

Metodología de análisis de adaptación al cambio climático de infraestructuras de transporte

Climate-Change-Adaptation Analysis Methodology of Transport Infrastructures

Laura Crespo García^{1*}, Fernando Jiménez Arroyo²

Resumen

Los impactos producidos por el Cambio Climático pueden ser paliados, mejorando la adaptación y resiliencia de los territorios. En este contexto se buscan herramientas de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo climático en infraestructuras de transporte, por lo que se hace necesario definir una metodología capaz de anticipar cambios en el conjunto del sistema de transporte. En este artículo se presenta una metodología de análisis sistemático de riesgo frente a impactos que se generan a partir de variables climáticas actuales y futuras en diferentes escenarios. Para lograr este objetivo se plantea valorar la criticidad física y funcional de la red, evaluando en primer lugar la vulnerabilidad de un proyecto, que depende de su exposición y sensibilidad. Una vez detectados los activos vulnerables se realiza un análisis de riesgo que depende de la probabilidad y gravedad de los impactos identificados tomando como referencia unos umbrales críticos que representan los niveles de riesgo tolerables. Finalmente sería necesario aplicar medidas de adaptación a incluir en un plan de acción en base a un análisis detallado que permita priorizar las medidas más adecuadas. Es también importante tener en cuenta qué activos del sistema son más críticos para desempeñar los servicios de transporte.

Palabras clave: Cambio Climático, variables climáticas, vulnerabilidad, sensibilidad, exposición, riesgo, gravedad, probabilidad, medidas de adaptación, criticidad.

Abstract

Climate change can be mitigated improving territories adaptation and resilience. In this context, vulnerability and climate risk assessment tools in transport infrastructures are being sought, so it's necessary to define a methodology capable of anticipating changes in the entire transport system. In this article, it's presented a systematic risk analysis methodology in relation to impacts generated from current and future climate variables in different scenarios. In order to achieve this objective, it's proposed to assess the physical and functional network criticality. First of all, the vulnerability of a project is evaluated, which depends on its exposure and sensitivity. Once vulnerable assets have been detected, a risk analysis is accomplished, which depends on the probability and severity of the identified impacts, taking as a reference critical thresholds that represent tolerable levels of risk. Finally, it would be necessary to apply adaptation measures, which will be included in an action plan based on a detailed analysis that allow prioritizing the most appropriate measures. It's also very important to take into account which system structures are more critical for performing transport services.

Keywords: Climate Change, climate variables, vulnerability, sensitivity, exposure, risk, severity, probability, adaptation measures, criticality.

INTRODUCCIÓN

El Cambio Climático de origen antropogénico es una realidad aceptada por la comunidad científica y avalada por evidencias documentadas en diferentes informes del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés). Estos cambios pueden ser paliados, mejorando la adaptación y resiliencia de los territorios, pero el aumento en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y la durabilidad de estos en la atmósfera provoca una dinámica atmosférica de cambio difícil de

detener. Es posible modificar esta tendencia de desequilibrio del sistema climático, aunque algunos cambios ya están integrados en el sistema climático como inevitables. La mitigación de las emisiones de GEI es esencial para evitar los peores efectos a largo plazo, además de los beneficios que se obtiene por repensar el conjunto del sistema y hacerle más eficiente. Sin embargo, a menos que las vulnerabilidades y los riesgos se gestionen adecuadamente, el Cambio Climático afectará cada vez más al desempeño de las actividades tal y como hoy las conocemos (económico-productivas, culturales y de ocio, de relaciones sociales y de formación), con el consiguiente cambio en la forma de planificar los proyectos e inversiones económicas.

Se pronostican cambios más frecuentes e intensos en las condiciones climáticas tanto en promedio, como extremas (frecuencia e intensidad). Los eventos extremos también ocurrirán en nuevas ubicaciones que no eran previamente consideradas como vulnerables. La comunidad científica

* Autor de contacto: Laura.Crespo@cedex.es

¹ Ingeniera agrónoma. Jefa del Área de Cambio Climático y Contaminación Atmosférica del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX.

² Licenciado en Ciencias Ambientales. Área de Cambio Climático y Contaminación Atmosférica del Centro de Estudios de Técnicas Aplicadas (CETA), del CEDEX.

pronostica que puede haber cambios abruptos e irreversibles cuando el clima del sistema cruce los llamados “puntos de inflexión”, lo que desencadenará una transición a un nuevo estado (dinámica del conjunto del sistema).

En este contexto de cambio se buscan herramientas de evaluación de la vulnerabilidad y el riesgo climático en infraestructuras de transporte, para incorporarlas en el análisis de riesgo mediante variables y peligros climáticos relevantes, con su probabilidad de ocurrencia. Se tomará como referencia las superaciones de umbrales, que pueden registrarse con mayor frecuencia en el futuro debido al Cambio Climático. Un clima cambiante puede provocar que un umbral que se consideraba excepcional pero aceptable pueda volverse habitual e inaceptable.

Los proyectos, y a veces el conjunto del sistema, puede que tengan que funcionar dentro de márgenes más estrechos entre la operación “normal” y “crítica”. Esto se traducirá en una disminución de la eficiencia del sistema, infraestructura o equipos, aumentándose el margen de error antes de que se aborden medidas de gestión más adecuadas y que mejoren la resiliencia.

OBJETIVO Y ALCANCE

En el marco de infraestructuras del Estado es necesario definir una metodología que analice las vulnerabilidades de la infraestructura frente a la variabilidad climática y sea capaz de anticipar cambios en el conjunto del sistema de transporte. Este artículo plantea una propuesta de metodología para hacer frente a este objetivo.

Analizar las vulnerabilidades actuales y las derivadas del efecto del Cambio Climático es clave en los análisis de riesgos. En las metodologías que han servido de referencia para la elaboración del artículo¹, de análisis de vulnerabilidad y de riesgo, se toman como punto de partida las variables climáticas que afectan a las infraestructuras de transporte, con sus índices climáticos (variables climáticas agregadas) según diferentes escenarios climáticos. Para estos escenarios se consideran diferentes períodos de análisis futuros (horizontes temporales). Como ejercicio práctico se plantean los siguientes períodos: cercano (2011-2040), medio (2041-2070) y lejano (2071-2100).

En la metodología propuesta en el artículo, se utilizan datos e índices climáticos (proyección del clima), superponiendo esta información climática con la proveniente de la infraestructura, como activo y como servicio prestado (estado de la infraestructura de red y estado de su mantenimiento y degradación, políticas de mantenimiento existentes, registros de la gestión de crisis, mantenimiento correctivo por fallos en la infraestructura, nivel de tráfico en el horizonte temporal, etc.)

Tanto los análisis de vulnerabilidad como los análisis de riesgo derivados de esta metodología permiten obtener información cuantitativa y mapas de las infraestructuras más vulnerables, proporcionando un inventario de los posibles impactos actuales y futuros.

Esta metodología busca identificar las redes estratégicas para el funcionamiento de la organización territorial, con sus posibles riesgos. Ayudando a determinar qué sitios

son esenciales en situaciones críticas: centros sanitarios, educativos, servicios de emergencias, áreas industriales y comerciales en zonas densamente pobladas, etc.

Del mismo modo, esta metodología se concibe como herramienta de análisis sistemático de riesgo climático para cualquier tipo de proyecto de infraestructuras de transporte, tal y como recoge la Ley 21/2013 de evaluación de impacto ambiental, modificada por la ley 9/2018, que obliga a realizar este tipo de ejercicios en las primeras etapas de un proyecto.

De igual forma, es necesario aplicar esta metodología a la Red de Transporte existente, que responde a las necesidades de movilidad impuestas por las exigencias económico - sociales del momento en la que se proyectó y construyó. Las condiciones de la Red se han de mantener, consiguiendo una red funcionalmente operativa, preservando así la integridad de los activos y asegurando buenas condiciones de movilidad para las personas y las mercancías. A los condicionantes actuales de la Red es necesario incorporar la variable Cambio Climático para mejorar su resiliencia, asegurando las prestaciones actuales, que se deben garantizar en el futuro.

Para lograr este objetivo se plantea valorar la criticidad física y funcional de la red con la metodología planteada en el siguiente esquema:

1. **Considerar la vulnerabilidad** de un proyecto y de la red Crítica de Transporte a la variabilidad climática.
2. **Evaluar los riesgos** climáticos actuales y futuros.
3. Identificar las **opciones de adaptación** más eficaces desde el punto de vista de costes.
4. Integrar las **medidas de adaptación** (medidas de resiliencia) en el ciclo de vida del proyecto.

Si se considerara oportuno, para simplificar el proceso, pudiera incluirse una fase previa o Fase 0, de identificación de riesgos, aplicando la metodología propuesta solo en los elementos del proyecto/infraestructura que se considere necesario en base a la experiencia previa, práctica aplicada el proyecto CLARITY, financiado en el marco del programa H2020 de la Unión Europea (UE) (CLARITY, 2020).

El documento elaborado por la DG de Acción Climática de la Comisión Europea, *Guidelines for Project Managers: Making vulnerable investments climate resilient*, en adelante *Guía EU-GL* (Comisión Europea, 2013), ha servido de referencia para establecer la metodología antes planteada. Las fases contempladas en esta guía son:

1. Análisis de sensibilidad.
2. Evaluación de la exposición.
3. Análisis de vulnerabilidad (incorporar los resultados de 1 y 2).
4. Análisis del riesgo.
5. Identificación de opciones de adaptación.
6. Evaluación de las opciones de adaptación.
7. Integración de del plan de acción de adaptación en el proyecto.

La guía igualmente recomienda que las herramientas climáticas y los módulos de análisis sean aplicados por gestores expertos en resiliencia climática como una parte del

¹ Comisión Europea (2013), FWHA (2018), IMT (2019), JASPERS (2017) y PIARC (2015)

desarrollo rutinario del proyecto o del funcionamiento del conjunto del sistema de transporte.

El objetivo principal de las evaluaciones de la vulnerabilidad y del riesgo del Cambio Climático es informar a los gestores de la Red de la criticidad física y funcional del sistema de transporte. Esta metodología aplicada en la fase de planificación permite mejorar la adaptación de la infraestructura. Tradicionalmente, esto se ha logrado a través de métodos que se centran en obtener datos climáticos, bien regionales o locales, a partir de modelos climáticos a una escala global. Los escenarios resultantes a escala local se introducen en modelos de variables climáticas debidamente georreferenciadas, lo que permite definir los impactos que pueden experimentar los tramos y secciones de la infraestructura (o activos existentes).

Aunque los modelos climáticos se mejoran constantemente, aún no son lo suficientemente precisos como para predecir las condiciones climáticas futuras con un grado de confianza que permita precisar decisiones de adaptación a tomar, con el consiguiente alto grado de incertidumbre.

El método planteado en este artículo dibuja una herramienta para hacer frente a esta incertidumbre que impone el Cambio Climático, con la intención de implementar acciones de adaptación que funcionen en las condiciones climáticas actuales y las que puedan darse en el futuro.

1. EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD (FASE 1)

La vulnerabilidad representa el grado en que un sistema natural o social es susceptible y no puede hacer frente a los efectos adversos del Cambio Climático. Se refiere a las características internas del propio proyecto, infraestructura o sistema de transporte.

Vulnerabilidad

La probabilidad de que un elemento en riesgo, clasificado como parte de una clase de vulnerabilidad específica, se vea afectado por un nivel de daño, de acuerdo con una escala prefijada de daños, bajo una intensidad de peligro dada (CLARITY, 2020).

Es función del carácter, magnitud y rapidez del Cambio Climático, así como de la variación a la que un sistema está expuesto (exposición); y del grado en que se ve afectado algo, ya sea adversa o beneficiosamente, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad) (PIARC, 2015).

La propensión o predisposición para verse afectada negativamente. La vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacer frente y adaptarse (IPCC, 2014).

El grado en que un sistema es susceptible y no puede hacer frente a los efectos adversos del Cambio Climático, incluida la variabilidad climática y los extremos. La vulnerabilidad es una función del carácter, la magnitud y la tasa de cambio y variación climáticos a los que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación (IPCC, 2007).

La vulnerabilidad también está determinada por la capacidad de adaptación, la cual esencialmente es la capacidad del sistema para hacer frente y adaptarse a la variabilidad climática existente y sus cambios futuros.

La vulnerabilidad puede ser funcional o física. La vulnerabilidad funcional de un sistema de transporte a nivel macroscópico depende de las características funcionales de la red de infraestructura, su capacidad, ya sea de malla o radial u otro tipo, etc. La vulnerabilidad física de un sistema de transporte, de los componentes del sistema, depende de las características físicas de los activos de la infraestructura, su resistencia y su comportamiento.

Calculando la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación, se determina el indicador de vulnerabilidad. Este indicador permite evaluar el nivel de vulnerabilidad de los sitios en riesgo. La evaluación de la vulnerabilidad comprende un análisis tanto de la sensibilidad, como de la exposición actual y futura.

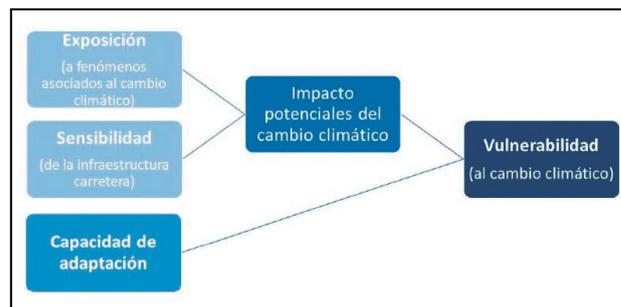


Figura 1. Relación entre los componentes de la vulnerabilidad (ITM, 2019).

1.1. Identificar la sensibilidad climática

La sensibilidad permite medir las condiciones intrínsecas del sistema de transporte o de sus modos o los elementos que la integran.

Sensibilidad

Grado en que un sistema se ve afectado, ya sea adversa o benéficamente, por estímulos relacionados con el clima (PIARC, 2015).

El grado en que un sistema o una especie se ven afectados, adversa o beneficiosamente, por la variabilidad o el cambio climático. El efecto puede ser directo (por ejemplo, un cambio en el rendimiento del cultivo en respuesta a un cambio en la media, rango o variabilidad de la temperatura) o indirecto (por ejemplo, daños causados por un aumento en la frecuencia de las inundaciones costeras debido a la subida del nivel del mar) (IPCC, 2014).

El grado en que un sistema se ve afectado, de manera adversa o beneficiosa, por la variabilidad o el Cambio Climático. El efecto puede ser directo (por ejemplo, un cambio en el rendimiento del cultivo en respuesta a un cambio en la media, rango o variabilidad de la temperatura) o indirecto (por ejemplo, daños causados por un aumento en la frecuencia de inundaciones costeras debido al aumento del nivel del mar) (IPCC, 2007).

Un modo de transporte puede ser más o menos sensible, según su capacidad de mantener su estructura, composición y función en presencia de un fenómeno climático que lo perturbe, ya sea por su capacidad de resiliencia o por su adaptación, o que carezca de capacidades para hacer frente a los estímulos climáticos.

Para evaluar la sensibilidad del activo, de acuerdo con la metodología de la Agencia Federal de Carreteras de EE. UU. (FHWA, 2018), se sugiere incluir las siguientes variables: edad del activo, etapa de su actividad de acuerdo a su vida útil, localización geográfica, información sobre su desempeño o condición actual, nivel de servicio, mantenimiento, calidad de los elementos constructivos, entre otras.

1.1.1. Variables/índices/amenazas

La sensibilidad del proyecto e infraestructura se determina en relación a un rango de variables climáticas que evolucionan en el tiempo, en diferentes escenarios (índices climáticos) y sus efectos secundarios asociados al clima (amenazas o peligros); lo que provoca impactos por razones de edad del activo o nivel de servicio. Este análisis debe materializarse en la representación gráfica de un mapa para cada variable, índice o amenaza identificada.

Amenaza (Peligro)

Es la ocurrencia potencial de un evento físico natural o provocado por el hombre, o un impacto físico, que puede causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos negativos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, la infraestructura, los medios de vida, la prestación de servicios, los ecosistemas y los recursos ambientales. El peligro en el Cambio Climático se refiere a los acontecimientos o tendencias físicas que están relacionados con el clima o sus impactos físicos (IPCC, 2014).

Las variables climáticas que se consideran más habitualmente en el diseño, explotación y mantenimiento de una infraestructura de transporte son los valores medios, extremos y extremos en intensidad, frecuencia o duración de los siguientes parámetros:

- Temperatura: temperatura extrema y mínima, ola de calor/frío con los matices antes descritos.
- Precipitación: lluvia, nieve, granizo y falta de precipitación: sequía.
- Viento: viento extremo; viento extremo con precipitación de lluvia y granizo. Mendicantes: huracanes en el Mediterráneo.

Estas variables deben ser calculadas y agregadas en los escenarios pronosticados de Cambio Climático, representando índices climáticos (CLARITY, 2020)².

En la categoría de fenómenos (amenazas o peligros) relacionados con los eventos climáticos extremos asociados con las anteriores variables climáticas se pueden señalar:

- Sequías.
- Lluvias.
- Inundaciones por elevación del nivel del mar e inundaciones fluviales.
- Incendios forestales, entre otros.

En la tabla 1 se muestra una lista extensa pero no exhaustiva de variables y amenazas asociadas planteadas la *Guía EU-GL* (Comisión Europea, 2013).

Otra posible referencia de amenazas climáticas potenciales se recoge en la tabla 2, obtenida de la metodología JASPERS (*Joint Assistance in Supporting Projects in European Regions*)³ (JASPERS, 2017):

Estos listados de variables/índices/amenazas pueden ampliarse en base a la experiencia que se vaya adquiriendo en la aplicación de esta metodología.

Es de sumo interés elegir con responsabilidad especialistas técnicos, o juicio de expertos, para hacer los estudios de manera adecuada, dada la amplia gama posibilidades de análisis y tipos de proyectos donde la metodología se puede aplicar, identificando variables climáticas o amenazas.

Una vez que se conocen las amenazas climáticas más relevantes para el proyecto estudiado, es necesario determinar cómo de sensibles son los componentes de este proyecto a esas amenazas climáticas.

² Los escenarios pronosticados de cambio climático pueden obtenerse de los visores de escenarios disponibles de las plataformas especializadas como Copernicus (repositorio de referencia a nivel europeo) y AdapteCCa (repositorio de referencia a nivel nacional).

³ Servicio de asesoramiento, prestado a través de una unidad del BEI para la elaboración de proyectos cofinanciados por los Fondos Estructurales y de Inversión Europeos. Entre los requisitos a tener en cuenta en los proyectos se halla la adaptación a los efectos del Cambio Climático.

Tabla 1. Variables climáticas clave y peligros relacionados con el clima

VARIABLES CLIMÁTICAS (Drivers primarios del clima)	AMENAZAS O PELIGROS OCASIONADOS POR EL CLIMA Efectos secundarios/daños
1. Temperatura media anual del aire ambiente, estacional, mensual	1. Aumento del nivel del mar (SLR) (más movimientos locales de tierra)
2. Temperatura extrema del aire (frecuencia y magnitud)	2. Temperaturas del mar / lámina de agua
3. Precipitación media mensual, estacional y anual	3. Disponibilidad de agua
4. Precipitación extrema (frecuencia y magnitud)	4. Tormenta (trayectoria e intensidad) incluyendo marejada
5. Velocidad media del viento	5. Inundación
6. Velocidad máxima del viento	6. pH del océano
7. Humedad	7. Tormentas de polvo
8. Radiación solar	8. Erosión costera
	9. Erosión del suelo
	10. Salinidad del suelo
	11. Incendio salvaje (gran incendio o super-incendio)
	12. Calidad del aire
	13. Inestabilidad del suelo/deslizamientos de tierra/ avalancha
	14. Efecto de isla de calor urbano
	15. Duración de la temporada de crecimiento vegetativo de plantas

Tabla 2. Amenazas climáticas potenciales

AMENAZA CLIMÁTICA (Peligro)	DESCRIPCIÓN
Aumento de temperatura media del aire	Incrementos en las temperaturas medias con el tiempo
Sucesos de temperaturas extremas (incluidas las olas de calor)	Cambios en la frecuencia e intensidad de los períodos de altas temperaturas, incluidas las olas de calor (períodos de temperaturas máximas extremadamente altas y mínimas)
Cambio de precipitación promedio	Tendencias a lo largo del tiempo de más o menos precipitación (lluvia, nieve, granizo, etc.)
Eventos de precipitación extrema	Cambios en la frecuencia e intensidad de períodos de precipitación intensa
Disponibilidad de agua	La abundancia o falta relativa de agua
Temperatura del agua	Cambios en la temperatura de las aguas superficiales y subterráneas
Inundaciones (costeras y fluviales)	Inundaciones desde el mar o desde los ríos
Temperatura del agua de mar	Cambios en la temperatura media del agua de la superficie del mar
Aumento relativo del nivel del mar	Causado por una combinación de aumento de la temperatura del mar (expansión del volumen de agua) y fusión de capas de hielo y glaciares
Temporales	Un aumento anormal de agua de mar generado por una tormenta, más allá de las mareas astronómicas previstas
Intrusión salina	Movimiento de agua salada en acuíferos de agua dulce, lo que puede conducir a la contaminación de las fuentes de agua potable y otras consecuencias
Salinidad del océano	Cambios en las concentraciones de sal en el agua de mar
pH del océano	Acidificación de los océanos
Erosión costera	El desgaste de la tierra y la eliminación de sedimentos de playa o dunas por acción de las olas, corrientes de marea, corrientes de olas, drenaje o vientos fuertes
Erosión del suelo	El proceso de eliminación y transporte de suelo y rocas por la meteorización, el desgaste masivo y la acción de corrientes, glaciares, olas, vientos y aguas subterráneas
Inestabilidad del suelo/deslizamientos de tierra/avalancha	Inestabilidad del suelo: movimiento del suelo; Deslizamiento de tierra: una masa de material que se ha deslizado cuesta abajo por gravedad, a menudo asistida por agua cuando el material está saturado; Avalancha: un flujo rápido de nieve por una superficie inclinada
Salinidad del suelo	Cambios en el contenido de sal en el suelo
Velocidad media del viento	Cambios en la velocidad media del viento a lo largo del tiempo
Velocidad máxima del viento	Aumento de la fuerza máxima de las ráfagas de viento
Tormentas (pistas e intensidad)	Cambios en la ubicación de las tormentas, su frecuencia e intensidad
Humedad	Cambios en la cantidad de vapor de agua en la atmósfera
Sequías	Períodos prolongados de precipitaciones anormalmente bajas, que provocan escasez de agua
Tormentas de polvo	Una tormenta de vientos fuertes y aire lleno de polvo
Incendios forestales	Incendios no deseados, no planificados y dañinos, como incendios forestales e incendios de arbustos y pastizales
Calidad del aire	Aumento de concentraciones de contaminantes a nivel local, incluidos incidentes como el smog
Efecto de isla de calor urbano	Ciudades o áreas metropolitanas que son significativamente más cálidas que el área rural circundante, causado por una mayor absorción de energía solar por materiales en el área urbana, como el asfalto
Duración de la temporada de cultivo	Cambios en las estaciones durante las cuales crecen ciertas especies de flora, ya sean más largas o cortas
Radiación solar	La energía emitida por el sol de una reacción de fusión nuclear que crea energía electromagnética

Amenaza climática (Peligro)	Descripción
Olas de frío	Períodos prolongados de temperaturas extremadamente frías
Daños por congelación y descongelación	La congelación y descongelación repetidas pueden causar daños por tensión a estructuras como el cemento
Derretimiento del permafrost	Derretimiento de suelo previamente congelado permanentemente

1.1.2. Análisis de la sensibilidad con su correspondiente Mapa de sensibilidad

Según recoge la *Guía EU-GL* (Comisión Europea, 2013), cuando se valora la sensibilidad a la adaptación al Cambio Climático de las diferentes alternativas de transporte, en fase de proyecto, se deberá prestar atención a las variables y peligros climáticos, y evaluar los proyectos (las componentes principales de la infraestructura) desde la óptica que ofrece la cadena de valor del activo concreto. Es decir, valorar los servicios que presta a la comunidad en su conjunto:

- Evaluación de activos y procesos de la infraestructura en relación al servicio prestado.
- Disponibilidad de energía y otros servicios, como agua.
- Factores productivos de mercado: obtención de materias primas, distribución de productos elaborados, y relaciones económicas de mercado de bienes de equipo.
- Enlaces y conexiones con el sistema de transporte.

Las variables climáticas y amenazas importantes son aquellas que se consideran de sensibilidad alta o media en al menos uno de los cuatro puntos del listado anterior.

El documento de *Guía EU-GL*, a modo de ejemplo analiza en una matriz un proyecto de carretera, particularizando en un activo concreto, un puente de un tramo de la carretera (ver tabla 3).

Simplificando este proceso en el caso de las infraestructuras de transporte se propone analizar la sensibilidad en relación con el primero de los criterios de análisis anteriores, **conjunto de activos y procesos de la infraestructura**. Tomando como referencia la metodología JASPERS, se analiza de forma diferenciada la sensibilidad de:

- Los activos físicos de la infraestructura.
- La funcionalidad de esta (medida como intensidad media diaria, IMD).
- La interdependencia entre los activos físicos y la funcionalidad de la infraestructura.
- La valoración global de la sensibilidad de un proyecto frente a una variable/índice/amenaza climática.

Tabla 3. Matriz de sensibilidad (efecto secundario/daños relacionados con las variables climáticas) para un tipo de proyecto: puente sobre carretera (Comisión Europea, 2013)

Tipo de proyecto: puente de un tramo de carretera			
Conjunto de activos y procesos	Productos (usuarios y servicios prestados)	Conexión con el conjunto de la red	Variables/Índices/Amenazas
Media	No	Media	Aumento de los incrementos de la temperatura del aire
Alta	Alta	Alta	Incremento de las temperaturas extremas
Media	No	Media	Incremento en el cambio de régimen de lluvia
Alta	Alta	Alta	Cambio en los extremos de lluvia
Alta	No	No	Media de la velocidad del viento
Alta	Alta	Alta	Máximo de la velocidad del viento
Media	Media	Media	Humedad relativa y absoluta
Media	No	No	Radiación solar
Alta	Media	Media	Aumento relativo del nivel del mar
No	No	No	Temperatura del agua del mar
No	No	No	Disponibilidad de agua
Alta	Alta	Alta	Tormentas
Alta	Alta	Alta	Inundaciones (costeras y fluviales)
Media	No	No	pH de los océanos
No	Media	Media	Tormenta de arena
Alta	Alta	Alta	Erosión costera
Media	No	Media	Erosión de suelo
No	No	No	Salinidad de suelo
Alta	Alta	Alta	Incendios salvajes
No	Media	No	Calidad del aire
Alta	Alta	Alta	Deslizamientos de tierra, inestabilidad
No	Media	Media	Isla de calor urbana
No	No	Media	Periodo de crecimiento vegetativo de plantas



Estos contenidos están recogidos en la tabla 4.

Tabla 4. Análisis de sensibilidad

Variable/índice/amenaza	Conjunto de Activos físicos	Funcionalidad (Operación) IMDs	Interdependencia	Global
Ej: Precipitación	Sensibilidad Media	Sensibilidad Alta	Sensibilidad Alta	Sensibilidad Alta

La valoración de la sensibilidad se puede llevar a cabo mediante juicio de expertos con conocimiento del proyecto. Se puede realizar esta valoración de forma más objetiva utilizando metodologías diseñadas en exclusiva para este tipo de análisis (por ejemplo, análisis multifactorial) (Alonso *et al.* 2017).

Las siguientes descripciones proporcionan una orientación sobre las puntuaciones subjetivas de variables climáticas, índices o amenazas que puede significar un impacto:

- Alta sensibilidad: la variable climática/índice/amenaza puede tener un impacto significativo.
- Sensibilidad media: la variable climática/índice/amenaza puede tener un ligero impacto en los activos y procesos, entradas, salidas y enlaces de transporte.
- No sensible: la variable climática/índice/amenaza no tiene efecto.

1.2. Evaluación de la exposición a las amenazas climáticas (Peligros)

Una vez analizada la sensibilidad, el siguiente paso es evaluar la exposición para cada variable, índice o amenaza climática en la localización donde se va a implementar un proyecto, ya que éste se va a comportar en cada territorio de manera diferente en función de las diferentes variables climáticas y dependiendo de los eventos extremos que se puedan producir.

Exposición

La presencia de personas, infraestructura, vivienda, capacidades de producción y otros activos humanos tangibles en áreas propensas a los peligros (CLARITY, 2020).

El grado en que un sistema ambiental se pone en contacto con las condiciones o los impactos climáticos específicos y la probabilidad, de que este estrés afecte a la infraestructura de transporte (PIARC, 2015).

La presencia de las personas, los medios de vida, especies o ecosistemas, las funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura o activos económicos, sociales o culturales, en sitios y entornos que podrían verse afectados de manera adversa (IPCC, 2014).

La naturaleza y el grado en que un sistema está expuesto a variaciones climáticas significativas. La exposición está determinada por el tipo, la magnitud, el tiempo y la velocidad de los eventos climáticos y la variación a la que está expuesto un sistema (por ejemplo, el cambio de inicio de la temporada de lluvias o las temperaturas mínimas de invierno, inundaciones, tormentas, olas de calor) (Banco Mundial, 2009).

Los niveles de exposición en un sitio pueden venir definidos por datos históricos y recientes (eventos acontecidos), registrados para generar conocimiento, o también basarse en proyecciones climáticas. De este modo, los niveles de exposición se deben calcular en el presente y en el futuro, en diferentes escenarios, por ejemplo, incremento de temperaturas u otro índice climático. Se plantea todo un proceso metodológico para conocer cómo pueden afectar las variables climáticas a los diferentes casos de estudio de proyectos de carretera o cualquier otra infraestructura de transporte, lineal y nodal, tanto en el presente como en el próximo horizonte temporal bajo el paraguas de incertidumbre que plantea el Cambio Climático, y en los posibles escenarios, resultado de implementar políticas de reducción de emisiones de GEI que puedan inducir a diferentes escenarios climáticos.

1.2.1. Evaluación de la exposición actual, con su correspondiente Mapa de exposición

En la evaluación se ha de comprender cuáles son las áreas expuestas y cómo se verán afectadas. Estos lugares serán los de mayores beneficios de la adaptación. Para ello se debe conocer el clima actual de la zona geográfica de la traza del proyecto y las variables e índices climáticos que la caracterizan: temperatura media, y extremas, precipitaciones medias y extremas y otras como el régimen de vientos.

De igual modo se ha de revisar y contar con registros de los eventos climáticos que pueden haber afectado en el pasado al territorio por donde discurre la traza de la red de transporte (emplazamiento de la infraestructura): registro de inundaciones, con sus niveles alcanzados y tiempo de duración; olas de calor, registros históricos con periodo de duración del suceso, temperatura media diaria y temperaturas máximas acaecidas; ciclos de congelación y descongelación (fuertes oscilaciones térmicas).

Para realizar esta tarea, con continuidad en el tiempo se propone crear un observatorio para analizar, registrar estos eventos climáticos y dejarlos debidamente documentados. Este departamento debería aglutinar todas las infraestructuras de transporte, por lo que se requiere una estructura de gobernanza transversal, que puede involucrar a varios niveles de Administración (estatal, autonómica y local), con competencia en diferentes modos de transporte.

A la hora de identificar los acontecimientos climáticos en una zona se ha de acudir a registros de información de observaciones del pasado, fruto de la experiencia acumulada en impactos de proyectos similares, valorados mediante umbrales críticos definidos con los estándares de diseño de los proyectos. Estas referencias se pueden usar como punto de partida en el análisis. Esta información puede recabarse en Institutos de investigación u organizaciones gubernamentales. En el caso español se puede obtener de las

diferentes demarcaciones territoriales de infraestructuras, que cuentan con registros de obras por daños sufridos en los diferentes activos, y de tiempos de servicio perdido por los eventos climáticos que han provocado daños en el pasado en sus infraestructuras.

Algunos de los fenómenos y eventos climáticos a tener presentes se deberían haber documentado convenientemente y deberían contar con un registro para abordar la adaptación al Cambio Climático en España en los diferentes ámbitos de trabajo. Para ello en lo sucesivo se debe disponer de un centro único de tratamiento de la información, aunque los organismos competentes en hacer frente a estos fallos (daños por consecuencias climáticas en las infraestructuras) sean distintos. Este centro debe tener presente y respetar el esquema competencial de la organización de Estado y sus Comunidades Autónomas (CC.AA.) en Infraestructuras de transporte.

Se ha de partir de un registro documental de:

- Condiciones climáticas extremas (descripción en variables climáticas) que han afectado los activos carreteros y a otros activos de infraestructura.
- Fenómenos climáticos frecuentes que han provocado daños a carreteras, puentes, pavimentos u otra infraestructura, por ejemplo, en obras de drenaje o señalamiento y otros activos de infraestructura.
- Fenómenos climáticos que han afectado en ubicaciones concretas del activo, aunque el impacto haya sido el mismo que en otros, y estos otros no han sufrido la misma afección.
- Fenómenos climáticos que han requerido inversiones económicas elevadas y que han dejado paralizado el activo carretero u otra obra de infraestructura en un periodo significativo de tiempo, con graves consecuencias para la sociedad y la economía de la región.
- Fenómenos climáticos que han puesto en riesgo a los activos con alto valor económico y son críticos dentro del conjunto del sistema de transporte.
- Fenómenos climáticos que rebasan los umbrales en los que el sistema comienza a experimentar impactos (por ejemplo, alta temperatura específica a determinar según cada territorio, tipo de activo y condiciones de servicio de cada infraestructura o un caudal máximo que ha causado daño o falla, a determinar por zonas según las condiciones específicas de cada territorio).

Este análisis de registros de variables climáticas debe proyectarse en el futuro para mejorar en la capacidad de análisis de un escenario o conjunto de escenarios concretos⁴.

1.2.2. Evaluación de la exposición futura con su correspondiente Mapa de exposición

La evaluación de la exposición de un proyecto sensible requerirá tantos análisis como amenazas climáticas se presenten (la calificación de la exposición será por variable/índice/amenaza climática). Será necesario realizar una evaluación de cómo su exposición puede cambiar en el futuro, teniendo en cuenta las

escalas de tiempo en función del ciclo de vida del proyecto. Los componentes del proyecto con una vida útil corta no necesitan tener en cuenta el Cambio Climático, pero es importante para los de mayor duración y más en aquellos elementos más duraderos en la escala temporal del proyecto (por ejemplo, drenajes transversales). En una infraestructura de una vida útil de más (o aproximadamente) de 20 años, los impactos del Cambio Climático serán más apreciables cada vez.

Para comprender cómo la exposición puede cambiar en el futuro, deben examinarse los resultados de los modelos climáticos. El tiempo de vida del proyecto y de sus elementos es clave para determinar el marco temporal del análisis de las variables climáticas.

Para valorar la incertidumbre asociada a los modelos climáticos se recomienda contemplar varios posibles escenarios y así analizar los efectos de Cambio Climático sobre las infraestructuras de transporte. Este ejercicio permitiría considerar las medidas de adaptación que mejor responden a los escenarios más extremos, ajustando así más la horquilla de incertidumbre hacia posiciones menos optimistas. Es importante usar el mismo conjunto de proyecciones a lo largo de todo el estudio.

Las proyecciones climáticas son simulaciones de los modelos climáticos que tienen en cuenta los diferentes escenarios de emisiones. EURO-CORDEX es la rama europea dentro de CORDEX, del *World Climate Research Program* (WRCP) que proporciona información regionalizada dinámica obtenida de los modelos globales de clima. Los datos se obtienen en rejilla de unos 11 km de resolución. CEREMA⁵ describe que cuenta con escenarios regionalizados de 1km, y que la aplicación de estos escenarios de manera más detallada va a incidir en el sobredimensionamiento de las soluciones a adoptar en las infraestructuras (CEREMA, 2015).

Con las variables climáticas e índices objeto de estudio se ha de elaborar un mapa de exposición de cada uno de los posibles escenarios futuros considerados.

1.3. Cálculo de la vulnerabilidad

Recordando lo dicho anteriormente la vulnerabilidad es función del carácter, la magnitud y la rapidez del Cambio Climático y la variación a la que un sistema está expuesto (exposición); y el grado de afectación (sensibilidad) (PIARC, 2015).

Buena parte de las metodologías recogen que la exposición, junto con la sensibilidad permite analizar el nivel del impacto del Cambio Climático, y determina la capacidad de adaptación de un sistema para hacer frente y adaptarse a la variabilidad climática existente y sus cambios futuros. Estos estados se miden con el indicador de vulnerabilidad, el cual permite evaluar el nivel de vulnerabilidad de los sitios en riesgo (ITM, 2019).

La vulnerabilidad se calcula como⁶:

$$V = S \cdot E$$

V → Vulnerabilidad

S → Grado de sensibilidad

E → Exposición a condiciones climáticas actuales o futuras

⁴ Escenarios de GEI (RCP, Representative Concentration Pathways), que se usan en el AR5 del IPCC: RCP2,6 (respuesta temprana), RCP4,5 (medidas efectivas), RCP6,0 (superación 2°C) y RCP8,5 (seguir como siempre/peor escenario).

⁵ Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement.

⁶ Comisión Europea (2013), IMT (2019), JASPERS (2017) y PIARC (2015).

Tabla 5. Ejemplo de matriz de clasificación de cada variable o amenaza que puede impactar en el proyecto (Ej.: Precipitación)

		Exposición		
		No expuesta	Media	Alta
Sensibilidad	No Sensible			
	Media	Humedad		
	Alta			Inundación

Nivel de vulnerabilidad

- No vulnerable
- Media
- Alta

La evaluación de la sensibilidad y exposición de un proyecto se puede usar para obtener una evaluación de la vulnerabilidad usando una matriz simple (ver tabla 5).

Se asume que la sensibilidad permanece constante en el tiempo (pudiendo variar por falta de mantenimiento, por citar un ejemplo).

En este momento correspondería elaborar mapas de vulnerabilidad actual y futura del proyecto frente a cada variable, índice o amenaza.

Si el análisis indica que el proyecto se enfrenta a vulnerabilidades que requieren más atención, se tendrán que llevar a cabo evaluaciones más en detalle, que debe determinar el gestor del proyecto. Esto puede afectar a elementos sensibles del proyecto, lo que implicaría estudiar el proyecto en secciones más pequeñas.

2. ANÁLISIS DEL RIESGO (FASE 2)

El análisis de riesgo se recomienda para los activos altamente vulnerables, pero la autoridad competente en la gestión del sistema puede definir el alcance para el análisis de riesgos dependiendo de sus políticas y prioridades. Esta fase haría referencia a los efectos externos que afectan al proyecto, infraestructura o sistema de transporte.

Riesgo

Es el potencial de consecuencias cuando algo de valor está en peligro y donde el resultado es incierto, reconociendo la diversidad de valores. El riesgo se representa a menudo como la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos o tendencias multiplicados por los impactos, si ocurrieran estos eventos o tendencias. El riesgo resulta de la interacción de la vulnerabilidad, la exposición y el peligro. El término riesgo se utiliza principalmente para hacer referencia a los riesgos de los impactos del Cambio Climático (IPCC, 2014).

El riesgo es una combinación de la posibilidad o probabilidad de que ocurra un evento y el impacto o consecuencia asociado con ese evento (Willows *et al.* 2003).

El objeto es determinar las consecuencias y sus probabilidades para los eventos de riesgo identificados. Para ello se ha de evaluar la probabilidad y las consecuencias de un impacto producido por un evento climático. Matemáticamente la multiplicación de la probabilidad y las consecuencias representa el nivel de riesgo para ser categorizado para posterior estudio.

El análisis del riesgo permite determinar las amenazas y sus impactos asociados en las infraestructuras de

transporte para aportar información en el proceso de toma de decisiones. Para ello es necesario evaluar la probabilidad y gravedad⁷ de estos impactos, analizando la significancia del riesgo en el proyecto concreto.

En este apartado parece interesante identificar los umbrales críticos relacionados con el clima, ya que representan el límite entre los niveles tolerables e intolerables de los criterios de riesgo o desempeño para las opciones del proyecto o sus componentes. Los umbrales pueden incluir aspectos de ingeniería operacionales, de seguridad/salud, ambientales, sociales, financieros, etc. (por ejemplo, el estándar de diseño para un sistema de drenaje, para evitar desbordamientos en el entorno).

En la tabla 6 se presentan posibles umbrales relacionados con diferentes variables climáticas identificados para una carretera.

Tabla 6. Posibles umbrales de referencia para variables climáticas que afectan a un proyecto de carretera. Elaboración propia a partir de Plan Nacional de Adaptación de Cambio Climático de CEREMA (CEREMA, 2015)

Variable	Propuestas de desarrollo de umbrales
Temperatura	<ul style="list-style-type: none"> - Temperaturas medias mensuales - Temperaturas medias máximas y mínimas mensuales - - Número de días de Tmax anormalmente altos - Número de días por mes donde las temperaturas son inferiores a 5 °C (Estadísticas de 30 años y eventos extremos)
Precipitaciones	<ul style="list-style-type: none"> - Intensidad máxima en un periodo de 6 minutos - Intensidad mínima, media y máxima (horaria, diaria, mensual, anual) - Número de días de sequía - Número de días en que las precipitaciones son mayores de un umbral (de 1 a 5 mm) - Acumulación de lluvia en tres días seguidos mayor de 100 mm - Número de días de lluvia superior a 10, 25, 50 y 100 mm (Estadísticas de 30 años y eventos extremos)
Viento	<ul style="list-style-type: none"> - Número de días por mes con velocidad de viento mayor de 30 km/h (Estadísticas de los 10 años anteriores)

El análisis del riesgo se construye en base a la evaluación de la vulnerabilidad. Este apartado facilita el proceso de estudio de causa-efecto entre la amenaza climática y el rendimiento del proyecto. Se pueden realizar análisis cualitativos (evaluación de riesgo general), basados en el juicio de expertos, y análisis cuantitativos o semicuantitativos (evaluación

⁷ En la bibliografía, el término *gravedad* recibe otras denominaciones como severidad, magnitud o consecuencias.

de riesgo detallado) que incluyen algún tipo de modelado numérico. En los apartados siguientes (2.1 a 2.3) se recoge la forma de realizar un análisis cualitativo. Si se quiere profundizar en el conocimiento de la significancia de los riesgos habría que recurrir a un análisis más detallado, que conlleven análisis por parte de especialistas (Alonso *et al.* 2017).

2.1. Evaluación de la probabilidad

Probabilidad

La posibilidad o frecuencia relativa de ocurrencia de tipos particulares de eventos, o secuencias o combinaciones de tales eventos (Willows *et al.* 2003).

Se evalúa la posibilidad de que una amenaza afecte al proyecto generando un impacto en un cierto periodo de tiempo (tiempo de vida del proyecto). En la tabla 7 se establece una valoración de la probabilidad para cada uno de los impactos generados (JASPERS, 2017).

En esta fase corresponde elaborar mapas de probabilidad de ocurrencia de eventos actual y futura del proyecto de cada variable, índice o amenaza.

2.2. Evaluación de la gravedad

Esta evaluación nos permite saber las consecuencias de que se produzca un impacto. En la tabla 8 se establece una

escala para evaluar la gravedad que tiene que explicarse en relación al proyecto (JASPERS, 2017).

Las consecuencias se considerarán en base a los activos y sus operaciones, seguridad y salud, impactos ambientales, impactos sociales, implicaciones financieras y riesgos reputacionales.

La evaluación debe considerar la capacidad de adaptación del proyecto y el sistema en el que opera, cómo el proyecto puede hacer frente al impacto y cuánto riesgo puede tolerar. También debe considerar cómo de esencial es esta infraestructura para una red o sistema más amplio y si hubiera impactos adicionales a mayor escala y efectos en cascada.

Del mismo modo que en el caso de la evaluación de la probabilidad, también es necesario generar mapas de gravedad actual y futura para cada escenario para cada variable, índice, o amenaza y para cada impacto asociado.

2.3. Evaluación del riesgo

El riesgo potencial se determina a través de la combinación de la probabilidad y la gravedad (ver tabla 9).

Es necesario establecer unos umbrales que sirvan de referencia para ayudar en la evaluación. Esta evaluación puede llevarse a cabo por juicio de expertos o por metodologías objetivas basadas en análisis multicriterio.

Tabla 7. Ejemplo de escala para evaluar la probabilidad de amenazas que afectan el proyecto

	1	2	3	4	5
	Rara	Improbable	Posible	Probable	Casi cierto
Significado	Muy poco probable que ocurra	Dadas las prácticas y procedimientos actuales, es poco probable que ocurra este incidente	El incidente ha ocurrido en un país / entorno similar	Es probable que ocurra un incidente	Es muy probable que ocurra un incidente, posiblemente varias veces
0					
Significado	5% de probabilidad de ocurrir	20% de probabilidad de ocurrir	50% de probabilidad de ocurrir	80% de probabilidad de ocurrir	95% de probabilidad de ocurrir

Tabla 8. Escala de ejemplo para evaluar la gravedad de las consecuencias

	1	2	3	4	5
	Insignificante	Menor	Moderado	Mayor	Catastrófico
Significado	Impacto mínimo que se puede mitigar a través de la actividad normal	Un evento que afecta la operación normal del proyecto, resultando en impactos localizados de naturaleza temporal	Un evento grave que requiere acciones adicionales para gestionar, lo que resulta en impactos moderados	Un evento crítico que requiere una acción extraordinaria, que resulta en impactos significativos, generalizados o de largo plazo	Desastres con el potencial de provocar el cierre o colapso del activo / red, causando daños significativos e impactos generalizados a largo plazo

Tabla 9. Ejemplo de matriz de riesgo

	Probabilidad	Rara	Improbable	Posible	Probable	Casi cierto
Gravedad		1	2	3	4	5
Insignificante	1	1	2	3	4	5
Menor	2	2	4	6	8	10
Moderado	3	3	6	9	12	15
Mayor	4	4	8	12	16	20
Catastrófico	5	5	10	15	20	25



- Riesgo insignificante
- Riesgo bajo
- Riesgo medio
- Alto riesgo
- Riesgo extremo

3. MEDIDAS DE ADAPTACIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA AL CAMBIO CLIMÁTICO (FASES 3 Y 4)

En esta fase se identifican las medidas para responder a las vulnerabilidades y riesgos climáticos que se han identificado. Primero se identifican las opciones para responder a vulnerabilidades y riesgos, seguido por una evaluación cualitativa y cuantitativa.

Es interesante identificar los ejemplos de adaptación de mejores prácticas para tipos de proyectos similares. También es necesario contar con comités de expertos, agentes externos, representantes gubernamentales o grupos locales para conseguir comprender mejor los pros y contras de las opciones identificadas.

El conocimiento local y la participación de las partes interesadas son un factor clave para la identificación de las medidas de adaptación, su experiencia permite seleccionar medidas realistas y factibles que pueden asegurar un mayor éxito al ser sometidas a condiciones de estrés climático.

Una vez identificadas las posibles opciones de adaptación, el siguiente paso es seleccionar una pequeña lista de opciones objetivo para el proyecto específico que sean ambiental, social, técnica y legalmente viables mediante un criterio cualitativo de selección, ayudándose de herramientas de valoración multicriterio o de coste-beneficio que prioricen unas opciones frente a otras por la escasez de recursos.

Cuando se consideren las opciones de adaptación más relevantes también hay que conocer cuándo será necesario realizar la acción, nivel de adaptación y consecuencias de sub o sobreactuar.

Algunas medidas requerirán una valoración económica más en detalle. Cualquier análisis de coste-beneficio (ACB) sirve para seleccionar opciones eficientes y óptimas. En el contexto del Cambio Climático no sólo se requieren

medidas eficientes sino también aquellas que sean robustas teniendo en cuenta la incertidumbre intrínseca asociada al Cambio Climático.

Para integrar en el diseño del proyecto las medidas de resiliencia al Cambio Climático se elaborará un plan de acción de adaptación (ver tabla 10). Se puede destacar en este plan la necesidad de acciones de seguimiento y respuesta del funcionamiento de las medidas. En este apartado se puede incluir indicadores específicos y relevantes de los impactos, siguiendo un proceso de mejora continua para identificar en caso necesario actuaciones de ajuste. Esto permitirá decidir si los impactos observados son aceptables, incluyendo las pérdidas, y considerando si compensarlas mediante un seguro adicional.

4. CRITICIDAD

La criticidad de la infraestructura es un concepto que alude a secciones, estructuras o tramos del sistema de transporte que son cruciales para desempeñar los servicios de transporte de una comunidad o región.

La criticidad por tanto no depende de un peligro específico, es un valor relacionado con la funcionalidad del sistema de transporte, y de los servicios que presta a la comunidad. En la mayoría de los casos la criticidad es un elemento de evaluación del riesgo, aunque en algunos trabajos se incluye en la evaluación de la vulnerabilidad (ITM, 2017).

Una infraestructura es crítica en función de la redundancia del conjunto del sistema de transporte, que facilita la capacidad de adaptación, y de la intensidad del tráfico que soporta. Por ello la criticidad puede ser uno de los factores de evaluación del riesgo y debe estar presente en el cálculo de los riesgos totales.

Tabla 10. Ejemplo ilustrativo de opciones de adaptación por categoría de proyecto (Comisión Europea, 2013)

Categoría del proyecto	Variables climáticas y amenazas relacionadas con el clima	Vulnerabilidad geográfica	Impactos del cambio climático	Opción de adaptación
Infraestructura de transporte	Cambio de temperatura	Zonas de baja altitud	Puede afectar los pavimentos de carreteras	Condiciones del subsuelo
	Cambio en la precipitación	Áreas propensas a inundaciones	Puede afectar los cimientos de las carreteras	Especificaciones de material
	Eventos extremos	Zonas costeras	Puede afectar la infraestructura crítica de transporte	Dimensiones estándar
	Aumento del nivel del mar y temporales	Cauces	Puede afectar la infraestructura crítica de transporte	Drenaje y erosión
	Aumento de la sequía y los incendios forestales	Valles	Puede afectar la infraestructura de transporte costero	Estructuras de ingeniería protectora (diques, etc.)
	Aumento de la velocidad del viento y las tormentas	Tierras bajas	Puede provocar daños en la infraestructura y fallos en la infraestructura	Planificación de mantenimiento y alerta temprana
		Pendientes pronunciadas		Aumentar mantenimiento
		Terrenos planos y regiones de deltas		Alineamiento, planificación general y planificación de usos del suelo
		Montañas		Gestión ambiental

5. CONCLUSIONES

A lo largo del artículo se ha hecho referencia a diferentes metodologías utilizadas a nivel internacional que perfilan la forma de analizar la vulnerabilidad y el riesgo de las infraestructuras de transporte frente a los eventos climáticos que se van a generar como consecuencia del Cambio Climático.

El esquema presentado pretende ser una primera aproximación a una metodología de común aplicación cuyos resultados van a depender de la fase del proyecto en las que se realice el análisis. La metodología de análisis y las medidas a adoptar para aumentar la resiliencia de las infraestructuras de transporte no van a ser las mismas para un mismo impacto si el proyecto está en fase de diseño o si la infraestructura afectada se encuentra operativa.

También resultarán de vital importancia los datos de referencia que se utilicen en las diferentes fases de la metodología, especialmente los relacionados con los eventos climáticos futuros basados en diferentes escenarios, cuya incertidumbre asociada es significativa. Para ello se ha propuesto que la recogida de esta información se centralice en un centro de registro documental establecido a tal efecto.

Otro de los aspectos importantes a tener en cuenta es la determinación de umbrales de referencia para establecer los niveles de riesgo, que dependerán de las características de cada territorio, y propio de cada infraestructura, diferenciando por modos de transporte.

Este artículo se plantea como punto de partida a partir del cual se genere un lugar de referencia que permita establecer las medidas más adecuadas para aumentar la resiliencia de las infraestructuras de transporte frente a los impactos del Cambio Climático, reduciendo el máximo posible las incertidumbres asociadas al mismo. Es el momento de convocar a grupos de expertos que faciliten conocimiento de los diferentes activos susceptibles de sufrir daños por efecto de los eventos climáticos extremos y otros impactos que se pronostican como consecuencia del Cambio Climático: taludes, drenajes, pilares o puentes.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos la información y ayuda facilitada por los miembros del proyecto CLARITY, representados por Laura Parra Ruíz, del Centro de Estudios del Transporte (CET), del CEDEX.

A la evaluadora del artículo, Patricia Klett, que nos ha permitido esclarecer contenidos, y precisar el hilo conductor de la propuesta metodológica para la adaptación de las infraestructuras de transporte al Cambio Climático.

6. REFERENCIAS

Banco Mundial (2009). *Climate Vulnerability Assessments. An Assessment of Climate Change Vulnerability, Risk and Adaptation in Albania's Power Sector. Sector. Report No. 53331-ALB.*

CEREMA (2015). *Plan National d'Adaptation au Changement Climatique, volet infrastructures et systèmes de transport, action 1. Impacts potentiels du changement climatique sur les infrastructures et systèmes de transport, sur leurs référentiels de conception, entretien et exploitation, et besoins de précisions des projections climatiques.* Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement. París (Francia).

CLARITY (2020). *Proyecto CLARITY. Horizonte 2020.* www.clarity-h2020.eu

Comisión Europea (2013). *Non-paper Guidelines for Project Managers: Making vulnerable investments climate resilient.* Dirección General de Acción Climática. Comisión Europea.

FWHA (2018). *Vulnerability Assessment and Adaptation Framework.* 3rd Edition. Federal Highway Administration. U.S. Department of Transportation.

IMT (2019). *Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México.* Querétaro (México): Instituto Mexicano de Transporte.

IMT (2017). *Panorama internacional de la adaptación de la infraestructura carretera ante el Cambio Climático.* Querétaro (México): Instituto Mexicano de Transporte.

IPCC (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK) y New York (USA): Cambridge University Press.

IPCC (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 (AR5).* Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (UK) y New York (USA): Cambridge University Press.

JASPERS (2017). *JASPERS Guidance Note. The Basics of Climate Change Adaptation Vulnerability and Risk Assessment.* Joint Assistance in Supporting Projects in European Regions. Luxemburgo.

Paniagua Serrano, I., y Álvarez Álvarez, E. (2017). *Metodología de gestión de taludes en desmonte en la red de carreteras de la GENCAT: experiencia en la aplicación. IX Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables.* Santander (España).

PIARC (2015). *Marco internacional para la adaptación de la infraestructura de carretera ante el Cambio Climático.* Asociación Mundial de la Carretera. París (Francia).

Willows, R.I., Reynard, N., Meadowcroft, I., y Connell, R. (2003). *Climate adaptation: Risk, uncertainty and decision-making.* UKCIP Technical Report. UKCIP, Oxford.