2 538	
Opc-2	La Robla - El Rabizo	3,70 km	9 175	1 407	2 933	15 765
	El Rabizo - Venta La Tuerta	5,75 km	7 697	1 202	3 846	
	Venta La Tuerta- C-623	7,22 km	7 729	1 206	4 845	
	C-623 - Ronda	3,03 km	17 535	1 881	4 142	
Opc-3	La Robla - El Rabizo	3,70 km	8 749	1 345	2 799	8 816
	El Rabizo - Venta La Tuerta	5,75 km	3 864	723	2 056	
	Venta La Tuerta - C-623	7,22 km	3 887	726	2 594	
	C-623 - Ronda	4,92 km	3 562	383	1 367	
Opc-4	La Robla - Venta La Tuerta	8,28 km	12 244	1 730	8 534	20 400
	Venta La Tuerta- Monteleón	5,18 km	12 601	1 771	5 486	
	Monteleón - Pol. Industrial	3,37 km	12 580	1 766	3 562	
	Polígono Industrial - León	2,55 km	13 276	1 804	2 818	
Opc-5	La Robla - Venta La Tuerta	8,28 km	7 694	1 189	5 516	14 506
	Venta La Tuerta C-623	7,22 km	7 791	1 207	4 872	
	C-623 - Ronda	3,03 km	17 384	1 886	4 118	
Opc-6	La Robla - Venta La Tuerta	8,28 km	4 169	742	3 137	7 364
	Venta La Tuerta C-623	7,22 km	4 245	756	2 784	
	C-623 - Ronda (RL-3)	4,92 km	3 735	412	1 443	
Opc-7	La Robla - Ctra. Valsemana	8,20 km	4 655	717	3 302	8 940
	Ctra. Valsemana - C-623	4,75 km	4 987	750	2 034	
	C-623 - Ronda	6,39 km	6 897	882	3 604	
Opc-8	La Robla - Ctra. Valsemana	8,20 km	8 152	1 214	5 721	16 511
	Ctra. Valsemana - C-624	4,75 km	8 531	1 251	3 451	
	C-623 - Ronda	6,82 km	13 094	1 711	7 339	
Opc-9	La Robla - Ctra. Valsemana	7,74 km	9 992	1 369	6 453	18 269
	Ctra. Valsemana - C-623	8,75 km	10 258	1 397	7 473	
	C-623 - Ronda (RL-2)	3,03 km	18 489	1 948	4 343	
Opc-10	La Robla - Ctra. Valsemana	7,74 km	5 734	877	3 832	9 856
	Ctra.Valsemana - C-624	8,75 km	5 984	904	4 501	
	C-623 - Ronda (RL-3)	4,92 km	3 934	438	1 523	
Opc-11	La Robla - Ctra. Valsemana	7,74 km	10 288	1 420	6 659	19 906
	Ctra. Valsemana- Monteleón	9,49 km	10 405	1 429	8 245	
	N-630 - Pol. Industrial	2,73 km	10 363	1 421	2 356	
	Polígono Industrial - León	2,55 km	12 435	1 706	2 647	

Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca et al. (2009b)

Emisiones debidas al tráfico residual

Para hacer un cálculo real se deben considerar las emisiones generadas en los nuevos trazados y las derivadas del tráfico residual que se mantienen por la actual red de carreteras. La autovía reemplaza en buena medida a la N-630; cuanto más se aleje de ella, mayor será el tráfico residual, que seguirá usando la N-630, mientas que si se pega a ella pasarán prácticamente a coincidir, no existiendo casi tráfico residual (Tabla 67).

Tabla 67 Emisiones de CO_2 asociadas al tráfico residual en la N-630

Opción	**Tráfico por tramos (vehículos)**					**Emisión (t CO_2/año)**
	La Robla - El Rabizo	El Rabizo - V. La Tuerta	V. La Tuerta - Monteleón	Monteleón - P. Industrial	P. Industrial - León	
Opc-1	0	47	6	31	265	75
Opc-2	0	1683	1765	1765	2703	2 345
Opc-3	0	5506	5601	5601	6515	7 058
Opc-4	294	294	15	41	274	272
Opc-5	2 763	2763	2764	2764	3689	4 524
Opc-6	6 484	6 484	6512	6512	7421	10 387
Opc-7	5 972	5 972	6 090	6090	6993	9 857
Opc-8	2 327	2 327	2 445	2 445	3383	4 059
Opc-9	2 107	2 107	2 225	2 225	3 149	3 683
Opc-10	5 651	5 651	5 768	5 768	6 676	9 228
Opc-11	1 645	1 645	1 763	1 814	384	2 604

Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca et al. (2009b)

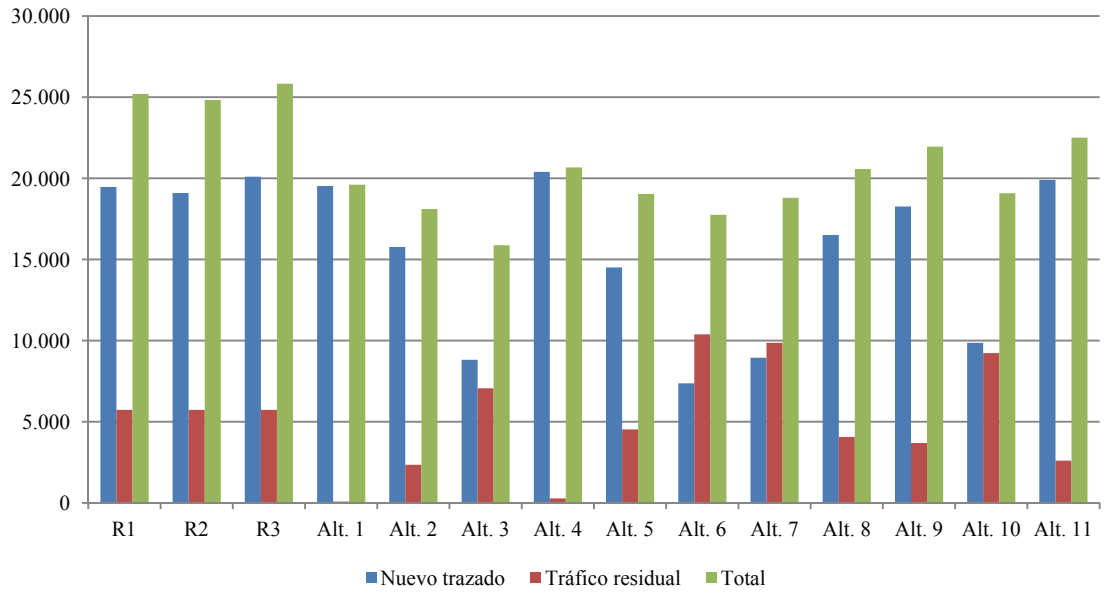
Para la Ronda Noroeste resulta difícil establecer hipótesis de tráfico residual, al no reemplazar a un único itinerario. Existe la certeza de que aunque la Ronda reducirá el tráfico en la zona existirá siempre tráfico residual, ya que la captación nunca alcanza el 100% salvo en duplicaciones estrictas. En la autovía La Robla - León, las emisiones del tráfico residual varían entre el 0,4 y el 141%. Para trazados con fuerte coincidencia con la N-630 el valor oscila entre el 0,4 y 15%, mientras que los trazados por el corredor Oeste, funcionalmente muy diferente de la actual N-630, el tráfico residual puede superar al de la propia autovía con valores del 80 al 140%. En la Ronda Noroeste se ha tomado como aproximación un incremento en las emisiones globales derivadas del tráfico de la Ronda y el tráfico residual del 30%, con un valor igual para todas ellas, al no apreciarse diferencias en la captación de tráficos asociadas a los trazados.

Emisiones globales de CO_2

Las emisiones globales de cada alternativa son la suma de las emisiones de CO_2 del nuevo trazado y las emisiones debidas al tráfico residual (Tabla 68). Se observan fuertes diferencias entre las opciones de la autovía La Robla - León, en función del tráfico captado. Existen opciones con emisiones moderadas (3, 6, 7 y 10) y otras con emisiones más intensas (1, 4, 9 y 11). En la Ronda Noroeste la opción con menores emisiones es la Ronda 2, aunque todas tienen valores muy similares.

Tabla 68 Emisiones globales de CO_2 por alternativas

Opción	Emisiones de CO_2 (t CO_2 /año)		
	Emisiones nuevo trazado	Emisiones tráfico residual	Emisiones totales
Ronda 1	19 471	5 729	25 200
Ronda 2	19 097	5 729	24 826
Ronda 3	20 103	5 729	25 832
Opc-1	19 529	75	19 604
Opc-2	15 765	2 345	18 110
Opc-3	8 816	7 058	15 874
Opc-4	20 400	272	20 672
Opc-5	14 506	4 524	19 030
Opc-6	7 364	10 387	17 751
Opc-7	8 940	9 857	18 797
Opc-8	16 511	4 059	20 570
Opc-9	18 269	3 683	21 952
Opc-10	9 856	9 228	19 084
Opc-11	19 906	2 604	22 510



Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca et al. (2009b)

Valoración de la contribución al cambio climático

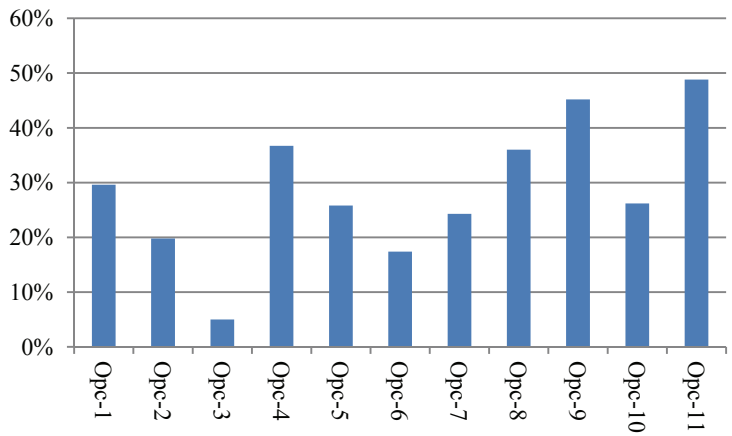
En la zona de estudio se localizan varios focos importantes de emisión de CO_2 como la aglomeración urbana de León, la central térmica de La Robla, o los tráficos ya existentes en la situación preoperacional que circulan por la N-630 y las carreteras al oeste de León. La construcción de la autovía genera un impacto acumulativo, que se suma al resto de fuentes de emisión de CO_2, empeorando la situación global.

Una forma de evaluar la influencia de las alternativas estudiadas, es calcular el incremento en las emisiones de CO_2 globales, es decir, las generadas en la autovía y en la N-630, con respecto a la situación sin autovía, únicamente con la carretera N-630. No todas las emisiones de CO_2 calculadas serán nuevas. Las alternativas estudiadas canalizarán el tráfico que discurre actualmente por otras vías, pudiendo además inducir nuevos tráficos. En el caso de la Ronda Noroeste, debido al entramado de carreteras existentes es difícil determinar los recorridos actuales de los vehículos y compararlos con los itinerarios por la Ronda, pero en la Autovía La Robla - León, si es posible realizar una comparación con la N-630 en ese mismo tramo.

Considerando el tráfico de la N-630 sin la autovía propuesta, las emisiones en el año horizonte serían 15 123 t CO_2/año. Comparando este valor con las emisiones totales de cada alternativa se obtiene el incremento medio de emisiones (Tabla 69).

Tabla 69 Incremento en las emisiones de CO_2 por alternativas

Opción	Incremento en las emisiones de CO_2
Opc-1	29,6%
Opc-2	19,8%
Opc-3	5,0%
Opc-4	36,7%
Opc-5	25,8%
Opc-6	17,4%
Opc-7	24,3%
Opc-8	36,0%
Opc-9	45,2%
Opc-10	26,2%
Opc-11	48,8%



Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca et al. (2009b)

Aunque la contribución al cambio climático no sea el factor condicionante en la selección de alternativas, puede tenerse en cuenta en la valoración global de sus impactos. Existe una diferencia apreciable en el incremento de emisiones de CO_2 entre las alternativas, siendo mínimo en la opción 3, que aprovecha la N-630 en la parte norte y finaliza en la Ronda Noroeste, y máximo en la opción 11, que no aprovecha el corredor de la N-630 en la zona norte pero entra en León por esa carretera. En la Ronda se prevén incrementos de emisiones muy similares en las tres opciones.

Medidas de mitigación

La única medida de mitigación recogida en el EsIA es la recuperación de la cubierta vegetal, en especial en zonas arboladas, que corrige la pérdida de sumideros.

3. Prolongación del ferrocarril de cercanías a Soto del Real

3.1. Antecedentes

Este caso se ha sido presentado en el VIII Congreso Nacional de Evaluación Ambiental (Enríquez de Salamanca 2015). Entre las directrices para el desarrollo de la política ferroviaria contempladas en el Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte 2005-2020 (MFOM 2005) se incluye completar las redes de cercanías de las grandes áreas metropolitanas y grandes ciudades. En 2009 se desarrolló el Plan de Infraestructuras Ferroviarias de Cercanías para Madrid, entre cuyos objetivos están potenciar las cercanías para facilitar la movilidad metropolitana y ampliar la cobertura poblacional. Este Plan incluye la extensión de la red de cercanías a Soto del Real, abordada mediante un estudio informativo, sometido a EIA. El promotor y órgano sustantivo es la Dirección General de Ferrocarriles del Ministerio de Fomento, y el órgano ambiental la Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. El estudio informativo y EsIA se sometieron a información pública, y obtuvieron DIA en 2014 (BOE 2014a).

3.2. Descripción del proyecto

Actualmente la línea de cercanías C4 finaliza en su extremo norte en Colmenar Viejo. Para su prolongación se pretende aprovechar la línea Madrid-Burgos (Figura 120), casi en desuso; el estudio informativo se centra en un corredor siguiendo esa línea, de 18,5 km de longitud y 35 a 320 m de anchura. La línea actual presenta vía única de ancho ibérico sin electrificar, incompatible con el tráfico de cercanías. Se plantea su sustitución por vía única o doble electrificada de ancho ibérico, mejorando el trazado cuando sea preciso. Existe una sola estación, lejos del casco urbano de Soto del Real, por lo que se analiza construir otra. La demanda estimada es 1,3 millones de viajeros en 2017, con 128 trenes en ambos sentidos.

Figura 120 Localización del proyecto de cercanías a Soto del Real

Fuente: Elaboración propia. Cartografía Iberpix (http://www.ign.es)

En una fase previa se definieron seis alternativas condicionadas en gran parte por las posibles soluciones para las estaciones. Sobre ellas se aplicó un análisis multicriterio, concluyendo que las alternativas viables son aquellas que aprovechan la plataforma ferroviaria actual y las estaciones existentes, sin variantes de trazado.

Tras ello se analizó la explotación, estableciendo alternativas funcionales, de manera que se pueda plantear la construcción de la línea en fases sucesivas, si se confirmaran las previsiones de captación de viajeros. Se plantearon dos escenarios funcionales, la explotación conjunta o el empleo de lanzaderas, y tres alternativas de explotación, pudiendo adoptarse vía única o doble (Tabla 70).

Tabla 70 Escenarios y alternativas de explotación para la línea Colmenar-Soto del Real

Escenarios	Alternativas de explotación
Escenario 1: Explotación conjunta. La ampliación de la línea C4B se explotaría conjuntamente con el resto de la línea según se hace actualmente. **Escenario 2: Lanzaderas.** La línea C4B finalizaría en Colmenar Viejo, y la ampliación hasta Soto se explotaría con trenes lanzadera independientes.	**Vía doble hasta Soto Norte** manteniendo las frecuencias de llegada y salida a Colmenar, manteniendo o no la estación Soto Sur. **Vía única entre Colmenar y Soto Norte** renovada y electrificada, poniendo en servicio la estación Soto Sur y el apeadero Soto Norte. Si la vía única no permite frecuencias razonables, se analizará la posibilidad de que los trenes puedan cruzarse. **Servicio de lanzadera en vía única**, independiente de la línea C4, pero condicionada por sus horarios para conseguir tiempos de trasbordo reducidos. Si no permite frecuencias razonables se analizará que los trenes puedan cruzarse en este trayecto.

Fuente: Elaboración propia con datos de Enríquez de Salamanca (2015)

Combinando escenarios y alternativas, se plantean cuatro alternativas para las que se analiza la rentabilidad económica y social, y se incluyen en el EsIA (Tabla 71).

Tabla 71 Alternativas estudiadas del ferrocarril a Soto del Real

Alternativa	Explotación	Tramo Colmenar-Soto	Estación en Soto Sur	Tramo Soto Norte- Sur	Estación en Soto Norte
Alternativa 1a	Escenario 1 Explotación conjunta con C4B	Vía Doble	Si	Vía Doble	Si
Alternativa 1b			No	Vía Doble	
Alternativa 2c			Si	Vía Única	
Alternativa 3b	Escenario 2 Lanzaderas		Si	Vía Única	

Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca (2015)

Los parámetros de explotación de las alternativas son (Tabla 72):

Tabla 72 Parámetros de explotación de las alternativas del ferrocarril a Soto del Real

Alt.	Estaciones	Explotación	Vía	Nº de trenes	Tiempo de recorrido	Frecuencia	
						Hora punta	Hora valle
1a	Soto Norte y Sur	C4B	Doble	64	13m 40s	9-14 minutos	20-23 minutos
1b	Soto Norte	C4B	Doble	64	11m 31s	9-14 minutos	20-23 minutos
2c	Soto Norte y Sur	C4B	Doble y única	33	13m 40s	22-28 minutos	39-42 minutos
3b	Soto Norte y Sur	Lanzadera	Doble y única	35	12m 19s	12-25 minutos	39-42 minutos

Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca (2015)

3.3. Consideración del cambio climático en la evaluación ambiental

El EsIA analiza los impactos del proyecto sobre los diferentes factores ambientales. El primer efecto analizado es la reducción de emisiones de CO_2 y contaminantes por trasvase modal de viajeros. Es la primera vez que se considera el cambio climático en la EIA de un ferrocarril en España (Enríquez de Salamanca 2016, Enríquez de Salamanca et al. 2016a).

La puesta en servicio de la línea de cercanías supondrá una captación de viajeros que utilizan otros medios de transporte, en concreto autobús y vehículos particulares, que se desplazan en la actualidad hasta la estación de Colmenar Viejo, dejando allí su vehículo y tomando el tren o que realizan todo su desplazamiento hasta Madrid.

Es especialmente interesante la captación de usuarios que realizan sus desplazamientos en vehículos particulares, y que dejarán de utilizar ese medio de transporte para pasar a emplear el ferrocarril. Ese cambio modal de transporte por parte de los usuarios implica una reducción en el empleo de vehículos privados, y con ello en el consumo de combustible y emisiones de gases contaminantes y de CO_2.

En consecuencia, se identifica un impacto positivo por reducción en emisiones de CO_2 derivadas de la captación de usuarios de vehículo privado. La magnitud de este impacto varía en las diferentes alternativas, en función de la captación de usuarios de vehículo privado.

El proyecto incluye un estudio de demanda, donde se analiza la captación de viajeros usuarios de vehículo privado que generaría la puesta en servicio de esta línea ferroviaria para el año 2017, de puesta en servicio y el 2037, año horizonte (Tabla 73).

Tabla 73 Captación de viajeros en función de la frecuencia de paso de los trenes

	Captación de viajeros	
Año	**Captación estación Soto Sur**	**Captación estación Soto Norte**
	Frecuencia de trenes de 10-15 minutos	
2017	437 viajes/día	1 233 viajes/día
2037	708 viajes/día	1 997 viajes/día
	Frecuencia de trenes de 20 minutos	
2017	149 viajes/día	421 viajes/día
2037	241 viajes/día	681 viajes/día

Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca (2015)

La distancia de Soto del Real a Madrid, a Plaza de Castilla donde se localiza el intercambiador de transportes de la zona norte, es 38 km, y a la estación de ferrocarril de Colmenar Viejo 12 km. Se considera que la mitad de los recorridos diarios captados de vehículos privados son a Madrid y la otra mitad a Colmenar Viejo. En consecuencia, el desplazamiento medio en vehículo privado captado por el ferrocarril es 25 km por trayecto. Para la estación de Soto Sur, esta distancia media se acorta en 5 km. Con ello, se calculan los recorridos totales captados en el año horizonte, 2037 (Tabla 74).

Tabla 74 Reducción de recorridos en vehículo privado según frecuencia de paso de los trenes

	Reducción de recorridos en vehículo privado en 2037	
Frecuencia	**Captación estación Soto Sur**	**Captación estación Soto Norte**
10-15 minutos	14 160 km/día	49 925 km/día
20 minutos	4 820 km/día	17 025 km/día

Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca (2015)

Se parte de que todo el tráfico que desaparece es de vehículos ligeros, ya que se trata de desplazamientos de usuarios particulares. Para determinar las emisiones de CO_2 generadas por el tráfico se considera el factor medio de emisión de CO_2 de vehículos ligeros en la fecha de elaboración del estudio (160 g CO_2/km).

Para adaptar los valores de captación de usuarios de vehículo privado y reducción de recorridos a las alternativas funcionales se consideran sus parámetros de explotación: Opción 1a, frecuencia 9-14 minutos, 2 estaciones; Opción 1b, frecuencia 9-14 minutos, 1 estación (Soto Norte); Opciones 2c y 3b, frecuencia 12- 28 minutos, 2 estaciones.

De acuerdo con estas hipótesis se calculan las emisiones de CO_2 que se reducirán en cada una de las alternativas por desaparición de desplazamientos (Tabla 75).

Tabla 75 Reducción de emisiones de CO_2 por alternativas

Reducción de emisiones de CO_2 de vehículos privados		
Alternativa	**Reducción de recorridos**	**Reducción de emisiones**
1a	64 085 km/día	10,25 t de CO_2/día
1b	49 925 km/día	7,99 t de CO_2/día
2c	21 845 km/día	3,50 t de CO_2/día
3b	21 845 km/día	3,50 t de CO_2/día

Fuente: Elaborado a partir de datos de Enríquez de Salamanca (2015)

En conclusión, se identifica un impacto positivo por reducción en las emisiones de CO_2 derivadas de la captación de usuarios por el vehículo privado, con unos valores de entre 3,50 y 10,25 t CO_2/día. Estos resultados se incorporan a la valoración global de las alternativas. Aunque no es un criterio determinante ni el único empleado, se suma al resto de efectos a la hora de proponer la mejor alternativa, que de hecho es la también la que logra una mayor reducción en las emisiones de CO_2.

Medidas de mitigación

Al tratarse de un efecto positivo no son precisas medidas de mitigación, protectoras, correctoras o compensatorias. La construcción del proyecto es en sí misma una medida de mitigación, que contribuye a reducir las emisiones de CO_2 del transporte.

Anexo 3. Caso práctico de mitigación compensatoria del cambio climático

Índice

1. Introducción 425

2. Metodología 425

2.1. Objetivos 425
2.2. Ámbito espacial 425
2.3. Ámbito temporal 428
2.4. Cálculo de las emisiones de CO_2 428
2.5. Compensación de emisiones de CO_2 428
2.6. Costes de Compensación 428
2.7. Posibilidades de financiación 429

3. Resultados 429

3.1. Emisiones resultantes 429
3.2. Medidas de compensación. Agricultura de conservación 430
3.3. Medidas de compensación. Plantación de arbolado 430
3.4. Estimación financiera 432
3.5. Financiación de la compensación 434

4. Discusión 435

5. Conclusiones 437

1. Introducción

Este caso analiza la viabilidad técnica y económica de compensar las emisiones de GEI generadas por una red de carreteras a través del secuestro de carbono mediante actividades LULUCF, aunando objetivos climáticos con la mejora de la biodiversidad y el paisaje y promoviendo el desarrollo rural. Algunos trabajos han relacionado áreas verdes urbanas con compensación de emisiones de carbono (Jo 2002, Zhao et al. 2010). Martin & Point (2012) analizan la compensación de emisiones de GEI en proyectos de carreteras basados en costos de oportunidad. Sin embargo, no existen estudios sobre compensación directa de las emisiones de GEI en las carreteras, probablemente debido a la disociación entre el impacto, las emisiones de GEI, y su posible compensación.

2. Metodología

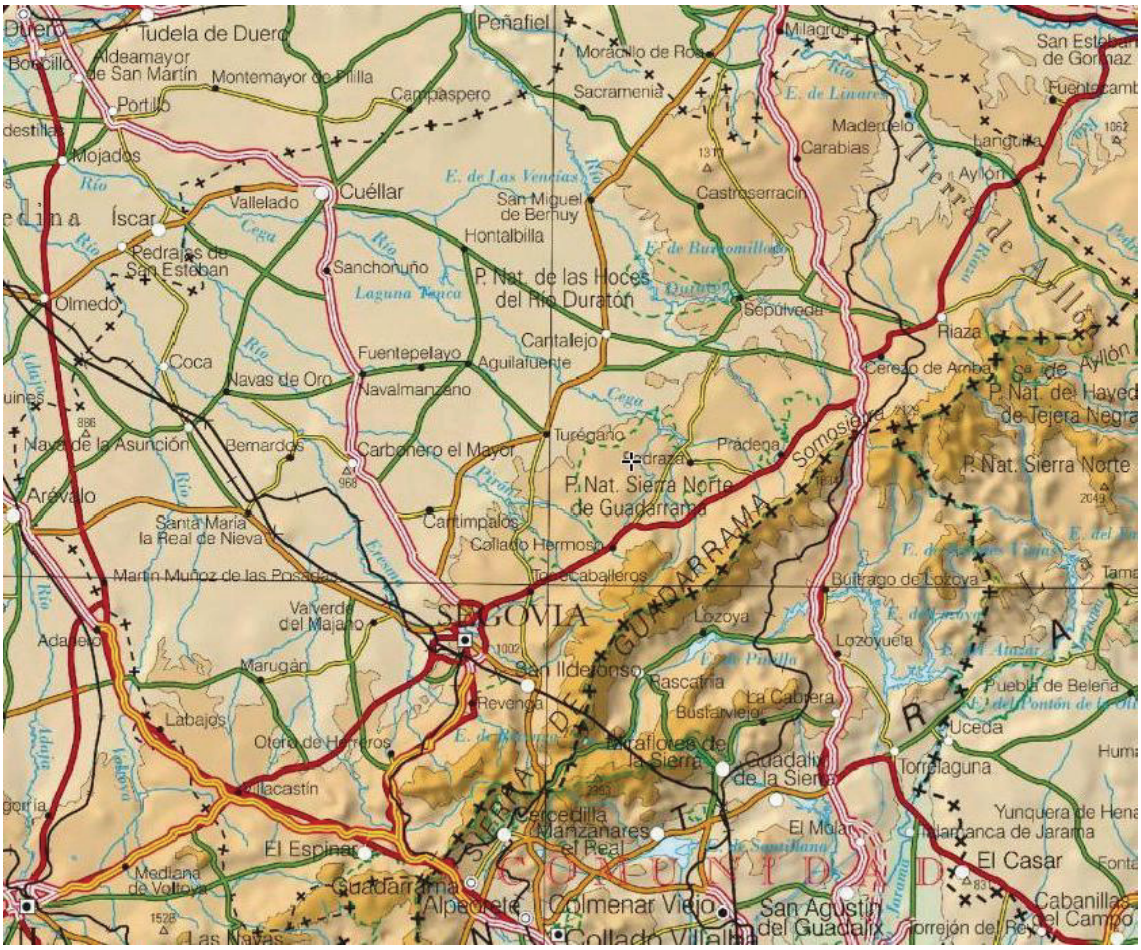
2.1. Objetivos

La investigación debe dar repuesta a dos preguntas: ¿Es posible compensar localmente las emisiones de GEI de una red de carreteras a través de actividades LULUCF en un clima mediterráneo, sin impactos ambientales o sociales? ¿Cuáles son los costes y cómo se podrían financiar?

2.2. Ámbito espacial

La compensación a través de las actividades de LULUCF depende de las condiciones locales, que determinan las posibilidades de actuación, especies utilizables y costes de ejecución y compensación. Por ello, un estudio de este tipo debe referirse a un área concreta. Una buena unidad de estudio son las provincias, porque presentan suficiente extensión para este tipo de análisis, siendo bastante homogéneas desde el punto de vista climático, ecológico y económico. Las diferencias entre provincias en cuanto a extensión, población, tráfico o uso del suelo son altas. Para este estudio se ha considerado la provincia de Segovia (Figura 121), en el centro de España, con una superficie de 6 923 km², cerca de la media nacional, y una población baja, 159 127 habitantes (INE 2015), aunque un tráfico más importante porque limita con la provincia de Madrid, la de mayor población en España, y es atravesada por dos de las principales autovías del país (A-1 y A-6). Es una provincia típicamente mediterránea continental, representativa de las mesetas del centro peninsular. La altitud oscila entre 850 y 1 000 m, y la precipitación media entre 400 y 500 mm, excepto en una banda montañosa estrecha en el este, que alcanza 2 430 m y 1 200 mm, respectivamente.

Figura 121 Ámbito de estudio (Segovia)



Fuente: Cartografía Iberpix (http://www.ign.es)

Entre los usos del suelo (JCYL 2015a, Tabla 76) destacan los cultivos de secano, el 30% de la superficie provincial, así como los pastos y eriales a pastos.

Tabla 76 Usos del suelo en Segovia en 2013

Uso del suelo				Superficie		Porcentaje	
Cultivos	Cultivos herbáceos	Secano	Cereal	167 365 ha	267 005 ha	24,18%	38,57%
			Otros	35 823 ha		5,17%	
		Regadío		17 416 ha		2,52%	
	Barbechos			2 756 ha		0,40%	
	Cultivos leñosos			43 645 ha		6,30%	
Prados y pastos	Praderas naturales			6 139 ha	135 650 ha	0,89%	19,60%
	Pastos			129 511 ha		18,71%	
Terrenos forestales	Bosques maderables			119 302 ha	188 451 ha	17,23%	27,22%
	Bosques abiertos			33 913 ha		4,90%	
	Bosques arbustivos			35 236 ha		5,09%	
Otras áreas	Erial a pastos			54 783 ha	101 146 ha	7,91%	14,61%
	Terrenos improductivos			4 832 ha		0,70%	
	Terrenos no agrícolas			34 602 ha		5,00%	
	Ríos y lagos			6 929 ha		1,00%	
					692 252 ha		**100,00%**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de JCYL (2015a)

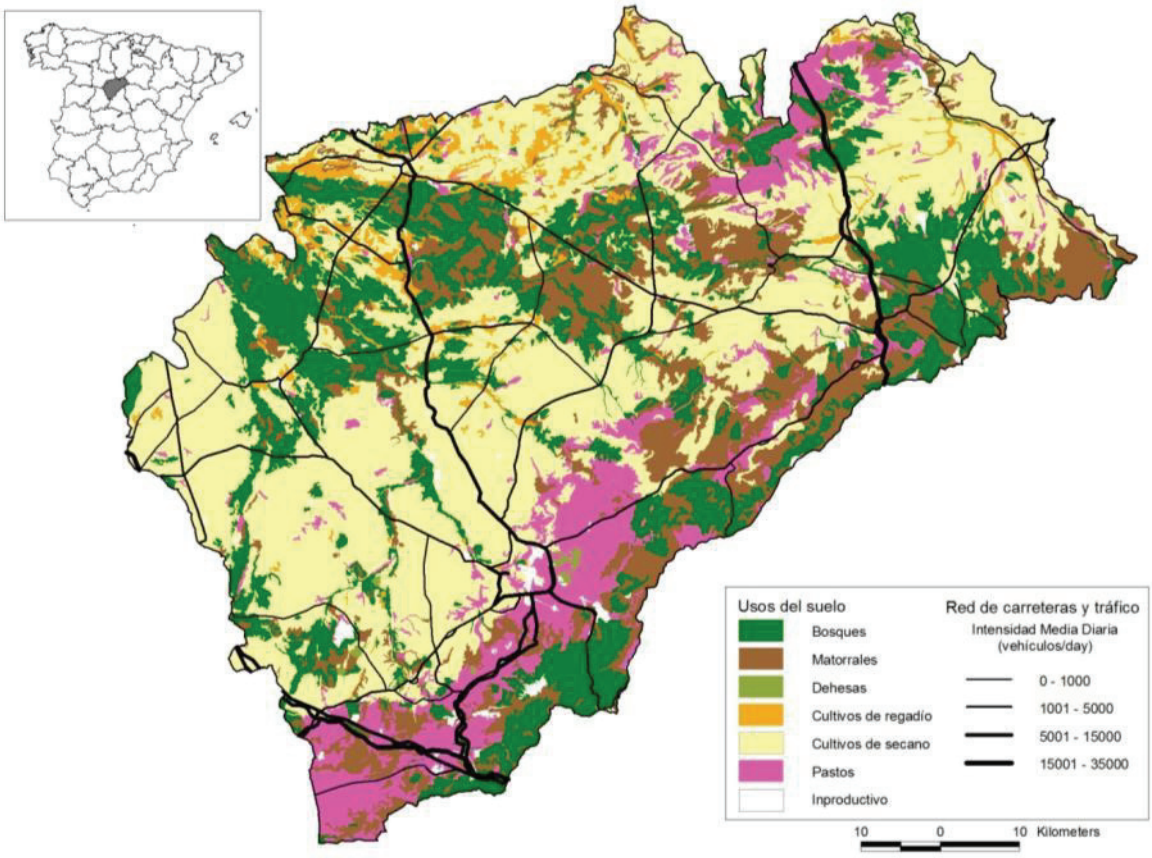
La red de carreteras se divide en tres competencias (Tabla 77): (i) Administración del Estado responsable de las carreteras principales (15,79% en longitud; 63,67% en tráfico); (ii) Junta de Castilla y León, a cargo de las carreteras regionales (31,72% en longitud; 30,90% en tráfico); Diputación Provincial, responsable de las carreteras locales (52,67% en longitud; alrededor del 5,43% del tráfico). Se han considerado las dos primeras redes, que suponen un 47,53% de la longitud y el 94,57% del tráfico.

Tabla 77 Red de carreteras de Segovia en 2014 según competencias y tipo de carreteras

Competencia	Tipo de carretera	Longitud km		%	IMD veh/día	Tráfico Total 10^6 veh/día	%
Administración del Estado	Autopista	67	368	15,79	7 787	2 866,99	63,67
	Autovía	48					
	Convencional	253					
Junta de Castilla y León	Autovía	64	739	31,72	1 881	1 391,28	30,90
	Convencional	675					
Diputación Provincial	Convencional	1 223	1 223	52,49	200	244,60	5,43
		2 330	**2 330**	**100,00**	**1 932**	**4 502,87**	**100,00**

Fuente: Elaboración propia

Figura 122 Red carreteras y usos del suelo de la provincia de Segovia



Fuente: Elaboración propia

2.3. Ámbito temporal

El secuestro de carbono por medio de vegetación no es un proceso inmediato, dependiendo del crecimiento de las plantas, sobre todo de los árboles. Una estimación del secuestro de carbono que incluya reforestación debe realizarse en un periodo de tiempo suficiente para compensar las diferencias de crecimiento con la edad, pero que sea a su vez abordable para la planificación. Se consideran 35 años, entre 2015 y 2050.

2.4. Cálculo de las emisiones de CO_2

A partir de los datos de tráfico de 2014 de las redes de carreteras del Estado (MFOM 2015d) y la Junta de Castilla y León (JCYL 2015b), se ha hecho una previsión de tráfico de 2015 a 2050. De acuerdo con las emisiones de los vehículos nuevos vendidos en la UE, las medidas en condiciones reales de conducción, la composición de la flota de vehículos y las emisiones de vehículos pesados se ha hecho una previsión del factor de emisión de CO_2 para cada año. Por medio de un sistema de información geográfica se aplica a cada sección de carretera su longitud, días por año, tráfico y factor de emisión de CO_2 obteniendo las emisiones totales por año.

2.5. Compensación de emisiones de CO_2

El objetivo de este estudio es analizar la viabilidad de compensar las emisiones de CO_2 por medio de actividades LULUCF. Se parte de la premisa que los bosques tienen una adecuada gestión en España, y de que no hay adicionalidad en la deforestación evitada en este país. Entre las posibles medidas de compensación se seleccionan cuatro con clara adicionalidad y posibilidad de medir el secuestro de carbono: agricultura de conservación, sistemas agroforestales, reforestación y plantación de setos, calculando el secuestro de carbono potencial en el periodo de referencia y su coste. En función de las emisiones del CO_2 de las carreteras y del secuestro de carbono posible, se evalúa la viabilidad técnica y financiera de la compensación, y las posibilidades de financiación.

2.6. Costes de Compensación

Las medidas son voluntarias, siendo preciso evitar pérdidas de productividad e ingresos y establecer incentivos. El coste por tonelada de CO_2 fijado depende de: i) la eficacia de las medidas (secuestro de carbono); ii) los costes de ejecución; (iii) la compensación por pérdida de productividad o ingresos por venta de productos o arrendamientos; (iv) los incentivos para la adopción de estas medidas; evaluados en un 10% de los ingresos actuales. El precio por tonelada de CO_2, se ha comparado con los valores propuestos por otros autores y con los precios de los mercados voluntarios de carbono en España.

2.7. Posibilidades de financiación

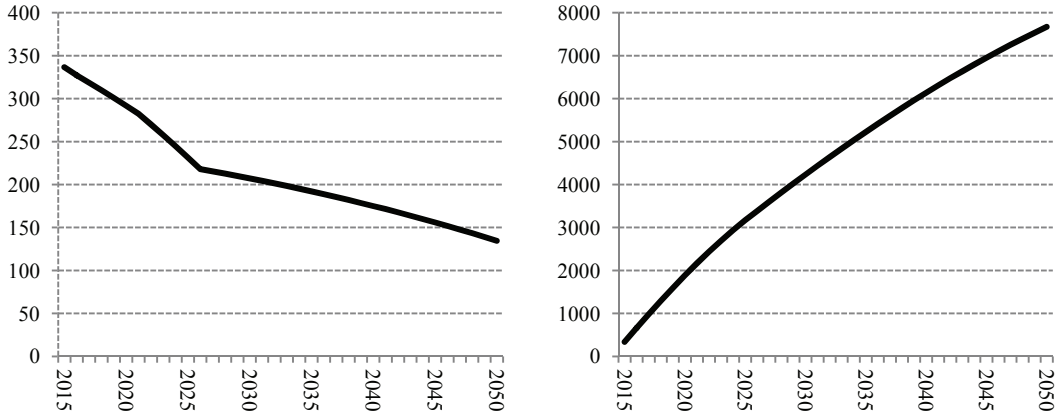
Para definir las posibilidades de financiación se ha aplicado el principio de quien contamina paga (EFTEC & IEEP 2010). Las emisiones de CO_2 del tráfico son producidas por los vehículos, por lo que quien contamina son sus propietarios, debiendo soportar los costos de la compensación. La emisión de CO_2 se produce como resultado del consumo de combustible, que depende del tipo de vehículo, la eficiencia y el comportamiento de conducción. En consecuencia, una posible fuente de financiación, aunque probablemente no la única, es un impuesto sobre los combustibles.

3. Resultados

3.1. Emisiones resultantes

La Orden FOM/3317/2010 (BOE 2010) establece los porcentajes de crecimiento a aplicar en la planificación de carreteras (1,08% entre 2010 y 2012, 1,12% entre 2013 y 2016 y 1,44% a partir de 2017). Usando estos valores, el crecimiento total del tráfico entre 2015 y 2050 sería del 64,42%. En ese mismo apartado se detalla la forma de calcular el factor de emisión de CO_2 por vehículo entre 2015 y 2050. Las emisiones de CO_2 en la red de carreteras en 2014 son 345,78 kt CO_2-eq, el 0,47% de las emisiones nacionales del transporte por carretera. Aunque el tráfico crece, las emisiones de los vehículos se reducen al mejorar su eficiencia, por lo que las emisiones anuales decrecen un 60%, de 336,52 kt CO_2-eq en 2015 a 134,60 kt CO_2-eq en 2050. Las emisiones totales en el periodo son 7 669,69 kt CO_2-eq (Figura 123).

Figura 123 Emisiones totales de CO_2 (kt CO_2-eq) en la red de carreteras de Segovia (2015-2050)



Izquierda: Previsión anual. Derecha: Resultados acumulados. Fuente: Elaboración propia

3.2. Medidas de compensación. Agricultura de conservación

Como se indicó, el laboreo de terrenos lleva una pérdida de SOC, mientras que por el contrario las prácticas de agricultura de conservación como el no laboreo (NT) y mantener los residuos de cultivo en el suelo (paja) ayudan al incremento del SOC.

Analizando 258 perfiles de suelos situados sobre cultivos de secano en Segovia (ITA 2015) se obtiene una media de materia orgánica en el suelo (SOM) del 1,8%, con máximos del 5 al 8%, lo que equivale a un 0,9% de SOC empleando un factor de conversión de 2 (Pribyl 2010). Considerando 30 cm de profundidad del suelo y una densidad aparente media para los suelos agrícolas de España de 1,405 g/cm³ (Rodríguez et al. 2016) se obtienen 37,94 t C ha^{-1}. Como se señaló existe un déficit de SOC en los suelos agrícolas en clima mediterráneo (Moyano et al. 1986, Romanyà et al. 2007). Para esta zona, una buena situación sería un 5% de SOM, el valor alcanzado en los mejores suelos, lo que supone que hay un déficit medio de 67,44 t C ha^{-1}

Adoptando un tasa conservadora de secuestro de SOC con no laboreo de 0,226 t ha^{-1} $año^{-1}$, durante 20 años, hasta la estabilización, se podrían fijar 4,52 t ha^{-1}, muy por debajo del nivel de saturación. A esto se pueden añadir 0,48 t C ha^{-1} (0,024 t ha^{-1} $año^{-1}$) por el menor consumo de combustibles, dando un total de 5 t C ha^{-1} en 20 años. La superficie de cereal en secano es de 167 365 ha por lo que el secuestro de carbono entre 2015 y 2035 sería de 3 071 kt CO_2-eq (Tabla 78).

Tabla 78 Fijación de carbono en suelos agrícolas de secano con no-laboreo (NT)

Secuestro de SOC [a]	Menor consumo de combustible [b]	Total	Total en 20 años	Cereal en secano en la provincia [c]	Máximo secuestro de carbono entre 2015 y 2035	
t C ha^{-1} $año^{-1}$	t C ha^{-1} $año^{-1}$	t C ha^{-1} $año^{-1}$	t C ha^{-1}	ha	kt C	kt CO_2
0,226	0,024	0,250	5,00	167 365	836,83	**3 071,15**

Fuente: Elaboración propia. [a] Álvaro-Fuentes & Cantero-Martínez (2010); [b] Kern & Johnson (1993); Tabla 76

3.3. Medidas de compensación. Plantación de arbolado

Las otras tres medidas propuestas, sistemas agroforestales, reforestación y setos vivos, se basan en la plantación de arbolado, por lo que el cálculo del secuestro de carbono es similar en todos ellos. Los sistemas agroforestales combinan pastos o cultivos con una cubierta arbolada clara, las tradicionales dehesas españolas. Esa presencia de arbolado permite fijar carbono, sin un cambio de uso principal del suelo. Para este supuesto se han planteado dos posibles medidas:

- Dehesas en cultivos de cereal en secano, plantando 25 pies/ha de encina *(Quercus ilex)*. La presencia de árboles afecta al rendimiento del laboreo, por lo que es mejor optar por el NT. Considerando un resguardo de 2x2 m por cada pie de

encina para prevenir daños, la pérdida de tierra es de 100 m²/ha, un 1% de la superficie. Se podrían transformar todos los cultivos de cereal en secano.

- Dehesas en zonas de pastos, con 100 pies/ha de encina *(Quercus ilex)* excepto en los suelos más húmedos donde podría ser fresno *(Fraxinus angustifolia)*. Considerando una zona de protección de 1x1 m por cada pie la pérdida de pastos sería también 100 m²/ha, un 1% de la superficie. Se ha considerado que podrían transformarse todos los pastos de la provincia, estimando que en esta zona corresponden potencialmente un 80% a zonas de encina y un 20% de fresno.

Otra posibilidad interesante para el secuestro de carbono es la reforestación de tierras agrícolas marginales. Se ha considerado para calcular el secuestro potencial de carbono una plantación con un 50% de encina *(Quercus ilex)*, la especie potencial dominante en la provincia, y otro 50% de pino resineros *(Pinus pinaster),* la principal especie forestal de la provincia actualmente (JCYL 2007). La densidad inicial de plantación considerada es de 1 111 pies/ha (marco de 3x3 m), con planta de 2 savias, estimando que sobreviven hasta los 35 años un 40% de las plantas, 444 pies/ha. Se ha considerado que podrían reforestarse todos los eriales a pastos.

El paisaje tradicional segoviano era en el pasado un mosaico de cultivos y setos, sobre todo de melojo *(Quercus pyrenaica),* encina *(Q.* ilex) y fresno *(Fraxinus angustifolia)* como especies arbóreas, mezcladas con un espinal dominado por zarzamora *(Rubus ulmifolius)*, rosales silvestres *(Rosa canina, R. corymbifera),* majuelo *(Crataegus monogyna)* y endrino *(Prunus spinosa)*. La intensificación agraria unida a la concentración parcelaria ha llevado a la destrucción de muchos de estos setos. Una medida de gran interés ecológico es la recuperación de estos setos entre parcelas de cultivo, para restaurar el paisaje original, crear refugios para la fauna y fijar carbono.

Para calcular el potencial de esta medida se define una plantación con *Quercus* ilex (60%), *Q. pyrenaica* (20%) y *Fraxinus angustifolia* (20%), con 1 111 pies/ha de densidad y supervivencia a los 35 años del 40% (444 pies/ha). Se deberían plantar también especies arbustivas, pero no han sido consideradas en los cálculos de carbono. La medida se diseña para cultivos de cereal en secano, las zonas más deforestadas de la provincia. En Castilla y León hay 53 700 parcelas dedicadas al cereal con una superficie total de 1 812 640 ha (INE 2014), lo que supone una media de 33,75 ha/parcela. Considerando la parcela media cuadrada, bordeada por un seto de 3 m de ancho, la superficie de setos sería 0,70 ha por parcela media, un 2,07% de la superficie total.

Para calcular el secuestro de carbono en estas tres medidas (Tabla 79, Tabla 80 y Tabla 81) se han considerado los siguientes datos:

- Diámetro normal de los árboles en 2050, con 37 años (2 años al plantarse y 35 de crecimiento). Los datos se han calculado a partir de información obtenida de Ximénez de Embún (1963) para *Quercus ilex*, Delgado (2009) para *Q. pyrenaica,* Modrego & Cisneros (2008) para *Fraxinu*s y Río et al. (2006) para *Pinus pinaster*.

- Biomasa de los árboles con 37 años (la biomasa inicial con 2 savias es despreciable), calculada a partir de la información de Montero et al. (2005).
- Porcentaje de carbono en la materia seca de las especies (Montero et al. 2005).
- Factor de equivalencia entre carbono fijado y secuestro de CO_2 (3,67).
- CO_2 fijado por especies y densidades de plantación propuestas.
- Máxima fijación potencial de CO_2, dependiendo del uso de la tierra.

Tabla 79 Fijación de carbono con medidas agroforestales (2015-2050)

Especies	DN37 cm[a]	Biomasa kg/pie	Carbono %	Carbono kg/pie	CO_2 fijado kg/pie	CO_2 fijado 35 a.		Máx. CO_2 fijado 35 años	
						pies/ha	t/ha	Uso suelo ha[e]	kt CO_2
Quercus ilex	14[b]	135,14[d]	47,5[d]	64,19	235,58	25	5,89	Cereal 167 365	985,78
						100	23,56	Pastos 103 609	2 441,02
Fraxinus angustifolia	23[c]	446,02[d]	47,8[d]	213,20	782,44	100	78,24	Pastos 25 902	2 026,59
									5 453,39

Fuente: Elaboración propia. [a] Diámetro normal con 37 años; [b] Ximénez de Embún (1963); [c] Modrego & Cisneros (2008); [d] Montero et al. (2005); Tabla 76

Tabla 80 Fijación de carbono mediante reforestación de eriales (2015-2050)

Especies	DN37 cm[a]	Biomasa kg/pie	Carbono %	Carbono kg/pie	CO_2 fijado kg/pie	CO_2 fijado 35 a.		Máx. CO_2 fijado 35 años	
						pies/ha	t/ha	Uso suelo ha[e]	kt CO_2
Quercus ilex	14[b]	135,14[d]	47,5[d]	64,19	235,58	222	52,30	Erial a pastos 54 783 ha	2 865,08
Pinus pinaster	23[c]	166,70[d]	51,1[d]	85,18	312,62	222	69,40		3 802,03
									6 667,11

Fuente: Elaboración propia. [a] Diámetro normal con 37 años; [b] Ximénez de Embún (1963); [c] Río et al. (2006); [d] Montero et al. (2005); Tabla 76

Tabla 81 Fijación de carbono en setos entre cultivos de cereal (2015-2050)

Especies	DN37 cm[a]	Biomasa kg/pie	Carbono %	Carbono kg/pie	CO_2 fijado kg/pie	CO_2 fijado 35 a.		Máx. CO_2 fijado 35 años	
						pies/ha	t/ha	Setos ha	kt CO_2
Quercus ilex	14[b]	135,14[e]	47,5[e]	64,19	235,58	266	62,66	2,07% de cultivo cereal en secano 3 456 ha [f]	216,55
Quercus pyrenaica	13[c]	76,78[e]	47,5[e]	36,47	133,85	89	11,91		41,16
Fraxinus angustifolia	23[d]	446,02[e]	47,8[e]	213,20	782,44	89	69,64		240,68
									498,39

Fuente: Elaboración propia. [a] Diámetro normal con 37 años; [b] Ximénez de Embún (1963); [c] Delgado (2009); [d] Modrego & Cisneros (2008); [e] Montero et al. (2005); [f] Tabla 76 .

3.4. Estimación financiera

Para determinar la viabilidad económica es necesario establecer los costes (Tabla 82 y Tabla 83), todos ellos calculados para 2015 considerando los siguientes aspectos:

- La producción de grano y paja y los precios del grano provienen de información de la campaña de cereales 2014 en Segovia (JCYL 2015a). Para la paja, plantación y mantenimiento se han usado precios de mercado contrastados.
- En el NT se ha considerado una pérdida de producción de grano del 10%, como margen de incertidumbre. Como la paja permanece en el suelo no podrá ser vendida, debiendo compensarse. La plantación de dehesas ocupa un 1% del suelo, y la reforestación y setos el 100%. En todos los casos se debe compensar de acuerdo con la producción; la producción en cultivos de cereal se calcula como en el NT, y en zonas ganaderas usando los precios medios de mercado de arrendamiento de prados (100 €/ha) y de pastos (50 €/ha).
- Aparte de cubrir el coste de las medidas, y la pérdida de producción, debe existir un beneficio para los propietarios de los terrenos, para incentivar la adopción de estas medidas. Se ha considerado un 10% de la actual producción de los terrenos.

Tabla 82 Costes de la fijación de carbono con no-laboreo (NT)

Cereal	Área	Producción (kg/ha)		Precio (€/100 kg)		Compensación (€/ha)				
		Grano[(a)]	Paja[(a)]	Grano[(a)]	Paja[(b)]	Pérdida de producción de grano[(c)]	Pérdida de venta de paja	Incentivo[(d)]	Total por año	Total 2015-2035
Trigo	66 615	2 207	1 119	17,44	3,00	38,49	33,57	41,85	113,91	2 278,14
Cebada	86 827	1 868	959	15,25	4,50	28,49	43,16	32,80	104,44	2 088,89
Avena	1 337	1 312	672	16,11	3,00	21,14	20,16	23,15	64,45	1 288,97
Centeno	11 666	1 465	752	15,36	3,00	22,50	22,56	24,76	69,82	1 396,42
Triticale	920	1 968	1 000	17,00[(c)]	3,00	33,46	30,00	36,46	99,91	1 998,24
	167 365	**1 971**	**1 006**	**16,15**	**3,78**	**32,02**	**37,65**	**35,78**	**105,45**	**2 109,06**

Fuente: Elaboración propia. [a] JCYL (2015a); [b] Según mercado; [c] Estimado el 10% del grano; [d] Propuesto el 10% del total (grano y paja)

Tabla 83 Costes de la fijación de carbono mediante plantaciones (dehesas, reforestación y setos)

Medida		Área	Densidad plantación	Coste de plantación[(a)]	Coste de mantenimiento 2años[(a)]	Pérdida de producción del terreno	Incentivo[(c)]	Total 2015-2050
			pies/ha	€/ha	€/ha 2y	€/ha 35 a[(b)]	€/ha 35 a	€/ha
Dehesa	Cereal	167 365	25	125,00	100,00	146,46	1 464,65	1 836,11
	Pastos *(Q. ilex)*	103 609	100	450,00	400,00	35,00	350,00	1 235,00
	Pastos *(Fraxinus)*	25 902	100	450,00	400,00	35,00	350,00	1 235,00
Reforestación	Eriales	54 783	1 111	3 100,00	1 100,00	1 750,00	175,00	6 125,00
Setos	Cereal	3 456	1 111	3 100,00	1 100,00	14 646,48	1 464,65	20 311,13

Fuente: Elaboración propia. [a] Según mercado; [b] Dehesas 1%, reforestación y setos 100%; [c] Propuesto el 10% de la producción o renta de arriendo

El secuestro potencial aplicando todas las medidas propuestas sería 15 690,04 kt de CO_2, más del doble de las emisiones entre 2015 y 2050. La eficiencia y coste por tonelada de CO_2 varían mucho entre las medidas.

Para calcular un presupuesto global de compensación se han estudiado tres escenarios: (1) optimización de costes, utilizando las medidas con coste más barato por tonelada de CO_2; (2) uso equitativo de todas las medidas; la compensación requerida es del 48,86% de la posible, por lo que cada medida se utiliza en este porcentaje; (3) combinación más costosa, utilizando primero las medidas con mayor coste por tonelada de CO_2. Dependiendo de los escenarios el presupuesto de compensación varía de 315.85 a 892.19 millones € (Tabla 84).

Tabla 84 Coste por t de CO_2 y coste total de la compensación según escenarios

Medida		Máximo secuestro kt CO_2	Eficiencia t CO_2/ha	Coste (€/ t CO_2)	1. Optimización de coste por t		2. Uso equitativo de las medidas		3. Combinación más cara	
					kt CO_2	M €*	kt CO_2	M €*	kt CO_2	M €*
	Cereal	985.78	5.89	311.73	0	0	481.69	150.16	985.78	307.30
Dehesas	Pastos *(Q. ilex)*	2441.02	23.56	52.42	0	0	1192.77	62.52	2441.02	127.96
	Pastos *(Fraxinus)*	2026.59	78.24	15.78	2026.59	31.98	990.26	15.63	0	0
Reforestación		6667.11	121.70	50.33	5640.10	283.87	3257.78	163.96	670.35	33.74
Setos		498.39	144.17	140.84	0	0	243.53	34.30	498.39	70.19
No-laboreo		3071.15	18.35	114.94	0	0	1500.67	172.49	3071.15	353.00
		15690.04	**74.03**	**78.14**	**7666.69**	**315.85**	**7666.69**	**599.06**	**7666.69**	**892.19**

*Millones de €. Fuente: Elaboración propia.

3.5. Financiación de la compensación

La principal opción de financiación considerada es un impuesto sobre los combustibles. La emisión del gasoil es de 2,660 kg CO_2/l, y para la gasolina 2,325 kg CO_2/l (EPA 2005); las ventas de combustibles en España en 2015 fueron del 82,4% del gasóleo y del 17,6% de la gasolina (CORES 2015), por lo que la media de emisión ponderada es de 2,601 kg CO_2/l. El precio medio del combustible en España en 2015 (MINETUR 2015) fue de 1,19 €/l para el gasoil y 1,33 € / l para la gasolina; utilizando los porcentajes de ventas, la media ponderada es de 1,21 €/l.

Las emisiones totales estimadas, 7 669,69 kt de CO_2, equivalen a un consumo de 2 948,75 millones de litros de combustible. Dependiendo de los escenarios de compensación, el impacto sobre el precio del combustible es de 0,11 a 0,30 € por litro, del 9 al 25% (Tabla 85).

Tabla 85 Repercusión de costes de las medidas compensatorias por litro de carburante

Emisión de CO_2 kt CO_2	Emisión carburante kg CO_2/l	Consumo carburante Millones l	Escenarios								
			1. Optimización costes			2. Equitativo			3. Más costoso		
			Coste total millones €	Coste / litro		Coste total millones €	Coste / litro		Coste total millones €	Coste / litro	
				€/l	%		€/l	%		€/l	%
7669.69	2.601	2948.75	315.85	0.11	8.9	599.06	0.20	16.8	892.19	0.30	25.0

Fuente: Elaboración propia.

4. Discusión

En el área estudiada, la reforestación, la agricultura de conservación y los sistemas agroforestales pueden compensar las emisiones de CO_2 del tráfico a medio plazo sin cambios en las actividades económicas relacionadas con uso del suelo, proporcionando importantes ventajas ecológicas y paisajísticas; El principal desafío es la financiación.

La medida más eficaz es la plantación de setos, con grandes beneficios ecológicos, aunque costosa y con potencial limitado porque implica la ocupación de tierras, compitiendo con la agricultura. Las dehesas en cultivos no son muy efectivas porque la encina crece lentamente, haciendo que la medida sea costosa, aunque produce fijación a largo plazo porque esta especie vive cientos de años. Las dehesas en pastos son más eficaces porque permiten mayor densidad de árboles y la producción de los terrenos es menor, bajando el coste de compensación. En suelos húmedos el fresno tiene un crecimiento mucho más rápido, haciendo su uso más eficiente.

La reforestación puede compensar el 87% de las emisiones totales de CO_2 a través de la plantación de eriales con uso ganadero marginal, con un impacto sobre la productividad mínimo. Además, la inversión puede ser rentable porque proporciona una fuente de energía renovable (Graham 2003).

El secuestro de carbono en el suelo mediante agricultura de conservación tiene una eficiencia limitada y no es barato, pero tiene la ventaja de que los pagos son anuales, sin requerir inversiones iniciales. Es una medida de transición hasta que la eficiencia de los vehículos aumente, se encuentren combustibles alternativos (Lal 2004) y las plantaciones crezcan. El NT es probablemente más rentable en esta área que el CT, por lo que los pagos podrían reducirse gradualmente hasta desaparecer. Sommer y Bossio (2014) concluyen que esta medida no puede considerarse una base para la estabilización climática, pero Lassaletta y Aguilera (2015) discrepan, argumentando que merece una atención importante para los científicos, gestores y políticos.

El lento crecimiento de los árboles bajo clima mediterráneo ralentiza el secuestro de carbono y hace que la compensación sea más cara, pero factible; en climas más lluviosos el coste se reducirá. Hobbs et al. (2016) muestran diferencias en la tasa media de secuestro de plantaciones arbóreas en función de la precipitación anual en el sur de Australia, oscilando entre 2,94 t CO_2-e ha^{-1} $año^{-1}$ con una precipitación media anual de 251-350 mm a 44,59 t CO_2-e ha^{-1} $año^{-1}$ con más de 750 mm anuales; multiplicar la precipitación por 2,5 aumenta el secuestro 15 veces.

Una ventaja de España es su gran extensión y una menor densidad de población en comparación con la media de la UE, con grandes zonas agrícolas, productivas y marginales, donde es posible actuar. Este binomio, clima-tierras, determina las posibilidades de compensación, con diferencias en factibilidad y costes entre regiones.

Los costes por tonelada de CO_2 en esta propuesta (15,78 a 311,73 €/t, Tabla 84) están por encima de los precios de los mercados voluntarios de carbono en España (usualmente 5 a 15 €/t) debido a las limitaciones climáticas y porque se han diseñado con criterios ecológicos y como incentivo a los propietarios, y no para maximizar el secuestro de carbono. Además, la compensación en un país desarrollado, como España, es mucho más cara que en países en desarrollo, donde muchos mercados de carbono tienen sus proyectos. Comparando los resultados con otros autores, Rodríguez-Entrena et al. (2012) calculan un valor por tonelada de CO_2 secuestrado en suelos de olivar de 17 €, mientras que Lubowski et al. (2006) establecen un coste entre 8 y 164 USD (7,65-156,92 €) dependiendo del tipo de interés, más similares a nuestros resultados. Benítez et al. (2007) indica que la plantación de árboles en 20 años podría compensar un año de emisiones globales de carbono en el sector energético si se considera un precio del carbono de 50 USD por tonelada (47,84 €), cerca de nuestros resultados para la reforestación (50,33 €). Sin embargo, el precio depende del clima y del nivel de vida de los países, por lo que no es posible hacer comparaciones globales. Además, el precio real del carbono y el precio esperado por la sociedad pueden diferir; TaeWoo et al. (2014) indica que las empresas surcoreanas están dispuestas a pagar entre 5,45 y 7,77 USD/t de CO_2 en proyectos nacionales y extranjeros, muy por debajo de 50 USD por tonelada. Teniendo en cuenta las diferencias de precios entre medidas, existe el riesgo de utilizar sólo las más baratas, aunque todas son deseables. Esto requiere la intervención de las administraciones para regular estas compensaciones, evitando desequilibrios.

Aplicando el principio de "quien contamina paga", se puede plantear un impuesto sobre los carburantes para la financiación de la compensación de las emisiones CO_2 del tráfico rodado, de manera que quienes emiten, los conductores, asuman el costo de la compensación. Sin embargo, esto puede conducir a un fuerte aumento en el precio de los carburantes, de hasta el 25%, con implicaciones macroeconómicas. Una opción para evitar un aumento excesivo del precio del carburante es cobrar sólo el coste de utilizar la reforestación, la medida más común, que este caso implicaría 0,13 €/l, un 11% del precio. El resto de los fondos podrían provenir de diferentes fuentes, teniendo en cuenta las ventajas sociales y ecológicas de estas medidas. Las medidas agroforestales y agrícolas pueden vincularse a las ayudas de la Política Agrícola Común para promover una agricultura más ecológica. Asimismo, es posible vincular ayudas estatales o comunitarias para mejorar la biodiversidad. La inclusión del sector LULUCF en la contabilidad nacional de GEI en el Marco Climático y Energético de la UE de 2030 (CE 2015) haría que la compensación de las emisiones de CO2 en el tráfico por carretera contribuyera a alcanzar los objetivos nacionales de emisiones.

La idea de compensar por daños ambientales inevitables es ampliamente aceptada, aunque en la práctica limitada, porque rara vez es una obligación legal. La compensación ambiental depende de la voluntad política de cada país. Un ejemplo es la

compensación de los daños causados a humedales establecida en la Ley de Agua Limpia de 1972 de los Estados Unidos (GPO 2016), que ha favorecido el desarrollo de mecanismos específicos, como los bancos de mitigación. Asimismo, se podría establecer la compensación de emisiones de GEI en la construcción de proyectos de desarrollo, o, más ambiciosos, en su funcionamiento.

5. Conclusiones

La compensación de las emisiones de CO_2 generadas por el tráfico rodado a través de actividades LULUCF es posible en el centro de España y probablemente en muchas otras regiones y países; de hecho, la oferta de compensación potencial en esta área es el doble de la requerida por las emisiones de GEI de la carretera. La viabilidad de estas medidas depende de la disponibilidad de tierras y del tráfico, y los costes del clima, que determinan el crecimiento de la vegetación, y del nivel de vida, que determina el coste de ejecución, compensación e incentivación. Estas medidas pueden extrapolarse a gran parte de la región mediterránea, pero en cada caso es necesario determinar las especies utilizables, su crecimiento y los costes locales para calcular eficacia y costes.

Los costes son mayores cuando se integran el secuestro de carbono, la mejora de la biodiversidad y el desarrollo rural que cuando se busca sólo maximizar el secuestro. Sin embargo, una integración de todos estos objetivos es una estrategia de beneficio mutuo con ventajas climáticas, ecológicas, sociales y paisajísticas. También hay importantes diferencias de costos entre las medidas, siendo la reforestación la más extensa y eficiente, aunque no debería ser la única opción.

De acuerdo con el principio de quien contamina paga, la principal fuente de financiación puede ser un impuesto sobre los carburantes, porque es precisamente el consumo de carburante lo que genera emisiones de GEI. Dependiendo de las medidas, el impacto en el precio del carburante podría estar entre el 9 y el 25%. Sin embargo, teniendo en cuenta los beneficios sociales y ecológicos de estas acciones, sería lógico integrar otros canales de financiación, como la Política Agrícola Común en la UE o fondos gubernamentales para la mejora de la biodiversidad y el paisaje, reduciendo el impacto sobre el precio del combustible.

El principal desafío es la financiación, que depende en gran medida de la voluntad política y la conciencia de los ciudadanos.

Anexo 4. Caso práctico de adaptación al cambio climático

Índice

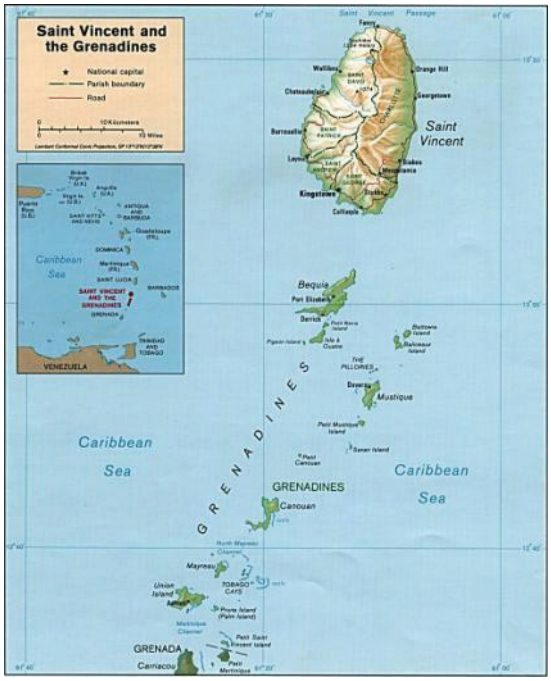
1. Antecedentes 443
2. Descripción del proyecto 444
3. Evaluación ambiental del proyecto 447

1. Antecedentes

El caso se basa en un Plan de Gestión Ambiental (Enríquez de Salamanca 2014c), y se ha publicado en Enríquez de Salamanca (2014b) y presentado en el VIII Congreso Nacional de Evaluación Ambiental (Enríquez de Salamanca & Carrasco 2015).

San Vicente y las Granadinas es un país insular de poco más de 100.000 habitantes situado en las Antillas Menores, formando parte de las Islas de Barlovento, las Antillas meridionales. Su territorio, de 389 km², comprende la isla principal, San Vicente, y las dos terceras partes del archipiélago de las Granadinas. Su capital y ciudad más poblada es Kingstown, ubicada en San Vicente (Figura 124).

Figura 124 Mapa de San Vicente y las Granadinas



Fuente: FAO

Este país sufre desastres naturales con frecuencia. Al norte de la isla de San Vicente se localiza el volcán La Soufrière, con un largo historial de erupciones que han causado víctimas y daños a la agricultura. También se ve afectado con frecuencia por huracanes, los últimos en 1980 (Allen), 1987 (Emily), 1999 (Lenny), 2002 (Lili) y 2010 (Tomas). El huracán Lenny afectó a 20 500 personas (18,8% del país). El huracán Tomas no causó muertos (si heridos), pero produjo pérdidas en la agricultura de más de 25 millones de dólares americanos, obligó a 1 200 personas a buscar refugio, dejó 600 casas sin tejado y generó una gran cantidad de caídas de postes eléctricos y árboles y deslizamientos de tierras que hicieron intransitables algunas carreteras principales. Fruto de las perturbaciones tropicales se producen marejadas que afectan con su oleaje a las zonas costeras. Además, las tormentas tropicales pueden descargar grandes cantidades de agua lo que, unido a las fuertes pendientes de San Vicente, origina crecidas súbitas e inundaciones, como las ocurridas en 1977, 1986, 1987, 1992 o 2013. Estos desastres naturales, sobre todo las inundaciones y deslizamientos, dañan las infraestructuras del país, afectando al suministro de energía eléctrica o impidiendo los desplazamientos por carretera o el uso del aeropuerto.

Según el GFDRR (2010) San Vicente y las Granadinas ocupa el puesto 54 entre los 96 países con riesgo relativamente alto de mortalidad por peligros naturales. La concurrencia de desastres naturales y las pérdidas de vidas humanas y económicas,

llevaron a un creciente interés por la reducción del riesgo de desastres. Aunque existían trabajos previos sobre riesgos volcánicos (Robertson 2005) o por huracanes (Ferdinand 2006), el punto de inflexión lo marca el huracán Tomas en 2010, momento a partir del cual se intensifican los esfuerzos en adaptación. Se desarrolla el Proyecto de Reducción de la Vulnerabilidad de Desastres (DVRP), que se sometió a evaluación ambiental y social, y el programa piloto de resiliencia al clima (GSVG 2010a, 2010b, 2011). Diversos organismos han realizado informes sobre el riesgo del cambio climático en el país (GFDRR 2010, McSweeney 2010, Simpson 2012, ECLAC 2012).

Un segundo punto de inflexión fueron las tormentas tropicales sufridas en diciembre de 2013, que dieron lugar a intensas inundaciones en San Vicente, causando muchos daños en infraestructuras de transporte, eléctricas y de agua y en edificios. El gobierno realizó un informe de daños (GSVG 2014a) donde se señala que en la última década los daños causados por desastres naturales en el país habían sido aproximadamente de 41 millones de dólares, más que la suma acumulativa de daños desde 1961 a 2008. En las tormentas de 2013 se vieron afectadas 16 885 personas con daños de más de 86 millones de dólares y pérdidas de 22 millones.

Para enfrentarse a los daños derivados del huracán Tomas y las tormentas de 2013, reducir la vulnerabilidad a los riesgos naturales e impactos del cambio climático y aumentar la resiliencia, el gobierno de San Vicente y las Granadinas solicitó asistencia financiera al Banco Mundial para desarrollar un proyecto dentro del Programa Regional de Reducción de la Vulnerabilidad de Desastres para la Región del Caribe Oriental, que a su vez se incluye en el Programa de Préstamos Adaptables del Banco Mundial.

2. Descripción del proyecto

El Proyecto de Reducción de la Vulnerabilidad a Desastres (DVRP) es un paraguas que abarca proyectos y actividades de reducción de riesgos, aumento de la resiliencia y adaptación al cambio climático. Incluye actuaciones de fortalecimiento institucional, capacitación y ejecución de obras civiles para modernizar o proteger bienes nacionales. Uno de los proyectos incluidos dentro del DVRP es el modelado hidrológico/hidráulico e investigación geotécnica en puentes, vados y ríos. El objeto de este proyecto es desarrollar cuatro actuaciones principales:

Middle Bridge (South River)

El South River se sitúa al sur de la isla de San Vicente. Cruza en su tramo bajo la ciudad de Kingstown, la capital, en cuyo puerto desemboca en el mar. A su paso por la ciudad tienen numerosos puentes, próximos entre sí. En Middle Street se localiza un puente de arco de mampostería, con problemas por su sección, inferior al resto de puentes, y con erosión en la base de los apoyos. En caso de avenidas se producen

desbordamientos en este punto, afectando a varias calles del centro urbano, agravando el descalzamiento del puente y afectando a su estabilidad. Para solucionar estos problemas, se decidió demoler el puente y sustituirlo por uno nuevo con mayor capacidad hidráulica y mayor seguridad (Figura 125).

Figura 125 Middle Bridge sobre el South River en Kingstown

Fuente: Izquierda, elaboración propia con ortofoto del Gobierno; derecha, autor.

Defensa de márgenes en el río Warrawarrow

La cuenca del río Warrawarrow se sitúa al sur de San Vicente, siendo una de las más grandes de la isla, con 1 200 ha. El río nace al pie del pico St. Andrew, en una zona de fuerte relieve y desemboca en el mar en Arnos Vale, junto al aeropuerto. La parte alta de la cuenca es boscosa, con cultivos dispersos en zonas de fuerte pendiente. La parte baja de la cuenca tiene numerosas edificaciones, con densidad baja o media salvo en Arnos Vale. En las inundaciones de 2013 se produjeron desbordamientos, con dos zonas especialmente conflictiva, donde se prevé actuar (Figura 126).

- **VINLEC-BRAGSA.** Tramo que linda con la central eléctrica diesel de Cane Hall de VINLEC (*St. Vincent Electricity Services Ltd.*) y el parque de maquinaria de BRAGSA (*Bridges, Roads and General Services Authority*). Las últimas avenidas modificaron el curso del río, que abandonó su lecho para excavar el talud que linda con estas empresas. Son instalaciones estratégicas ya que de ellas depende la producción de energía eléctrica (las tormentas de 2013 dejaron sin servicio las tres centrales hidroeléctricas de la isla, manteniéndose solo Cane Hall) y la reparación de infraestructuras. Se plantea la estabilización del talud con gaviones.
- **Desembocadura del río.** Desde el cruce de la Windward Highway, el río discurre encajonado entre la pista del aeropuerto y la localidad de Arnos Vale. En la desembocadura se ha construido un estadio, que ha ocupado parte del río, obligando a canalizarlo. La canalización se ha mostrado ineficaz, ya que en las últimas avenidas el río se desbordó e inundó parte del aeropuerto. Se debe revisar

el diseño, y proponer actuaciones que incrementen la capacidad del río, evitando inundaciones en el aeropuerto, el estadio y las viviendas próximas al río.

Figura 126 Zonas de actuación en el río Warrawarrow.

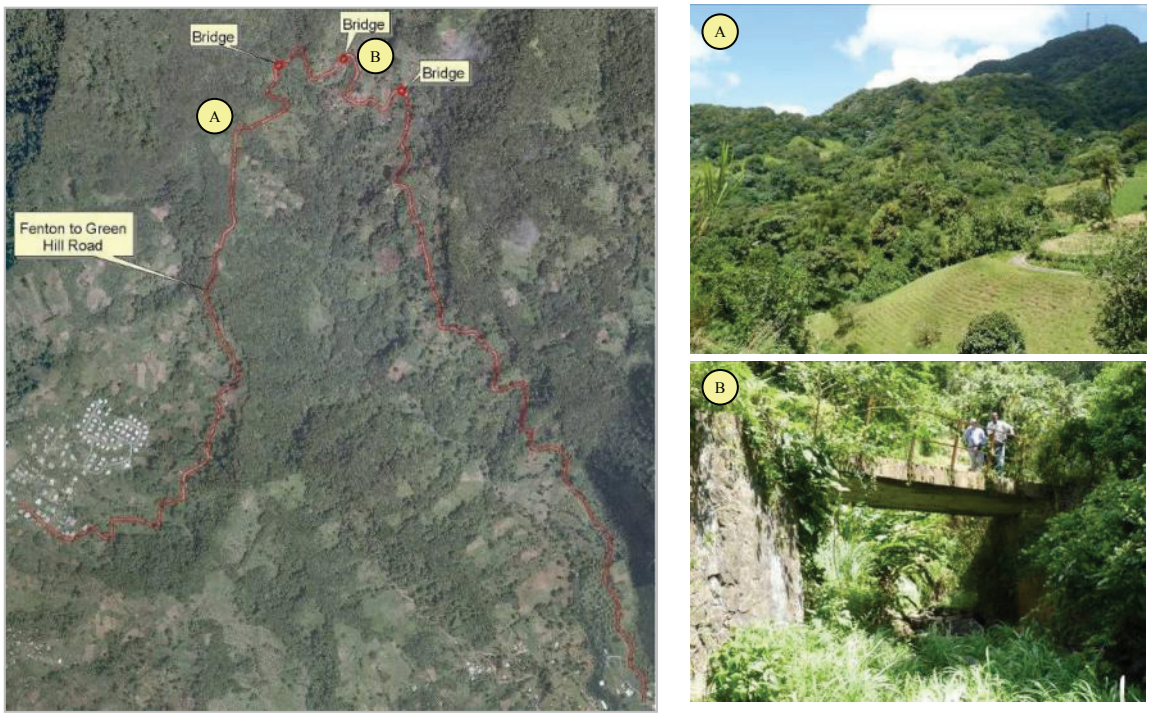
Fuente: Izquierda, elaboración propia con ortofoto del Gobierno; derecha, arriba y abajo, autor.

Diseño de puentes y drenaje en la carretera de Green Hill a Fenton

Desde Green Hill, al norte de Kingstown, parte una carretera que cruza la ladera del monte St. Andrew y la cabecera del río Warrawarrow, finalizando en Fenton, al norte de Arnos Vale (Figura 127). Hasta hace unos años era transitable para vehículos, teniendo una cuneta de fábrica en todo su margen, y contando con un marco, tres puentes y varios vados. El huracán Tomas en 2010 y las tormentas de 2013, sumadas a las intensas precipitaciones habituales en la zona, han llevado a que el camino sea intransitable en la actualidad. La cuneta ha desaparecido por deslizamientos de la ladera, haciendo que el agua corra por la plataforma, dañándola. El marco y los tres puentes siguen operativos, pero tienen problemas de erosión, que afectan a su seguridad.

Aunque la carretera tiene poco uso es una ruta estratégica para comunicar Kingstown y Arnos Vale, las dos localidades más pobladas del país, además de la capital y el aeropuerto. En caso desbordamientos del Warrawarrow o del South River en sus cursos bajos la actual carretera *(Winward Highway)* podría quedar cortada, y ambas localidades incomunicadas. La carretera de Green Hill a Fenton actuaría como vía alternativa de comunicación. La reconstrucción de toda la carretera no puede incluirse dentro del proyecto financiado por el Banco Mundial. Por ello, se ha incluido únicamente la demolición y reconstrucción de los tres puentes, el arreglo del marco y la realización de un nuevo drenaje longitudinal. El arreglo de la plataforma la asumiría posteriormente el Gobierno de San Vicente y las Granadinas.

Figura 127 Carretera de Fenton a Green Hill



Fuente: Izquierda, elaboración propia con ortofoto del Gobierno; derecha, arriba y abajo, autor.

3. Evaluación ambiental del proyecto

Aunque el promotor del proyecto es el Gobierno, al depender de un préstamo del Banco Mundial son de aplicación las políticas operativas de este organismo y las condiciones en cuanto al alcance y contenidos de los proyectos financiables. Son de aplicación a la EA del proyecto la Ley Nº 45 de 1992 (*Town and Country Planning Act*) que exige la EIA de proyectos sensibles (no es este caso), el Marco de Gestión Medioambiental (EMF) del Programa Regional de Reducción de la Vulnerabilidad de Desastres (GSVG 2014b), que establece una EA de los proyectos acorde con los requisitos del Banco Mundial, y la política operacional OP 4.01 "Evaluación ambiental" del Banco Mundial (World Bank 2014), que establece varias categorías de proyectos:

- Categoría A: Proyectos que puede tener impactos adversos significativos. Se debe elaborar un EsIA que examine los impactos potenciales, analice alternativas y proponga medidas para prevenir, minimizar, mitigar o compensar los impactos.
- Categoría B: Proyectos con impactos menos adversos, localizados, no irreversibles y con medidas de mitigación más sencillas. Deben incluir un Plan de Gestión Medioambiental (EMP, *Environmental Management Plan*), que en la práctica es un EsIA y proyecto de integración ambiental simplificados.
- Categoría C: Proyectos con efectos mínimos o sin ellos que no precisan EA.

- Categoría FI: Inversión de fondos del Banco Mundial a través de intermediarios financieros, en proyectos que pueden tener impactos ambientales adversos.

De acuerdo con el EMF en el Proyecto de Reducción de la Vulnerabilidad de Desastres no se identifican impactos ambientales importantes, pero incluye obras civiles que pueden implicar impactos menores, considerándose de categoría B y debiendo incluir un EMP. El proyecto se divide en subproyectos, uno por cada actuación descrita, cada cual con su EMP, que de acuerdo con la política operativa del Banco Mundial incluye: (i) Mitigación, identificando los impactos ambientales significativos, las medidas de mitigación y sus impactos y la vinculación con otros planes de mitigación ; (ii) Monitoreo; (iii) Desarrollo de capacidades y formación; (iv) Calendario de ejecución y estimaciones de costos; y (v) Integración del EMP con el Proyecto.

Aunque los impactos identificados no son significativos, se establecen medidas de mitigación como: protección de la vegetación del entorno mediante jalonamientos y del arbolado próximo a las obras; protección de la calidad de las aguas con barreras de retención de sedimentos; revegetación de taludes y zonas afectadas y estaquillado de escolleras; construcción de un canal de aguas bajas en la desembocadura del Warrawarrow para permitir el paso de peces; limitaciones temporales a las obras para reducir molestias a población y fauna; Medidas de gestión de residuos, y de préstamos y vertederos de tierras; y limpieza de residuos existentes en ríos y vaguadas, demolición de presas formadas por acumulación de ramas y retirada de vehículos abandonados.

4. Conclusiones

Este caso pone de manifiesto tres aspectos esenciales:

- La importancia que pueden tener los impactos del cambio climático en regiones vulnerables, al incrementar la frecuencia de fenómenos extremos. En este caso, el aumento en la frecuencia de huracanes y tormentas tropicales ha causado la interrupción de vías de comunicación, la inundación de ciudades, carreteras y el aeropuerto, la destrucción de centrales hidroeléctricas y amenazas a otras infraestructuras críticas.
- La necesidad de adoptar medidas de adaptación para reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia. En este caso las medidas son reactivas, aunque se acompañan de un plan de gestión de cuencas para lograr una adaptación anticipatoria, reduciendo factores de riesgo.
- La necesidad de una evaluación ambiental de los proyectos de adaptación, de forma deseable para considerar diferentes opciones, pero en caso de no ser posible, al menos para incorporar medidas de mitigación para minimizar los impactos de la adaptación.

Anexo 5. Impacto ambiental de la adaptación en firmes de carreteras

Índice

1. Introducción 453

2. Impactos del cambio climático en los firmes de carreteras 454

2.1. Impactos directos 454

2.2. Impactos indirectos 455

3. Adaptación al cambio climático de los firmes de carreteras 456

4. Impactos ambientales de la adaptación al cambio climático 456

5. Mitigación de los impactos de la adaptación 457

6. Conclusiones 458

1. Introducción

Las condiciones climáticas afectan a la funcionalidad y durabilidad de los firmes de carreteras (Zapata et al. 2007), tema esencial de investigación para identificar mecanismos de degradación y reducir necesidades y costes de mantenimiento. El cambio climático puede producir variaciones en ciertos factores climáticos, de acuerdo a los escenarios posibles; Mallick et al. (2016) muestran un incremento significativo en el deterioro de los firmes como resultado de las predicciones de cambio climático, señalando que esta consideración debe incluirse en el diseño de los firmes. El cambio climático modifica la exposición de los firmes de manera positiva o negativa, reduciendo o aumentando la degradación. Estos impactos directos pueden tener efectos indirectos, por ejemplo sobre la seguridad vial o el ruido del tráfico.

La incidencia de los impactos del cambio climático hace necesario aplicar medidas de adaptación, para ajustarse al clima real o esperado y sus efectos (Field et al. 2014). Estas medidas, como cambios en el diseño del pavimento o en la frecuencia de mantenimiento, pueden tener también impactos positivos o negativos, lo que a su vez puede dar lugar a otros impactos indirectos; cualquier adaptación puede producir impactos ambientales no deseados (Adger et al. 2005). Sin embargo, el diseño de la adaptación se centra sólo en los impactos primarios directos del cambio climático.

Pueden definirse como primarios los impactos del cambio climático en los firmes, y como secundarios los impactos de la adaptación (Tabla 86). Los impactos directos pueden producir impactos indirectos, y estos a su vez otros nuevos, en una larga cadena. Por ejemplo, olas de calor → degradación de firmes → aumento del ruido del tráfico → reducción de la reproducción de aves→ reducción presas para rapaces.

Tabla 86 Impactos ambientales del cambio climático relacionados con firmes de carreteras

Impactos primarios		**Medidas de adaptación**	**Impactos secundarios**	
Directos	**Indirectos**		**Directos**	**Indirectos**
(–) Degradación acelerada de firmes	(–) Incremento del ruido del tráfico (–) Menor seguridad vial (–) Mayor desgaste de vehículos (–) Mayor tiempo de viaje por menor velocidad (–) Riesgos de corte de tráfico	Sustitución más frecuente Cambio de tipo de firme o de materiales	(–) Mayor consumo de energía y emisión GEI (–) Mayor consumo de materiales y residuos (–) Incremento del ruido del tráfico (+) Reducción del ruido del tráfico (+) Materiales con menor huella de C (–) Materiales con mayor huella de C	(–) Incremento del cambio climático (–) Daño ambiental (canteras, vertidos) (–) Molestias a población/fauna (+) Mejora para población/fauna (+) Reducción del cambio climático (–) Incremento del cambio climático
(+) Mayor duración de los firmes	(+) Mayor consumo de energía y emisión de GEI	Innecesarias		

(+) Impactos positivos; (–) Impactos negativos. Fuente: Elaboración propia

2. Impactos del cambio climático en los firmes de carreteras

2.1. Impactos directos

Las variaciones derivadas del cambio climático pueden producir un aumento o una disminución en los costes de construcción y mantenimiento de las carreteras, dependiendo del área (Chinowsky et al. 2013). También en los firmes de carreteras, los efectos del cambio climático pueden ser positivos o negativos (Tabla 87).

Los pavimentos sufren fatiga debida a la temperatura (Moreno-Navarro et al. 2015). Las temperaturas bajas pueden producir agrietamiento en regiones frías (Dave & Buttlar 2011, Dave & Hoplin 2015), mientras que las temperaturas elevadas pueden producir agrietamiento por oxidación acelerada de aglutinantes (CEDEX et al. 2013) y deformación derivada del ablandamiento de asfalto (TRB 2008, Regmi & Hanaoka 2011, Nemry & Demirel 2012, Alaswadko & Hassan 2016). En regiones cálidas y templadas, el aumento esperado en las temperaturas en verano y de las olas de calor aumentará los daños en los firmes, mientras que los inviernos más suaves pueden reducir los daños por congelación y nieve. En las regiones frías, los inviernos más suaves pueden tener el efecto opuesto, con un aumento en los ciclos de congelación-descongelación debido a una mayor irregularidad de la temperatura. En regiones árticas un peligro importante es el descongelamiento del permafrost, dañando las carreteras.

Tabla 87 Factores de estrés asociados al cambio climático e impactos en firmes de carreteras

Factor de estrés climático	Efectos negativos	Efectos positivos
Mayores temperaturas estivales y olas de calor	Ablandamiento y deformación del asfalto Agrietamiento debido a la oxidación de ligantes	
Inviernos más suaves: cambios en las heladas y menores nevadas	Ciclos hielo-deshielo más frecuentes (regiones frías) Deshielo del permafrost y hundimiento de carreteras	Ciclos hielo-deshielo menos frecuentes (regiones templadas) Menores daños por agrietamiento debido al frío Menor uso de fundentes Menor limitación al uso de aflato poroso por heladas
Menor precipitación media	Menor uso de asfalto drenante y mayor coste de mantenimiento Menor enfriamiento de firmes Riesgos de subsidencia	Menor degradación de carreteras Menores problemas en carreteras sin firme (países en desarrollo)
Mayor irregularidad en las precipitaciones	Daños por inestabilidad en plataformas y taludes	
Incremento del nivel del mar y la agresividad de fenómenos costeros	Inundación y problemas de estabilidad (erosión costera, deslizamientos, desprendimientos)	
Vientos y tormentas	Mayores daños en carreteras (no específicamente en los firmes)	

Fuente: Elaboración propia

Los cambios en las precipitaciones producen efectos positivos o negativos, principalmente relacionados con la estabilidad de las carreteras (RAE 2011, Regmi & Hanaoka 2011, Nemry & Demirel 2012, EC 2013b, CEDEX et al. 2013). En regiones húmedas la temperatura y precipitación afectan al agrietamiento longitudinal de formes flexibles (Hasan et al. 2016).

Una menor precipitación media reduce los daños en las carreteras, especialmente en carreteras no pavimentadas, pero puede causar subsidencia debida a cambios en la humedad del suelo.

Una mayor irregularidad de la precipitación implica una inundación más frecuente y daños en carreteras y firmes. Los impactos costeros, vientos y tormentas también pueden influir en la estabilidad de la carretera.

El uso de asfalto poroso tiene limitaciones climáticas. Por ejemplo, en España no se utiliza en zonas secas, con menos de 600 mm de precipitación media o en zonas fría por encima de 1200 m sobre el nivel del mar debido a los riesgos de helada (CEDEX et al. 2013); una menor precipitación implica una reducción en el área de uso potencial, no compensada por el aumento de las áreas libres de riesgo de helada, mucho menores.

2.2. Impactos indirectos

El cambio climático tiene influencia en los firmes de carreteras, aumentando o reduciendo el deterioro, y esto produce también impactos indirectos positivos o negativos. Los impactos negativos se relacionan principalmente con el tráfico y el ruido.

Un pavimento de mal estado tiene una influencia negativa en la seguridad vial, aumenta el desgaste de los vehículos, reduce la velocidad aumentando los tiempos de viaje y puede producir trastornos del tráfico. Por otro lado, un menor deterioro de los firmes reduce estos impactos, así como los relacionados con su sustitución.

La degradación de los firmes aumenta el ruido del tráfico; la exposición al clima normal produce un agrietamiento progresivo del firme, aumentando los niveles de ruido entre 0,4 y 0,7 dB(A) anualmente (Ongel & Harvey 2010, Boodihal et al. 2014, Gardziejczyk 2016). El cambio climático puede influir, haciendo los pavimentos más ruidosos en un período más corto o reduciendo el deterioro.

El uso de fundentes con arena en invierno en el mantenimiento de asfaltos porosos produce una pérdida de propiedades acústicas (Paje et al. 2010); los inviernos más suaves y la menor caída de nieve por el cambio climático reducen este efecto negativo.

3. Adaptación al cambio climático de los firmes de carreteras

Existe una amplia gama de medidas de adaptación de aplicación a los firmes de carreteras, que pueden agruparse en cinco categorías principales (Tabla 88). Las medidas constructivas se centran en pavimentos más resistentes, con menor vulnerabilidad climática, como cambio en materiales, mezclas asfálticas, aglutinantes, espesor o reflectancia (Regmi & Hanaoka 2011, Wismar & Walther 2013).

Tabla 88 Adaptación de los firmes de carreteras al cambio climático

Categoría	Medidas
Constructivas	Cambio de mezcla de asfalto: más rígidas y con mayor punto de fusión Firmes de hormigón Ligantes transparentes Cambio en el diseño estructural (mayor espesor) Incremento en la reflectancia y albedo Pavimentación de carreteras sin firme (sobre todo en países en desarrollo)
Externas	Enfriamiento forzado con agua
Mantenimiento	Cambio en la frecuencia de mantenimiento (acortamiento de ciclos)
Gestión del tráfico	Cierre temporal de carreteras o limitación a vehículos pesados en olas de calor Sacar tráfico pesado de las carreteras (trasvase modal a otros transportes) Forzar al tráfico de mercancías circular por la noche (menores temperaturas)
Regulatorias	Cambios en las normas de diseño de firmes Reducción de la carga máxima admisible por eje en vehículos pesados

Fuente: Elaboración propia

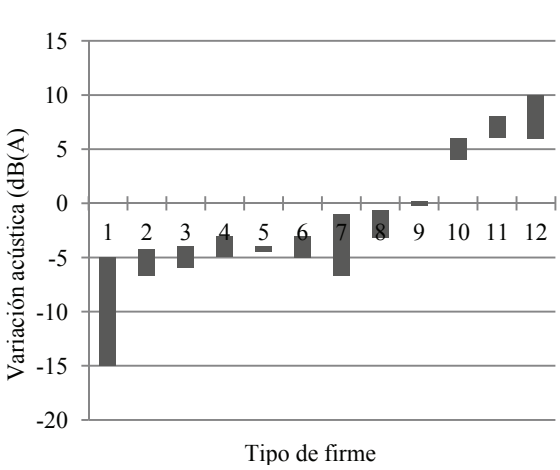
Las medidas externas como el enfriamiento con agua son opciones de emergencia en olas de calor, especialmente en áreas urbanas, pero no una adaptación a largo plazo. La adaptación más fácil en firmes es acortar el período de reemplazo para mantenerlos en buenas condiciones, pero implica un aumento en los costes de mantenimiento y los impactos ambientales. La gestión del tráfico, especialmente de vehículos pesados, tiene enormes posibilidades, pero puede entrar en conflicto con la movilidad y el comercio. Sin embargo, es una medida esencial, ya que un predominio del transporte por carretera implica un acortamiento de la vida de los firmes, sobre todo en regiones cálidas donde la deformación llega a ser muy intensa. Las medidas reglamentarias incluyen, por ejemplo, cambios en las normas de diseño de firmes para adaptarlas a futuros escenarios climáticos o cambios en las regulaciones de los vehículos, como la reducción de la carga máxima admisible por eje para limitar los daños al firme debidos a la deformación.

4. Impactos ambientales de la adaptación al cambio climático

El mantenimiento de los firmes incluye la sustitución periódica de la capa de rodadura, o incluso reparaciones mayores. El aumento de la agresividad climática puede acortar los ciclos de reparación, lo que implica un mayor uso de materiales y emisiones de GEI debido a la maquinaria.

El ruido del tráfico se produce principalmente por la rodadura, el contacto del neumático-pavimento, influyendo varios factores (Sandberg & Ejsmont 2002, Sirin 2016), especialmente la superficie del firme. No todos los firmes tienen el mismo comportamiento acústico; comparados con un asfalto convencional, algunos tipos son más ruidosos mientras que otros son más silenciosos (Figura 128), con diferencias que pueden variar en más de 15 dB (Praticò & Anfosso-Lédée 2012).

Figura 128 Comportamiento acústico de los firmes de carreteras



Tipo de pavimento:

1. Poroelástico ultra-silencioso [3, 11]
2. LOA (*Lärmoptimierter Asphalt*) [7]
3. Asfalto poros de dos capas [11, 12]
4. Asfalto SMA (*Stone Mastic Asphalt*) [11, 12]
5. Asfalto de textura abierta (*Open graded*) [8,9]
6. Asfalto poroso de una capa [4, 6, 11, 12]
7. Microaglomerado [6]
8. Asfalto goma (*Rubberised asphalt*) [1, 5, 6, 10, 11]
9. Asfalto convencional (referencia)
10. Firme de hormigón [2]
11. Asfalto plástico modificado (*Plastic modified*) [2]
12. Adoquines [5]

Fuente: Elaboración propia. [1] Biligiri & Way (2014); [2] Boodihal et al. (2014); [3] Ejsmont et al. (2016); [4] Freitas et al. (2009); [5] Freitas et al. (2012); [6] Liu et al. (2016); [7] Miljković & Radenberg (2011); [8] Ongel & Harvey (2010); [9] Ongel et al. (2011); [10] Paje et al. (2010); [11] PIARC (2013b); [12] Praticò & Anfosso-Lédée (2012).

La adaptación suele implicar cambios en el tipo o composición del firme, con influencia acústica, positiva si se utilizan tipos más silenciosos, o negativa si es más ruidosa. Es posible un aumento del ruido del tráfico cuando se usan pavimentos de hormigón como adaptación a temperatura máximas, o la eliminación de asfalto poroso debido a la reducción de la precipitación.

Por ejemplo, en una autopista (M-40 de Madrid, España), el cambio del asfalto poroso actual a otro convencional incrementa en un 46% el área afectada por el ruido del tráfico y a un firme de hormigón en un 117%.

5. Mitigación de los impactos de la adaptación

La adaptación al cambio climático de los firmes puede producir impactos no deseados, necesitando medidas de mitigación (Tabla 89), que puede ser preventiva, para evitar la ocurrencia de los impactos, correctiva para minimizar los impactos inevitables, o compensatoria para lograr mejores condiciones ambientales que las iniciales.

Tabla 89 Mitigación de impactos ambientales de la adaptación en firmes de carreteras

Impacto de la adaptación	Criterios	Opciones de mitigación
Mayor uso de materiales y emisión de GEI por mayor frecuencia de reposición de los firmes	La adaptación no debe incrementar la emisión de GEI ni la demanda de materiales	Materiales más resistentes Reciclado *in situ* de firmes Materiales con menor huella de C Maquinaria con mayor eficiencia
Incremento del ruido del tráfico debido al cambio de tipo de firme	El cambio de firme no debe incrementar el ruido del tráfico	Uso de firmes silenciosos y resistentes Evitar firmes ruidosos aún adaptados

Fuente: Elaboración propia

Una medida de mitigación preventiva para evitar la mayor frecuencia de reemplazo del firme es el uso de materiales más resistentes, para mantener, al menos, ciclos de mantenimiento. Si es posible ampliar estos ciclos, la mitigación será no sólo preventiva, sino también compensatoria, reduciendo los impactos actuales. Una medida correctiva es el reciclaje in situ de pavimentos, reduciendo el uso de materiales externos, el transporte y las emisiones de GEI. El uso de materiales con menor huella de carbono y maquinaria con mayor eficiencia energética, reduce las emisiones de GEI; por otro lado, nuevos materiales con mayor huella de carbono y maquinaria antigua tienen el efecto opuesto.

La toma de decisiones sobre el tipo de firme debe considerar los impactos acústicos potenciales. Los cambios en el tipo de firme para una mejor adaptación al cambio climático nunca deberían implicar un aumento del ruido del tráfico. Mejor aún, el cambio puede ser útil para reducir el ruido actual, actuando como medida compensatoria. Es especialmente importante evaluar cuidadosamente el uso de pavimentos de hormigón debido a sus malas características acústicas.

6. Conclusiones

El cambio climático afecta a los firmes de carreteras, haciendo necesarias medidas de adaptación, pero estas medidas pueden producir impactos ambientales. Sin embargo, los impactos de la adaptación generalmente se ignoran en la toma de decisiones.

Los dos principales impactos de la adaptación son la sustitución de firmes más frecuente, con mayor uso de materiales, energía y emisiones de GEI, e impactos acústicos relacionados con el cambio de tipo de firme. En el primer caso es posible mitigar los impactos utilizando materiales más resistentes, reciclaje in situ de firmes, materiales con menor huella de carbono y maquinaria con mayor eficiencia energética. En el segundo se debe incluir el comportamiento acústico en la toma de decisiones sobre la adaptación, evitando cambios que impliquen un aumento del ruido del tráfico.