

# La adaptación al cambio climático en el transporte ferroviario en España

## *Railway Transport in Spain and Its Adaptation to Climate Change*

Gabriel Castañares Hernández<sup>1\*</sup>

### Resumen

Los impactos potenciales del cambio climático sobre las infraestructuras y el transporte ferroviario incluyen fundamentalmente afectaciones a condiciones de elementos comunes a otras infraestructuras lineales como son trazado, obras de tierra, taludes, sistemas de drenaje, túneles, puentes y otras estructuras particulares del sistema ferroviario, como la infraestructura de vía, los railes, las instalaciones de seguridad y señalización o las condiciones de explotación de la infraestructura.

Además, el posible aumento de fenómenos climáticos extremos puede poner en riesgo la fiabilidad y seguridad de los servicios ferroviarios por inundaciones, tormentas, fuertes vientos o incendios. Sin embargo, el aumento de las temperaturas tiende a mejorar las condiciones de explotación ferroviaria al reducir las heladas y las nevadas, aunque se aumenten los requerimientos estivales de climatización en espacios y vehículos con presencia de viajeros.

Ante estos impactos y los potenciales riesgos analizados y la capacidad de adaptación se concluye que la mayor causa de vulnerabilidad se debería a los eventos extremos. Según los estudios existentes, evolucionaría desde un nivel bajo (1) en la actualidad hasta un nivel medio (3) a finales de siglo.

Para combatir la vulnerabilidad y reducir los riesgos se recomienda revisar la normativa de diseño, especialmente en elementos afectados por excesos de agua, altas temperaturas, fuertes vientos o tormentas eléctricas. También se recomienda dimensionar los sistemas de climatización, revisar los protocolos de prevención, fomentando, por ejemplo, la utilización de zapatas de compuesto y continuar mejorando los sistemas de alerta meteorológica y los procedimientos de respuesta.

**Palabras clave:** adaptación al cambio climático, infraestructuras y servicios de transporte, infraestructuras y servicios ferroviarios.

### Abstract

*Potential impacts from climate change on rail infrastructures and services include common affections to other lineal infrastructures, such as earthworks, slopes, drainage systems, tunnels, bridges, as well as other specific structures of the railway system like trucks, rails, safety and signalling installations or the specific conditions of the infrastructure.*

*Additionally, the potential increasing of extreme climatic events might put at risk the safety and the reliability of the rail services due to storms, strong winds, floods or forest fires. Although temperature rise helps to improve service conditions linked to decreasing snows and freezes, the requirements on air conditioning for passengers will increase.*

*These impacts, and the potential risks analysed along the adaptation capacity issue, will result in growing vulnerability because of extreme events. According to the existing reports, vulnerability will increase from a current low value (1) to a medium value (3) at the end of the century.*

*In order to reduce risks and vulnerability, the recommendations include reviewing designing procedures, mainly for elements affected by excess of water, high temperatures, strong winds or electric storms. Besides, it is recommended to assess air conditioning systems, prevention protocols, fostering the use of compound braking shoes, and continuing the improvement of meteorological alert systems and reaction procedures.*

**Keywords:** climate change adaptation, transport infrastructures and services, rail services and infrastructures.

## 1. INTRODUCCIÓN: EL FERROCARRIL EN ESPAÑA Y LAS PROYECCIONES CLIMÁTICAS PARA FINALES DEL SIGLO XXI

### La Red ferroviaria española analizada en estudios sobre adaptación al cambio climático

La red ferroviaria de interés general en España (RFIG) se caracteriza por disponer de una variedad de anchos de

vía y tipos de tracción frente a otras redes europeas. En los análisis realizados hasta el momento, se han incluido las infraestructuras pertenecientes a la gestión histórica de ADIF, debido a que la integración de la red de ancho métrico, procedente de la antigua FEVE, se produjo con posterioridad a la mayor parte de estas evaluaciones. Además, debido a la intensidad de servicios prestados mayoritariamente por Renfe, las evaluaciones de riesgos de cambio climático y las consiguientes necesidades de adaptación se han limitado a aquellas líneas donde los tráficos se consideran superan un umbral de intensidad.

Por tanto, en este artículo y en todos los análisis previos, la red que se toma como referencia para la evaluación de impactos y vulnerabilidad se corresponde con toda la red de alta

\* Autor de contacto: [gabriel.castanares@renfe.es](mailto:gabriel.castanares@renfe.es)

<sup>1</sup> Licenciado en Ciencias Ambientales. Técnico de Eficiencia Energética de la Dirección de Estrategia de Renfe (Madrid).

velocidad de ancho internacional y ancho ibérico (2.290 km), con la totalidad de la red gestionada por ADIF por la que discurren servicios de cercanías (2.152 km), y con el resto de red convencional de ancho ibérico gestionada por ADIF con alta intensidad de tráfico (líneas con niveles de utilización superiores a 50 circulaciones medias diarias) y mayores prestaciones (3.779 km). En total, esta red supone algo más de 8.220 km, esto es, alrededor del 54% de la longitud total de la red en servicio gestionada por ADIF y más del 51% del total de la red ferroviaria española. Se entiende que quedan recogidas de esta forma en la red troncal ferroviaria todas las líneas de carácter estratégico, sobre las que las eventuales afecciones derivadas del cambio climático pueden conllevar mayores efectos negativos para la operatividad del servicio.

La red comprende casi 1.400 túneles que suman una longitud de más de 700 km, y casi 400 sub-estaciones de tracción. Toda la red seleccionada discurre por territorio peninsular; de ésta, sólo algunos tramos de la red convencional en el este y noreste discurren junto a la costa. En cuanto a su antigüedad, cabe destacar una gran diferencia entre las líneas de red convencional y las de alta velocidad; mientras que las primeras cuentan en bastantes casos con una edad centenaria, la primera línea de alta velocidad en España se inauguró en 1992 y el tiempo transcurrido desde la puesta en servicio del 80% de esta red es inferior a once años.

Se consideran incluidos en el ámbito del análisis, los distintos componentes de la línea ferroviaria, como son la Infraestructura: explanaciones y obras de tierra, estructuras (obras de paso transversal, puentes y viaductos), túneles y falsos túneles, obras de drenaje longitudinal y transversal, y otros elementos auxiliares (caminos de acceso, cerramientos, pantallas, canaletas, zonas de rescate). También se incluye la superestructura de vía (balasto, carril, traviesas, sujeciones, aparatos de vía), elementos de electrificación (catenaria, subestaciones de tracción), sistemas de seguridad y comunicaciones; y las estaciones e instalaciones técnicas, incluyendo en particular la totalidad de las grandes estaciones gestionadas por la Dirección General de Servicios a Clientes y Patrimonio de ADIF, que suman un total de 95 ubicaciones y los centros de gestión del tráfico ferroviario, entre los que se incluyen 20 Centros de Regulación y Control – 16 de ellos en la red convencional y 4 en la de alta velocidad – más un Centro de Gestión de Red H24, que supervisa de forma permanente el estado de la infraestructura, así como el desarrollo de la circulación ferroviaria.

Además, como parte final antes de los viajeros y las mercancías, se han evaluado los trenes y los procesos involucrados en la operación de transporte de viajeros y mercancías.

### Proyecciones climáticas a lo largo del siglo XXI en España

Hasta el momento, se han identificado contingencias climáticas locales que afectan a servicios e infraestructuras ferroviarias, buenos ejemplos son la “gota fría”, en Levante, o los fenómenos de fuertes vientos en la zona de la desembocadura del Ebro, entre Vinarós y Tarragona (en esta zona, los vientos han llegado hasta los 110 km/h). Además, de nevadas en invierno en la línea de Alta Velocidad Madrid-Barcelona, entorno a la estación de Calatayud, entre las paradas de Guadalajara y Zaragoza y en la Meseta Norte y fuertes olas de calor en todo el sur y centro de la península.

Los principales cambios que podrían esperarse para España, son un incremento de las temperaturas máximas y mínimas de 1°C-2°C para mediados del siglo XXI, y de entre 1 y 4°C para finales, variando en función del escenario de emisiones de GEI considerado, así como una reducción de hasta un 5% a mediados de siglo y en algo más del 15% a finales del mismo, con respecto a la cuantía de las precipitaciones, dependiendo de las regiones analizadas.

En cuanto a las olas de calor, éstas se prolongarían en un número de días que oscilaría entre 5 y 10 para mediados de siglo, y entre 5 y 40 hacia el año 2100. Las lluvias intensas tendrían una gran variabilidad interanual (de hasta  $\pm 10\%$ ), sin una clara tendencia a aumentar o disminuir en la mayoría de las regiones.

Por último, el nivel del mar podría situarse 0,51 metros por encima del actual a finales del siglo XXI.

## 2. POSIBLES IMPACTOS CLIMÁTICOS SOBRE EL FERROCARRIL EN ESPAÑA

Para analizar y valorar los posibles impactos de procesos de cambio climático sobre el ferrocarril en España, se han incluido las previsiones de cambio climático y las zonas de riesgo obtenidas de los datos de incidencias (mapas), además de las consecuencias de que suceda cada tipo de evento en términos de costes (tanto de reparación como de prevención o mantenimiento) y otras consecuencias como el nivel de servicio, seguridad, o la criticidad del componente.

Debido a su extensión, es conveniente incluir otros impactos estudiados por Renfe, como son los sistemas de frenado y los posibles incendios asociados, especialmente en la red de Alta Velocidad, donde se ha evaluado como un impacto medio, debido a la baja incidencia actual de los tráfico de mercancías en esta red, hecho que puede modificarse en un futuro en líneas de ancho UIC con tráfico mixtos, como se está planteando en la línea del corredor mediterráneo hasta la frontera francesa que podría llevar a un ascenso de este impacto a valores altos.

En Red Convencional el impacto se ha valorado como alto en base a las cifras registradas de incendios ocurridos en estas vías en los últimos años debidas a los sistemas de frenado de vagones de mercancías. Un escenario climático de mayor temperatura y evapotranspiración puede facilitar los incendios en los márgenes de las vías. En cuanto a los trenes, se ha dado una valoración alta debido a los riesgos que pueden suponer los incendios para ciertos transportes de mercancías, como las mercancías peligrosas.

En lo referente a los impactos de incrementos de temperatura con necesidades adicionales de climatización, en lo que respecta a los trenes de mercancías se ha dado una valoración del impacto como baja, ya que si bien un incremento como el planteado de temperaturas puede afectar a los tráfico de ciertas mercancías (especialmente peligrosas) no es uno de los hechos más relevantes que hayan producido incidentes hasta el momento. Mientras que, en los trenes de viajeros, por el contrario, la valoración otorgada es alta debido a la exigencia de niveles de confort por parte de los clientes, mayor incluso que las exigidas en otros países, hecho que ha llevado a Renfe a contar con sistemas de climatización, en especial de aire frío, que superan los estándares establecidos por la Unión Internacional del Ferrocarril (UIC). Un incremento de las temperaturas puede

llevar a una revisión de estos procedimientos de climatización para mantener los niveles de confort actuales.

Respecto a los estudios de demanda, la valoración se ha establecido teniendo en cuenta el posible impacto operacional y comercial que puedan tener los cambios en la idoneidad climática, en los destinos turísticos y en los asentamientos poblacionales.

De forma general dentro de la evaluación de impactos destacan los siguientes aspectos:

- En la parte de infraestructura, el mayor número de impactos identificados tiene que ver con variables climáticas relacionadas con la precipitación, fundamentalmente con el aumento de los episodios de lluvia intensa. Estos impactos se caracterizan por presentar niveles de tipo medio por lo general y afectarían más a las líneas de Red Convencional, cuyos criterios de diseño no respondieron a las mismas exigencias que actualmente cumplen las de Alta Velocidad y, por tanto, serían susceptibles de un mayor grado de revisión. Destaca también el alto impacto potencial del factor viento en el diseño de las pantallas acústicas y de protección para la Red de Alta Velocidad.
- En la parte de superestructura se identifican impactos relacionados con el aumento de temperatura y las oscilaciones térmicas, así como con la ocurrencia de tormentas más intensas. Destacan los altos impactos debidos a la temperatura sobre el carril y las sujeciones, especialmente en las líneas de Alta Velocidad sujetas a mayores requerimientos, así como la previsión de daños a la catenaria y a las sub-estaciones de tracción por tormentas eléctricas. También es notable el impacto identificado por el aumento de ráfagas de viento sobre catenaria y sistemas de seguridad y las comunicaciones. Se prevé también un aumento del arrastre del balasto por lluvias intensas a tener en cuenta en el diseño.
- En cuanto a las estaciones y edificios técnicos, se ha identificado un impacto alto relacionado con el aumento de necesidades de climatización debido al aumento de temperatura.
- En lo referente a la operación de servicios, se han establecido en los trenes un mayor número de impactos sobre las líneas de Alta Velocidad, debido a una previsible mayor proporción de uso de este tipo de líneas frente a las de Red Convencional a lo largo de este siglo. Identificando principalmente un aumento del riesgo de incendio en los sistemas de frenado, así como una mayor necesidad de climatización en coches de viajeros.
- En cuanto a la vialidad, se han identificado impactos altos relacionados con previsión de incidencias relativas a lluvias intensas, inundaciones y fuertes vientos en las líneas de Red Convencional operativas.
- Dentro del impacto económico, y asociado a los costes de operación relacionados con un incremento de la temperatura, según los datos de la Dirección de Estaciones de Viajeros de ADIF para la estación de Valladolid, la climatización en verano presenta un incremento medio del 7% en el consumo eléctrico anual por cada grado centígrado que aumenta la temperatura media; en invierno, el consumo de gas para calefacción disminuye en torno al 15% por cada grado que aumenta la temperatura media anual.

### 3. CAPACIDAD DE ADAPTACIÓN: ANÁLISIS DE PROCEDIMIENTOS ACTUALES PARA AFRONTAR SITUACIONES DE CRISIS EN LOS SERVICIOS Y EN LA INFRAESTRUCTURA

Actualmente, Renfe y ADIF cuentan con una serie de medidas de gestión de la adaptación meteorológica que pueden beneficiar en situaciones de cambio climático, pudiendo considerarse medidas “soft”/”non-regret”.

En cuanto a las infraestructuras ferroviarias, ADIF lleva a cabo su mantenimiento de modo periódico y planificado contando con las previsiones que, para la red ferroviaria, elabora AEMET a 24 horas vista, en los parámetros de velocidad del viento, intensidad de lluvia y espesor de nieve, para cada 5 km de ciertos tramos de red convencional y de alta velocidad, y que remite a ADIF cada 6 horas. La AEMET emite un aviso de alerta (niveles amarillo, naranja o rojo) siempre que se supere los umbrales establecidos por ADIF en alguno de los cuatro sub-periodos de 6 horas en que se divide el periodo de predicción de 24 horas. Los umbrales de alerta son los mismos para toda la red ferroviaria convenida por ADIF y la AEMET, salvo en el caso del viento, para el que se establecen umbrales distintos para la red convencional y la red de alta velocidad.

En función del nivel de alerta, estos avisos desencadenan las medidas preventivas que establece el Plan de Contingencias de ADIF, con objeto de minimizar el impacto de las inclemencias sobre las infraestructuras ferroviarias y sobre la circulación de los trenes. Para el caso de lluvia, ADIF tiene identificados tramos de la red calificados como de riesgo medio, medio-alto o alto frente a la intensidad de lluvia, lo que le permite desencadenar actuaciones preventivas diferenciadas según niveles de alerta y riesgo.

ADIF ha incorporado recientemente en sus aplicaciones un módulo de alertas meteorológicas adversas que permite la visualización de forma sencilla de los avisos que genera diariamente la AEMET. Ello ha mejorado sustancialmente el tratamiento de las alertas meteorológicas recibidas, permitiendo una toma más rápida de decisiones y la optimización de movilización de recursos humanos y técnicos necesarios.

Mientras que Renfe cuenta con estándares de climatización adaptados al amplio rango de temperaturas que existen actualmente en los territorios donde presta servicios. Además, anualmente se lleva a cabo el Plan Anual de Protección de Incendios, en coordinación con las Comunidades Autónomas, para prevenir los incendios forestales en verano.

Por otra parte, en los casos de la operación de servicios ferroviarios en situaciones de eventos extremos, se llevan a cabo algunas prácticas para garantizar la seguridad del servicio y minimizar los posibles daños. Los principales procedimientos realizados por Renfe difieren entre las operaciones de servicios de viajeros y de mercancías.

En el caso de Renfe Viajeros, se recibe información de las alertas meteorológicas de AEMET por parte de ADIF que les envía a los Centros de Gestión de Viajeros (CGO's) 2 veces al día, además estos CGO's tienen acceso a la aplicación de Alertas Meteorológicas de Renfe para poder ver con detalle cuales son las zonas problemáticas y poder aplicar los diferentes procedimientos de actuación que tienen establecidos.

En este sentido, Renfe Viajeros, además de aplicar las medidas que afectan directamente a la infraestructura por

causas meteorológicas que determina ADIF, dispone de procedimientos adicionales en los siguientes casos:

- En caso de fuertes nevadas, teniendo previstos cambios de flota, reducciones de velocidad -especialmente en servicios de Alta Velocidad- la aplicación de sal en zonas de salida/entrada de trenes en talleres y el incremento de personal para la implementación de estas medidas.
- En casos de temperaturas por debajo de cero grados y de fuertes heladas, Renfe Viajeros dispone de procedimientos para el precalentamiento de las unidades, el estacionamiento en estaciones cubiertas durante la noche, o la salida de trenes exploradores que recorran y limpien la catenaria de posibles acumulaciones de hielo.
- Otra medida operativa que se realiza en casos de inclemencias meteorológicas que disminuyan la velocidad, es el aumento de comida y bebida en los servicios que dispongan de catering a bordo por el previsible aumento del tiempo de viaje y el incremento del tiempo de parada, así como el acuerdo con empresas de suministro de alimentación y bebida en paradas intermedias.
- De forma general, para suspensiones del servicio, Renfe Viajeros dispone de procedimientos para la realización de planes alternativos de transporte con autobuses contratados para estas contingencias.
- Finalmente, en el caso de olas de calor con temperaturas que superan los 38°C, el CGO central, previa consulta de la aplicación de alertas, establece recomendaciones de revisión de deficiencias de climatización en flotas, unidades y equipos en los que sea preciso porque las temperaturas lo requieran, con el consiguiente aumento de recursos. Además, se realizan de forma preventiva medidas de cierre de puertas y encendido previo. Todo ello, para garantizar el máximo confort a los clientes, que con las políticas comerciales de Renfe Viajeros tienen derecho a reclamar una compensación por deficiencias de la climatización a bordo. Se trata de una variable muy importante para la empresa que dispone de una aplicación en la intranet que permite conocer en tiempo real todo lo que acontece en todas las operaciones.

Desde Renfe Mercancías la forma de actuar desde nivel central cuando se presenta información de alguna alerta meteorológica es mediante la activación de un mensaje a los Centros de Gestión de Mercancías para tener preparado personal y locomotoras diésel debidamente repostadas por si fuese necesario intervenir ante una de estas alertas.

#### 4. RIESGOS Y VULNERABILIDAD

Los principales riesgos que puede presentar la red ferroviaria estarían ligados a los eventos extremos, que comenzarían de acuerdo con los análisis existentes en un nivel bajo (nivel 2) en la actualidad y terminarían en un valor alto (nivel 4) en el último período del siglo XXI.

Los riesgos asociados al aumento de la temperatura, se situarían en un nivel muy bajo en la actualidad (nivel 1) y podrían alcanzar un nivel alto (nivel 4) al final del periodo.

La adaptación a los impactos climáticos detectados no requiere de procedimientos o modificaciones en los vehículos diferentes a los que se llevan a cabo en la actualidad en situaciones de eventos climáticos extremos. Por otra parte, Renfe lleva a cabo el mantenimiento, la reparación y la renovación periódica de trenes y equipos, mientras que ADIF está a cargo del mantenimiento de las infraestructuras ferroviarias, estas operaciones implican la reparación en caso de daños meteorológicos (reportados en el pasado en algunas estaciones como Salou y Alicante, por avenidas de agua), o en los trenes, donde Renfe realiza modificaciones del material rodante cuando las circunstancias meteorológicas lo aconsejan (cambio de posición de los convertidores eléctricos en olas de frío). Por todo ello, dichos estudios estiman una capacidad de adaptación alta.

#### Histórico de incidencias causadas por eventos climáticos y costes asociados

Las incidencias por razón climatológica registradas por ADIF durante el periodo 2009-2012 tanto para la red de alta velocidad como para la red convencional fueron unas 1.100 incidencias al año como promedio, el 97% corresponden a la red convencional y únicamente el 3% a la red de alta velocidad, lo que podría interpretarse como que la tasa de incidencias por unidad de longitud de red es aproximadamente diez veces superior en la red convencional

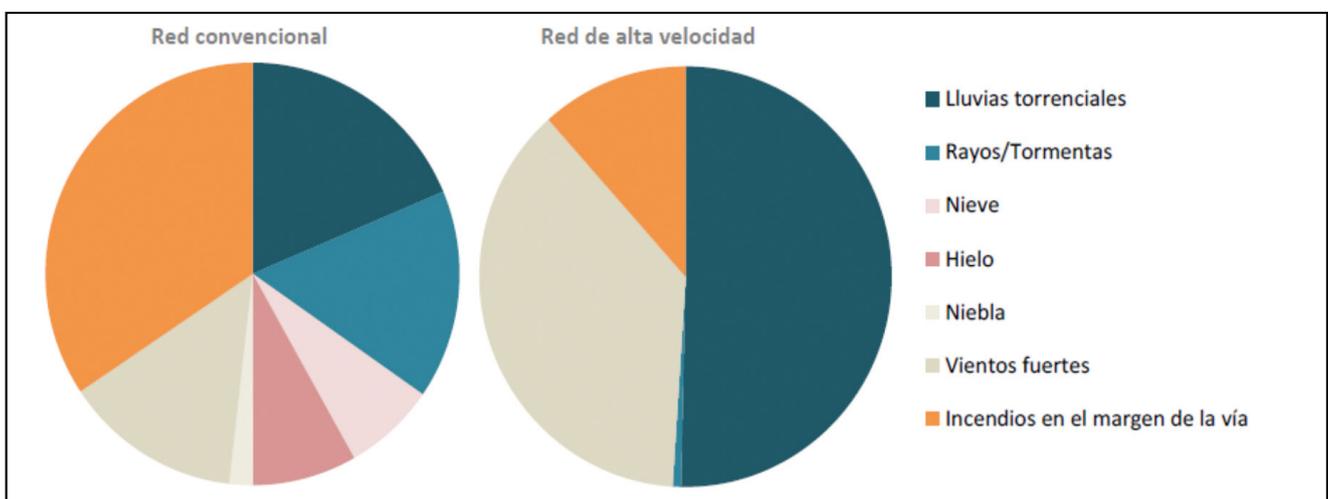
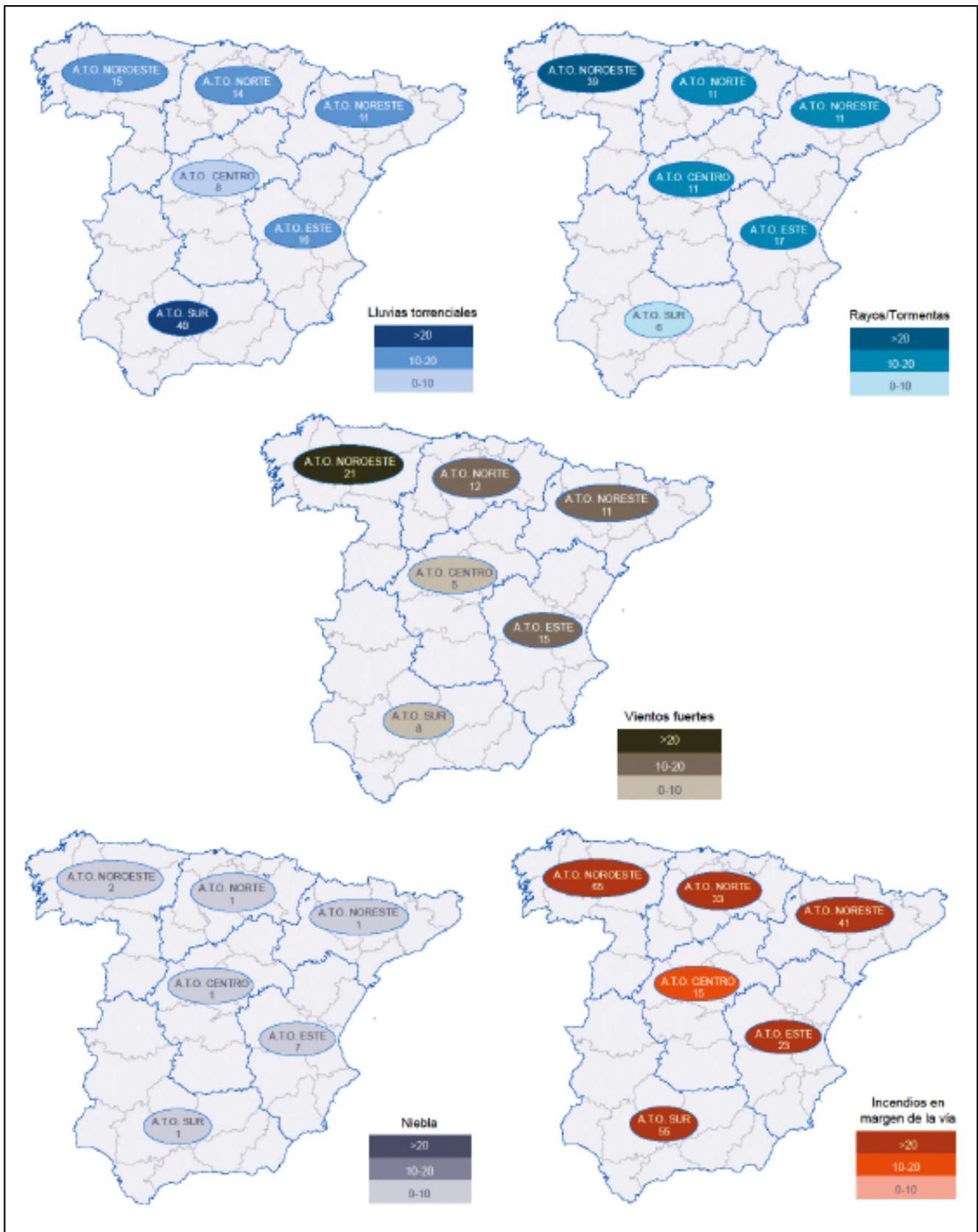


Figura 1. Distribución anual media de las incidencias por razón climatológica registradas por ADIF.

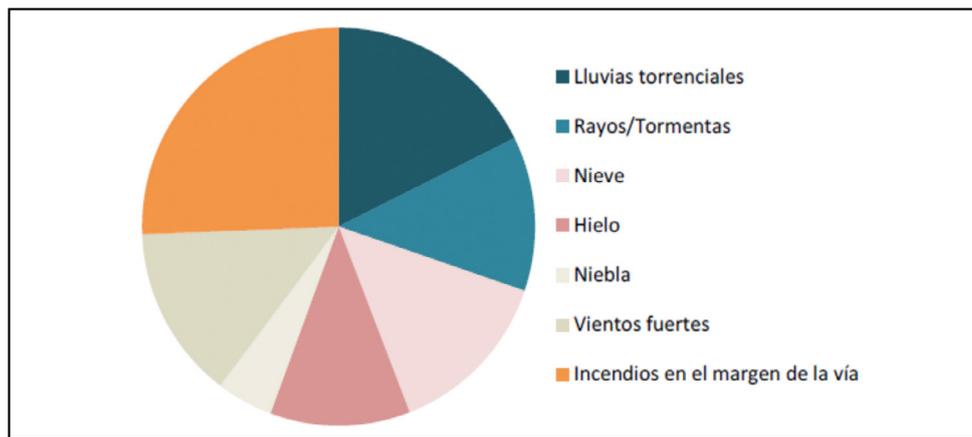
que en la red de alta velocidad, aunque ésta diferencia se debe parcialmente a que el concepto de incidencia en las distintas áreas de actividad de ADIF es diferente. En el caso de la red de alta velocidad, una incidencia está delimitada por el tramo de vía que corresponde a una Base de Mantenimiento dentro del mismo Área Territorial Operativa

(seis en España). En el caso de la red convencional, una incidencia está delimitada por el tramo de vía que corresponde al equipo de mantenimiento, por especialidades, dependiente de una Base de Mantenimiento.

La tipología de las incidencias pone de manifiesto que la red de alta velocidad es especialmente sensible



**Figura 2.** Reparto geográfico de las incidencias registradas por ADIF según Área Territorial Operativa (A.T.O.) (Número de incidencias / 100 km en el periodo 2005-2012).



**Figura 3.** Distribución anual media de las incidencias por razón climatológica en la circulación de trenes registradas por Renfe (Datos de 2010-2011).

a las lluvias intensas de corta duración y a los vientos fuertes. Las incidencias más frecuentes en la red convencional están vinculadas sobre todo con la ocurrencia de incendios en los márgenes de las vías (directamente relacionados con altas temperaturas), con lluvias intensas y tormentas y, en menor medida, vientos fuertes, hielo y nieve. De los incendios ocurridos en los márgenes de las vías, solo una minoría (menos del 5%) es atribuible a la explotación ferroviaria. En los últimos años, los incendios atribuibles a la explotación ferroviaria se han registrado únicamente en líneas convencionales, especialmente en áreas del valle del Ebro y norte peninsular, como consecuencia en la mayoría de los casos de falta de limpieza de la vegetación en las márgenes de la vía y/o chispas por fricción en el sistema de frenado de los trenes, normalmente de mercancías.

La mayor concentración de incidencias por lluvias torrenciales por longitud de red se produce en el sur peninsular. Las incidencias por vientos fuertes predominan en cambio en el noroeste y tercio nororiental peninsular. La concentración de incidencias por rayos/tormentas también predomina en el noroeste. Los incendios en el margen de la vía tienen mayor incidencia en la operación ferroviaria en el sur y noroeste peninsular, aunque también son frecuentes en el noreste.

En estaciones de viajeros, el número medio de incidencias registradas por ADIF es de 3-4 al año (en el caso de estaciones, una incidencia está delimitada por el Área Territorial Operativa, pudiendo afectar a más de una estación). La mayoría de estas incidencias están asociadas a rachas de viento fuerte y, en menor medida, a lluvias torrenciales. Desde el punto de vista económico, las incidencias climáticas más dañinas sobre la infraestructura ferroviaria son las relacionadas con las lluvias intensas en el caso de vía, y con vientos fuertes en estaciones. Los costes de reparación de daños por lluvias intensas son muy variables (desde 15.000€/incidencia de una pequeña limpieza de material desprendido en una trinchera de vía convencional, hasta por ejemplo 7 millones de € en el caso de las inundaciones ocurridas entre Lorca y Águilas en septiembre de 2012). La horquilla de costes de reparación de daños por rachas de viento en estaciones es también muy variable, aunque suelen ser más altos en términos generales.

En cuanto a las incidencias por razón climatológica registradas por Renfe (unas 2.150 incidencias al año).

Para Renfe, una incidencia equivale a un tren afectado y se caracteriza por tener típicamente los siguientes efectos:

- Lluvias intensas: interceptación de las comunicaciones ferroviarias por ocupación de circuitos; retrasos en la puntualidad por disminución de la velocidad, incluso marcha a la vista; o arrastre y movimiento de balasto por interceptación de la vía.
- Nieve: disminución de la velocidad; disminución de la adherencia; cortes de vía al alcanzar la nieve cierta altura sobre el carril; bloqueo de cambios e intercambiadores si además el tren lleva hielo en los rodales o ejes; o caída de viajeros.
- Hielo: disminución de la adherencia; obstrucción de los cambios; falta de contacto eléctrico entre pantógrafo y catenaria; corte de circulación; o caída de personas.
- Vientos fuertes: disminución de la velocidad y, por tanto, retrasos; caída de árboles a la vía; o proyección de elementos ligeros sobre la catenaria y pantógrafos con enganchones a veces.

La mayoría de incidencias (93%) se traducen en un retraso del servicio ferroviario; sólo en una minoría de casos se llega a suprimir trenes, a transbordar viajeros o a desviar servicios. Los retrasos medios en el caso de trenes de viajeros se sitúan en torno a los 10-15 minutos, sin que el retraso varíe excesivamente en función del evento climático que provoque la incidencia. En el caso de trenes de mercancías, los retrasos medios alcanzan los 50 minutos, siendo menores en el caso de incidencia por niebla o lluvia, y mayores en caso de nieve y viento.

También conviene subrayar finalmente la fuerte incidencia que tienen sobre la funcionalidad del ferrocarril las perturbaciones provocadas por las condiciones climáticas en otras infraestructuras externas, como las redes de suministro eléctrico o de telecomunicaciones.

#### Riesgos potenciales en las próximas décadas asociados a procesos de cambio climático y calentamiento global

A futuro, en líneas ferroviarias de la red convencional, se prevé que los mayores impactos estén relacionados con componentes de la infraestructura, cuyos criterios

de diseño son más antiguos y no responden a las mismas exigencias que actualmente cumplen las líneas de alta velocidad. Las obras de tierra, las estructuras y las obras de drenaje son a priori los componentes más vulnerables. En la mayoría de casos, los impactos guardan relación con el aumento de los episodios de lluvias intensas.

Respecto de los componentes de la superestructura, en líneas de la red convencional se identifican impactos relacionados sobre todo con el aumento generalizado de temperatura y de las oscilaciones térmicas, así como con la ocurrencia de tormentas más intensas y, eventualmente, un aumento de la intensidad máxima en las rachas de viento.

Destacan a este respecto los impactos debidos a la temperatura sobre el carril y las sujeciones, así como la previsión de aumento del riesgo de daños a la catenaria por sobretensiones por tormentas eléctricas y por caída de objetos por efecto de rachas de viento.

En líneas ferroviarias de alta velocidad de nueva construcción, los principales impactos se producirán previsiblemente sobre los componentes de vía, la catenaria y determinados elementos auxiliares de la infraestructura, como las pantallas y las plantaciones. El aumento generalizado de las temperaturas máximas y de las oscilaciones térmicas aumentará la dilatación de los carriles y sus tensiones internas, afectando a las sollicitaciones del sistema carril-travesía-sujeción, en mayor medida incluso que en el caso de líneas convencionales, al estar las líneas de alta velocidad sujetas a mayores requerimientos.

También es notable el posible impacto sobre la catenaria por aumento de intensidad de las ráfagas de viento, a tener en cuenta en su diseño. Conviene prestar atención asimismo al impacto potencial del factor viento en el diseño de las pantallas acústicas y de protección para la red de alta velocidad. Las previsiones actuales de cambio en el régimen e intensidad del viento no son a priori significativas, pero son todavía bastante inciertas. Dada la elevada incidencia que en la actualidad tiene este aspecto en la operación de las líneas de alta velocidad, parece conveniente mantener la atención sobre este potencial impacto mientras se está a la espera de disponer de previsiones más afinadas.

Tanto en estaciones y edificios técnicos ferroviarios como en trenes de nueva construcción, el mayor impacto proviene del aumento de necesidades de climatización debido al aumento de temperatura. Los mayores riesgos en la red ferroviaria convencional existente se concentran sobre todo en la vulnerabilidad de su infraestructura –fundamentalmente obras de tierra, estructuras y drenaje– y sobre las condiciones del servicio ferroviario. Los impactos sobre la infraestructura guardan relación, en gran medida, con el aumento de las lluvias intensas. En obras de tierra, preocupa especialmente la erosión en taludes de desmonte por aguas de escorrentía y posibles deslizamientos de laderas. En el caso concreto de puentes, preocupa el aumento de la erosión en cimientos de pilas y estribos y el riesgo de colapso, así como el posible agotamiento del resguardo entre la lámina de agua y el tablero del puente, como consecuencia del aumento del caudal de avenidas.

En la red convencional se prevé igualmente un incremento del número de incidencias en el servicio ferroviario como consecuencia de la presencia de obstáculos en la plataforma e inundaciones y daños localizados debido a

lluvias intensas. Se prevé también un aumento del número de los incendios que afectarán al tráfico ferroviario, debido al aumento de las olas de calor y de los periodos de sequía. Los incendios directamente imputables a la explotación ferroviaria –causados por regla general por los sistemas de frenado de vagones de mercancías– seguirán siendo sin embargo una minoría. La repercusión del cambio climático sobre los servicios ferroviarios de alta velocidad se prevé mayor, debido a una previsible mayor proporción de uso a largo plazo de este tipo de líneas frente a las de la red convencional.

Los impactos sobre la red de alta velocidad existente se prevén similares a los que hay que tener en cuenta para el diseño de nuevas líneas, aunque –junto con la afección a los componentes de vía, catenaria, pantallas y plantaciones– se agravan algunos impactos en otros componentes de la infraestructura, principalmente en líneas del sur de España. En general, son impactos debidos a precipitaciones extremas, con niveles de incidencia más altos que los previstos en líneas de nueva construcción. En particular, se estima mayor riesgo de erosión en taludes de desmonte y terraplén por efecto de las lluvias intensas, un aumento de la erosión de las pilas, estribos y obras de protección en puentes y viaductos como consecuencia del caudal de avenidas, inundaciones y arrastres por agua de escorrentía en túneles y falsos túneles, y un aumento del riesgo de caída del vallado de cerramiento por efecto combinado de fuertes lluvias y rachas de viento intenso.

En alta velocidad se contempla asimismo que puedan agravarse, de forma localizada, algunos impactos sobre la superestructura: por ejemplo, la intensidad de las lluvias puede aumentar el arrastre y movimiento de balasto; el aumento de la intensidad de las tormentas y de las temperaturas máximas puede elevar el riesgo de incendio en las sub-estaciones de tracción; y el incremento en la intensidad máxima de las ráfagas de viento, en caso de darse, aumentaría el riesgo de daños y de rotura en elementos de los sistemas de seguridad y comunicaciones.

La incidencia de los incendios directamente imputables a la explotación ferroviaria es despreciable, debido a la escasez actual de los tráficos de mercancías en la red de alta velocidad. Con todo, este riesgo podría verse alterado si se abre en el futuro las líneas de ancho UIC al tráfico mixto.

En cuanto a las estaciones y edificios técnicos ferroviarios, se ha identificado un impacto alto relacionado con el aumento de necesidades de climatización debido al aumento de temperatura, un impacto que será algo más moderado en el caso de los coches de viajeros de los trenes.

De forma general, el aumento de las temperaturas tiende a mejorar las condiciones de explotación del transporte ferroviario al disminuir la presencia de hielo o nieve en invierno, aunque aumenta las necesidades de mantenimiento en el verano. El aumento de las temperaturas puede suponer además mayores requerimientos de climatización en estaciones y coches de viajeros.

Desde un punto de análisis cuantitativo, cruzando la información sobre el análisis de riesgos, la capacidad de adaptación, y las incidencias existentes, se puede concluir que la mayor vulnerabilidad estaría asociada a los eventos extremos. Ésta empezaría en un nivel muy bajo (nivel 1) en la actualidad, terminando en un nivel medio (nivel 3) en el último período del siglo XXI estudiado. Hay que apuntar que

no se alcanzaría un nivel de vulnerabilidad mayor gracias a la existencia de servicios de mantenimiento de infraestructura ferroviaria, que contribuyen a facilitar la prestación normal del servicio en caso de afecciones por eventos extremos.

La vulnerabilidad asociada al aumento de la temperatura se situaría en la actualidad en un nivel muy bajo (nivel 1), y terminaría en un nivel de vulnerabilidad medio (nivel 3), aunque casi bajo, a finales del siglo XXI.

## 5. RECOMENDACIONES DE ESTRATEGIAS DE ADAPTACIÓN

De forma general como principales estrategias de adaptación a futuro los estudios realizados plantean una posible planificación de rutas alternativas evitando áreas de alto riesgo, la inclusión de nuevos estándares de diseño más resistentes en los requisitos de construcción y el diseño de alternativas logísticas y de suministro para localizaciones concretas en eventos extremos.

Se recomienda a corto plazo revisar la normativa y recomendaciones de diseño de las infraestructuras para reducir su vulnerabilidad frente a precipitaciones extremas de mayor intensidad. En particular, conviene prestar especial atención a las condiciones de diseño de puentes y viaductos frente al caudal de avenidas (por erosión en cimientos, estribos y obras de defensa) y de túneles, para evitar infiltraciones de agua e inundaciones de la plataforma. También se aconseja revisar las recomendaciones para el proyecto y la realización de taludes con el fin de mejorar su estabilidad en caso de avenidas. Se considera que, con las modificaciones que incorpora el actual borrador de revisión de la Instrucción sobre drenaje superficial de carreteras, que es la utilizada como referencia en el ámbito ferroviario, se cubren ya las necesidades de adaptación a corto plazo del diseño del drenaje superficial en ferrocarriles.

Respecto de la superestructura ferroviaria de nueva construcción, conviene valorar con detalle los riesgos asociados a la deformación del sistema carril-travesía-sujeciones por aumento de las temperaturas máximas y de las oscilaciones térmicas diarias, así como los daños que se puedan ocasionar en la catenaria por sobretensión en caso de tormentas eléctricas de mayor intensidad y, si es pertinente, actualizar la normativa y recomendaciones de diseño aplicables. Aunque la construcción de estaciones y edificios técnicos ferroviarios se encuentra regulada en la actualidad por el Código Técnico de la Edificación, el sector también cuenta con recomendaciones específicas para su diseño. En base a registros históricos de mantenimiento, ADIF ha constatado que - aun cumpliendo los reglamentos - existen problemas esporádicos con la evacuación de saneamiento, por lo que se recomienda realizar una revisión de sus capacidades ante la previsión de precipitaciones máximas más intensas. Asimismo, se sugiere que se considere la oportunidad de dimensionar los sistemas de climatización por encima de los mínimos que exige actualmente el reglamento en las cargas térmicas; dicho sobredimensionamiento encarecerá los equipos, pero en contrapartida se puede conseguir un aumento del rendimiento y fiabilidad de la instalación, y que se adapte al previsible aumento de las cargas térmicas por efecto del cambio climático.

En líneas ferroviarias existentes, se aconseja llevar a cabo una revisión general de los protocolos actuales de

prevención, mantenimiento y vigilancia de la infraestructura. Durante la revisión, conviene prestar una atención particular: a los taludes y laderas con riesgo de erosión y deslizamiento a causa de lluvias intensas; a la erosión en puentes por efecto de los cauces; al estado de la cimentación de los postes de vallado y al posible descalce de las canaletas en la plataforma ferroviaria debido al agua de escorrentía; a la verificación del riesgo de inundación de la vía, túneles, obras de drenaje, caminos de acceso y canaletas, así como de colapso en puentes/viaductos situados en lugares donde se produzcan fuertes avenidas; al estado de la vía (balasto, traviesa, carril y sujeciones), con el fin de detectar posibles arrastres y deformaciones ocasionados por lluvias extremas o por el incremento de las oscilaciones térmicas; al estado de la catenaria, con el fin de detectar daños causados por sobretensión en caso de tormenta eléctrica; al estado de las instalaciones en sub-estaciones eléctricas de tracción, con el fin de evitar posibles incendios causados por daños ocasionados por tormentas eléctricas y altas temperaturas; y al control de la vegetación en los márgenes de la vía, para reducir el riesgo de incendios en periodos de sequía.

Con objeto de reducir el riesgo de incendios causado por la explotación ferroviaria, convendría además fomentar la utilización en los sistemas de frenado de los vagones de mercancías de zapatas de material compuesto (tipo K o tipo LL) en lugar de las zapatas convencionales de fundición.

Para estaciones ferroviarias existentes, la revisión de los protocolos debería centrarse en el estado de las instalaciones de saneamiento, con el fin de evitar disfunciones por aumento del nivel freático como consecuencia de lluvias intensas. Además, sería conveniente valorar el aumento de la potencia de climatización instalada conforme se llegue al final de la vida útil de sus equipos de climatización. El sector ferroviario ha realizado en los últimos años un esfuerzo considerable por dotarse de sistemas sólidos de alerta meteorológica.

No obstante, sería conveniente completar su desarrollo e implantación, y reforzar su integración con aquellos procesos de toma de decisión encaminados a minimizar la afección al servicio ferroviario y a la infraestructura, especialmente en el caso de inundaciones.

En el caso de infraestructuras ferroviarias, especialmente para alta velocidad, en función de la actualización de las previsiones de cambio relacionadas con el régimen extrema de vientos, puede ser necesario revisar la normativa de diseño relacionada con la catenaria y con los apantallamientos (acústicos, antivandálicos, para protección de aves, etc.).

## 6. BIBLIOGRAFÍA

CEDEX 2013. *Informe final del Grupo de Trabajo para el análisis de las Necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España*. Madrid: CEDEX.

Oficina Española de Cambio Climático (OECC) 2013. *Estrategia empresarial para la adaptación al cambio climático. Incorporación de impactos, riesgos y vulnerabilidad*. Madrid: OECC.

Agencia Ambiental Europea (EEA) 2014. *Adaptation of transport to climate change in Europe. Challenges and options across transport modes and stakeholders*. Luxembourg: EEA.