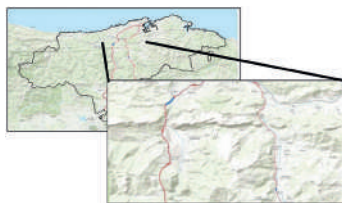


**Premio a la mejor comunicación PRAGA 2023
en la categoría “Cambio climático y resiliencia”**

Umbrales de riesgo por cambio climático en las infraestructuras viarias en España



Thresholds of risk due to climate change in Spanish road infrastructure

Fernando Jiménez

CETA & CET
CEDEX / MTMS

Laura Crespo

CETA & CET
CEDEX / MTMS

Álberto Gil

CETA & CET
CEDEX / MTMS

Laura Parra

CETA & CET
CEDEX / MTMS

Monica Laura Alonso

Diputación de Valencia

Felipe Collazos

Dirección General de Carreteras
MTMS

Los riesgos derivados del cambio climático que se pueden producir en las infraestructuras de carretera necesitan ser estudiados con mayor precisión. La metodología que la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC) utiliza para este fin aborda, entre otras cuestiones, la exposición de los activos y de los servicios que presta la infraestructura y la probabilidad de que se produzca la amenaza o el impacto. Por ello, la vulnerabilidad y el riesgo variarán en el futuro dependiendo de los diferentes escenarios que se barajen como consecuencia de las sendas que pueden acontecer si se promueve un tipo u otro de políticas de mitigación, lo que está condicionado, a su vez, por los esfuerzos que se impongan para avanzar en la descarbonización del sistema energético.

Esas amenazas dependen de la variabilidad del clima. Es previsible que los principales impactos vengan

de la mano del incremento de las precipitaciones en periodos cortos de tiempo. Para evaluar sus efectos es necesario conocer las características territoriales donde el fenómeno tiene lugar, características definidas por su capacidad de drenaje, que dependerá entre otras de la orografía, la geología y la vegetación. Por ello, para cada espacio territorial se han de fijar umbrales, que se deben considerar como valores que activen protocolos de actuación para que los efectos de los eventos climáticos tengan el menor impacto posible.

La identificación de estos umbrales no es sencilla y para ello se están analizando los datos de eventos anteriores. En este artículo se trabaja con los gestores de las infraestructuras para un caso piloto concreto analizando el riesgo derivado del impacto de la precipitación máxima en 24 horas en dos activos situados en la red viaria de la región de Cantabria en el norte de España.

The risks arising from climate change that may occur in road infrastructure need to be studied with greater precision. The methodology used by the World Road Association (PIARC) for this purpose addresses, among other issues, the exposure of the assets and services provided by the infrastructure and the probability of the hazard or impact occurring. Therefore, vulnerability and risk will vary in the future depending on the different scenarios that are considered as a result of the paths that may occur if one or another type of mitigation policy is promoted, which is conditioned, in turn, by the efforts that are imposed to advance in the decarbonization of the energy system.

These threats depend on climate variability. It is foreseeable that the main impacts will come from increased precipitation in short periods of time. In order to assess their

effects, it is necessary to know the territorial characteristics where the phenomenon takes place, characteristics defined by their drainage capacity, which will depend on orography, geology and vegetation, among others. For this reason, thresholds must be established for each territorial space, which must be considered as values that activate action protocols to ensure that the effects of climatic events have the least possible impact.

The identification of these thresholds is not simple and for this purpose data from previous events are being analyzed. In this article we work with infrastructure managers for a specific pilot case analyzing the risk derived from the impact of the maximum 24-hour rainfall on two assets located in the road network of the Cantabria region in northern Spain.

1. Introducción y objeto

El cambio climático es uno de los principales problemas ambientales de nuestro tiempo que obliga a repensar la gestión del territorio con una mirada diferente para anticiparnos a los fenómenos adversos que se pronostican y que causarán graves pérdidas en la prestación de servicios de la carretera.

De todas las variables climáticas analizadas, las que tienen mayor relevancia para las infraestructuras de transporte son la precipitación en todas sus formas y, en menor proporción, las temperaturas extremas y las oscilaciones térmicas a lo largo del día.

Estas variables climáticas son las desencadenantes de impactos directos en los activos de las infraestructuras de carreteras, como desbordamiento de las obras de drenaje transversal (ODT) o puentes, que en los casos más extremos pueden arrastrar tableros y pilas o descalzar estribos o pilas y taludes. En ocasiones, llegan a interrumpir la prestación del servicio, cortando el acceso a ciertos tramos de las ca-

rrteras e incluso dejando poblaciones incomunicadas.

Para hacer frente a estos impactos se ha planteado una metodología de análisis de la vulnerabilidad y del riesgo de los servicios y de los activos frente al cambio climático para priorizar un programa de intervención que permita dotar de mayor resiliencia a la infraestructura de transporte, siendo necesario poner el foco en los diferentes comportamientos territoriales para analizar su funcionamiento. Para ello, y para cada territorio, se han de caracterizar los umbrales o puntos de inflexión de los índices climáticos que dan señales de alerta en aquellos emplazamientos con alta probabilidad de ocurrencia, donde las inspecciones se deben hacer más minuciosas y se anticipen medidas correctoras que eviten colapsos en la movilidad, principalmente por daños en las obras de drenaje o en las obras de tierra.

Se trata de detallar el desarrollo metodológico que permita caracterizar los diferentes umbrales de gestión desencadenantes de impactos en las diferentes infraestructuras. Se pretende que esta metodología

se implemente en las distintas administraciones con competencias en la gestión de carreteras para determinar con cierta precisión y anticipación la aparición de fallos en el sistema. Esta práctica sensibilizará a los gestores a documentar de manera sistemática los eventos que afectan a las infraestructuras, lo que ayudará a determinar los riesgos y niveles de afectación para intervenir con mayor o menor celeridad.

El diseño de esta metodología ha sido planteado en el seno del Grupo de Trabajo "Cambio climático y resiliencia en carreteras" del Comité Técnico de Medio Ambiente de la Asociación Técnica de Carreteras de España (ATC-PIARC). El comité técnico está integrado por profesionales de la administración pública con competencias en la gestión de las carreteras, organismos de investigación en el ámbito del sistema de transporte, la academia y empresas de consultoría, construcción y conservación de infraestructuras de transporte.

Algunas de las primeras referencias reseñables en el campo del estudio de los posibles efectos en carreteras se encuentran en los proyectos europeos RIMAROC¹,

Roadapt² e INFRARISK³. En ellos, se dan pautas para identificar los principales elementos que forman parte de un análisis de los posibles efectos del cambio climático en las carreteras. Posteriormente, se han llevado a cabo distintos proyectos europeos, entre los que se destaca los proyectos CLARITY⁴ y FORESEE⁵ por su reciente finalización, que avanzan en la georreferenciación de activos con la consideración de los efectos del cambio climático teniendo en cuenta la plataforma AdaptCCa6 de AEMET (Agencia Estatal de Meteorología, España).

A nivel internacional, existen también multitud de trabajos que son referentes en el estudio de impactos por cambio climático en carreteras. No obstante, en el ámbito de este estudio nos vamos a centrar principalmente en los trabajos realizados por la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC). En 2016, PIARC publicó su primer estudio sobre este tema [1], en el que se proponía una primera versión de un marco metodológico para ayudar a efectuar estos análisis. En 2019, se publicaron dos nuevos documentos, [2] y [3]. En el primero de ellos, se actualiza el marco metodológico y en el segundo se presenta una compilación de los principales casos de estudio que se recopilaban. De entre los casos de estudio analizados en el ámbito de la PIARC, hay que destacar las aportaciones del IMT, Instituto Mexicano de Transporte, ([4] y [5]). Por último, procede hacer notar otras tres referencias para el estudio de la adaptación al cambio climático.

La primera son los informes del Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). El sexto informe de evaluación del IPCC pone un especial énfasis en la protección de las infraestructuras críticas, incluidos los sistemas de energía y transporte. Estas infraestructuras se ven cada

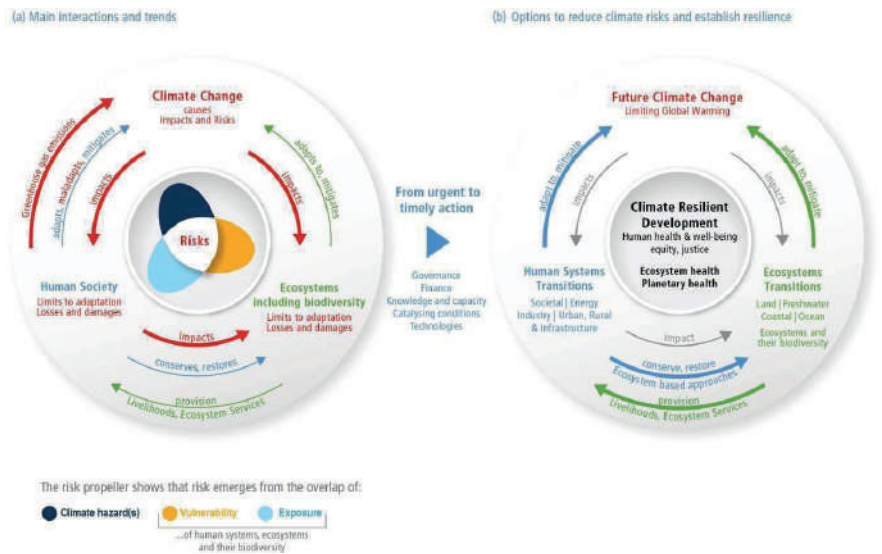


Figura 1. Del riesgo climático al desarrollo de la resiliencia climática: clima, ecosistemas (incluyendo biodiversidad) y sociedad humana como sistemas acoplados⁶

Resiliencia frente al cambio climático Adaptación al cambio climático	
Fase 1. Comprobación Previa	Fase 2. Análisis detallado
• Análisis de Sensibilidad • Análisis de Exposición • Análisis de Vulnerabilidad	• Análisis de Probabilidad • Análisis de Impacto⁷ • Evaluación de Riesgos • Determinar opciones de adaptación • Valorar opciones de adaptación • Planificar la adaptación

Figura 2. Esquema de metodología de la Comisión Europea Elaboración propia a partir de ⁷

vez más afectadas por los peligros de las olas de calor, las tormentas, los incendios, las sequías y las inundaciones, así como por los cambios de evolución lenta, como la subida del nivel del mar [6].

En la Figura 1 se muestra el planteamiento propuesto por el IPCC para el estudio de riesgos. En ella se aprecia que los “ingredientes” del análisis de riesgos ante impactos vinculados al cambio climático son: peligro, vulnerabilidad y exposición.

La segunda es la comunicación de la Comisión Europea [7] donde se ofrecen unas orientaciones técnicas sobre la defensa contra el cambio climático de las infraestructuras para el período de programación 2021-2027.

¹ Risk Management for Roads in a Changing Climate | TRIMIS (europa.eu)

² ROADAPT_integrating_main_guidelines.pdf (cedr.eu)

³ Drupal | Novel Indicators for identifying critical INFRAstructure at RISK from natural hazards (infrarisk-fp7.eu)

⁴ Home | Clarity (clarity-h2020.eu)

⁵ <https://cordis.europa.eu/project/id/769373>

⁶ Plataforma de consulta e intercambio de información en materia de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). España

⁷ Esta parte de la metodología de [7] equivale al análisis de la gravedad en la mayor parte de metodologías analizadas, incluida la planteada en este informe

El esquema planteado en la Figura 2 resume la metodología seguida en relación con la adaptación al cambio climático.

Como tercera y última referencia, y con un papel normalizador, se encuentra la norma ISO 14090:2019 [8]. La aplicación de este documento puede ayudar a demostrar a las partes interesadas que el enfoque de una organización para la adaptación al cambio climático es creíble. Esta norma ISO está diseñada para ayudar a las organizaciones a desarrollar medidas e informar sobre la actividad de adaptación de manera verificable. Su estructura abarca la planificación previa, la evaluación de impactos incluyendo oportunidades, la planificación de la adaptación, la implementación, el seguimiento y la evaluación y el informe y la comunicación.

2. Aspectos generales de la metodología. Fases

Los términos utilizados en un análisis de riesgo hacen referencia a sus diferentes componentes que se usan de forma diferente en función de la metodología o guía utilizada. Esto dificulta la difusión de los resultados de los estudios que ayudan a los responsables de toma de decisiones y a las personas o agentes interesados o afectados [9].

Por esta razón, como primer paso para ayudar a entender la terminología utilizada y comprender mejor el alcance del estudio de los riesgos asociados al cambio climático que se propone en esta metodología, se hace un paralelismo entre las distintas etapas de análisis de la metodología y las diferentes partes de un evento climático transformado en relato descriptivo. Así, este relato es una “mini-historia” que recoge los aspectos que se deben estudiar para conocer y cuantificar el impacto que

se puede producir sobre un activo viario o sobre el propio servicio prestado por la carretera derivado de una amenaza climática actual o futura, que se puede ver modificada por los efectos del cambio climático. Este “relato” es el hilo conductor de la metodología propuesta en el marco del ATC-PIARC.

A través del siguiente ejemplo sencillo, transformado en “relato”, se recoge “un posible análisis de los efectos de un evento climático sobre una carretera”. Es un ejercicio de aproximación que intenta facilitar la comprensión de la metodología [10].

Ejemplo de “relato”:

Las lluvias intensas (**amenaza**) hacen deslizar (**impacto**) un talud de carretera (**activo**) situado en la zona de estudio (**exposición**), debido a sus características geológicas, su pendiente y altura (**sensibilidad**), cada 2 años (**probabilidad**), provocando pérdidas económicas, ambientales y sociales moderadas (**gravedad**) generando efectos en el tráfico y en las poblaciones próximas (**criticidad**).

En la Figura 3, se describen los pasos que integran la metodología propuesta. El esquema de trabajo es consistente con lo que se marca en [1], [2] y [7]. Se ordena siguiendo las siguientes fases:

Para más detalle, se definen en la Tabla 1 los conceptos que se trabajan para dar soporte al marco metodológico y que ha quedado presentado en ATC-PIARC.

2.1. Evaluación de impactos (fase 1)

En esta primera fase es necesario establecer el alcance del estudio.

Una determinada administración de carreteras puede estar interesada en determinar solamente cuáles son sus activos más vulnerables, a efectos de acometer para todos ellos un plan de mejora general (por ejemplo, planes de limpieza de las ODT). En otros casos, puede interesar dar un paso más e identificar aquellos activos que realmente suponen un riesgo para la gestión de la red, planteando adicionalmente medidas de adaptación específicas. También es preciso dirimir otras cuestiones, tales como si el estudio aborda todas las carreteras del estado, una demarcación territorial de carreteras, un corredor, un tramo, etc.

Posteriormente se ha de describir las características territoriales donde se encuentra ubicada la red de carreteras objeto de estudio, las características de la red de carreteras (criticidad de la infraestructura) e identificar las fuentes de información disponibles. Por último, es preciso constituir un grupo de expertos que dé apoyo a lo largo de todo el proceso de evaluación y contraste los resultados del mismo con las evidencias históricas.

Una vez definido el alcance del estudio, es preciso clasificar entre activos o servicios prioritarios y activos o servicios secundarios; y estos, a su vez, desagregados por tipos de activos. Esto se debe a que, en una primera aproximación, no va a ser posible analizar todos los activos de la red, ya que el estudio exige cierto nivel de detalle, lo que implica un esfuerzo a nivel de recursos que es preciso optimizar. Por ello, se propone afrontar en primer lugar los que, a priori, presentan un mayor riesgo potencial, a la vista de los proyectos y estudios previos analizados, así como teniendo en cuenta la experiencia de los integrantes del grupo de expertos.



Figura 3. Esquema Metodológico de Adaptación al Cambio Climático de Infraestructuras de Carretera del ATC-PIARC

Tabla 1. Resumen de definiciones de conceptos empleados en la metodología del ATC-PIARC						
Activo o Servicio	Amenaza	Impacto	Exposición	Sensibilidad	Capacidad de Adaptación	Vulnerabilidad
Elemento (Activo de carretera o Servicio de circulación) receptor de la acción (Impacto)	Elemento desencadenante de la acción (Impacto)	Acción que se produce sobre el Activo o Servicio carretero a causa de la Amenaza	Definido por el lugar donde se produce el Impacto	Características del Activo o Servicio que condicionan el efecto o grado del Impacto (determina cómo se produce el Impacto)	Se refiere a los aspectos que mejoran la respuesta de los elementos que componen la Vulnerabilidad aumentando la Resiliencia del Activo o Servicio	Combinación de Exposición y Sensibilidad. Depende de las características el Activo o Servicio y del tipo de Impacto. No se asocia directamente a ningún elemento del relato
	Probabilidad	Gravedad (Severidad, Magnitud, Consecuencias)	Riesgo	<i>Criticidad</i>	Resiliencia	
	Cuándo y cuántos Impactos se producen en un periodo de tiempo	De cuánto es y qué consecuencias tiene el Impacto que se produce	Combinación de Probabilidad y Gravedad. Depende de las características de la Amenaza. No se asocia directamente a ningún elemento del relato	Características que hacen indispensable un Activo o Servicio y que sufren el Impacto	Análisis de todos los elementos anteriores para procurar la mejor respuesta del Servicio o Activo frente al cambio climático	

El objetivo principal de esta primera fase es identificar los posibles impactos sobre los activos o servicios del tramo objeto de estudio. En primer lugar, partiremos de un listado de impactos predefinidos y veremos cuáles de ellos son relevantes a los efectos del tramo objeto de estudio. Para elaborar la citada lista hemos de identificar los principales impactos que habitualmente afectan a las redes de carreteras y que se pueden asociar con las condiciones climáticas, tanto actuales como futuras. Para ello, partiremos de un estudio de los posibles modos de fallo de los distintos activos o servicios.

Las condiciones climáticas o suma de condiciones climáticas que activan o influyen de manera determinante en el modo de fallo es lo que, a efectos de esta metodología, denominamos amenazas. Por ello, la amenaza se relaciona de forma directa con una o varias variables climáticas, que se estudian de forma directa en el proceso.

2.1.1 Mapa de amenazas

Para comenzar a trabajar las amenazas hay que identificar la existencia de fuentes de consulta de variables climatológicas y proyecciones de cambio climático a partir de las

que se elabora el mapa de amenazas. A partir del listado de impactos potenciales se obtienen también un listado de las principales amenazas que, a priori, se van a estudiar. Se elaborarán mapas con información de la amenaza en su situación actual y en distintos periodos y escenarios temporales futuros. La proyección de las variables climáticas implica a su vez seleccionar un determinado RCP⁸.

⁸ Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) del IPCC.

Se recomienda usar las proyecciones de las variables e índices climáticos correspondientes a los RCP 4.5 y 8.5. El RCP 4.5 representa la senda de mitigación de emisiones que con mayor probabilidad se cumpla en base a la implementación actual de políticas de reducción de emisiones. El RCP 8.5 es un escenario más pesimista, donde las políticas de reducción de emisiones no han funcionado. Estas son las sendas para las que la información de las variables climáticas que pueden suponer una amenaza están disponible en distintas fuentes, estudios y proyecciones. Además, se recomienda utilizar las proyecciones de RCPs para distintos periodos (Histórico [1971-2000], Futuro cercano [2011-2040], Futuro medio [2041-2070] y Futuro lejano [2071-2100]). La principal referencia para realizar estos estudios de prospectiva es AdapteC-Ca, aunque existen otras fuentes de información como [11], Copernicus⁹ o el Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables (SNCZI)¹⁰ que permiten caracterizar los impactos y amenazas.

2.2. Evaluación de la vulnerabilidad (fase 2)

La evaluación de la vulnerabilidad se realiza en base a la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación de los activos o servicios. En las referencias documentales de [7] el concepto sensibilidad se refiere las características intrínsecas del activo o servicio, incluyendo su capacidad adaptativa.

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Exposición} \times \text{Sensibilidad}$$

La evaluación de la exposición consiste en determinar en qué grado un activo o servicio, por su ubicación geográfica, puede verse afectado por las distintas amenazas potenciales que se están evaluando. Expresado

de una manera algo coloquial, consistiría en determinar “si nuestro activo o servicio está en el camino del daño”.

Por otro lado, la sensibilidad de un activo o servicio está relacionada con aquellas características propias que influyen en la afectación del elemento por un determinado impacto. Para evaluar la sensibilidad se han elaborado, para cada activo o servicio, matrices de sensibilidad. En cada matriz de sensibilidad habrá distintos factores de sensibilidad, que se refieren a los rasgos que pueden influir de cara a verse afectado por un determinado impacto. En esta metodología la capacidad de adaptación se incluye dentro del análisis de la sensibilidad.

El resultado de esta fase es un listado de los activos o servicios categorizados según su nivel de vulnerabilidad que deberán ser analizados a efectos de determinar el riesgo asociado.

2.3. Evaluación del riesgo (fase 3)

La evaluación del riesgo se realiza en base a la probabilidad y gravedad del impacto en los activos o servicios.

$$\text{Riesgo} = \text{Probabilidad} \times \text{Gravedad} \quad (\text{Severidad, Magnitud o Consecuencias})$$

La cuantificación tanto de la probabilidad como de la gravedad presenta algunas dificultades. Se ha de poner de manifiesto que el principal problema al que nos enfrentamos es la falta de información disponible para este tipo de estudios.

La probabilidad o posibilidad de que un fenómeno climático se presente es incierta, por lo que estimar un plazo determinado para que un determinado evento ocurra es difícil. Para determinar la probabilidad de

que se produzca un impacto sobre un activo o servicio en el marco de esta metodología se plantea recurrir al cálculo de periodos de retorno a partir de los datos meteorológicos de una variable climática o a la recopilación de experiencias previas. En este último caso se pretende estimar la probabilidad de que se produzca el evento o la afectación de forma cualitativa. Lo adecuado sería identificar el máximo número de eventos que se han producido en el tramo de carretera en un periodo de tiempo lo más amplio posible. Esto serviría para contrastar umbrales para la gestión del riesgo.

La gravedad puede relacionarse con la magnitud o la intensidad del evento, con el tamaño del impacto causado por el evento o las consecuencias, si llegara a producirse el evento. Este concepto se valora a través de la escala de gravedad de sus consecuencias. Para su valoración, se pueden tener en cuenta distintos factores.

El resultado de esta etapa es la identificación y priorización de activos o servicios en riesgo, para los que habrá que evaluar su resiliencia y proponer un plan de adaptación.

2.4. Evaluación de la resiliencia (fase 4)

El objetivo de esta fase es dotar a los gestores de carreteras (administraciones y empresas) de herramientas de análisis para aumentar la resiliencia de la red para prevenir incidentes o reducir el impacto que

⁹ Programa de Observación de la Tierra de la Unión Europea.

¹⁰ Instrumento de apoyo a la gestión del espacio fluvial, la prevención de riesgos, la planificación territorial y la transparencia administrativa del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITERD). España.

las condiciones meteorológicas (normales y extremas, en el momento actual y en los horizontes temporales evaluados) están teniendo sobre la infraestructura de carretera. En la presente etapa se pretende identificar y seleccionar algunas medidas de adaptación para ciertos casos de estudio, siendo conscientes que para cada riesgo existen medidas de adaptación que pueden ser específicas, o en algunos casos complementarias.

La selección y priorización de respuestas y estrategias de adaptación se hace necesaria por partir de recursos escasos, que hay que racionalizar, prevaleciendo las medidas más efectivas para cada caso. Los métodos propuestos para hacer este tipo de análisis son el análisis multicriterio (AMC) y el análisis de coste-beneficio (ACB), cuyos procedimientos se describen a continuación. Estos esquemas de trabajo son los más seguidos en la documentación de referencia ([1], [5] y [7]).

Para la aplicación del AMC se pueden definir ciertos criterios que se referirán al coste de implementar la medida, la viabilidad de su realización, los posibles impactos ambientales que se pueden generar y su capacidad para adaptarse a nuevas circunstancias, entre otros ([5]).

En el ACB se utiliza un proceso lógico y estructurado en el que se cuantifican todos los aspectos (costes y beneficios). El valor total cuantificable y no cuantificable de los beneficios debe compensar los costes para que un proyecto se considere rentable. Hay distintos tipos de ACB, pero el más completo es el denominado ACB de los tres pilares (Triple Bottom Line, TBL). El análisis TBL evalúa una medida o estrategia en función de sus repercusiones económicas, ambientales y sociales, todas debidamente combinadas [12].

Como último paso de esta fase y de la metodología estaría la implementación y seguimiento del Plan de Adaptación. Consiste en integrar las medidas de resiliencia que se ha decidido aplicar frente al cambio climático en el diseño técnico del proyecto o en los planes de mantenimiento y explotación de los activos. Para todo ello se ha de elaborar un plan de acción (ejecución y financiación) y un plan de seguimiento y respuesta, que incluiría un plan de revisión periódica de las hipótesis de la evaluación de la vulnerabilidad y los riesgos climáticos, entre otros, recogiendo una serie de indicadores que permitan analizar la evolución del plan y que servirán al mismo tiempo para revisar y mejorar el funcionamiento de la metodología. Es preciso elaborar un plan de comunicación para coordinar a todos los agentes involucrados.

Como resultado de esta etapa de implementación y seguimiento se dispondrá de un plan completo y organizado en el tiempo para mejorar la resiliencia de la red, a través de la mejora de los activos o servicios en riesgo.

2.5. Reflexiones preliminares sobre la aplicación de la metodología

Como se ha señalado anteriormente, una de las principales dificultades que se han identificado en la aplicación de esta metodología es la disponibilidad de datos e información fiable para completar las diferentes fases. Los elementos que presentan un mayor reto son las variables climáticas o amenazas a estudiar, principalmente en el caso de las proyecciones a futuro que incluyan los efectos del cambio climático, la identificación de las características de activos o servicios afectados por los eventos producidos por estas

amenazas y la falta de registros detallados sobre impactos en la red producidos por el clima. Esto dificulta la determinación de umbrales para establecer categorías de exposición y probabilidad, así como de indicadores de comportamiento, que son aspectos fundamentales en un plan de adaptación al cambio climático. En los siguientes apartados se detalla en mayor medida cómo hacer frente a este reto mediante el estudio de un caso piloto en la región de Cantabria en España.

3. Variables climáticas más relevantes. Precipitación y temperatura

Los cambios derivados del cambio climático van a afectar a la prestación de servicios en todos los ámbitos de la sociedad. Tal y como se ha dicho anteriormente, las variables climáticas que más incidencia pueden tener en el funcionamiento de las infraestructuras de carretera tanto a nivel estructural como funcional son la precipitación y la temperatura, siendo estas variables las más estudiadas y con más información disponible en cuanto a proyecciones a futuro con la consideración del cambio climático.

3.1. Precipitación

En AdapteCCA se puede consultar, para el conjunto de territorio español, por Comunidad Autónoma y por provincia, la variable precipitación, como precipitación máxima en 24 horas (PMax24h) y la precipitación máxima acumulada en 5 días, que informan de los impactos que pueden sufrir los activos de manera puntual y de forma acumulada para aproximarnos a las posibles amenazas a que se verán sometidos los desmontes por deslizamiento en distintos horizontes temporales.

Sin embargo, no existe apenas información relativa al concepto “torrencialidad”, que se refiere a las precipitaciones intensas en periodos de tiempo corto. La única aproximación al estudio de la variable climática torrencialidad en España ha sido abordada en [11], donde se ha ampliado el número de variables analizadas de trabajos anteriores, incluyendo precipitaciones máximas en intervalos inferiores al día (3, 6 y 12 horas). Se han considerado un periodo de control (1971-2000), tres periodos de impacto (2011-2040, 2041-2070, 2071- 2100) y dos escenarios (RCP 4,5 y RCP 8,5), con el objeto de valorar el impacto a lo largo de todo el siglo XXI, y en tres periodos de retorno (10,100 y 500 años).

3.2. Temperatura

En la variable temperatura existen varios parámetros que pueden determinar los efectos de la misma en los activos viarios. Entre ellas están: temperatura mínima, temperatura máxima, amplitud térmica, temperatura máxima extrema y temperatura mínima extrema, entre otras. En el caso piloto de Cantabria no se han analizado las implicaciones de esta variable en el impacto de activos.

En todo caso, procede indicar que es difícil trabajar con los datos asociados a las variables climáticas. En ese sentido, cabe destacar varias iniciativas promovidas por la Comisión Europea para desarrollar servicios climáticos, como por ejemplo, el que se impulsó a través del proyecto CLARITY. El objetivo es poder acceder de forma sencilla a la información climática. Sin embargo, los problemas asociados al mantenimiento de las aplicaciones hacen que, en última instancia, haya que trabajar los datos caso a caso, lo que dificulta el acceso a la información.

4. Casuística de los principales activos afectados por la variable precipitación. Caso piloto

Varios activos viales se están volviendo más vulnerables al cambio climático en todo el mundo [13] preocupando a la comunidad científica y a los gobiernos. En España, el 45% de la red principal y el 4% de la longitud total sufren algún tipo de impacto climático [14]. La región cántabra no es una excepción, diversos estudios constatan los crecientes impactos relacionados con el clima en las infraestructuras, tanto en eventos extremos como en procesos de lenta evolución [15].

Con el fin de mostrar una aplicación práctica de la metodología antes descrita, se ha llevado a cabo un caso piloto en el que se analizan dos activos situados en la Comunidad Autónoma de Cantabria (ver Figura 4), más concretamente en las carreteras A67 (Desmonte_A67_km175) y N623 (Desmonte_N623_km117). En este caso piloto la variable climática que se ha estudiado es la precipitación, concretamente la PMax24h.

La región de Cantabria está situada en el norte de España y cuenta con una población de 585.222 habitantes

(censo 2022). Se trata de una región costera que a su vez presenta un relieve montañoso debido a la presencia de la Cordillera Cantábrica. Esta orografía le confiere una importante variabilidad climática, que va desde el clima oceánico templado que se presenta en la zona costera, hasta el clima mediterráneo cálido-veraniego que aparece hacia el interior.

El Gobierno de España cuenta con 600 km de carreteras estratégicas en esta región, que dan acceso a los principales servicios sanitarios, turísticos y comerciales, que gestiona a través de la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA).

La conexión de Cantabria con la Meseta, la zona central y el sur de España se ha realizado históricamente por medio de dos carreteras: la N-611 de Palencia a Santander y la N-623 de Burgos a Santander. Como consecuencia de los grandes volúmenes de tráfico generados en el tramo final de la N-611, entre Torrelavega y Santander (más de 60.000 vehículos/día), los dos principales núcleos de población de Cantabria, en los años 80 se acometió la construcción de una vía de altas prestaciones, la Autopista A-67 Santander-Torrelavega, concluida en 1990. Esta

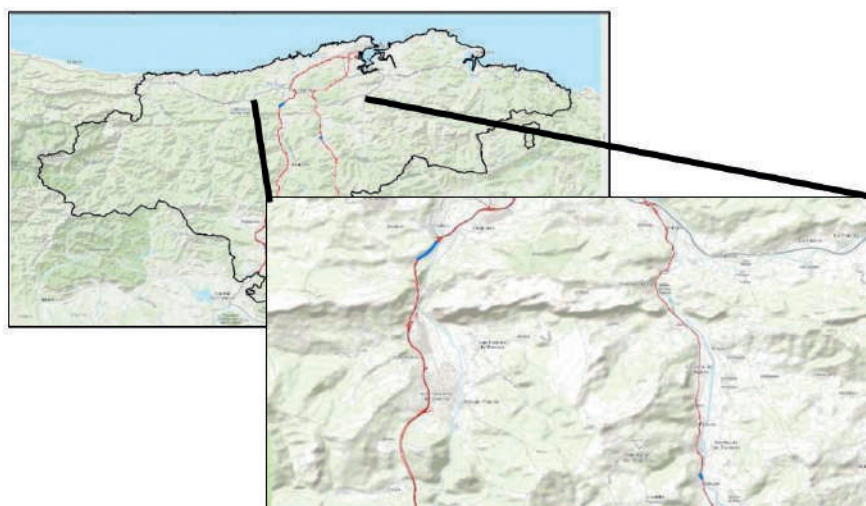


Figura 4. Situación de los dos activos estudiados en la región de Cantabria

vía se prolongó hasta Palencia bajo la nueva denominación de Autovía A-67 con año de finalización en el 2008.

En este marco, la A-67 constituye la principal conexión de la Comunidad Autónoma de Cantabria con la Meseta, y desde allí con la zona centro y sur peninsular, cumpliendo adicionalmente una importantísima función de accesibilidad en toda la región a la que da servicio.

El caso de estudio del activo denominado Desmonte_A67_km175 se encuentra en el tramo Torrelavega-Los Corrales de Buelna Norte que se inauguró en el año 2000. Supone la duplicación de la variante de Torrelavega, y es de destacar que se encuentra entre el túnel de las Caldas de Besaya y el viaducto sobre la carretera Cartes-Villanueva de la Peña en una orografía accidentada con pendientes del 8%.

Mientras, el caso de estudio del activo denominado Desmonte_N623_km117, se encuentra en el municipio de Entrambasmestas de la N-623, y aunque la orografía en esta carretera es accidentada, en este tramo la carretera discurre paralela entre el río Pas y laderas con fuertes pendientes transversales, con pendiente longitudinal de la carretera baja, teniendo un tráfico más local.

En estas carreteras las precipitaciones intensas por tormentas provocan, en algunas zonas, inestabilidad de taludes o laderas consecuencia de la saturación del suelo, con deslizamientos de tierra de taludes o laderas; así como desprendimientos de rocas en zonas fracturadas, que pueden llevar al posible cierre total o parcial de la circulación.

Haciendo un análisis de los posibles impactos que pueden producirse por la precipitación se pueden destacar los siguientes:

- Afección a la circulación por precipitaciones intensas. Puede llegar a producirse una interrupción del tráfico.
- Desprendimiento de rocas y/o tierra del talud. Este hecho podría tener una especial incidencia en terrenos kársticos.
- Deslizamiento traslacional o rotacional (profundo).
- Deslizamiento superficial del talud.
- Asiento y vuelco de muros de contención.
- Asiento del terraplén debido a hundimiento por fallo en la cimentación o colapso del cuerpo del terraplén. Conlleva una deformación y/o rotura parcial o total del firme.
- Disminución de la seguridad de la vía por acumulación de agua en el pavimento debido a precipitaciones intensas.
- Incremento de problemas de socavación. Afectaría a pilas y estribos de obras de paso.

5. Umbrales de precipitación. Caso piloto

Para evaluar la exposición (fase de vulnerabilidad) y la probabilidad (fase de riesgo) en el caso piloto planteado se han de establecer unos umbrales que dependen de cada variable, índice climático o amenaza y serán específicos de cada territorio. Estos umbrales vendrán marcados por la experiencia documentada y deberán ser coherentes con la zona de estudio.

Dentro de los aspectos que pueden suponer una diferencia entre los distintos territorios a la hora de establecer umbrales que marquen dónde

y cuándo se va a producir un impacto debido a un evento climático se puede señalar la artificialización del terreno. Una misma cantidad de precipitación en dos zonas con distinta capacidad de retención o absorción de una cantidad concreta de lluvia, debido al efecto esponja de suelos bien protegidos con vegetación, pueden hacer que los umbrales establecidos para un impacto varíen mucho. Puede llegar a suceder que en zonas donde las precipitaciones sean menores se produzcan impactos mayores que en zonas con precipitaciones más altas debido a sus características territoriales, marcadas por su ordenación territorial o porque haya perdido parte de su funcionalidad de prestación de servicio ecosistémico.

Dependiendo de los recursos disponibles se podrán establecer umbrales a diferentes niveles, nacional, regional o local. Lógicamente, establecer umbrales con una mayor resolución espacial, es decir, en un territorio más reducido, permitirá determinar los riesgos asociados a eventos climáticos de forma más precisa al tiempo que requerirá un tiempo de análisis mayor.

Para mejorar el nivel de conocimiento y por tanto establecer la categorización de niveles de exposición y de probabilidad de forma más adecuada se tendría que contar con un departamento que inventariase de forma sistematizada los eventos climáticos y los efectos que se han producido en el pasado y los que se produzcan de aquí en adelante.

Esa caracterización debería incluir, al menos: lugar y fecha de ocurrencia, datos climáticos de la amenaza “desencadenante”, elemento afectado, descripción de los daños ocasionados y coste de reparación-reposición. Como se ha indicado, estos datos permiten establecer umbrales, lo que sirve de ayuda en la tarea de prepararse para mitigar los

posibles efectos del cambio climático y permite analizar las causas que han motivado los impactos y anticiparse ante impactos futuros.

Existen estados que han avanzado mucho en la caracterización de estos eventos, la mayoría relacionados con fenómenos hidrometeorológicos, que son los que generan mayor impacto socioeconómico, según [5] el 98% del total. El estado de México cuenta con departamentos que hacen seguimientos de las variables climáticas, proyectadas a futuro con la variabilidad que impone el cambio climático, y se pronostica que no todos los cambios en el clima futuro serán significativos para la red de transporte local o regional, aunque el nivel de ocurrencia de estos impactos irá en aumento.

5.1. Umbrales de exposición en el caso piloto

La evaluación de la exposición de los activos estudiados comienza con la elección de la amenaza a la que se van a enfrentar y el impacto que se va a producir. En este caso se estudia la PMax24h que puede ocasionar desprendimientos en los dos desmontes estudiados. Para ello se genera un mapa de amenazas, en el que se establecen categorías de exposición en base a umbrales específicos que vendrán marcados por la experiencia documentada, debidamente registrada y coherentes con la zona de estudio.

Para la realización de este caso piloto la Demarcación de Carreteras del Estado en Cantabria ha proporcionado los datos de los eventos registrados en la zona con anterioridad que se han relacionado con la PMax24 y que han permitido establecer los umbrales de referencia. En base a estos umbrales se establecen cinco categorías de amenaza (Muy baja (1), Baja (2), Media (3), Alta (4)

y Muy Alta (5)) que al cruzarse con la ubicación de los activos nos darán la exposición de los mismos en nuestro estudio (Ver Tabla 2).

En base a estos umbrales la exposición del activo vendrá determinada por su ubicación y por la amenaza para cada uno de los periodos y escenarios establecidos en la metodología. La vulnerabilidad del activo frente al cambio climático se estimará en base a esta exposición y su sensibilidad.

5.2. Umbrales de probabilidad en el caso piloto

De cara a la determinación de la probabilidad puede llegar a producirse un conflicto en el alcance de la evaluación. Por un lado, en algunos casos, se analiza la probabilidad de que se produzca la amenaza (por ejemplo, PMax24h por encima de un determinado umbral); en tanto que en otros casos el análisis se centrará en la probabilidad de que se produzca el impacto, daño o la afectación. En general, y dada la dificultad para obtener datos que sustenten las evaluaciones, se recurrirá a la información disponible en cada caso.

En este caso piloto se trata de estudiar el nivel de ocurrencia de los impactos sobre los activos, por lo que para la evaluación de la probabilidad, además de recurrir a al estudio de los eventos, que ya se ha utilizado para establecer los umbrales de exposición, se recurre al cálculo de periodos de retorno para estudiar cuándo se producen los impactos. Los periodos de retorno son una técnica usada comúnmente para representar un estimativo de la probabilidad de

ocurrencia de un evento determinado en un periodo determinado.

Se toma la PMax24h para las siguientes estaciones como referencia, ya que son las más cercanas a los activos estudiados¹¹ para el periodo actual:

1. Desmonte_A67_km175. Estación 1124A, Villacarriedo (Datos desde 1990 hasta 2021)
2. Desmonte_N623_km117. Estación 1154H, Torrelavega-Sierapando (Datos desde 1994 hasta 2021, faltan 1999 y 2000)

Estos datos se sometieron a un análisis estadístico por Gumbel para cada una de las estaciones para obtener la PMax24h para siete periodos de retorno, definidos así para ligarlos a una escala de clasificación del riesgo. Mediante estos datos y utilizando el método de interpolación IDW (Ponderación de distancia inversa) del Sistema de Información Geográfica QGIS, se obtuvo un valor único de PMax24h por periodo de retorno para la zona de estudio en la que se encuentran situados los dos activos analizados en el caso piloto (Ver Tabla 3).

En base a estos datos se proponen las siguientes categorías de probabilidad de ocurrencia del impacto (Tabla 4) definido como desprendimiento de rocas y/o tierra del talud debido a la amenaza de PMax24h. Para este ejercicio se tienen en cuenta los umbrales de precipitación uti-

¹¹ Esta asignación se realiza mediante el método de los polígonos de Thiessen considerando estaciones meteorológicas con series de datos suficientemente largas para que sean representativas

Exposición	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
PMax24h (mm/día)	< 25	25-30	30-40	40-60	> 60

lizados en la matriz de exposición a partir de los cuales se produce el evento y el periodo de retorno de las precipitaciones en la zona de estudio (probabilidad de la amenaza).

En este caso, como el valor de PMax24 para el periodo de retorno de 2 años es superior a la precipitación a la que se suele producir el impacto analizado se establece que la probabilidad a la que se produce el impacto es muy alta (Ver Tabla 4).

Los periodos de retorno sirven para establecer los umbrales mientras que los valores de PMax24h del periodo y escenario correspondiente que se obtienen de AdapteCCa se utilizan para saber si en la zona concreta de estudio donde se puede producir el impacto se superan esos umbrales.

Para los periodos futuros incluidos en los escenarios de cambio climático se tienen que calcular sus correspondientes probabilidades de amenaza con la dificultad que eso conlleva debido a la incertidumbre asociada a los modelos climáticos. Para la determinación de los impactos en los periodos y escenarios futuros se emplearán los mismos umbrales que en el periodo actual.

En base a la probabilidad de ocurrencia del impacto, que toma como referencia los umbrales establecidos, y la gravedad de ese impacto se determinará el riesgo de cada uno de los activos frente a los efectos del cambio climático.

6. Conclusiones

La geografía española es el resultado de un mosaico de microclimas, unidades geomorfológicas y fisiográficas, por lo que dependiendo del detalle y las necesidades de capacidad de resolución en el cálculo del riesgo de activos frente al cambio climático

Tabla 3. Determinación de Periodos de Retorno de PMax24h por estaciones mediante Gumbel. Valor de referencia interpolado a nivel de territorio donde se encuentran los activos

Periodo de Retorno (T)	Estación 1154H	Estación 1124A	PMax24h referencia (mm)
2	63,4147	78,3875	76,0497
5	77,3032	100,4764	96,8579
10	86,4987	115,1012	110,6351
25	98,1172	133,5796	128,0430
50	106,7364	147,2879	140,9564
100	115,2920	160,8950	153,7747
500	135,0627	192,3390	183,3961

Tabla 4 - Matriz de Probabilidad de ocurrencia del impacto por PMax24h (mm/día). Periodo actual. Caso Piloto Cantabria

Probabilidad	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
PMax24h (mm/día)	< 25	25-30	30-40	40-60	> 60

se podrían plantear multitud de escalas de evaluación de umbrales que determinarán la exposición de los activos y la probabilidad de ocurrencia del impacto.

Así mismo, en el ámbito urbano y periurbano, un factor que condiciona la resiliencia territorial es el nivel de artificialización del suelo. Los suelos urbanizados han perdido toda capacidad de prestar servicios ecosistémicos a su entorno y al conjunto del territorio, respondiendo a las características que el planeamiento urbanístico les ha dotado, mediante los estudios de detalle. Las características de los sistemas de drenaje de la ciudad, sistema de saneamiento, alcantarillado y espacios ajardinados condicionan la capacidad de drenaje de las calles, espacios urbanos y sus plazas. Las carreteras y viales urbanos tendrán que contar con un análisis pormenorizado para determinar los umbrales a definir por cada tipo de activos y variable climática.

En el caso concreto de la afectación de los activos de carretera por fenómenos hidrometeorológicos extremos es necesario contar con herramientas más precisas para calcular la probabilidad de ocurrencia y

su nivel de impacto. Todavía se está lejos de conocer con cierta aproximación el nivel de ocurrencia de la torrencialidad, incluyendo precipitaciones máximas en intervalos inferiores al día (1, 3, 6 y 12 horas de duración) en el conjunto del territorio español.

La información disponible en las carreteras sobre los eventos e impactos asociados al cambio climático debería estar organizada dentro del territorio español. Esto conlleva:

- Facilitar el acceso a la información climática.
- Desarrollo de inventarios de los activos con información relevante desde el punto de vista de la valoración de su sensibilidad.
- La caracterización del histórico de eventos sucedidos con sus correspondientes impactos, en los diferentes modos de transporte, y para distintos activos.

Esta caracterización es clave, ya que con esta información las diferentes autoridades territoriales competentes podrían establecer umbrales de gestión particularizando por cada tipo de activo, variable climática y territorio.

En el caso concreto de este artículo, para la determinación de umbrales se han considerado únicamente dos activos y los datos correspondientes a las dos estaciones meteorológicas más cercanas. La utilización de un mayor número de estaciones y de activos ayudaría a obtener una mayor precisión en los resultados obtenidos. Esto permitiría una mejor aproximación a la realidad existente en relación a los riesgos derivados del cambio climático en las infraestructuras viarias y de las posibles medidas a llevar a cabo para hacer frente a sus impactos.

Agradecimientos

David López Oliver, Marta Per tierra Rodríguez, David Carracedo Esteban y Adriana Mata Calvo, de la empresa española INES Ingenieros Consultores, que también forma parte del grupo de trabajo ATC_PIARC, han prestado su inestimable ayuda en la elaboración de este artículo en relación a la determinación de las estaciones meteorológicas más representativas de la zona de estudio y el cálculo del periodo de retorno para establecer las categorías de probabilidad.

Referencias

- [1] PIARC (2016). Marco internacional para la adaptación de la infraestructura de carreteras ante el Cambio Climático. PIARC
- [2] PIARC (2019a) Refinamiento del marco internacional de la PIARC para la adaptación al Cambio Climático de la infraestructura carretera. PIARC
- [3] PIARC (2019b) Metodologías y estrategias de adaptación para aumentar la resiliencia de las carreteras al Cambio Climático.
- [4] IMT (2017) Panorama internacional de la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático. Instituto Mexicano del Transporte (IMT)
- [5] IMT (2019) Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México. Instituto Mexicano del Transporte (IMT)
- [6] IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.
- [7] Comisión Europea (2021). Comunicación de la Comisión: Orientaciones técnicas sobre la defensa contra el cambio climático de las infraestructuras para el periodo 2021-2027 (2021/C 373/01). C. (2021) 5430 final.
- [8] ISO (2019). ISO 14090:2019. Adaptación al cambio climático — Principios, requisitos y directrices. International Organization for Standardization (ISO)
- [9] TECNALIA (Pendiente de Publicar). Guía para el análisis de riesgos asociados al cambio climático. Fundación Biodiversidad junto a la Oficina Española de Cambio Climático (OECC), a través de una asistencia técnica de TECNALIA.
- [10] Grupo de Trabajo ATC-PIARC (2023). ¿De qué hablamos cuando hablamos de evaluación de la evolución del cambio climático en carreteras? Revista RUTAS. N° 193. Asociación Técnica de Carreteras (ATC)
- [11] CEDEX (2021). Impacto del cambio climático en las precipitaciones máximas en España. Informe. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX).
- [12] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2020). Incorporating the Costs and Benefits of Adaptation Measures in Preparation for Extreme Weather Events and Climate Change Guidebook. Washington, DC: The National Academies Press
- [13] Alonso, M.L., Parra, L., Jiménez, F. & Crespo, L. (2022). Hacia una red de carreteras española más resiliente. PIARC. XVI Congreso Mundial de Vialidad Invernal y Resiliencia de la Carretera. Calgary
- [14] CEDEX (2018). Secciones de la red estatal de infraestructuras de transporte terrestre potencialmente más expuestas por razón de la variabilidad y cambio climáticos. Informe Final. Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)
- [15] Collazos, F., Parra, L. & Alonso, M.L. (2022). Incremento de la resiliencia de las obras de tierra de las carreteras del estado en el norte de España. Lecciones aprendidas en el periodo 2011-2018. PIARC. XVI Congreso Mundial de Vialidad Invernal y Resiliencia de la Carretera. Calgary. ❖