



**SCT**  
SECRETARÍA DE  
COMUNICACIONES  
Y TRANSPORTES



---

# **Marco Metodológico para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático en México**

Juan Fernando Mendoza Sánchez  
Omar Alejandro Marcos Palomares  
Héctor Orantes Olvera

**Publicación Técnica No. 557  
Sanfandila, Qro, 2019**



---

**SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES**  
**INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE**

**Marco Metodológico para la Adaptación de la  
Infraestructura Carretera ante el Cambio  
Climático en México**

**Publicación Técnica No. 557**  
**Sanfandila, Qro, 2019**

---



Esta investigación fue realizada en la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte, por el MC Juan Fernando Mendoza Sánchez, con el apoyo de los Ingenieros Omar Alejandro Marcos Palomares, y Héctor Orantes Olvera, investigadores del Grupo de Medio Ambiente.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna II-04/16 “Metodología para la identificación de impactos y adaptación del cambio climático en carreteras”.

# Contenido

---

Índice de tablas		iv
Índice de figuras		vi
Sinopsis		ix
Abstract		xi
Resumen	Ejecutivo	xiii
Introducción		1
Capítulo 1.	Antecedentes	5
Capítulo 2.	Planeación para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático	15
Capítulo 3.	Identificación de riesgos en la infraestructura carretera asociados al cambio climático	39
Capítulo 4.	Evaluación de la vulnerabilidad en la infraestructura carretera al cambio climático	65
Capítulo 5.	Análisis del riesgo al cambio climático en la infraestructura carretera	83
Capítulo 6.	Determinación de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático	94
Capítulo 7.	Priorización de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático	115
Capítulo 8.	Implementación y monitoreo de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático	123
Conclusiones		131
Bibliografía		133
Anexos		-

---

# Índice de tablas

---

Tabla 1.1. Eventos climáticos más frecuentes en México .....	11
Tabla 1.2. Eventos climáticos que más han demandado recursos económicos en México .....	13
Tabla 2.2 Amenazas naturales identificadas por región .....	30
Tabla 3.1 Longitud expuesta de carreteras al peligro de inundación con nivel muy alto por entidad federativa .....	42
Tabla 3.3. Número de puentes expuestos al peligro de inundación con nivel muy alto por entidad federativa.....	42
Tabla 3.4 Tipo de información a recopilar .....	62
Tabla 4.1 Escala para evaluar el nivel de sensibilidad .....	70
Tabla 4.2 Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un corte carretero .....	71
Tabla 4.3 Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un terraplén carretero...	72
Tabla 4.4 Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un puente carretero .....	73
Tabla 4.5 Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un pavimento flexible carretero .....	74
Tabla 4.6 Matriz para evaluar la capacidad de adaptación .....	78
Tabla 5.1 Escala de probabilidades de los impactos del cambio climático .....	87
Tabla 5.2 Tipología de daños asociados a amenazas naturales.....	88
Tabla 5.3 Matriz para la determinación de la escala de severidad/gravedad con base en potenciales consecuencias.....	89
Tabla 5.4 Matriz para la valoración de riesgos .....	90
Tabla 5.5 Categorías de riesgo .....	91
Tabla 6.1 Enfoques para la gestión de riesgos del cambio climático .....	94

---

Tabla 7.1. Herramientas económicas de apoyo para la toma de decisiones sobre la adaptación.....	113
Tabla 7.2 Criterios para evaluar medidas de adaptación .....	116
Tabla 7.3 Criterios de evaluación de las medidas de adaptación.....	117

# Índice de figuras

---

Figura 1.1. Estrategia de adaptación según la contribución de México.....	6
Figura 1.2. Impactos del cambio climático en los sistemas de transporte en México .....	10
Figura 1.3. Eventos apoyados por el FONDEN y la inversión anual .....	12
Figura 2.1. Esquema para la determinación de impactos del cambio climático en la infraestructura carretera en México.....	25
Figura 2.2 Mapa de registro de impactos al Cambio Climático .....	26
Tabla 2.1 Tipos de fenómenos climáticos con más impacto socioeconómico en México.....	26
Figura 2.3 Eventos apoyados por el FONDEL .....	27
Figura 2.4 Mapa del impacto económico en infraestructura carretera por fenómenos hidrometeorológicos .....	28
Figura 2.5 Escenario RCP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio. ....	29
Figura 4. Interacción entre actores involucrados en el cambio climático.....	33
Figura 3.1 Enfoque metodológico para la identificación de riesgos de arriba hacia abajo .....	40
Figura 3.2 Esquema de superposición de capas de información referenciada geográficamente para identificación de sitios para la adaptación .....	40
Figura 3.3 Mapa de peligro de inundación en la red de carreteras en México .....	41
Figura 3.4 Proceso para la selección de sitios de riesgo .....	44
Figura 3.5 Formato para el registro en campo .....	45
Figura 3.6 Enfoque de abajo hacia arriba para la identificación de riesgos asociados al cambio climático .....	45
Figura 3.7 Red causa-efecto, inundaciones y pavimentos .....	46

---

Figura 3.8 Red causa-efecto, inundaciones y, pavimentos y calzadas .....	47
Figura 3.9 Red causa-efecto, inundaciones y, obras de drenaje y túneles .....	48
Figura 3.10 Red causa-efecto, inundaciones costeras y calzada.....	49
Figura 3.11 Red causa-efecto, altas temperaturas y pavimentos.....	50
Figura 3.12 Red causa-efecto, altas temperaturas y otros elementos .....	51
Figura 3.13 Red causa-efecto, precipitación intensa y puentes .....	52
Figura 3.14 Red causa-efecto, precipitación intensa y, calzada y obras .....	53
Figura 3.15 Red causa-efecto, precipitación intensa y otros elementos .....	54
Figura 3.16 Red causa-efecto, precipitación intensa y márgenes.....	55
Figura 3.17 Red causa-efecto, vientos fuertes y varios elementos .....	56
Figura 3.18 Red causa-efecto, marejadas y diversos elementos.....	57
Figura 3.19 Red causa-efecto, avenidas torrenciales y varios elementos.....	58
Figura 3.20 Red causa-efecto, ondas frías y pavimentos .....	59
Figura 3.21 Red causa-efecto, ondas frías y diversos elementos.....	60
Figura 3.22 Red causa-efecto, ondas frías y diversos elementos.....	61
Figura 3.23 Ejemplo de sitios de riesgo identificados en carreteras federales en México.....	62
Figura 3.24 Ejemplo de mapa de riesgos de la red federal carretera del estado de Colima .....	63
Figura 4.1 Relación entre los componentes de la vulnerabilidad .....	66
Figura 4.2 Niveles de exposición actual de la infraestructura de transporte en México .....	67
Figura 4.3 Niveles de exposición actual de la infraestructura de transporte debido a lluvias intensas en México.....	68
Figura 4.4 Niveles de exposición futura de la infraestructura carretera debido al cambio de la temperatura máxima en México.....	69
Figura 5.1 Probabilidad de ocurrencia de huracán categoría 1 en la escala Saffir-Simpson (1949-2014).....	85

---

Figura 5.2 Probabilidad de ciclones tropicales en México .....	86
Figura 5.3 Mapa de riesgos.....	91
Figura 6.1 Ejemplo de medida de adaptación para alcantarillas .....	108
Figura 6.2 Ejemplo de medida de adaptación para carretera costera .....	109
Figura 6.3 Ejemplo de medida de adaptación para carretera costera .....	110
Figura 6.4 Ejemplo de medida de adaptación para cortes carreteros .....	110
Figura 7.1 Esquema de ayuda para la selección del método de priorización.....	114

## Sinopsis

---

La experiencia de la utilización Marco de Adaptación de PIARC permitió construir un marco metodológico específico para México, con un fuerte componente en la planificación del proceso de adaptación, de tal manera que las organizaciones de carreteras estatales del país puedan hacer uso de éste instrumento, a través de sus ingenieros de carreteras.

El Marco mexicano establece una fase de planificación previo al inicio del proceso, mediante el cual la organización de carreteras pueda determinar adecuadamente el trabajo y un proceso de 6 etapas.

En la planificación se debe realizar un análisis de los requerimientos de información para la adaptación, el establecimiento del objetivo y el alcance, éste último incluye definir la escala de análisis, la selección de activos relevantes o críticos, el alcance temporal, la identificación de impactos pasados (fenómenos climáticos) o futuros (variables climáticas); establecer el contexto interno y externo, el cual contiene la identificación de las partes interesadas, la población objetivo y el plan para una comunicación efectiva; la identificación de riesgos y oportunidades para la adaptación, los productos entregables y la tareas por realizar.

La etapa 1 de Marco comienza con la identificación de riesgos asociados al cambio climático, definiendo dos enfoques de identificación, de arriba hacia abajo o de abajo hacia arriba, basados en ejemplos de la experiencia mexicana. La etapa 2 evalúa la vulnerabilidad en función de la exposición y la sensibilidad. En la etapa 3 se realiza un análisis del riesgo, en función de su probabilidad y consecuencias. La etapa 4 se determinan las acciones de adaptación basados en las mejores prácticas internacionales disponibles. La etapa 5 permite determinar la priorización de las medidas de adaptación en función de sus costo-beneficio o efectividad. La etapa 6 establece el mecanismo para la implementación de las respuestas de adaptación y como se llevará a cabo el monitoreo mediante el cual se pueda construir una base de datos de mejores prácticas nacionales.

El conocimiento disponible sobre adaptación de la infraestructura carretera ha sido compilado e integrado en un marco metodológico, el cual permitirá guiar a la Secretaría de Comunicaciones y Transportes, y sus profesionales para encarar el desafío que ha representado en los últimos años el cambio climático.

# Abstract

---

The experience using the PIARC Adaptation Framework helped to the construction of a specific methodological framework for Mexico, with a strong component in the planning of the adaptation process, in such a way that the state road organizations of the country can make use of this instrument, through their road engineers.

The Mexican Framework establishes a planning phase prior to the start of the process, through which the road organization can properly determine the work for the adaptation, and a 6-stage process.

In the planning, an analysis of the information requirements for the adaptation, the establishment of the objective and the scope must be carried out, the last one includes defining the scale of analysis, the selection of relevant or critical assets, temporal scope, identification of impacts past (climatic phenomena) or future (climatic variables); establish the internal and external context, which contains the identification of the stakeholders, the target population and the plan for effective communication; the identification of risks and opportunities for adaptation, the deliverables and the tasks to be carried out in this phase.

Stage 1 of the Framework begins with the identification of risks associated with climate change, defining two identification approaches, top-down or bottom-up, based on the Mexican experience examples. Stage 2 evaluates vulnerability, based on exposure and sensitivity. In stage 3, a risk analysis is carried out, based on its probability and consequences. Stage 4 determines the adaptation actions based on the best international practices available. Stage 5 allows determining the prioritization of adaptation measures based on their cost-benefit or effectiveness. Stage 6 establishes the mechanism for the implementation of adaptation responses and how monitoring will be carried out through which a database of national best practices can be built.

The available knowledge on adaptation of the road infrastructure has been compiled and integrated into a methodological framework, which will guide the Secretariat of Communications and Transportation, and its professionals to face the challenge that has represented in recent years the climate change.



# Resumen ejecutivo

---

El presente documento ha sido desarrollado para ayudar a los ingenieros de carreteras que operan y mantienen la infraestructura carretera en cada uno de los Centros SCT y otros organismos de carreteras del país en el proceso de adaptación al cambio climático, así como para que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) emita las políticas necesarias en el sector.

El objetivo de construir el presente Marco mediante el cual se pueda guiar el proceso de adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera en México, tuvo como base los siguientes tres aspectos:

- Los requerimientos legales y normativos existentes a nivel nacional en materia de cambio climático y específicos para la adaptación.
- Las políticas sectoriales que enmarcan la visión del transporte a nivel nacional y cómo estas abordan la adaptación al cambio climático.
- La necesidad de hacer frente a los impactos del clima que se han presentado en México y que han impactado a las carreteras, con base en análisis específicos realizados por el IMT.

Este documento busca proporcionar conocimiento de cómo los cambios en el clima y los fenómenos meteorológicos extremos están afectando la infraestructura carretera en el país, y cómo podría afectarla en el futuro, de tal manera que al conocer los efectos se pueda responder adecuadamente a través de la implementación de acciones de adaptación.

El conocimiento disponible sobre adaptación de la infraestructura carretera ha sido compilado e integrado en un marco metodológico en el presente trabajo, el cual permitirá guiar a la SCT y otros organismos, y sus profesionales para encarar el desafío que ha representado en los últimos años el cambio climático.

La adaptación para las carreteras implica acciones que permitirán que la infraestructura permanezca operando bajo la presencia de fenómenos climáticos extremos y sus efectos derivados, sin que resulten en fallas que repercuten en cierres parciales o totales de la vialidad.

El objetivo de construir el presente Marco mediante el cual se pueda guiar el proceso de adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera en México, tuvo como base los siguientes tres aspectos: los requerimientos legales y normativos, las políticas sectoriales y la necesidad de hacer frente a los impactos del clima que se han presentado en México y que han impactado a las carreteras, con base en

análisis específicos realizados por el IMT. El capítulo 1 detalla estos aspectos, considerando el marco jurídico sobre la adaptación al cambio climático, la visión del Sector Comunicaciones y Transportes, y el análisis del impacto del cambio climático en las carreteras en México.

El marco metodológico del presente trabajo está desarrollado en varias etapas que permitirán a los profesionales del sector a considerar el cambio climático en sus actividades cotidianas, ya sea durante la planeación, construcción, operación y/o mantenimiento de las carreteras.

El Marco propuesta establece una base sólida de planeación que permite a las organizaciones de carreteras en establecer los objetivos y alcances de un proceso de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático, basados en la información disponible, la contextualización interna y externa para la adaptación, y con ello definir el producto entregable y las tareas necesarias para alcanzar el objetivo.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) o cualquier organismo de carreteras a nivel estatal o municipal en México deberá considerar algunos aspectos básicos en la planeación que permitan definir el objetivo del estudio de adaptación; acotar el alcance del análisis, establecer la escala de análisis, los activos relevantes, el alcance temporal, los impactos del cambio climático y las variables climáticas relevantes a incluir; precisar el contexto donde se llevará a cabo la adaptación; identificar los actores clave y grupos de interés, definir el producto entregable (producto resultante) y las tareas.

Posterior a la fase de planeación, el proceso de adaptación se realiza mediante 5 etapas:

- Identificación de riesgos

La identificación de riesgos, está basada en dos enfoques, el primero para analizar toda la red que pudiera estar en riesgo y el segundo en identificar los sitios de riesgo en los tramos carreteros previamente analizados.

- Evaluación de la vulnerabilidad

La vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático, así como la variación a la que un sistema está expuesto (exposición); y el grado en que se ve afectado algo, ya sea adversa o benéficamente, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad). La vulnerabilidad también está determinada por la capacidad de adaptación.

La exposición y la sensibilidad permiten determinar el nivel del impacto del cambio climático, y se adiciona la capacidad de adaptación, se puede determinar el indicador de vulnerabilidad, el cual permite evaluar el nivel de vulnerabilidad de los sitios en riesgo.

- Análisis del riesgo

El análisis de riesgo consiste en determinar las consecuencias y sus probabilidades para los eventos de riesgo identificados. La multiplicación de la probabilidad y las consecuencias determinan el nivel de riesgo y como estos pueden ser categorizados para su atención.

- Determinación de las medidas de adaptación

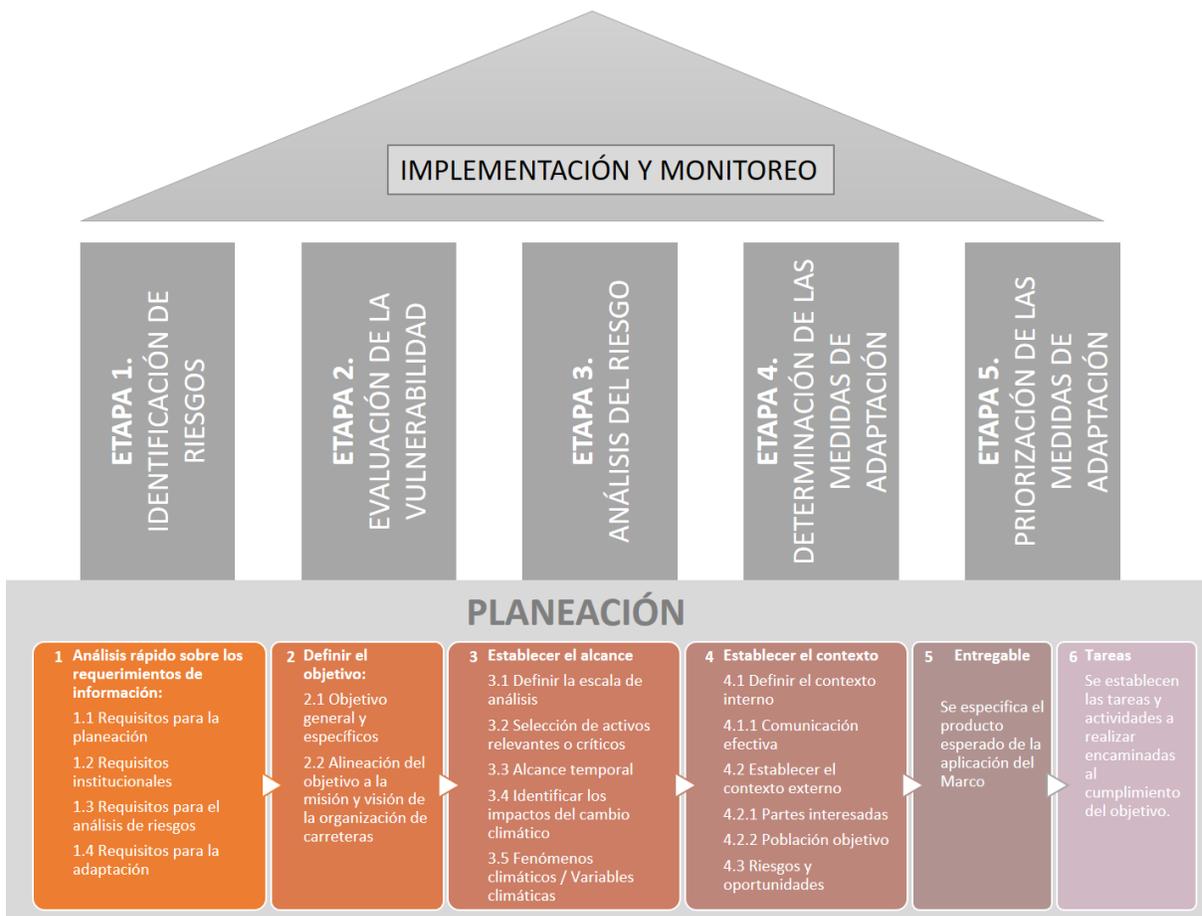
Consiste en la identificación de la medida de adaptación conforme al riesgo identificado, por ejemplo, el aumento del nivel del mar.

Una vez elegida la medida de adaptación se debe diseñar/concebir la medida de adaptación óptima, que permite garantizar la resiliencia del activo carretero.

Posterior a ello, las posibles propuestas para la adaptación deben ser seleccionadas, para asegurar que cumplan con el objetivo.

- Priorización de las medidas de adaptación

La priorización apoya a los tomadores de decisiones para evaluar los proyectos de inversión y asignar prioridades para las medidas de adaptación seleccionadas a través de criterios económicos, técnicos, sociales y ambientales.



Finalmente, la última etapa del proceso es la implementación y monitoreo de las medidas de adaptación, basados en su capacidad de adaptación y el grado de resiliencia de la red o el activo carretero.

Es decir, cómo se puede realizar la incorporación de las medidas/acciones/respuestas de adaptación dentro de los programas de mantenimiento e inversión en las organizaciones de carreteras permite garantizar el éxito del proceso de adaptación; y posteriormente realiza el monitoreo, seguimiento y evaluación de las estrategias de adaptación, para medir el éxito de las medidas implementadas. Los resultados también se pueden usar para revisar y refinar periódicamente las estrategias y los procesos de adaptación.

No obstante, los sistemas de gestión de riesgos y la resiliencia de la infraestructura en la mayoría de los países ya es sub-óptima, independientemente de cualquier cambio potencial en el clima, por lo que las políticas para aumentar la capacidad de resiliencia deben ser acciones de adaptación denominadas "sin remordimientos".

El Marco metodológico propuesto busca ayudar a las organizaciones de carreteras en definir o establecer una visión sobre la adaptación al cambio climático, para que la dependencia pueda continuar prestando con calidad el servicio a los usuarios y a las cadenas logísticas en el transporte de mercancías.

El tiempo de adaptar es ahora, por un lado, se tiene que trabajar en la adaptación de la infraestructura carretera existente para aumentar su resiliencia y evitar mayores riesgos, y por otro lado en generar nuevas especificaciones técnicas que involucren variables climáticas para el diseño de las futuras carreteras.



# Introducción

---

El presente documento ha sido desarrollado para ayudar a los ingenieros de carreteras que operan y mantienen la infraestructura carretera en cada uno de los Centros SCT y otros organismos de carreteras del país en el proceso de adaptación al cambio climático, así como para que la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) emita las políticas necesarias en el sector.

Este documento busca proporcionar conocimiento de cómo los cambios en el clima y los fenómenos meteorológicos extremos están afectando la infraestructura carretera en el país, y cómo podría afectarla en el futuro, de tal manera que al conocer los efectos se pueda responder adecuadamente a través de la implementación de acciones de adaptación.

El conocimiento disponible sobre adaptación de la infraestructura carretera ha sido compilado e integrado en un marco metodológico en el presente trabajo, el cual permitirá guiar a la SCT y otros organismos, y sus profesionales para encarar el desafío que ha representado en los últimos años el cambio climático.

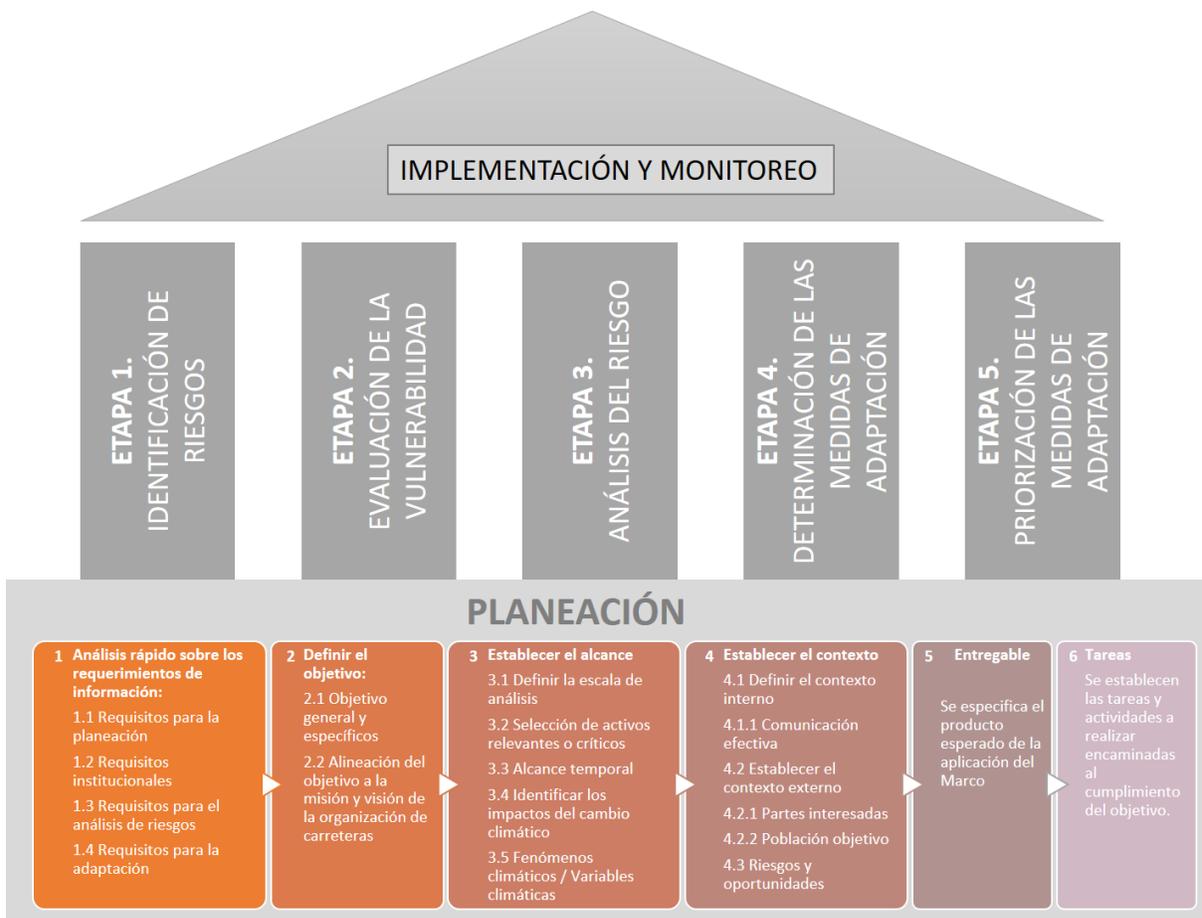
Adaptar la infraestructura carretera al cambio climático no es una tarea sencilla, ya que aún existe mucha incertidumbre del clima en el futuro y baja confiabilidad de las proyecciones climáticas futuras, además de la inercia existente de realizar ingeniería “*business as usual*”. Sin embargo, la sociedad continúa demandando una infraestructura carretera rentable y resiliente.

Adaptación es un concepto que se entiende como la acción y efecto de adaptar o adaptarse, un verbo que hace referencia a la acomodación o ajuste de algo respecto a otra situación. La adaptación para las carreteras implica acciones que permitirán que la infraestructura permanezca operando bajo la presencia de fenómenos climáticos extremos y sus efectos derivados, sin que resulten en fallas que repercuten en cierres parciales o totales de la vialidad. La adaptación ayuda también a reducir los costos de operación y mantenimiento, mejora la seguridad para los usuarios y protege las inversiones en infraestructura carretera (NCHRP, 2014).

**Adaptación:** Es el proceso de adaptación al clima actual, o esperado, y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación tiene por objeto moderar o evitar el daño o de aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar la adaptación al clima esperado y sus efectos (IPCC, 2014).

El objetivo de construir el presente Marco mediante el cual se pueda guiar el proceso de adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera en México, tuvo como base los siguientes tres aspectos: los requerimientos legales y normativos, las políticas sectoriales y la necesidad de hacer frente a los impactos del clima que se han presentado en México y que han impactado a las carreteras, con base en análisis específicos realizados por el IMT. El capítulo 1 detalla estos aspectos, considerando el marco jurídico sobre la adaptación al cambio climático, la visión del Sector Comunicaciones y Transportes, y el análisis del impacto del cambio climático en las carreteras en México.

El marco metodológico del presente trabajo está desarrollado en varias etapas que permitirán a los profesionales del sector a considerar el cambio climático en sus actividades cotidianas, ya sea durante la planeación, construcción, operación y/o mantenimiento de las carreteras.



El capítulo 2 de la presente publicación aborda la fase planeación para la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático. Para ello se quiere un análisis rápido sobre los requerimientos de información (planeación, institucionales, análisis de riesgos, técnicos para la adaptación), para establecer objetivos realizables y un alcance adecuado.

La fase de planeación requiere definir el objetivo y el alcance del proceso de adaptación. El alcance debe establecer la escala de análisis (territorial, a nivel de red, a nivel tramo carretero, o activo físico), la selección de activos relevantes o críticos, la temporalidad, los impactos del cambio climático (pasados, escenarios futuros), y los fenómenos climáticos/variables climáticas. También en la planeación la organización de carreteras deberá conocer el contexto interno (la organización, la estructura, las responsabilidades, sus capacidades técnicas y sus recursos), y el externo (población objetivo, gobiernos locales, capacidad para la adaptación, etc.). Finalmente, en esta fase se establece el producto a entregar y las tareas necesarias para alcanzar el objetivo del proceso de adaptación.

La identificación de riesgos en la infraestructura carretera asociados al cambio climático (etapa 1 del Marco) se explica en el capítulo 3 del documento, donde se describe como hacer la identificación de riesgos, basado en dos enfoques, el primero para analizar toda la red que pudiera estar en riesgo y el segundo en identificar los sitios de riesgo en los tramos carreteros previamente analizados.

La etapa 2 “Evaluación de la vulnerabilidad en la infraestructura carretera al cambio climático” del Marco se describe en el capítulo 4. La vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático, así como la variación a la que un sistema está expuesto (exposición); y el grado en que se ve afectado algo, ya sea adversa o benéficamente, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad). La vulnerabilidad también está determinada por la capacidad de adaptación. En el capítulo se explica cómo calcular la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación, mediante los cuales se determina el nivel del impacto del cambio climático y posteriormente el indicador de vulnerabilidad, el cual permite evaluar el nivel de vulnerabilidad de los sitios en riesgo.

En caso de requerirse la etapa 3 “Análisis del riesgo al cambio climático en la infraestructura carretera” del Marco, éste se explica cómo es determinado en el capítulo 5. El análisis de riesgo consiste en determinar las consecuencias y sus probabilidades para los eventos de riesgo identificados. En el capítulo se detalla cómo evaluar la probabilidad de un impacto y se sugiere como evaluar las consecuencias de un impacto. La multiplicación de la probabilidad y las consecuencias determinan el nivel de riesgo y como estos pueden ser categorizados para su atención.

La etapa 4 del Marco consisten en la determinación de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático, las cuales se encuentran en el capítulo 6, y fueron clasificadas de acuerdo al tipo de impacto del cambio climático, es decir, medidas de adaptación para el aumento del nivel del mar, altas temperaturas y olas de calor, ciclones tropicales, huracanes y marejadas, incremento de tormentas y de la precipitación, vendavales o vientos fuertes, alta presencia de agua, inundaciones y avenidas torrenciales, sequía e incendios, bajas temperaturas y olas frías, aluviones y deslizamientos, etc.

El capítulo 6 se complementa con medidas de adaptación que influyen las normas técnicas, los procedimientos institucionales o la estructura de la organización, concientización y las necesidades de investigación.

Una vez elegida la medida de adaptación debe ser diseñada, por lo que en el capítulo 6 se muestra mediante ejemplos, como diseñar/concebir la medida de adaptación óptima, que permite garantizar la resiliencia del activo carretero. Posterior a ello, las posibles propuestas para la adaptación deben ser seleccionadas, esto implica un proceso de análisis para asegurar que la medida identificada pueda lograr el alcance previsto para mitigar el efecto adverso del cambio climático.

En el capítulo 7 se describe la etapa 5 “Priorización de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático” del Marco. La priorización apoya a los tomadores de decisiones para evaluar los proyectos de inversión y asignar prioridades para las medidas de adaptación seleccionadas a través de criterios económicos, técnicos, sociales y ambientales. En este capítulo se describe cómo utilizar el análisis costo-beneficio y el análisis multicriterio, como herramientas para la priorización y toma de decisiones.

La fase final de Marco, que se describe en el capítulo 8, es la implementación y monitoreo de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático. Es decir, cómo se puede realizar la incorporación de las medidas/acciones/respuestas de adaptación dentro de los programas de mantenimiento e inversión en las organizaciones de carreteras permite garantizar el éxito del proceso de adaptación; y posteriormente realiza el monitoreo, seguimiento y evaluación de las estrategias de adaptación, para medir el éxito de las medidas implementadas. Los resultados también se pueden usar para revisar y refinar periódicamente las estrategias y los procesos de adaptación.

Las conclusiones hacen referencia a la importancia de contar con herramientas para la adaptación de la infraestructura carretera, con el objetivo de atender los desafíos que representan los impactos del cambio climático y los fenómenos climáticos extremos.

Este trabajo está alineado al Programa Especial de Cambio Climático 2013-2018, en su objetivo 1.3.4 el cual busca “Mantener y aumentar los niveles de resiliencia en la infraestructura de comunicaciones”, esto se correlaciona directamente con la línea de trabajo en medio ambiente y cambio climático del IMT y, a su vez, esta investigación permitirá contribuir al cumplimiento de del objetivo 6, “Desarrollar integralmente y a largo plazo al sector con la creación y adaptación de tecnología y la generación de capacidades nacionales” del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2013-2018.

# 1 Antecedentes

---

El objetivo de construir el presente Marco mediante el cual se pueda guiar el proceso de adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera en México, tuvo como base los siguientes tres aspectos:

- Los requerimientos legales y normativos existentes a nivel nacional en materia de cambio climático y específicos para la adaptación.
- Las políticas sectoriales que enmarcan la visión del transporte a nivel nacional y cómo estas abordan la adaptación al cambio climático.
- La necesidad de hacer frente a los impactos del clima que se han presentado en México y que han impactado a las carreteras, con base en análisis específicos realizados por el IMT.

## 1.1 Marco jurídico sobre la adaptación al cambio climático

Desde la creación de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático en 1992 y su consolidación en 1994, México formó parte de ese primer acuerdo el cual lo constituyeron 196 países, los cuales convinieron buscar resolver los problemas relacionados con el cambio climático a una escala mundial.

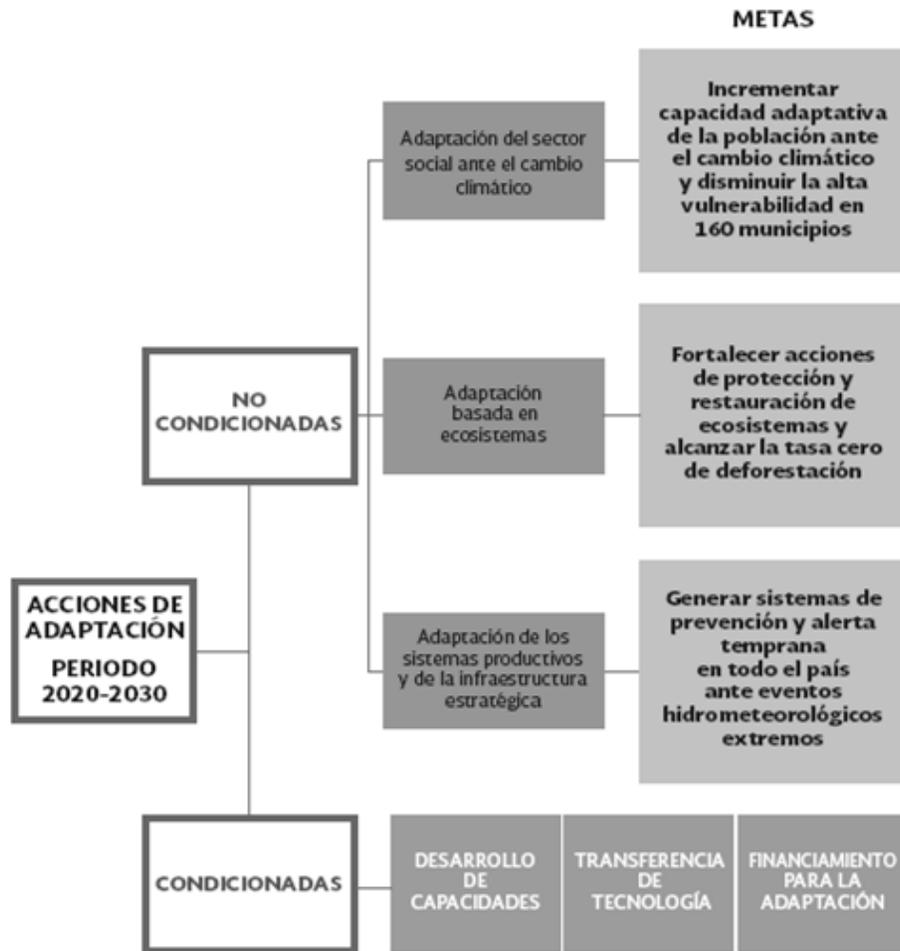
En 1997, las partes acordaron adoptar el Protocolo de Kioto, cuyo objetivo principal ha sido reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a través de medidas de mitigación. Dicho Protocolo fue ratificado por México en el año 2000, sin embargo, no contemplaba acciones de adaptación, solo mecanismos de financiamiento, para los países en desarrollo.

La COP 21, cuyos resultados se encuentran plasmados en el llamado “Acuerdo de París”, donde los países firmantes establecieron sus metas de reducción de GEI denominadas como “Contribuciones Previstas Nacionalmente Determinadas” (INDC, por sus siglas en inglés de *Intended Nationally Determined Contribution*), en el cual México comprometió una reducción del 22% de GEI que representan 762 M-ton de CO<sub>2</sub> equivalente.

En el tema de adaptación, la propuesta de México se resume en la figura 1.1. Como se puede observar en la figura, una de las estrategias es la adaptación de la infraestructura estratégica.

De manera específica las acciones determinadas son las siguientes:

- Instalar sistemas de alerta temprana y gestión de riesgo en los tres niveles de gobierno.
- Garantizar la seguridad de infraestructura estratégica.
- Incorporar criterios de adaptación en proyectos de inversión pública que consideren construcción y mantenimiento de infraestructura.



**Figura 1.1. Estrategia de adaptación según la contribución de México**

Fuente: Gobierno de la República, 2015.

En el ámbito nacional, posterior a la ratificación del Protocolo de Kioto, se desarrolló la primera Estrategia Nacional de Cambio Climático para el periodo 2007-2012 y un primer Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012, cuyos resultados no fueron del todo satisfactorios por falta de una plataforma jurídica que diera una mayor obligatoriedad a las acciones comprometidas, de esta manera surgió la idea de generar una Ley en materia de Cambio Climático.

De esta manera se promulgó en el año 2012 la Ley General de Cambio Climático (LGCC), como base de la política nacional en nuestro país en material de cambio climático. La cual ha pretendido ser la base para formular acciones de mitigación y adaptación.

La ley establece, entre otros aspectos, la creación de instituciones, marcos legales e instrumentos financieros que permitan apoyar al país a responder a los desafíos debidos al cambio climático, así como a la formulación de un modelo de desarrollo para el país bajo en carbono.

Esta ley, en el artículo 7, define las atribuciones de la federación para:

VI. **Establecer, regular e instrumentar las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático**, de conformidad con esta Ley, los tratados internacionales aprobados y demás disposiciones jurídicas aplicables, en las materias siguientes: i) Transporte federal y comunicaciones.

De esta manera a través de la entidad correspondiente, tanto de la SEMARNAT como el INECC trabajaron las políticas nacionales vigentes que a continuación se describen brevemente.

En México en el año 2013 se publicó la segunda Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), Visión 10-20-40, el cual es un instrumento que guiará las acciones nacionales en los próximos 40 años en materia de reducción de gases de efecto invernadero (GEI) y para construir una sociedad con mayor resiliencia ante los fenómenos del cambio climático. La ENCC resulta entonces ser un instrumento que enmarca la política nacional sobre cambio climático para los tres órdenes de gobierno.

La política nacional tiene como base seis pilares estratégicos que permitirán fortalecer y mantener una estrecha liga entre las acciones de mitigación y adaptación en el país.

Dichos pilares buscan lo siguiente:

- Contar con políticas y acciones climáticas transversales, articuladas, coordinadas e incluyentes.
- Desarrollar políticas fiscales e instrumentos económicos y financieros con enfoque climático.
- Implementar una plataforma de investigación, innovación, desarrollo y adecuación de tecnologías climáticas y fortalecimiento de capacidades institucionales.
- Promover el desarrollo de una cultura climática.
- Instrumentar mecanismos de Medición, Reporte, Verificación y Monitoreo y Evaluación.
- Fortalecer la cooperación estratégica y el liderazgo internacional.

Bajo los principios de estos pilares, se plantearon para México 3 ejes estratégicos, que se enuncian a continuación:

- A.1 Reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia del sector social ante los efectos del cambio climático.
- A.2 Reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de la infraestructura estratégica y sistemas productivos ante los efectos del cambio climático.
- A.3 Conservar y usar de forma sustentable los ecosistemas y mantener los servicios ambientales que proveen.

De la estrategia de adaptación 2, se desprenden dos líneas acciones que incluyen al transporte y que son la base del presente Marco, y son las siguientes:

- A.2.11 Fortalecer la infraestructura estratégica existente (comunicaciones, transportes, energía, entre otras) considerando escenarios climáticos.
- A.2.12 Incorporar criterios de cambio climático en la planeación y construcción de nueva infraestructura estratégica y productiva.

Por su parte, el Programa Especial de Cambio Climático 2013-2018 (PECC), publicado en abril de 2014, en materia de adaptación planteó el objetivo 1, que busca “Reducir la vulnerabilidad de la población y sectores productivos e incrementar su resiliencia y la resistencia de la infraestructura estratégica”.

Derivado de este objetivo se desprende la Estrategia 1.3, que buscará “Fortalecer la infraestructura estratégica e incorporar criterios de cambio climático en su planeación y construcción”.

Las líneas de acción para la adaptación de la infraestructura de transporte, y son:

- 1.3.4 Mantener y aumentar los niveles de resiliencia en la infraestructura de comunicaciones.
- 1.3.5 Implementar programas a fin de contar con infraestructura nacional de mayor capacidad de resistencia ante fenómenos naturales.

De esta manera quedan enmarcadas las acciones de México en materia de políticas sobre cambio climático, que a través del tiempo han podido concretarse tanto el contexto internacional, como el nacional y que han dado rumbo a las acciones para mitigar y adaptar la infraestructura del transporte ante el cambio climático.

De manera general, la política nacional está encaminada al fortalecimiento de la infraestructura estratégica, particularmente en prevenirla de los riesgos asociados a los desastres naturales que incluye sismos, tsunamis, erupciones volcánicas, entre otros, pero se destaca de manera particular en la prevención para resistir los daños que podrían provocar los fenómenos climáticos extremos en el país y su efecto en la infraestructura estratégica, productiva y de servicios.

De esta manera el Instituto Mexicano del Transporte de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes ha desarrollado el presente Marco mediante el cual de manera sistematizada se puedan llevar acciones que permitan fortalecer la infraestructura estratégica para el transporte carretero.

## **1.2 Visión del Sector Comunicaciones y Transportes**

El Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2013-2018 incluye en su diagnóstico la degradación del medio ambiente y los efectos del cambio climático, y cómo el sector transporte en el país ha contribuido en los últimos años a su deterioro. Los principales problemas van orientados a la generación de emisiones y al consumo energético.

Derivado del diagnóstico se presentan acciones encaminadas a modernizar la flota vehicular del autotransporte de carga, promover el transporte ferroviario de pasajero, incentivar el uso de tecnología baja en emisiones y el empleo de combustibles alternos, fomentar respeto a la normatividad que regula el impacto ambiental, y finalmente hace énfasis en la necesidad de realizar investigaciones para diseñar políticas para la mitigación y adaptación ante el cambio climático para el sector transporte, así como promover transporte público sustentable y la construcción de inventarios de emisiones de fuentes móviles. Las acciones se pretenden realizar a través de los Centros de Innovación y Tecnología (CIT), tal cual lo establece el Programa Sectorial.

De manera específica el apartado “1.1.8 Medio ambiente”, establece la importancia de “Fomentar el respeto de la normatividad ambiental en la construcción y mantenimiento de la infraestructura de transporte considerando escenarios climáticos” y señala la necesidad de colaborar con otras dependencias para, entre otras cosas, “realizar investigación en CTI, para generar información y sistemas para diseñar políticas de mitigación y adaptación al cambio climático para el sector transporte”.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes forma parte del Sistema Nacional de Cambio Climático y de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC), dentro de la cual se desprende el Grupo de Trabajo de Políticas de Adaptación (GT-ADAPT), quienes en su ámbito de competencia lideran las acciones necesarias de cada dependencia para la adaptación al cambio climático.

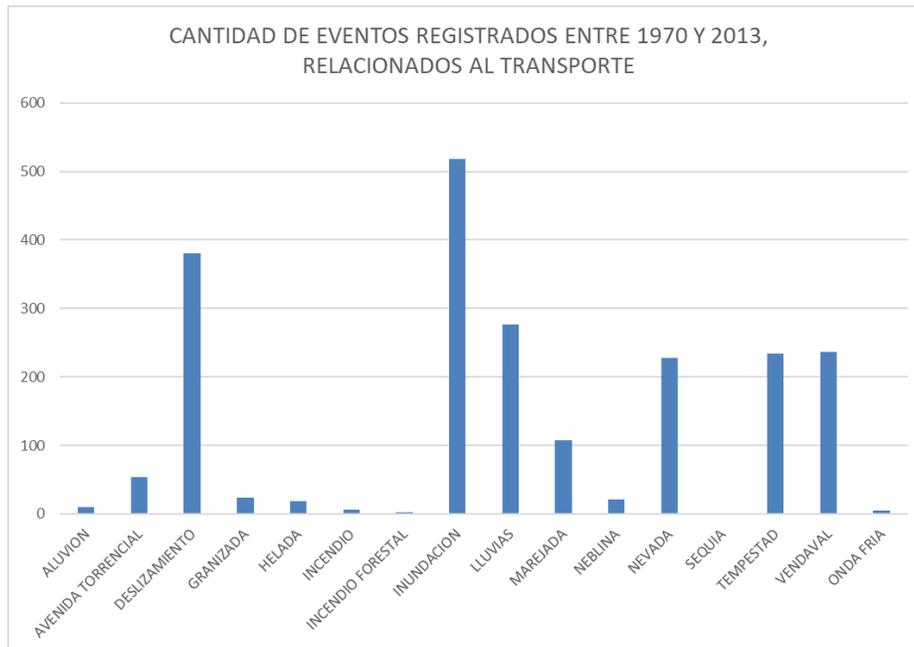
### 1.3 El impacto del cambio climático en las carreteras en México

Las condiciones climáticas actuales en México han variado considerablemente en la última década y se han reflejado en diversos impactos en los ecosistemas y en la infraestructura.

El análisis que realiza Germanwatch (2018) permite establecer un indicador que refleja el nivel de exposición y vulnerabilidad ante eventos climáticos extremos. En el periodo 1997-2016, México ocupó el lugar 47 de la tabla, lo que representa una pérdida anual de 2,957.22 millones de dólares, es decir el 0.181% del PIB.

Este indicador agrupa las consecuencias derivadas de los impactos ocurridos en el país por la presencia de fenómenos asociados al cambio climático, tales como: tormentas intensas, inundaciones, ciclones, olas de calor, etc.

En un análisis realizado por el Instituto Mexicano del Transporte (Mendoza et al, 2017b) mediante la utilización de la base de datos DesInventar, la cual es un sistema de adquisición, consulta y despliegue de información sobre desastres de pequeños, medianos y grandes impactos, con base en datos preexistentes, fuentes hemerográficas y reportes de instituciones en nueve países de América Latina, construido por un grupo de expertos congregados en la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED), se obtuvieron los eventos registrados entre 1970 y 2013 relacionados con impactos a los sistemas de transporte (Ver figura 1.2)



**Figura 1.2. Impactos del cambio climático en los sistemas de transporte en México**

Fuente: Elaboración propia con información de DesInventar 2016.

Del análisis se identificaron aquellos que han sido más frecuentes en el país, los cuales están relacionados con fenómenos hidrometeorológicos. Los resultados se muestran en la tabla 1.1.

**Tabla 1.1. Eventos climáticos más frecuentes en México**

No.	Evento	Cantidad de eventos registrados entre 1970 y 2013, relacionados al transporte
1	Inundación	518
2	Deslizamiento	380
3	Lluvias	277
4	Vendaval	237
5	Tempestad	234

Fuente: Elaboración propia con base en DesInventar, 2016.

Los registros de inundación se refieren a las afectaciones de carreteras y puentes por desbordamiento de ríos o escurrimientos superficiales que obstruyeron parcial o totalmente las vías. Estas inundaciones fueron productos de lluvias intensas o de huracanes.

Los registros de deslizamientos representan la obstrucción de carreteras por derrumbes o deslaves sobre la superficie de rodamiento, y algunas de ellas requirieron ser reconstruidas, así como puentes afectados por deslaves o deslizamientos. El factor determinante de este fenómeno está asociado a la alta concentración de agua en el suelo, volviendo inestables a las estructuras y a los taludes/laderas.

Los registros de afectaciones por lluvias indican daño en carreteras y puentes, con cierres al tránsito o interrumpidas temporalmente, así como la pérdida de infraestructura.

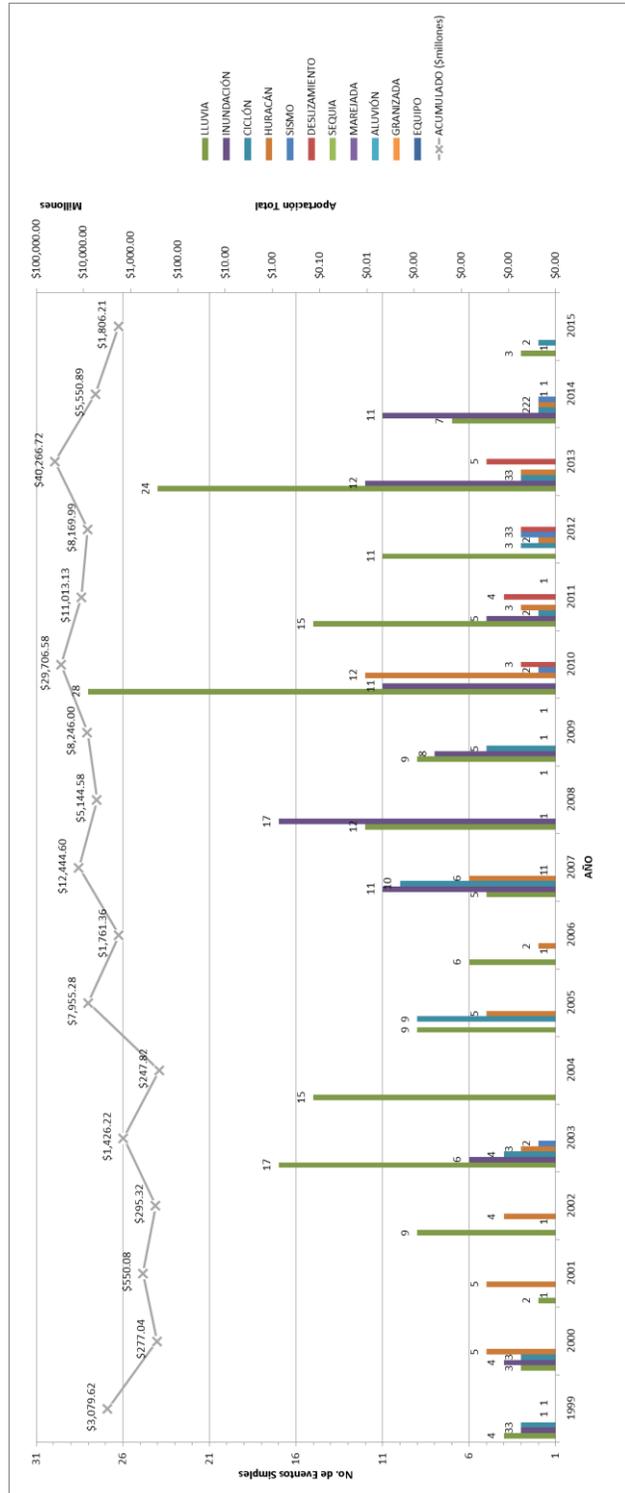
Los registros de vendavales están asociados a la obstrucción temporal de las carreteras por la caída de objetos, tales como anuncios panorámicos o señalización vial, así como cierres parciales a la circulación por tolvaneras. La mayoría de los registros por fuertes vientos están asociados a los huracanes.

Los registros por tempestad o tormenta severa son la destrucción de infraestructura (puentes y pavimentos) o el cierre parcial o total de la carretera por la lluvia y vientos fuertes, así como inundaciones en vialidades urbanas.

Por otro lado, es importante analizar los impactos económicos que los diversos fenómenos climáticos han tenido sobre la infraestructura de transporte, particularmente sobre las carreteras.

En la búsqueda para revisar las implicaciones económicas que los impactos del cambio climático han tenido en los últimos años sobre la infraestructura del transporte, Instituto Mexicano del Transporte (Mendoza et al, 2018) realizó un

análisis sobre la información publicada de los recursos ejercidos por el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) el cual es un instrumento financiero dentro del Sistema Nacional de Protección Civil. La figura 1.3 muestra una gráfica que cuantifica los elementos climáticos por año y el impacto económico que representaron para el país en cada uno de ellos.



**Figura 1.3. Eventos apoyados por el FONDEN y la inversión anual**

Fuente: Elaboración propia, basado en datos de DGGR, 2017.

En el análisis realizado a los reportes emitidos sobre la aportación del Fondo de Desastres Naturales en el país, de 1999 al 2015, se obtuvieron aquellos eventos climáticos que han demandado más recursos y los resultados se muestran en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2. Eventos climáticos que más han demandado recursos económicos en México**

No.	Evento	Cantidad con mayor aportación del FONDEN de 1999-2015
1	Lluvias	179
2	Inundaciones	90
3	Huracanes	52
4	Ciclones	49
5	Deslizamientos	17

Fuente: Elaboración propia con base en FONDEN, 2017.

La mayoría de los eventos son del tipo hidrometeorológico. Las lluvias se refieren a lluvias torrenciales o severas y lluvias atípicas, quizá asociadas a precipitaciones intensas. Las inundaciones están asociadas a lluvias severas.

En México anualmente se presentan impactos asociados a ciclones tropicales y huracanes, atendiendo necesidades derivadas de estos, tales como inundaciones y deslizamientos.

Estos gastos reflejan significativamente el impacto económico de los fenómenos asociados al cambio climático, el cual debe reducirse en el futuro realizando acciones preventivas que ayuden a aumentar la resiliencia de la infraestructura de transporte a través de medidas de adaptación, principalmente.

La experiencia internacional ha demostrado que el costo de la adaptación siempre será menor que el de reconstrucción de la infraestructura perdida por el cambio climático. Los gobiernos deben asumir un papel más activo en la materia, impulsando más y mejores acciones de la adaptación de la infraestructura.



## **2 Planeación para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático**

---

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) o cualquier organismo de carreteras a nivel estatal o municipal en México deberá considerar algunos aspectos básicos en la planeación que permitan definir el objetivo del estudio de adaptación; acotar el alcance del análisis, establecer la escala de análisis, los activos relevantes, el alcance temporal, los impactos del cambio climático y las variables climáticas relevantes a incluir; precisar el contexto donde se llevará a cabo la adaptación; identificar los actores clave y grupos de interés, definir el producto entregable (producto resultante) y las tareas.

Antes de establecer y definir los elementos que permitirán enmarcar la planeación del proceso de adaptación, se requiere conocer la disponibilidad de información que existe en el país, en la región, en el estado o el lugar específico seleccionado donde se llevará a cabo un proyecto para la adaptación al cambio climático.

### **2.1 Análisis rápido sobre los requerimientos de información**

Antes de iniciar el proceso de adaptación, se recomienda revisar la información y datos disponibles. Esta actividad ayuda a establecer objetivos realizables y un alcance adecuado.

Para que el análisis del requerimiento de información demande el menor tiempo posible se preparó una lista de verificación con los requerimientos básicos para la adaptación, aunque ésta no es una lista exhaustiva, ni limitativa.

Al utilizar la lista de verificación, el usuario se podrá dar cuenta de la posible falta de información, y como podría subsanar dicho requerimiento con algún otro tipo de inferencia, así como delimitar el alcance posible del trabajo, es decir qué nivel de profundidad y de detalle tiene el proceso de análisis.

La lista también sirve para identificar la necesidad de información que requieren las organizaciones de carreteras para poder hacer frente a las amenazas que el cambio climático está presentando en sus activos carreteros, mediante la cual podrán emprender acciones para generar dichos datos y prepararse para el proceso de adaptación.

La lista se clasificó en requisitos necesarios para la planeación, institucionales, para el análisis de riesgos y para la adaptación, aunque varios elementos son necesarios en diferentes fases del proceso de adaptación.

A continuación, se presentan los requisitos de información que puede requerir el uso del presente Marco, y con base en su identificación establecer objetivos y alcances realizables.

### REQUISITOS PARA LA PLANEACIÓN

No.	Descripción del requisito	Si	No	Observaciones
1	Legislación sobre cambio climático que incluya la adaptación de las carreteras			
2	Información histórica sobre impactos asociados al cambio climático en las carreteras (registro de daños)			
3	Información de la red carretera			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Red carretera georreferenciada</li> </ul>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inventario de la red de los activos físicos de la red de carreteras (señales, obras de drenaje, etc.)</li> </ul>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Inventario de puentes</li> </ul>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Activos críticos de la red</li> </ul>			
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Estado físico del activo carretero y vida útil del mismo</li> </ul>			
4	Escenarios climáticos futuros (proyecciones de temperatura, precipitación, etc.)			
5	Pre-selección de variables climáticas para la adaptación			
6	Estadísticas sobre el impacto socioeconómico en las carreteras de eventos pasados asociados al cambio climático			

### REQUISITOS INSTITUCIONALES

No.	Descripción del requisito	Si	No	Observaciones
1	Políticas institucionales sobre adaptación al cambio climático de las carreteras			
2	Presupuesto específico para la adaptación de las carreteras			
3	Programa de mantenimiento de carreteras			
4	Recursos humanos capacitados en temas de adaptación al cambio climático / Capacidad técnica para implementar acciones de adaptación			
5	Estructura / Área para la adaptación al cambio climático			
6	Mecanismos de comunicación interna (actores involucrados) y externa (usuarios de la red)			

7	Programas de atención de emergencias / Procedimientos de emergencias			
8	Gestión de riesgos			
9	Gestión de activos carreteros			
10	Base de datos sobre medidas de adaptación implementadas y su monitoreo			
11	Estándares para el diseño de las carreteras (incluyen variables climáticas / incluyen adaptación al cambio climático)			
12	Indicadores de desempeño de la red			

### REQUISITOS PARA EL ANÁLISIS DE RIESGOS

No.	Descripción del requisito	Si	No	Observaciones
1	Conocimiento sobre los riesgos asociados al cambio climático en la red de carreteras			
2	Datos disponibles de la población (público objetivo de la adaptación/beneficiarios o perjudicados)			
3	Datos del tránsito de la carretera (TDPA y su clasificación)			
4	Mapas de exposición de la red carretera al cambio climático			
5	Registros de información meteorológica			
6	Inventario de riesgos en la red (deslizamientos, inundaciones, etc.) / Mapas de riesgos / Registro de riesgos			
7	Estadísticas de cierres parciales o totales de la red asociados al cambio climático			

### REQUISITOS PARA LA ADAPTACIÓN

No.	Descripción del requisito	Si	No	Observaciones
1	Capacidad para reparar daños de manera expedita			
2	Identificación de rutas alternas en la red			
3	Identificación de activos carreteros resiliente			
4	Registros y reportes meteorológicos específicos para carreteras			

Al concluir el análisis rápido, se podrá tener un diagnóstico sobre la información existente y disponible para que la SCT o la organización de carreteras definan o establezcan los siguientes pasos para la planeación de la adaptación.

## **2.2 Definir el objetivo**

El objetivo específico de todo proceso de adaptación deberá ser que el activo carretero, o la red carretera o la operación del transporte carretero sea resiliente al cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos, o los estímulos climáticos existentes.

La SCT o la organización de carreteras deberá definir cuál es el objetivo general y específicos para llevar a cabo el proceso de adaptación.

El Marco de la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC, 2015) sugiere algunos posibles objetivos para enfocar los trabajos de adaptación, por ejemplo:

- Para cumplir con la legislación nacional de cambio climático;
- Disponer de una política formal de adaptación al cambio climático;
- Para entender cómo deben adaptarse las normas de diseño de los activos carreteros;
- Para tener buen nivel de conocimiento sobre los riesgos del cambio climático en la organización, y lograr la adaptación al cambio climático, con plena conciencia de los altos directivos y tomadores de decisiones;
- Para que la organización de carreteras conozca la vulnerabilidad al cambio climático de la red a nivel general;
- Priorizar los activos carreteros y sus operaciones para la adaptación; y,
- Apoyar el desarrollo de un modelo de negocio para obtener apoyo financiero dentro del gobierno nacional para las medidas de adaptación y revisiones de los gastos de la organización.

Por su parte la Agencia Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, 2012), sugiere como objetivos:

- Integrar la evaluación de la vulnerabilidad en los procesos de toma de decisiones existentes de la organización de carreteras.
- Planificar la localización de nuevos proyectos carreteros, e implementar cambios en el diseño para mitigar la vulnerabilidad al cambio climático.
- Determinar las posibles consecuencias de un tipo particular de impacto climático, como el aumento del nivel del mar.
- Identificar tramos carreteros o instalaciones en riesgo por los impactos del cambio climático.

Este objetivo debe estar alineado a la misión y políticas de la organización de carreteras, para establecer la prioridad de la misma, reflejándose en objetivos tales como:

- Proteger los activos críticos de los impactos de los fenómenos asociados al cambio climático.
- Garantizar la resiliencia de la red carreteras que tienen el mayor tránsito de pasajeros y el mayor flujo de mercancías (Ejemplo: los corredores de transporte).
- Preservar las rutas carreteras que facilitan los desplazamientos para la atención las emergencias, que garantizan el abasto alimentario, la accesibilidad a los servicios de salud, etc.

En México, como resultado de la implementación del Marco de la Asociación Mundial de la Carretera (AMC, o AIPCR por las siglas de su nombre de creación), en la red de carreteras de los estados de Nayarit, Colima, Tabasco, Hidalgo y Baja California Sur, se establecieron los siguientes objetivos (DGST, 2016):

- Adaptar el Marco de referencia propuesto por la AMC para evaluar la vulnerabilidad de la red carretera a nivel de entidad federativa ante fenómenos naturales extremos provocados por el cambio climático.
- Desarrollar un proceso para la identificación de sitios vulnerables de la red de carreteras federales expuestos a fenómenos hidrometeorológicos.
- Determinar los tipos de acciones que podrían implementarse para reducir el daño que impactaría en la ruptura de los servicios que proveen las carreteras.

En años recientes los proyectos de inversión han incluido un análisis de riesgos, el cual ahora incluye los riesgos/peligros asociados al cambio climático, de tal manera que se identifique cómo el cambio climático puede afectar los objetivos del proyecto y sus beneficios. Este enfoque también puede ser definido como el objetivo para la adaptación de éste marco metodológico, a fin de que los proyectos de inversión desde su concepción puedan minimizar los efectos potenciales del cambio climático y garantizar una inversión en infraestructura resiliente.

Un término utilizado en este apartado es la resiliencia. Este término asociado a las carreteras, significaría que una infraestructura resiliente será aquella infraestructura del transporte que al ser sometida a condiciones de estrés por la presencia de un fenómeno asociado al cambio climático mantiene su operación y su integridad estructural.

**Resiliencia:** La capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales para hacer frente a un evento, tendencia o perturbación peligrosa, para responder o reorganizarse de manera que mantengan su función esencial, la identidad y estructura, conservando al mismo tiempo su capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación (IPCC, 2014).

Una vez definido el objetivo de la evaluación, se deberá establecer el alcance, es decir los límites, la escala que se defina de la evaluación y tener un enfoque claro de cuales son aquellos fenómenos asociados al cambio climático que han tenido mayores impactos en la red de carreteras, aunque también se pueden seleccionar escenarios futuros del cambio climático, así como identificar los grupos de interés y actores clave para asegurar su involucramiento en etapas tempranas de la adaptación.

## **2.3 Establecer el alcance**

Las organizaciones de carreteras cuentan con recursos limitados, por lo que la adaptación de la infraestructura carretera no podría cubrir la totalidad de los activos carreteros del país, de esta manera el alcance debe establecer la escala de análisis a realizar, los activos relevantes, las variables o fenómenos climáticos a incluir en el análisis, el tipo de escenarios temporal (escenarios pasados o futuros), entre otros aspectos asociados a recursos humanos y financieros que la organización tendrá que precisar.

### **2.3.1 Definir la escala de análisis**

Establecer una escala para el análisis de riesgos asociados al cambio climático permite estratificar los trabajos relacionados con la adaptación al cambio climático, de tal manera que se puedan realizar inversiones programadas en diversos plazos y la información de base puede tener diferentes escalas de análisis.

Para identificar los puntos expuestos que pueden ser vulnerables al cambio climático se pueden utilizar las siguientes escalas de análisis.

#### **2.3.1.1 Escala territorial**

Los escenarios climáticos suelen tener una característica especial territorial, y en ellos se analiza, por ejemplo, si la precipitación o la temperatura variará en el tiempo bajo las diferentes proyecciones futuras conforme lo establece el IPCC, las cuales se basan en la concentración de gases de efecto invernadero y su potencial de calentamiento.

Las regiones que nos interesan evidentemente tendrán que ser servidas por carreteras. Este tipo de escala de análisis parte de que un evento climático podría afectar parte o la totalidad de un territorio.

En esta escala entonces se podrán utilizar por ejemplo un mapa nacional o regional de riesgos sobre aumento del nivel del mar, y con ello analizar espacialmente las carreteras y puentes que geográficamente quedarán en estas zonas de peligro, y que requerirán ser adaptadas para asegurar su resiliencia al cambio climático.

### 2.3.1.2 Escala de red

Esta escala de análisis busca identificar las vulnerabilidades de una red de carreteras, y posteriormente enfocarse en análisis específicos en secciones críticas o activos críticos.

Evaluar la vulnerabilidad de una red tiene un enfoque estratégico para la organización de carreteras. Se basa principalmente en la utilización de mapas climáticos sobre impactos pasados (vulnerabilidad actual) o mapas con escenarios climáticos futuros (vulnerabilidad futura), mediante los cuales se pueda identificar la vulnerabilidad de la red.

Estos riesgos identificados deberán analizarse a un nivel más detallado, para identificar el nivel de vulnerabilidad del activo, y con ello definir las estrategias de adaptación.

En esta escala se puede evaluar la capacidad de adaptación del sistema. La capacidad de adaptación se entiende como la capacidad o el potencial que un sistema tiene para poder responder con éxito a los impactos de la variabilidad del clima, el cambio climático, y el clima extremo.

**Capacidad de adaptación:** La capacidad de los sistemas, las instituciones, los seres humanos y otros organismos para adaptarse al daño potencial, para aprovechar las oportunidades o para responder a las consecuencias (IPCC, 2014).

A nivel de red se pueden considerar diferentes atributos para evaluar la capacidad de adaptación.

El Marco de la Asociación Mundial de la Carretera sugiere considerar tres atributos para evaluar la capacidad de adaptación.

- **Reparación:** La capacidad de reparar los daños rápidamente;
- **Redundancia:** Se relaciona con la existencia de rutas de transporte alternas que permiten el acceso a destinos que de otro modo serían inaccesibles como resultado del cierre temporal o permanente de la carretera;
- **Resiliencia:** Es la capacidad de ajustarse fácilmente a los eventos climáticos de corto plazo (tales como, inundaciones relacionadas con la precipitación) con el fin de minimizar la interrupción de la red.

El análisis a nivel de red permitirá a los usuarios a implementar planes o programas de adaptación que garanticen la operación de la red, a pesar de los riesgos y peligros del cambio climático, integrar la gestión de riesgos del cambio climático en la gestión de activos carreteros, conocer el grado de vulnerabilidad actual y futuro de la red de carreteras, desarrollar programas de inversión para la adaptación al

cambio climático, establecer planes o procedimientos para la atención de emergencia debido a cierres parciales o totales de las carreteras, entre otros fines.

### **2.3.1.3 Escala a nivel tramo carretero**

Este análisis puede ser un segundo paso de análisis de red, ya que al ubicar los tramos vulnerables de la red se requieren evaluaciones específicas con mayor detalle para conocer la fragilidad del activo carretero.

Sin embargo, es posible realizar análisis específicos a nivel de tramo, sin pasar por un análisis de red, el cual pudo ser seleccionado por su importancia comercial, jerarquía en la red, registros históricos de cierres carreteros, o simplemente una selección aleatoria.

Esta escala puede aplicarse a proyectos carreteros nuevos, que requieran un análisis de riesgos por cambio climático.

El nivel de análisis por tramo carretero es el más completo. Esto implica recopilar información histórica de impactos asociados al cambio climático, inversiones realizadas para reparación de daños, datos del tránsito y de la infraestructura carretera, también es imprescindible el conocimiento de los ingenieros de campo, ya que suelen tener conocimiento sobre los impactos acontecidos y las vulnerabilidades del tramo carretero. Éste análisis requiere visitas a campo para identificar riesgos basados en el criterio experto del grupo de trabajo, el cual podrá estar conformado por ingenieros de carreteras, hidrólogos, geotécnicos, especialistas en cambio climático, entre otros. Adicionalmente se pueden utilizar modelos para simular inundaciones, deslizamientos, etc.

El resultado puede arrojar una lista de riesgos identificados, que permitirán ser evaluados de forma cuantitativa desde un inicio.

### **2.3.1.4 Escala por activo físico en la carretera**

Esta escala permite analizar puntos críticos de un tramo carretero, los cuales podrían ser un puente, un túnel, una intersección, un viaducto, etc.

El análisis se centra en el activo y los elementos que lo integran, de tal manera que se pueda evaluar la vulnerabilidad a través de modelos y el uso de información de las inspecciones físicas y del proyecto del activo.

Por ejemplo, se puede identificar la vulnerabilidad por socavación de las pilas de un puente mediante inspecciones físicas, datos climáticos, modelos matemáticos, etc., asociados a riesgos climáticos como avenidas torrenciales, incremento de la precipitación, tormentas intensas, etc.

### 2.3.2 Selección de activos relevantes o críticos

Sí el alcance de la adaptación tiene un enfoque en aumentar la resiliencia en los activos críticos, entonces se deben establecer criterios para la identificación de los activos relevantes.

La SCT o las organizaciones de carreteras en México, pueden utilizar los siguientes criterios para identificar aquellos activos que por sus características puedan considerarse como relevantes dentro de toda la red carretera nacional o estatal, según el caso de que se trate, los cuales están basados en el Marco de Adaptación de la Agencia Federal de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, 2018).

- **Jurisdiccional.** Las organizaciones de carreteras en México pueden optar por limitar la evaluación a los activos que están bajo su control. Este criterio permite a cada dependencia acotar su alcance y definir las acciones de la organización de carreteras.
- **Geográfico.** Los activos relevantes podrán ser aquellos localizados en áreas específicas, donde pueden ser más vulnerables a algunas variables climáticas, por ejemplo: zonas bajas susceptibles a inundaciones, o zonas altas susceptibles a deslizamientos de laderas.
- **Representativos.** La organización puede seleccionar los activos carreteros que representen los diferentes tipos de infraestructura y activos que se encuentran dentro de su sistema de transporte. Este tipo de evaluaciones permite a la organización de carreteras conocer los posibles impactos que pueden tener en su sistema en un rango de variables o fenómenos climáticos.
- **Frecuentemente impactados.** Los activos que con mayor frecuencia son afectados por diversos fenómenos asociados al cambio climático y que continuamente son reparados, son más vulnerables y pueden considerarse como críticos debido a que constantemente son sometidos a condiciones de estrés inducido por el cambio climático.
- **Etapas de su vida útil.** Las organizaciones de carreteras en México se pueden enfocar en los activos que están por cumplir su vida útil, y por lo tanto serán reemplazados o rehabilitados, por lo que el nuevo proyecto deberá considerar la adaptación al cambio climático en función de la vulnerabilidad al cambio climático del activo existente, cuyo diseño actual podría estar obsoleto.
- **Activos críticos.** Las organizaciones de carreteras pueden enfocarse en los elementos más críticos del sistema de transporte, los cuales pueden ser identificados mediante criterios cuantitativos o cualitativos. Se pueden además de acompañar de un método que proporcione una forma estructurada de enfocarse en los activos que son más importantes para el funcionamiento del sistema de transporte (Ejemplo, con mayor TDPA).

- **Activos planeados.** Se puede incluir la evaluación de la vulnerabilidad al cambio climático de los activos planeados, para asegurar su resiliencia en el largo plazo.

### 2.3.3 Alcance temporal

Por un lado, el alcance temporal se refiere a delimitar el periodo de análisis, sobre todo cuando se utilizarán datos históricos, por ejemplo, inundaciones de los últimos 50 años en un tramo carretero. Aunque no siempre es posible definir los límites en el tiempo, se recomienda acotar en la medida de lo posible el uso de la información, para que ésta sea asociada a cambio climático y no fenómenos climáticos severos, pero que son aislados y que raramente se presentan.

Por otro lado, habrá que definir el alcance temporal de los activos carreteros que se van a evaluar, es decir, si la evaluación para la adaptación se realizará para activos con una vida de diseño larga, como los puentes, o la evaluación de activos se realizará para aquellos que en el corto plazo pueda incorporarse rápidamente a los programas de mantenimiento de carreteras.

La SCT y las organizaciones de carreteras deberán establecer el alcance temporal para identificar a aquellos activos que sean de interés conforme su vida de diseño.

### 2.3.4 Identificar los impactos del cambio climático

El análisis de la información climática debe basarse en registros o pronósticos, por lo que la adaptación en su planeación deberá tener claro el enfoque que quedará plasmado en el alcance del estudio.

#### 2.3.4.1 Impactos del clima en el pasado

Es importante hacer una revisión de los impactos que se han presentado, para acotar el alcance del trabajo, de tal manera que se puedan optimizar los recursos para la adaptación.

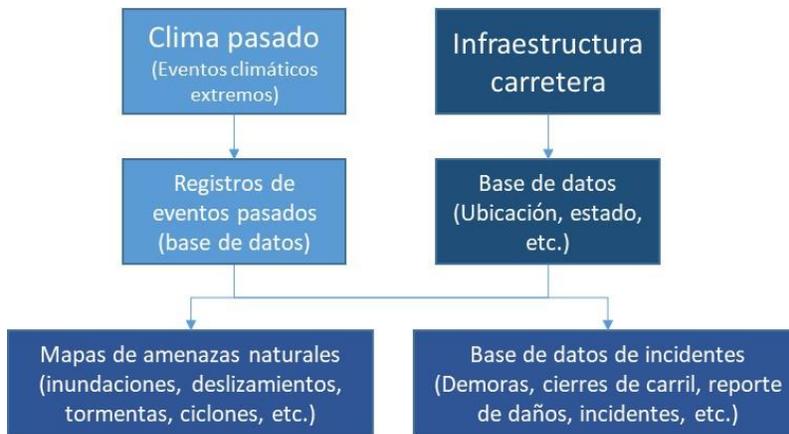
En la actualidad existen un gran número de impactos del cambio climático identificados, los cuales pueden variar por región, por el sector de la economía a la que pueden impactar, por lo que para cada estudio de adaptación deberán ser precisados.

**Impactos:** Efectos sobre los sistemas naturales y humanos. El término impacto se utiliza principalmente para referirse a los efectos sobre los sistemas naturales y humanos derivados de los fenómenos meteorológicos y climáticos extremos, y del cambio climático. Los impactos se refieren, en general, a los efectos sobre la vida, los medios de vida, la salud, los ecosistemas, las economías, las sociedades, las culturas, los servicios y la infraestructura debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren dentro de un período de tiempo específico y la vulnerabilidad de una sociedad, o un sistema expuesto. Los impactos también se conocen como consecuencias y

resultados. Los impactos del cambio climático en los sistemas geofísicos, que incluyen inundaciones, sequías y aumento del nivel del mar, son un subconjunto de los impactos llamados impactos físicos (IPCC, 2014).

El esquema 2.1 muestra cómo se interrelacionan los datos de los registros de impactos pasado y la infraestructura carretera, mediante el cual se pueden definir las amenazas naturales asociadas al cambio climático que mayor afectación han tenido en la red de carreteras del país, y que ha implicado desde cierres operacionales hasta pérdida de infraestructura.

Para ello es necesario hacerse de fuentes confiables para el análisis de información, las cuales no siempre son específicas para carreteras.

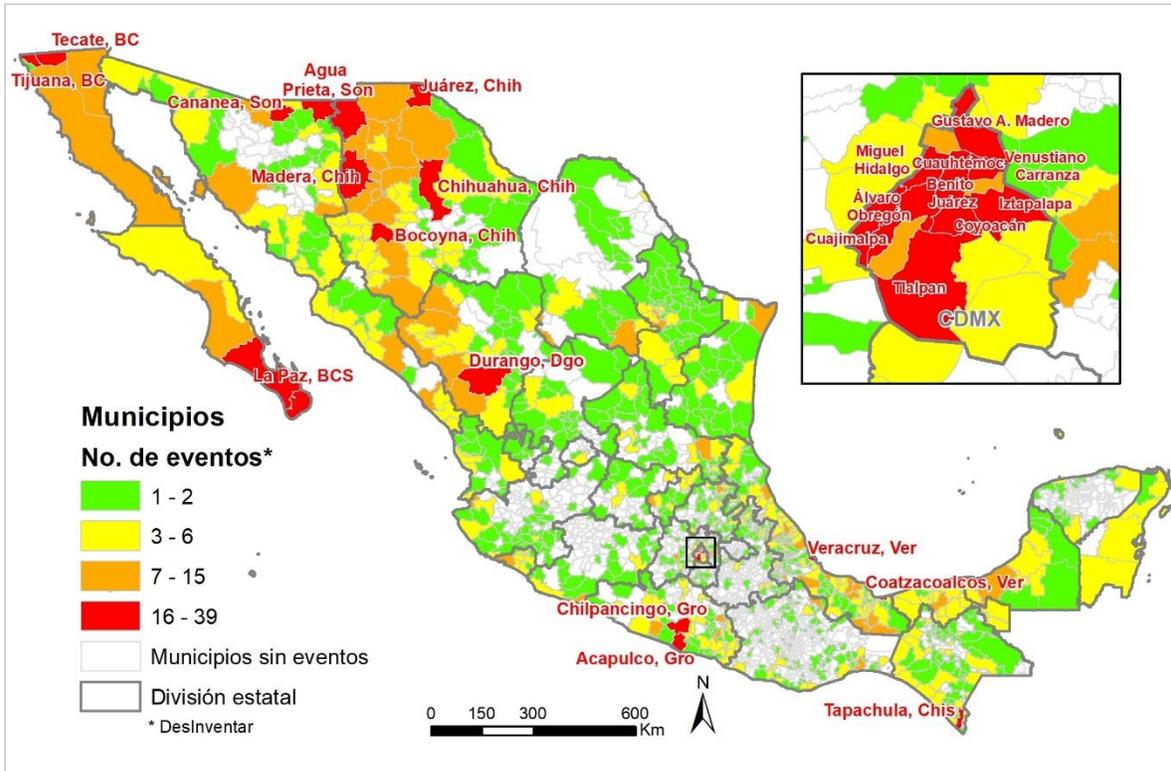


**Figura 2.1. Esquema para la determinación de impactos del cambio climático en la infraestructura carretera en México**

Fuente: Elaboración propia.

Mendoza et al (2017b), realizaron para México un análisis de la información de registros de desastres en los cuales se tuvieron efectos negativos en la infraestructura para el transporte. La información se obtuvo del Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar). El resumen de los datos se encuentra en los antecedentes del presente trabajo (Ver figura 1.2 y Tabla 1.1).

En un análisis integral de todos los eventos identificados en DesInventar se pudo construir el mapa de la figura 2.2, en el cual se pueden observar los municipios que mayor número de eventos que han tenido impactos de fenómenos que podrían estar asociados al cambio climático, y que han sido registrados.



**Figura 2.2 Mapa de registro de impactos al Cambio Climático**

Fuente: Gradilla et al (2018).

Aunque la base de datos de DesInventar es una herramienta útil se considera que las organizaciones nacionales deberían tener un registro nacional propio de los impactos asociados al cambio climático y una cuantificación de los daños.

La mayoría de los impactos registrados en DesInventar están relacionados con fenómenos hidrometeorológicos, los cuales también se pueden verificar con los registros del Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED).

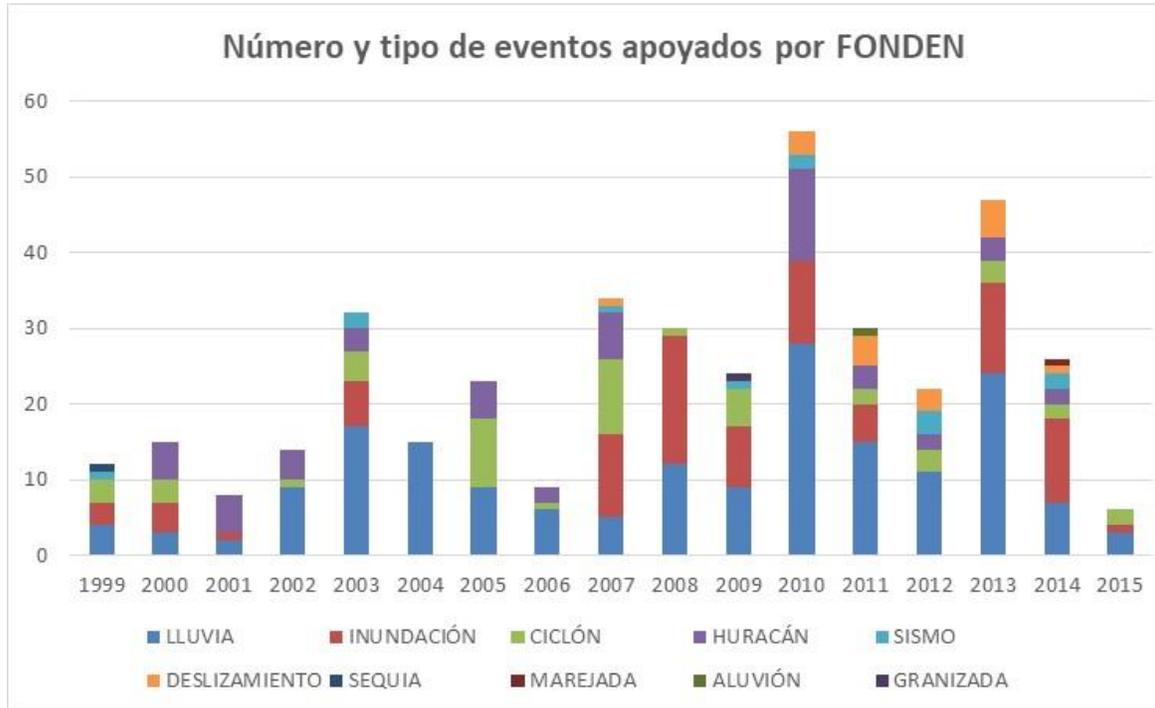
Los registros de CENAPRED permiten evaluar el impacto socioeconómico de los principales desastres ocurridos en la República Mexicana, y para el sector transporte se pueden identificar las afectaciones de los caminos, los puertos y las vías ferroviarias, asociadas a fenómenos hidrometeorológicos o geológicos y cuál fue la magnitud de la inversión en pesos, la cual se resume en la tabla 2.1.

**Tabla 2.1 Tipos de fenómenos climáticos con más impacto socioeconómico en México**

Tipo de fenómeno	Inversión (Pesos)	Porcentaje (%)
Hidrometeorológicos	108,057,391,389.60	99%
Geológicos	1,587,552,500.00	1%
<b>Total</b>	<b>109,644,943,889.60</b>	<b>100%</b>

Fuente: Elaboración propia con base en CENAPRED 2000-2015.

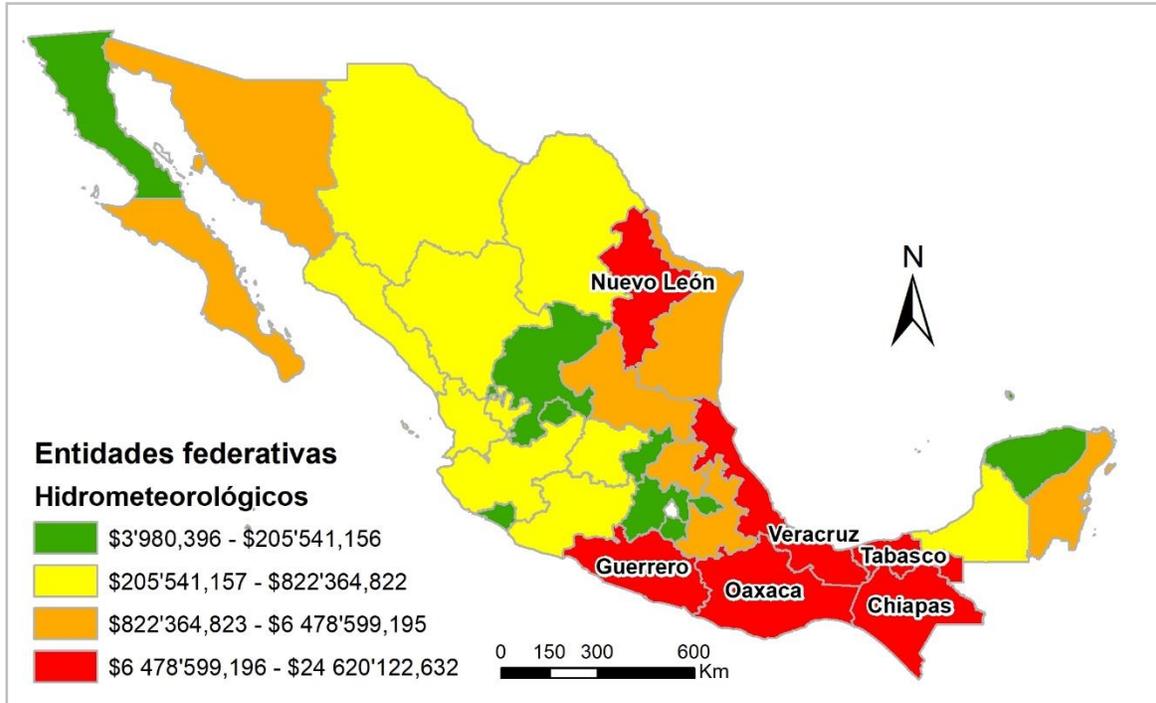
Mendoza et al (2017b) también realizaron un análisis de los reportes emitidos sobre las aportaciones del Fondo de Desastres Naturales en el país, de 1999 al 2015, donde se identificaron aquellos eventos climáticos que han demandado recursos para reparar/rehabilitar la infraestructura carretera. El resumen de los datos se encuentra en los antecedentes del presente trabajo (Ver figura 1.3 y Tabla 1.2). La figura 2.3 muestra el número y tipo de evento apoyado por el FONDEN en el periodo de análisis.



**Figura 2.3 Eventos apoyados por el FONDEN**

Fuente: Elaboración propia con información del FONDEN.

La mayoría de las inversiones se debe a los impactos de fenómenos hidrometeorológicos y sus efectos, por lo que se construyó un mapa con el total de las inversiones económicas incluyendo: aluvión, ciclón, deslizamientos, granizada, huracanes, inundación, lluvias, los cuales se muestran en la figura 2.4.



**Figura 2.4 Mapa del impacto económico en infraestructura carretera por fenómenos hidrometeorológicos**

Fuente: Elaboración propia con información del FONDEN.

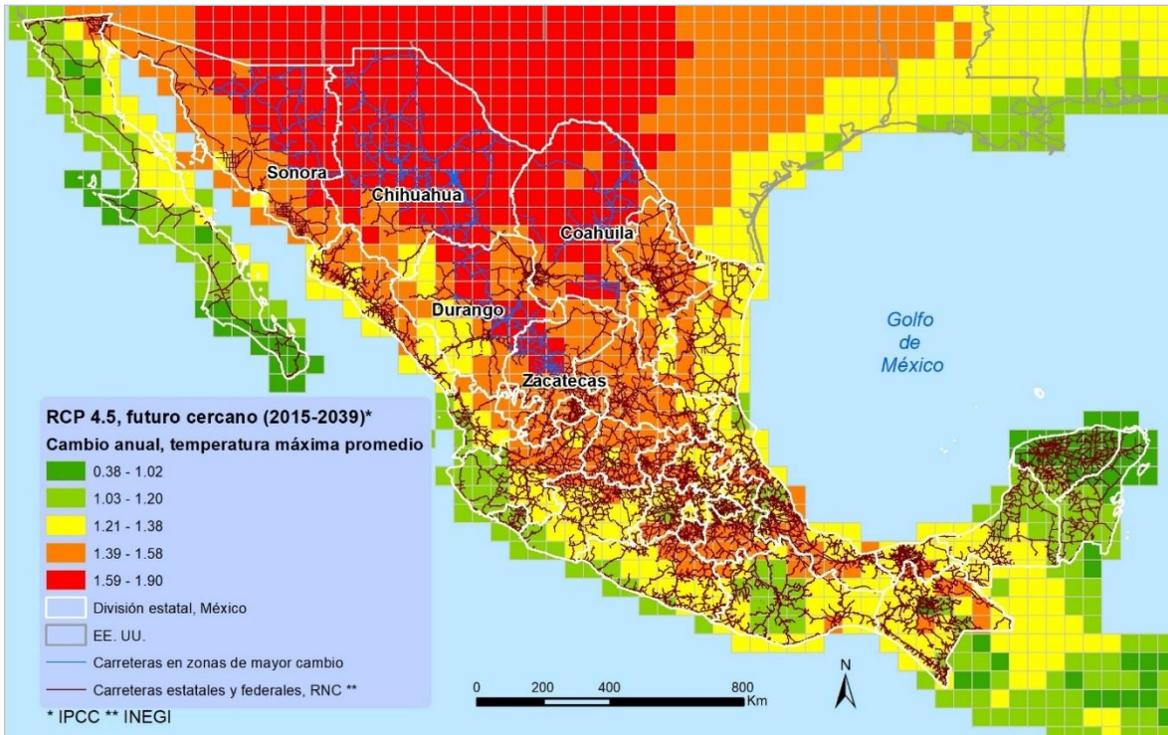
En la figura 2.4 se puede observar a escala estatal, aquellos estados que mayores aportaciones han absorbido para reparar o rehabilitar la infraestructura carretera debido a los impactos de fenómenos hidrometeorológicos asociados al cambio climático.

#### 2.3.4.2 Impactos del clima en el futuro

No todos los cambios en el clima futuro serán significativos para la red de transporte local o regional, limitar el estudio a las variables clave de interés permite realizar proyecciones más profundas de estas variables (FHWA, 2012).

En México, solo existen proyecciones futuras para temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio, precipitación, humedad relativa, humedad específica, presión superficial y viento (Cavazos et. al., 2013).

A continuación, se muestra el resultado obtenido para las proyecciones climáticas de México, de temperatura, para un futuro cercano (2015-2039) y con un escenario de concentración de emisiones RCP 4.5.



**Figura 2.5 Escenario RCP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio.**

Fuente: Gradilla et al (2018)

Si el alcance del análisis implica la revisión de la infraestructura carretera bajo escenarios futuros, habrá que revisar la escala de los escenarios y las variables meteorológicas que se utilizaron para dichos pronósticos futuros.

Usualmente es común evaluar el impacto futuro del cambio en la temperatura, del cambio en la precipitación y del aumento del nivel del mar.

### 2.3.5 Fenómenos climáticos / Variables climáticas

Las variables climáticas que se deben seleccionar para el proceso de adaptación normalmente están influenciadas por las experiencias que el sector transporte ha tenido en los últimos años con respecto al desempeño del sistema en respuesta al clima, especialmente durante condiciones climáticas extremas tales como vientos fuertes, olas de calor, inundaciones causadas por fuertes precipitaciones o tormentas.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (2012), desarrolló un documento para los tomadores de decisiones sobre la adaptación al cambio

climático. En el documento identifican las amenazas identificadas por región y que se muestran en la tabla 2.2.

**Tabla 2.2 Amenazas naturales identificadas por región**

Amenazas identificadas por región			
Centro	Norte	Sur-Sureste	Centro-Occidente
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sequías</li> <li>• Incendios</li> <li>• Lluvias extremas</li> <li>• Ondas de calor</li> <li>• Ondas frías</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olas de calor y frío (heladas)</li> <li>• Sequías</li> <li>• Lluvias extremas</li> <li>• Huracanes</li> <li>• Tornados</li> <li>• Aumento del nivel del mar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ondas de calor</li> <li>• Heladas</li> <li>• Lluvias torrenciales</li> <li>• Tornados</li> <li>• Aumento del nivel del mar</li> <li>• Inundaciones</li> <li>• Salinización</li> <li>• Erosión del suelo (por causa hídrica y eólica)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olas de calor y frío (heladas)</li> <li>• Huracanes</li> <li>• Tormentas</li> <li>• Granizadas</li> <li>• Lluvias torrenciales</li> <li>• Sequía (estrés hídrico, desertificación e incendios)</li> <li>• Inundaciones</li> <li>• Aumento del nivel del mar</li> </ul>

Fuente: INECC (2012).

Estas amenazas fueron identificadas para todos los sectores, por lo que se requiere una identificación específica para la infraestructura carretera.

Evaluar el desempeño del sistema de transporte durante eventos climáticos históricos puede ayudar a entender la sensibilidad del sistema de transporte a los extremos climáticos, apoyando la selección de las variables climáticas y sus umbrales, proporcionando información que pueda usarse para medir los impactos asociados con el clima futuro y examinar las proyecciones.

Algunos de los criterios para la selección de los fenómenos climáticos para la adaptación en México son:

- Condiciones climáticas extremas que han afectado los activos carreteros.
- Fenómenos climáticos frecuentes que han provocado daños a carreteras, puentes, pavimentos u otra infraestructura; por ejemplo, alcantarillas o señalamiento.
- Fenómenos climáticos que por la ubicación de los activos los vuelven vulnerables experimentando el mismo impacto.
- Fenómenos climáticos que han requerido inversiones económicas elevadas.
- Fenómenos climáticos que pueden poner en riesgo a los activos con alto valor económico y son críticos dentro del sistema de transporte.
- Fenómenos climáticos que rebasan los umbrales en los que el sistema comienza a experimentar impactos (por ejemplo, una alta temperatura específica o un caudal máximo que ha causado daño o falla).
- Pronósticos meteorológicos que proyectan interrupciones frecuentes del tránsito.

Con base en el análisis realizado por Mendoza et al (2017b), sobre el clima y su impacto en la infraestructura carretera, se definieron los siguientes fenómenos

climáticos en el proceso de adaptación y el nivel de prioridad con los que deben ser atendidos.

<b>Nivel Prioritario</b>	
<b>Eventos con precipitación intensa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclones tropicales</li> <li>• Huracanes</li> <li>• Lluvias y tormentas intensas</li> </ul>
<b>Efectos de precipitación excesiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inundaciones</li> <li>• Marejadas e inundaciones costeras</li> <li>• Deslizamientos / Aluviones</li> <li>• Avenidas torrenciales</li> <li>• Vendavales</li> <li>• Granizadas</li> </ul>

<b>Nivel Medio</b>	
<b>Eventos con precipitación intensa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ondas frías</li> </ul>
<b>Efectos de precipitación excesiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heladas</li> <li>• Nevadas</li> <li>• Vendavales</li> <li>• Neblina</li> <li>• Marejadas</li> </ul>

<b>Nivel Bajo</b>	
<b>Eventos con aumento de la temperatura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olas de calor</li> <li>• Aumento de la temperatura</li> </ul>
<b>Efectos del aumento de la temperatura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sequía</li> <li>• Deslizamientos</li> <li>• Incendios</li> <li>• Calor extremo</li> </ul>

## 2.4 Establecer el contexto

Para el establecer el contexto de la adaptación, la SCT o la organización de carreteras deberá conocer el contexto interno (la organización, la estructura, las responsabilidades, sus capacidades técnicas y sus recursos), y el externo (población objetivo, gobiernos locales, capacidad para la adaptación, etc.).

### 2.4.1 Contexto interno

La organización de carreteras debe establecer su contexto interno en el proceso de adaptación, para ello debe identificar:

- Políticas, metas y objetivos sobre la adaptación al cambio climático y la gestión de riesgos ante amenazas naturales.

- La estructura interna (áreas específicas para la adaptación al cambio climático).
- Los procesos que permitirán implementar el proceso de adaptación y su seguimiento.
- Programas disponibles para la atención de riesgos y la gestión de activos en carreteras.
- Personal disponible y el grado de capacitación (roles y responsabilidades dentro de la estructura organizacional).
- Capacidad para atender emergencias y el restablecimiento del servicio.
- Niveles de aceptación del riesgo en el sector (gestión del riesgo, seguros, fondos para reconstrucción, etc.).
- Manuales, normas o especificaciones técnicas que incluyan variables asociadas al cambio climático.
- Recursos disponibles para la adaptación al cambio climático.

La lista es enunciativa que enmarca algunas sugerencias de lo que se deberá revisar al interior de la organización para iniciar el proceso de adaptación, con la finalidad de alcanzar las metas determinadas o para definir objetivos realizables.

#### **2.4.1.1 Comunicación efectiva**

La organización de carreteras debe establecer en su contexto interno una comunicación efectiva y activa, entre las partes interesadas, los tomadores de decisiones, los beneficiados y los usuarios.

Una comunicación efectiva asegura el involucramiento de todas las partes interesadas, aumenta el conocimiento sobre la adaptación al cambio climático, promueve el apoyo para la implementación de las acciones de adaptación, propicia la interrelación entre el sector público, privado y la población local.

Algunos medios de comunicación pueden ser, por ejemplo: talleres, reportes técnicos, animaciones informativas, notas resumen y notas informativas.

El Marco de la AMC (2015), sugiere que la comunicación también puede apoyar al desarrollo de los objetivos adecuados y el conocimiento del contexto local, ayuda a asegurar que los riesgos climáticos sean identificados correctamente, y a construir un consenso entre las partes interesadas sobre los resultados de una evaluación del riesgo, así como al tratamiento de riesgos seleccionados para su implementación.

#### **2.4.2 Contexto externo**

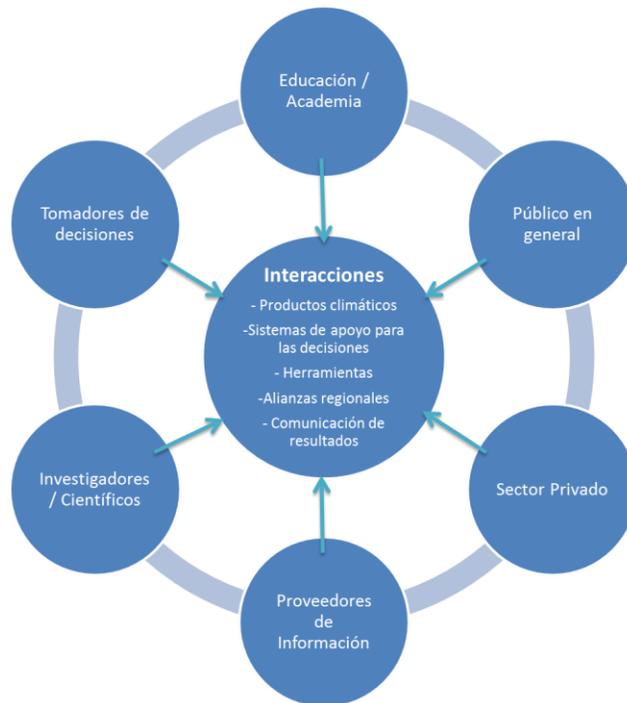
El contexto externo deberá considerar aspectos relevantes para la organización de carretera para asegurar éxito en el proceso de adaptación, esto incluye la identificación de las partes interesadas, las cuales se detallan el siguiente punto.

### 2.4.2.1 Partes interesadas

Para la adaptación al cambio climático el liderazgo adecuado en el sector transporte, es responsabilidad inherente a los gobiernos, ya sean de nivel nacional, regional o local.

Cada proyecto de adaptación en particular puede tener múltiples actores involucrados que, de acuerdo a su alcance, tales como: gobiernos locales o estatales, departamentos públicos, empresas de consultoría o de ejecución de obras civil, instituciones de financiamiento, operadores o empresas de transporte, instituciones de investigación y educativas, etc.

La figura 2.6 muestra el resultado del análisis realizado por el Banco Interamericano de Desarrollo (IDB, 2014), sobre la identificación y las interacciones entre partes interesadas en el proceso de adaptación.



**Figura 4. Interacción entre actores involucrados en el cambio climático**

Fuente: Elaboración propia, basados en IDB, 2014.

Cada uno de los interesados puede tener experiencia y conocimiento para contribuir a los objetivos de la adaptación, así como a determinar la composición del equipo y el nivel de participación que se necesita de cada miembro del equipo.

No todas las partes interesadas incluidas en la lista que a continuación se presenta, desarrollada por la Agencia Federal de Carreteras (FHWA, 2018) participarán activamente en la adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera,

pero pueden concurrir en determinadas tareas para proporcionar orientación y experiencia relevantes.

- **Planificadores de transporte**, los cuales son responsables de la planificación a largo plazo del sistema de transporte y utilizan regularmente la proyección de escenarios y otras herramientas para proyectar inversiones y políticas a largo plazo frente a futuros inciertos.
- **Administradores de la gestión de activos**, quienes están familiarizados con las condiciones de la infraestructura carretera y pueden tener conjuntos de datos relevantes de los activos.
- **Personal de mantenimiento**, quienes tienen conocimiento institucional y conocimiento en campo de cómo los eventos climáticos actuales y pasados afectan los activos carreteros, e incluso los requerimientos para mantener y operar el sistema bajo las diferentes amenazas climáticas.
- **Operadores de emergencias** (por ejemplo, personal de los Centros SCT que deben atender una emergencia en carreteras), los cuales brindan una respuesta rápida a los desastres naturales y están familiarizados con las rutas de evacuación y otras necesidades operacionales durante los eventos climáticos severos. Se pueden incluir a la policía de caminos y al personal de protección civil.
- **Ingenieros** (con especialidad en estructuras, hidráulica e hidrología, geotecnia, carreteras, entre otras disciplinas), quienes pueden proveer información sobre la sensibilidad de la infraestructura y el área adyacente a la carretera, sobre los impactos climáticos, así como proponer medidas y estimar costos de las posibles alternativas de soluciones para la adaptación.
- **Operadores del sistema carretero**, los cuales tienen conocimiento y experiencia sobre cómo el clima y las condiciones climáticas extremas afectan la operación del tránsito y que repercute en congestionamiento, así como en la seguridad del viajero; y que se requiere para minimizar la interrupción, las demoras y las fallas del servicio ante la presencia de condiciones climáticas adversas.
- **Especialistas en sistemas de información geográfica**, quienes pueden analizar y visualizar espacialmente los activos de transporte y la información del cambio climático.
- **Especialistas en medio ambiente y cambio climático**, donde los primeros puede proporcionar información sobre cómo los cambios proyectados podrían afectar los ecosistemas o sobre los beneficios que proporcionan los ecosistemas; adicionalmente las organizaciones ambientales proporcionan acceso a la información sobre el medio ambiente local; los segundos puede proveer datos locales y conocimiento de investigaciones sobre el cambio

climático realizadas por otras organizaciones, las cuales pueden ser útiles para el estudio adaptación al cambio climático de las carreteras.

- **Investigadores y académicos**, quienes pueden proporcionar resultados de sus investigaciones sobre ciencias del clima o proyecciones climáticas, así como estudios relacionados. El conocimiento generado en las universidades locales puede ser útil para establecer el contexto local para la adaptación al cambio climático.
- **Climatólogos o especialistas en ciencias de la atmósfera**, particularmente aquellos organismos gubernamentales, los cuales pueden proporcionar información y conocimientos sobre datos y tendencias climáticas históricas y, en algunos casos, proyecciones futuras.
- **Autoridades locales**, quienes pueden proporcionar información sobre los activos dentro de su jurisdicción y contar con personal con experiencia en áreas relevantes para el proceso de adaptación, tales como la gestión de emergencias o el mantenimiento de las carreteras.

#### 2.4.2.2 Población objetivo

Las necesidades y expectativas de la población en el área de influencia del proyecto pueden influir en el objetivo y alcance de la adaptación al cambio climático.

Se pueden considerar como población objetivo aquellas que se verán impactadas o beneficiadas con la implementación de las acciones de adaptación, tales como la población y los usuarios de la red, estos pueden variar según el tipo de carretera, si es local, regional o nacional.

El Banco Asiático de Desarrollo (ADB, 2011) sugiere la realización de consultas a la población objetivo, mediante las cuales se pueda obtener información útil para el proceso de identificación, selección y evaluación de las respuestas de adaptación.

La aceptación social de las medidas de adaptación, puede asegurar el éxito de todo el proceso.

#### 2.4.3 Riesgos y oportunidades de la adaptación

La planificación requiere una identificación de riesgos y oportunidades, los cuales por un lado puede afectar la conclusión del proceso de adaptación, y por el otro permitirán tomar ventaja de las oportunidades identificadas.

Para los responsables de la adaptación tienen el desafío de evitar que los riesgos se materialicen e impacten el proceso, y explotar las oportunidades y efectos positivos del cambio climático.

Esta identificación de riesgos y oportunidades se puede dar a través de una lluvia de ideas. En el caso de los riesgos, estos pueden afectar el logro del objetivo del

proceso de adaptación, pueden ser internos o externos, establece el nivel de importancia, el nivel de tolerancia al riesgo, y la forma en que se pretende responder a los riesgos.

Algunos riesgos pueden ser externos, tales como: económicos, medioambientales, regulatorios, sociales, tecnológicos, etc., o internos, tales como: estructura organizacional, personal, activos, tecnología o de infraestructura instalada, etc.

Las oportunidades por su parte van asociadas a los beneficios, particularmente referidos a las ventajas de la adaptación, donde se debe reflexionar como estos beneficios pueden ser potencializados, de tal manera que se obtengan mejores resultados.

## **2.5 Entregable**

Las salidas de un proceso pueden ser múltiples, las cuales deben estar alineadas al objetivo planteado en la adaptación al cambio climático. Es importante tener claro quién será el usuario del producto final, para que éste pueda ser entendible y manejable.

A continuación, se presenta una posible relación de entregables:

- Sí el objetivo de la organización de carreteras es que conozca la vulnerabilidad al cambio climático de la red a nivel general, entonces el producto podrá ser un informe de riesgos y el nivel de vulnerabilidad en el que se encuentran.
- Si el objetivo es identificar tramos carreteros o instalaciones en riesgo por los impactos del cambio climático, como resultado se espera obtener una base de datos georreferenciada con la identificación de los sitios expuestos de la red de carreteras.
- Sí el objetivo es determinar los tipos de acciones que podrían implementarse para reducir el daño que impactaría en la ruptura de los servicios que proveen las carreteras, entonces obtendremos una lista de acciones de adaptación al cambio climático, la cual puede ser priorizada o no.

Una vez que el objetivo es claro, el alcance se ha establecido, entonces se deben determinar las tareas o actividades a realizar.

## **2.6 Tareas**

Finalmente, el procedimiento implica que el responsable de la adaptación y con el fin de alcanzar el objetivo y en función de los alcances, se deben definir las principales tareas a realizar.

Estas tareas pueden ser muy diversas, pero algunas de las que se consideran necesarias son:

- Realización de talleres de capacitación y concientización sobre el proceso de adaptación al cambio climático.
- Definir los criterios de aceptación del riesgo dentro de la organización de carreteras, así como los umbrales de diseño para los elementos adaptados al cambio climático.
- Recopilación de información, tales como mapas de cambio climático, estadísticas sobre impactos del cambio climático, etc. (Ver la lista de verificación del apartado 2.1).
- Inspecciones de campo para identificar y evaluar los riesgos del cambio climático en las carreteras.
- Desarrollo de base de datos y medios de visualización.
- Desarrollar las acciones de adaptación al cambio climático en la infraestructura carretera
- Evaluar el costo-beneficio de las acciones de adaptación, y desarrollar una priorización.
- Establecer los mecanismos de implementación de las acciones de adaptación y el procedimiento para su monitoreo y seguimiento.
- Acciones de vinculación entre los distintos actores involucrados.
- Definir políticas para la toma de decisiones.
- Construir escenarios climáticos asociados a las variables de diseño de la infraestructura carretera.

Lo anterior descrito es solamente enunciativo, sobre la cual la organización de carreteras definirá sus propias actividades conforme a su proyecto de adaptación al cambio climático.



### 3 Identificación de riesgos en la infraestructura carretera asociados al cambio climático

---

Previo al análisis de vulnerabilidad al cambio climático, se debe elegir los elementos o sitios en riesgo en las carreteras que serán incluidos en la evaluación. Esta selección de riesgos está directamente relacionada con la escala de análisis elegida en la planeación, es decir el alcance del proceso de adaptación al cambio climático.

El término riesgo se utiliza para referirse a un evento potencial, cuyo resultado puede ser incierto, y las consecuencias pueden resultar adversas para la vida, el medio ambiente, o la infraestructura, como las carreteras.

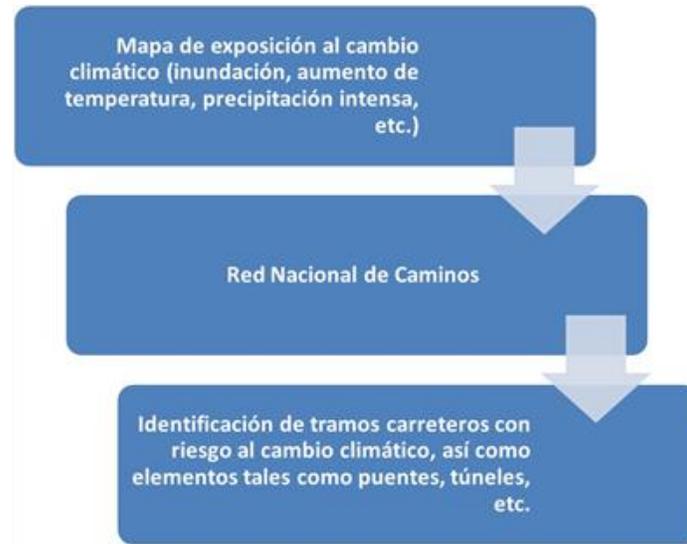
**Riesgo.** El riesgo a menudo se representa como probabilidad o posibilidad de ocurrencia de eventos o tendencias peligrosos multiplicados por los impactos si ocurren estos eventos o tendencias (IPCC, 2014). El riesgo a menudo se expresa en términos de una combinación de las consecuencias de un evento o un cambio en las circunstancias, y la probabilidad de ocurrencia asociada (ISO, 2009).

El objetivo de este apartado es identificar los elementos que, solos o en combinación, tienen el potencial de generar riesgo, y que al materializarse pueden generar consecuencias perjudiciales para el sistema de carreteras.

En este capítulo se describe como hacer la identificación de riesgos, basado en dos enfoques, el primero para analizar toda la red que pudiera estar en riesgo y el segundo en identificar los sitios de riesgo en los tramos carreteros previamente analizados.

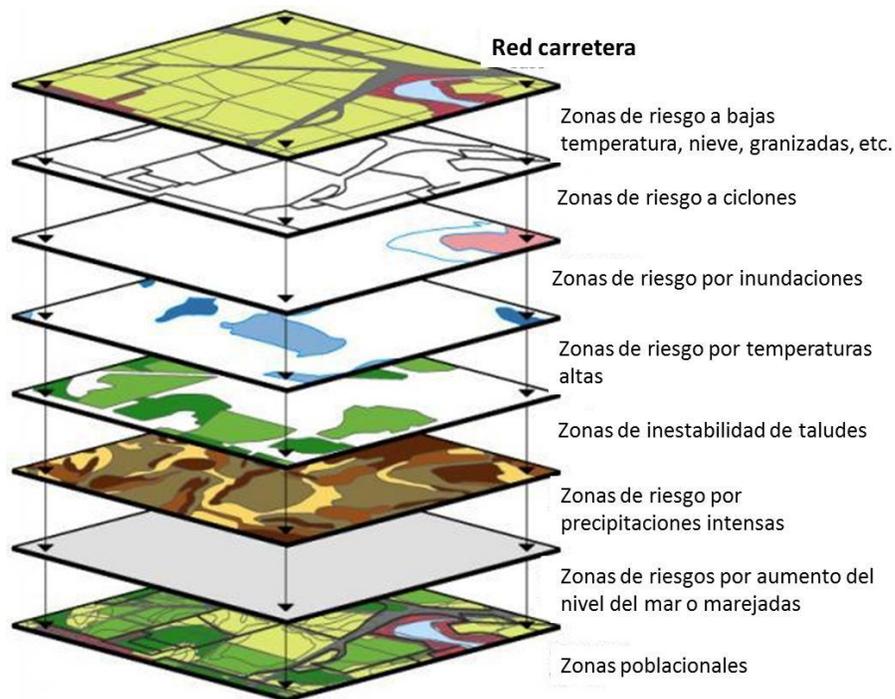
Para analizar una red carretera se utiliza un enfoque de arriba hacia abajo, mediante la técnica de superposición de capas de información georreferenciada, donde los mapas de exposición al cambio climático ya sea general o por variables climáticas, tales como inundación, precipitación intensa, aumento de temperatura, etc., se superponga sobre la red de carreteras para identificar los activos que podrían ser vulnerables ante los diferentes fenómenos asociados al cambio climático.

La figura 3.1 muestra el enfoque metodológico de arriba hacia abajo, mientras que la figura 3.2 muestra la superposición de capas de información para México.



**Figura 3.1 Enfoque metodológico para la identificación de riesgos de arriba hacia abajo**

Fuente: Elaboración propia.



**Figura 3.2 Esquema de superposición de capas de información referenciada geográficamente para identificación de sitios para la adaptación**

Fuente: Adaptado de CASA, 2013.

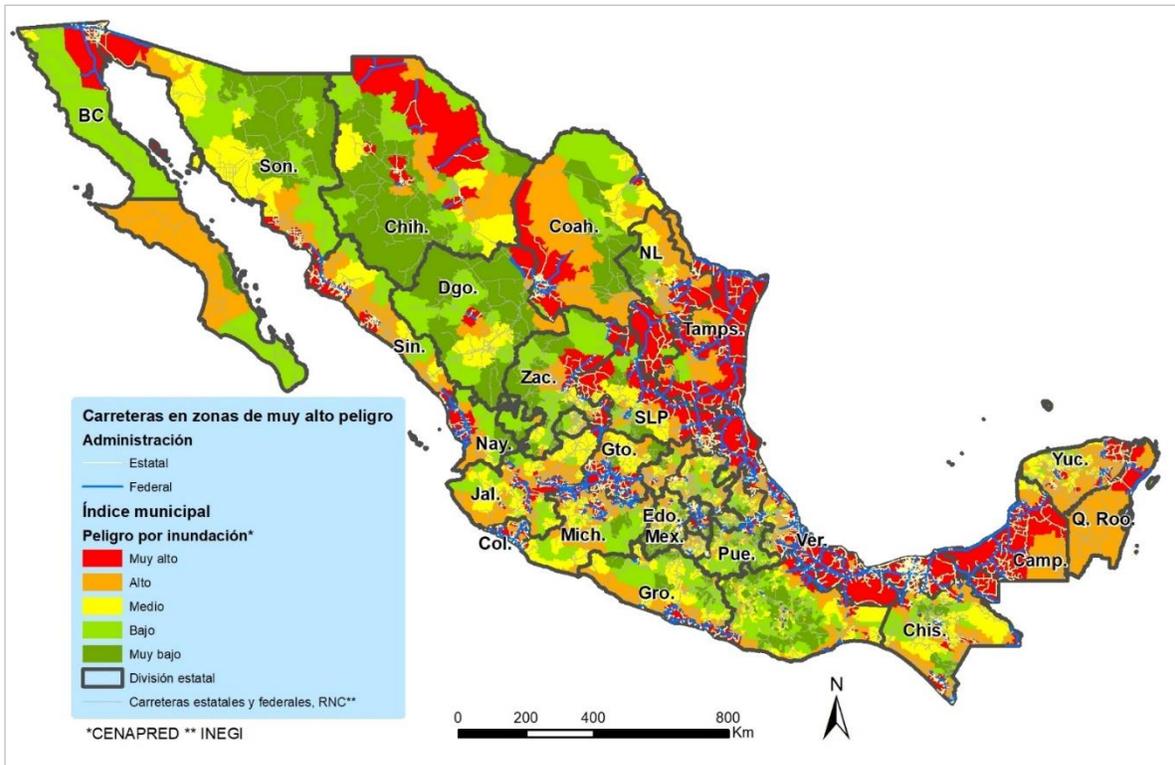
Si se desea identificar los sitios de riesgo se recomienda utilizar las capas de información de los índices de peligro de CENAPRED.

Por ejemplo, si se conocen las zonas o redes carreteras expuestas a inundaciones se puede usar el índice de peligro por inundación a escala municipal, el cual fue calculado por el CENAPRED en el año 2016.

Las inundaciones están asociadas con diversos factores como: 1) desbordamiento de ríos; 2) inundaciones súbitas, 3) mareas altas asociadas con huracanes, y 4) rompimiento de estructuras de control.

El índice propuesto se basa en un “Índice Topográfico”. El índice topográfico es definido como el cociente entre acumulación de flujo (área de drenaje parcial “aguas arriba” para un punto en particular) y la tangente de la pendiente.

La figura 3.3 muestra a escala municipal el índice de peligro de inundación, determinado por el CENAPRED, superpuesto a la red de carreteras del país. Las zonas del país en rojo indica un nivel alto de peligro a inundaciones. Dentro de esas zonas, se cuantificaron los tramos carreteros expuestos a inundaciones.



**Figura 3.3 Mapa de peligro de inundación en la red de carreteras en México**

Fuente: Gradilla et al (2018), con información de CENAPRED e INEGI.

En la tabla 3.1 se presenta la longitud total de las carreteras (km-carril) que se encuentran en las zonas de muy alto peligro y en la tabla 3.2 el número de puentes que están localizados en las carreteras con dicho nivel de peligro.

**Tabla 3.1 Longitud expuesta de carreteras al peligro de inundación con nivel muy alto por entidad federativa**

Entidad federativa	Estatad (km-carril)	Federal (km-carril)	Total (km-carril)
Veracruz	7,963	6,291	14,254
Tamaulipas	4,464	3,665	8,129
Campeche	3,949	2,330	6,279
San Luis Potosí	3,687	2,245	5,933
Guanajuato	2,865	2,412	5,277
Nuevo León	3,109	1,615	4,724
Michoacán	1,748	1,735	3,483
Sinaloa	2,539	941	3,480
Chihuahua	1,989	1,239	3,228
Chiapas	2,268	874	3,143
Jalisco	1,661	1,419	3,081
Coahuila	1,834	919	2,754
Zacatecas	1,510	966	2,476
Baja California	1,228	1,042	2,270
Estado de México	1,351	888	2,240
Colima	992	1,087	2,079
Sonora	1,636	435	2,071
Yucatán	1,440	488	1,927
Oaxaca	776	995	1,771
Guerrero	1,006	751	1,757
Nayarit	747	661	1,408
Quintana Roo	625	677	1,302
Puebla	633	502	1,135
Durango	274	520	793
Hidalgo	453	70	523
Morelos	282	86	368
Querétaro	106	70	175
Tlaxcala	28	60	88
<b>Total (km-carril)</b>	<b>51,163</b>	<b>34,984</b>	<b>86,146</b>

Fuente: Gradilla et al (2018).

**Tabla 3.3. Número de puentes expuestos al peligro de inundación con nivel muy alto por entidad federativa**

Entidad federativa	No. de puentes
Veracruz	569
Tamaulipas	396
Michoacán	219
Chiapas	205
Guanajuato	179
San Luis Potosí	177
Sinaloa	173
Campeche	156
Chihuahua	131
Baja California	93

Oaxaca	92
Sonora	88
Nayarit	85
Guerrero	75
Nuevo León	64
Colima	59
Estado de México	56
Jalisco	53
Coahuila	50
Zacatecas	29
Puebla	24
Durango	23
Quintana Roo	11
Hidalgo	9
Querétaro	6
Morelos	5
Tlaxcala	5
Yucatán	1
<b>Total</b>	<b>3,033</b>

Fuente: Gradilla et al (2018).

Cada tramo carretero o puente identificado, requiere un análisis más fino para determinar el grado de vulnerabilidad y con ello tomar la decisión de realizar estrategias de adaptación.

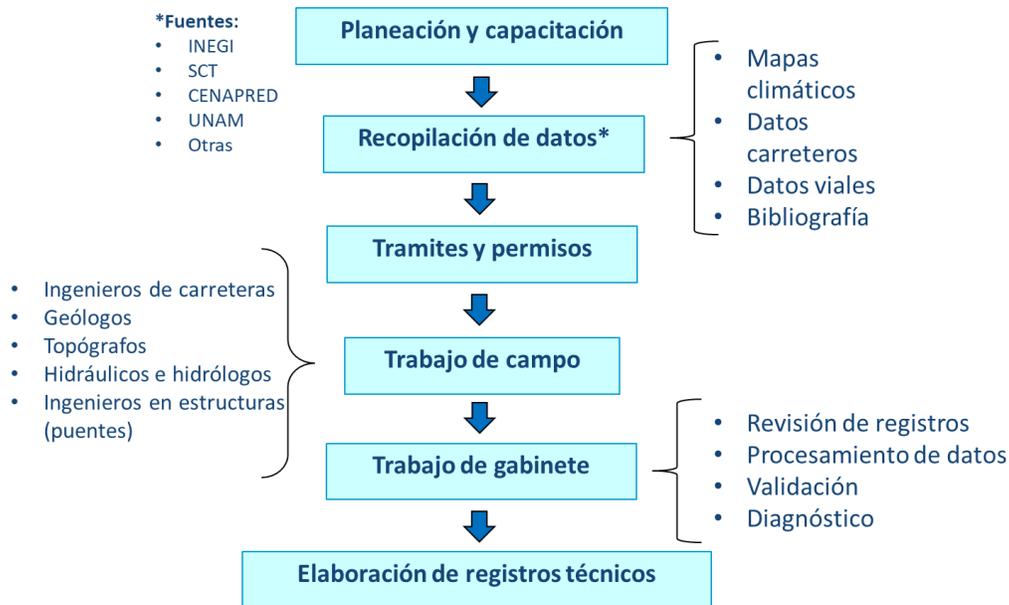
Este proceso de arriba hacia abajo es posible hacerlo también para índices de peligro, tales como ondas de calor, etc. Así como para mapas de exposición de lluvias intensas, inundaciones, marejadas, deslizamientos, aluviones, avenidas torrenciales, vendavales, granizadas, ondas frías, heladas, nevadas, neblinas, tempestades, sequía, incendios forestales, etc. Y también para escenarios futuros de temperatura, precipitación y aumento del nivel del mar.

Una vez identificado las áreas vulnerables, y cuantificado los tramos carreteros, se requiere trabajo de campo para evaluar la vulnerabilidad de los activos, para ello se utiliza un enfoque de abajo hacia arriba.

La Dirección General de Servicios Técnicos (2016), desarrolló un procedimiento para la identificación de activos en riesgo asociados al cambio climático.

El proceso para la identificación de activos fue realizado a través de trabajos de campo y gabinete, los cuales mediante recorridos en toda la red de carreteras de cada estado se identificaron puntos de riesgo en diversos elementos que conforman la carretera, tales como puentes, alcantarillas, taludes de corte o terraplén, pavimentos, etc. Cada sitio identificado fue georreferenciado y mapeado sobre la red de carreteras para su localización y evaluación.

La figura 3.4, muestra un diagrama del proceso realizado para identificar, evaluar y compilar todos los sitios de riesgo de cada red de carreteras analizada.



**Figura 3.4 Proceso para la selección de sitios de riesgo**

Fuente: Elaboración propia con información de la DGST, 2016

La recopilación del trabajo en campo se basó en el criterio experto del grupo de especialista que recorrieron físicamente la red de carreteras. Este trabajo debe acotarse únicamente a las zonas vulnerables identificadas en el enfoque de arriba hacia abajo.

La información de los sitios de riesgos fue registrada en el formato de la figura 3.5. Como se puede observar la evaluación se basa en criterios cualitativos basados en el criterio experto de la brigada de campo.

El combinar la experiencia de la brigada de campo con los ingenieros locales es muy importante, pues el conocimiento de los segundos permite facilitar la identificación de riesgos y su valoración, ya que cuenta con información histórica de eventos anteriores donde se han registrado afectaciones.

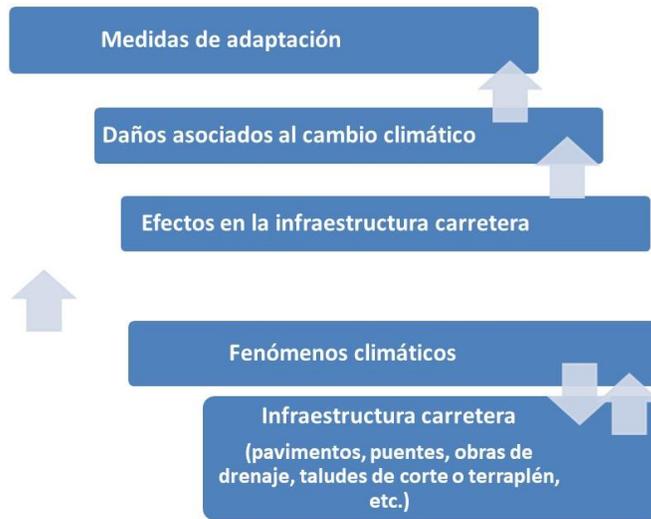
El grupo que identificará los riesgos debe conocer los riesgos potenciales en la infraestructura carretera asociados al cambio climático, por lo que requieren un entrenamiento previo sobre herramientas para la identificación de riesgos. Para facilitar el proceso de capacitación, en el presente Marco se construyeron diversas redes causa-efecto mediante las cuales los responsables del proyecto de adaptación podrán apoyarse para la identificación de riesgos e incluso proponer las posibles acciones de adaptación. El enfoque de las redes causa efecto se puede observar en la figura 3.6.

DESCRIPCIÓN DEL ACTIVO	ESTADO FÍSICO		AFECTACIÓN POR EVENTOS ANTERIORES		EVENTO CLIMATOLÓGICO QUE PROVOCÓ AFECTACIÓN (ESPECIFICAR)	ÁMBITO		
	SATISFACTORIO	NO SATISFACTORIO	SÍ	NO		LOCAL	REGIONAL	INTERACCIÓN DE ASPECTOS MÚLTIPLES
Puente de concreto, con una longitud aproximada de 66 m, con traves tipo I y columnas rectangulares de concreto.	✓			✓	Lluvias y escurrimientos.	✓		
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA: Puente de concreto reforzado que presenta acumulación de material aluvial y vegetación en el cauce del río, lo cual provoca una disminución de la sección hidráulica, existen zonas con estancamiento de agua.								
POSIBLE SOLUCIÓN: Limpieza general del cauce para aumentar su sección hidráulica.								
COMENTARIOS: Se observa una vialidad secundaria de acceso bajo el puente.					Exposición: <u>Alta</u> Sensibilidad: <u>Baja</u> Posibilidad: <u>Muy probable</u> *Preclasificación con base en la visita de reconocimiento del sitio.			

ELABORÓ: \_\_\_\_\_ REVISÓ: \_\_\_\_\_ SITIO IDENTIFICADO: \_\_\_\_\_ 01

**Figura 3.5 Formato para el registro en campo**

Fuente: DGST, 2016



**Figura 3.6 Enfoque de abajo hacia arriba para la identificación de riesgos asociados al cambio climático**

Fuente: Elaboración propia.

En las figuras 3.7-3.22 se podrán observar las diferentes redes causa-efecto construidas para la identificación de impactos asociados a fenómenos relacionados con el cambio climático, tales como inundaciones, inundaciones costeras, altas temperaturas, precipitación intensa, vientos fuertes, marejadas, avenidas torrenciales y ondas frías.

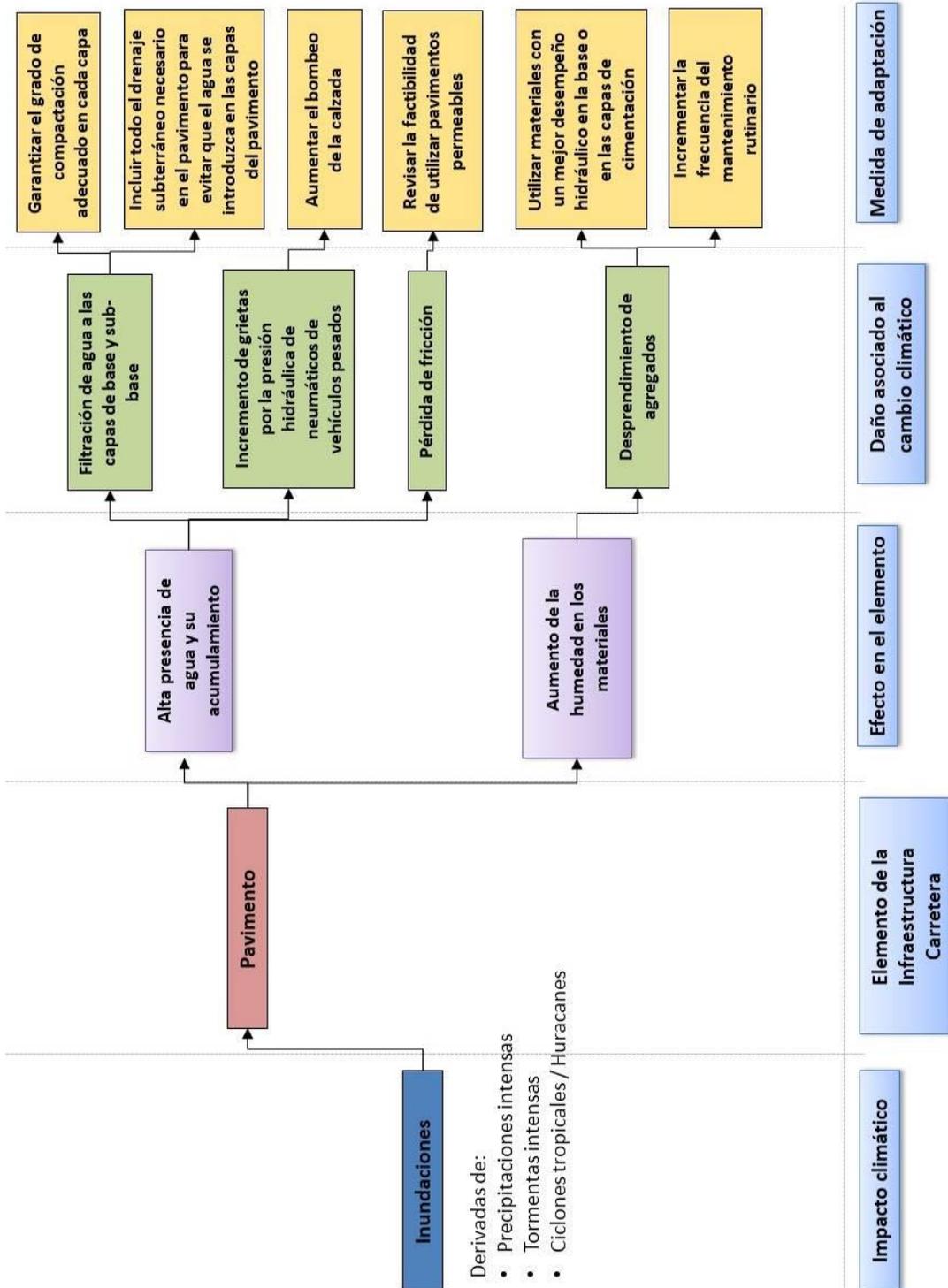


Figura 3.7 Red causa-efecto, inundaciones y pavimentos

Fuente: Elaboración propia.

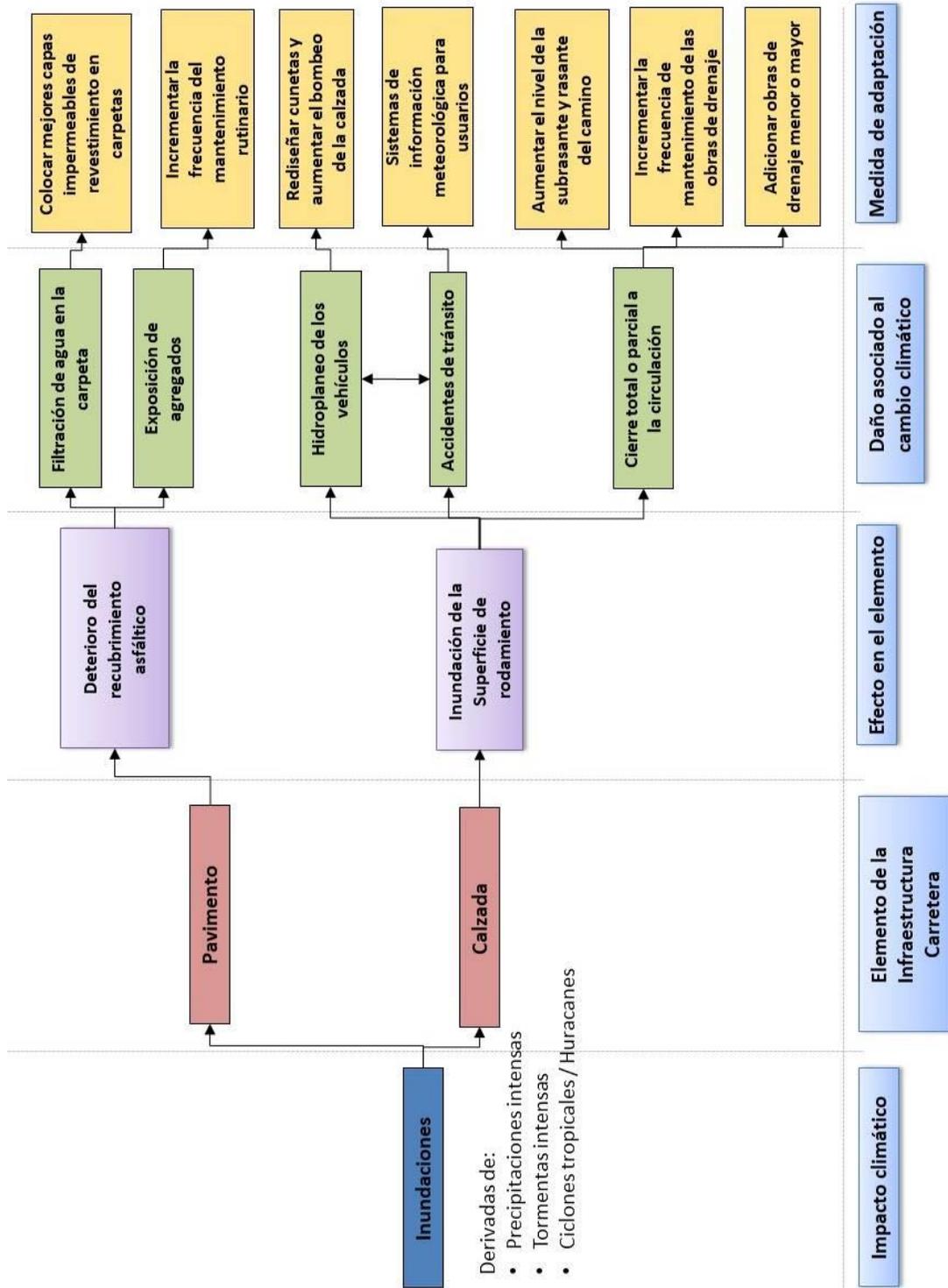


Figura 3.8 Red causa-efecto, inundaciones y, pavimentos y calzadas

Fuente: Elaboración propia.

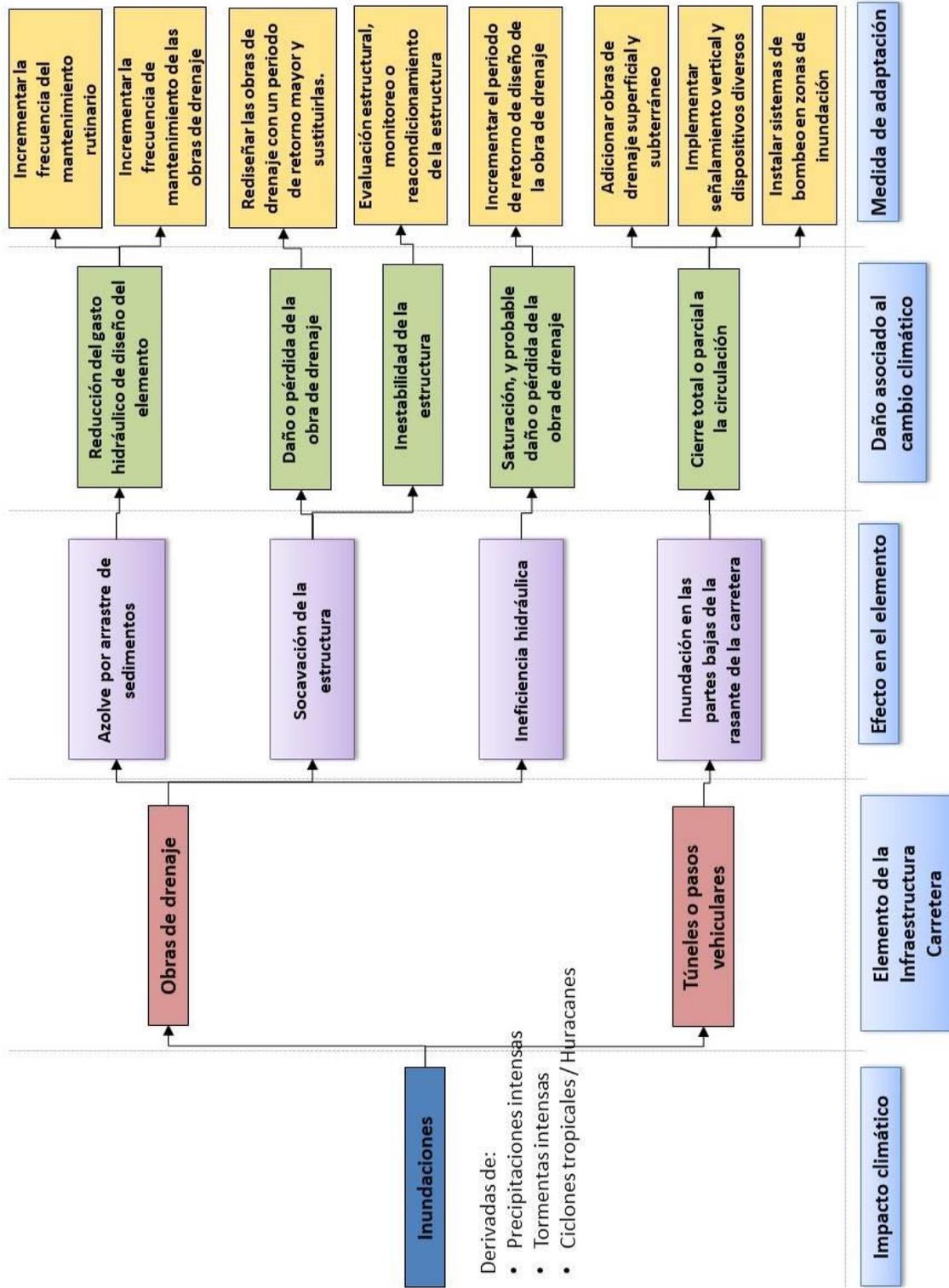


Figura 3.9 Red causa-efecto, inundaciones y, obras de drenaje y túneles

Fuente: Elaboración propia.

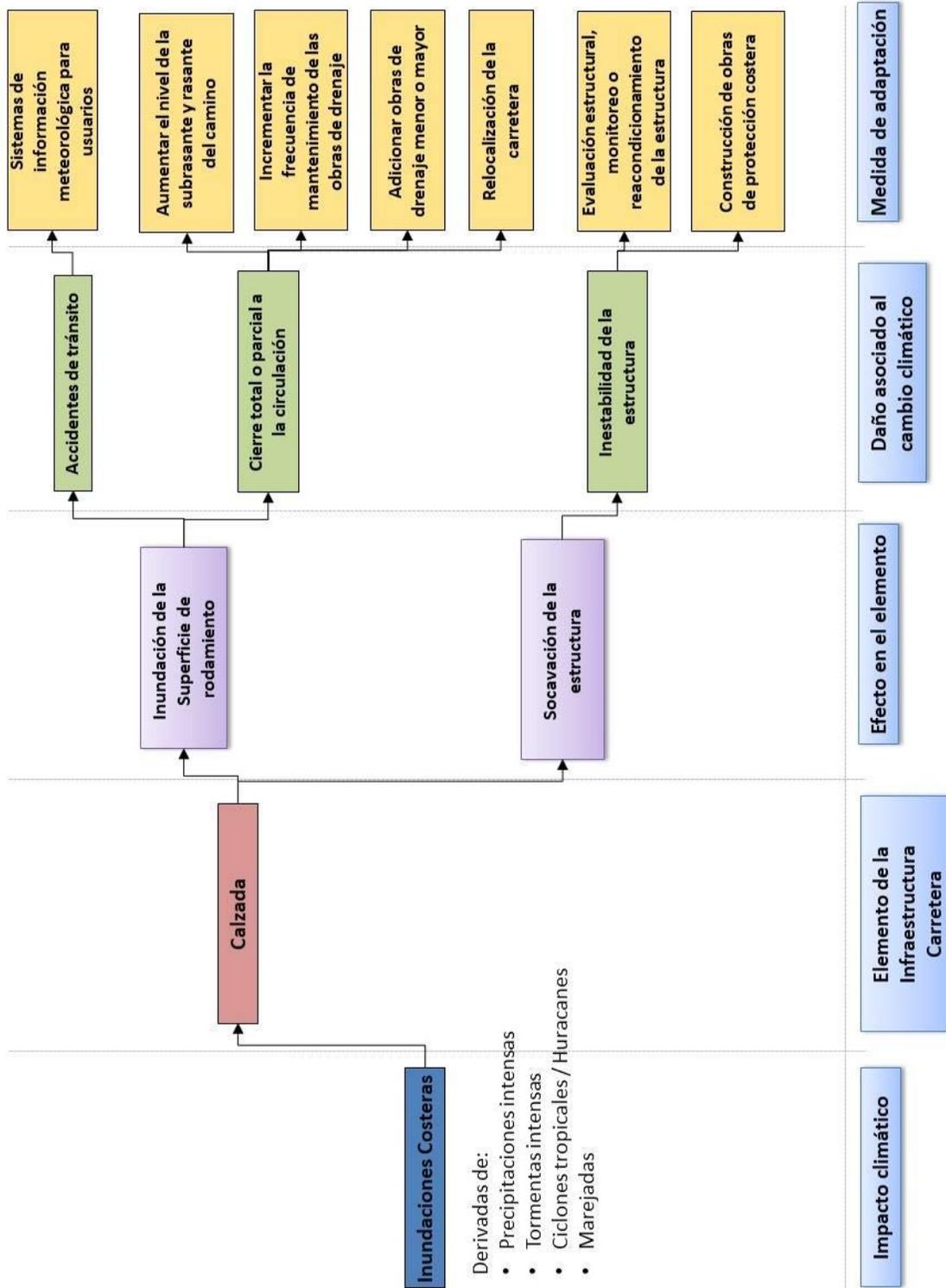


Figura 3.10 Red causa-efecto, inundaciones costeras y calzada

Fuente: Elaboración propia.

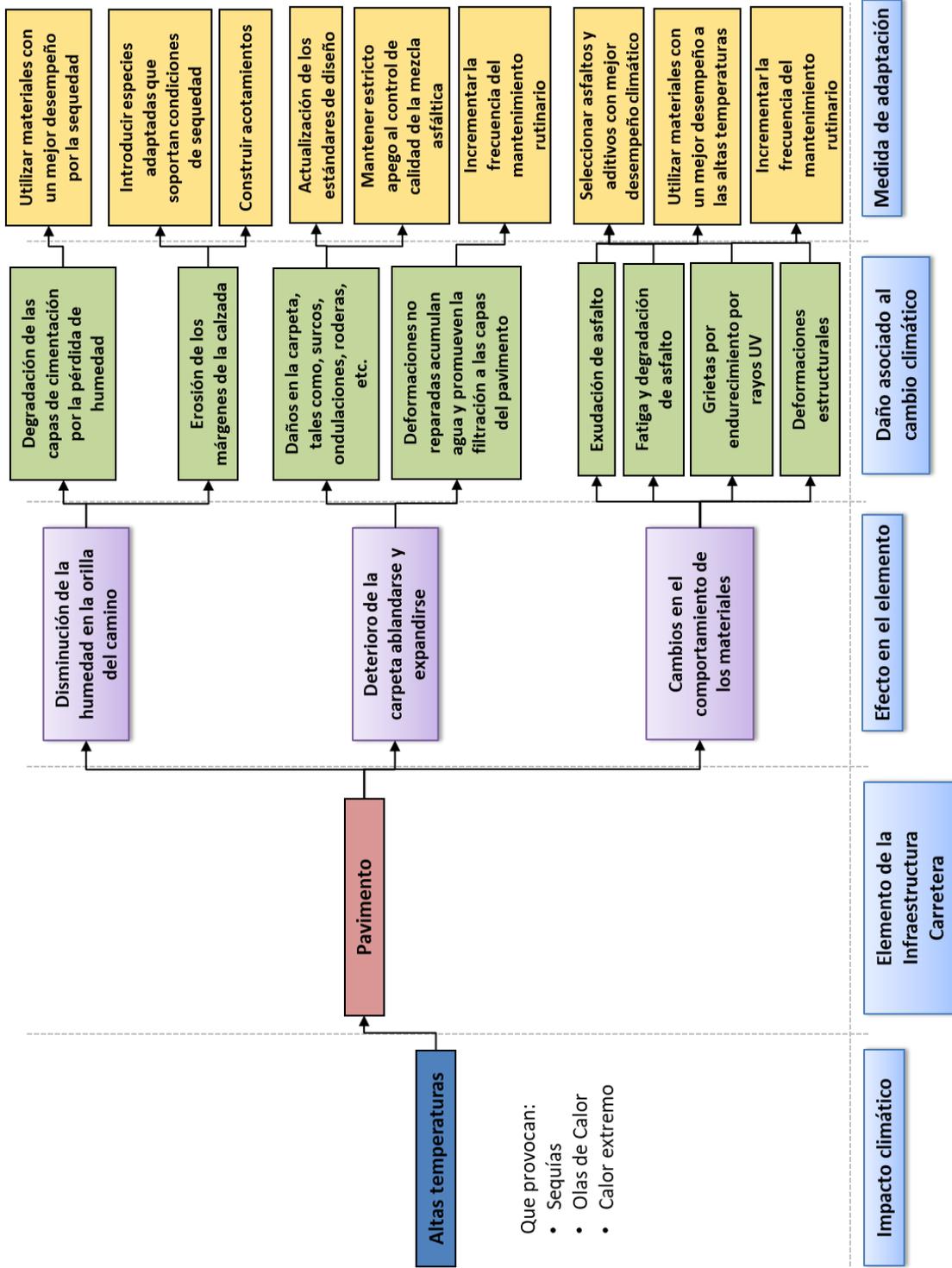


Figura 3.11 Red causa-efecto, altas temperaturas y pavimentos

Fuente: Elaboración propia.

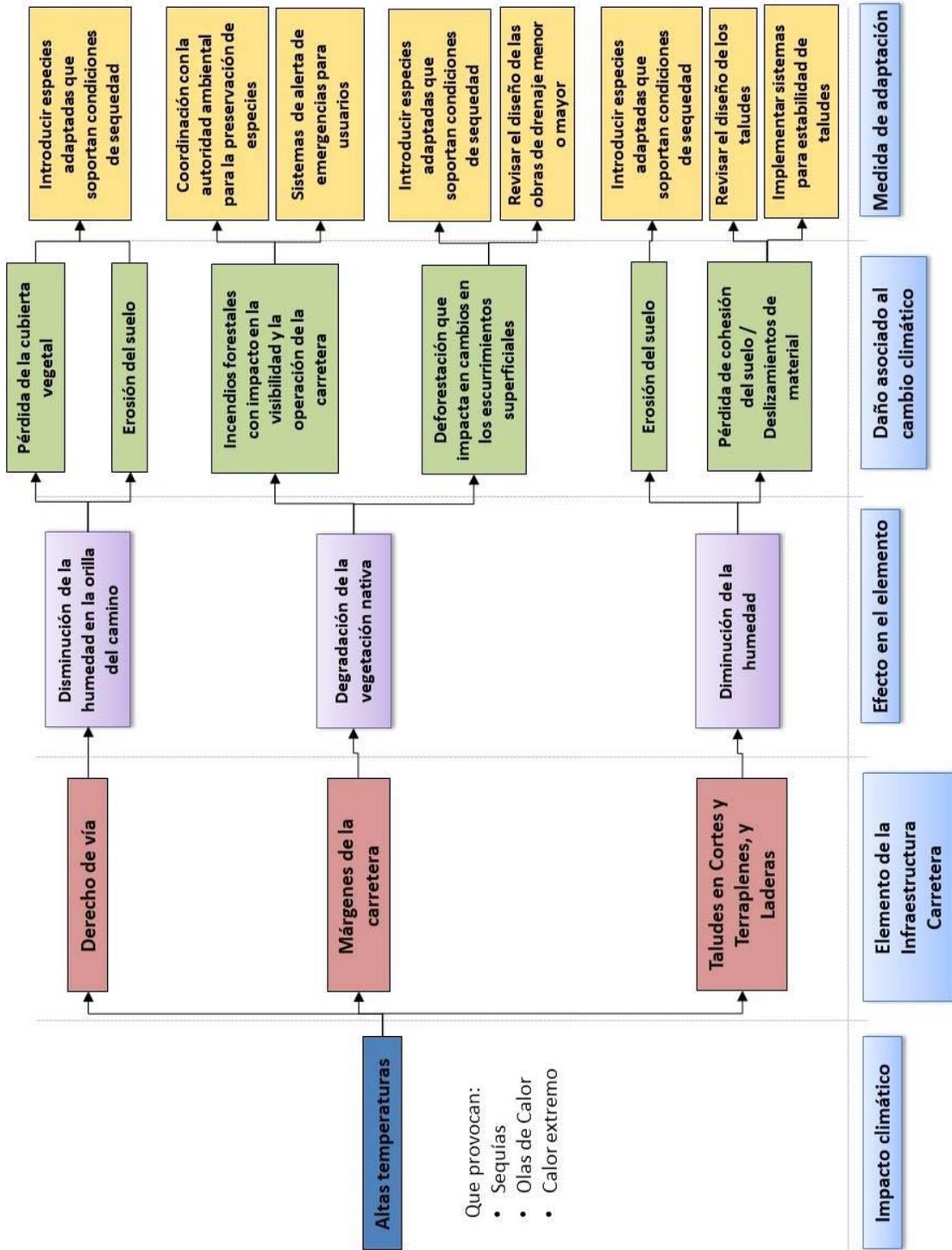


Figura 3.12 Red causa-efecto, altas temperaturas y otros elementos

Fuente: Elaboración propia.

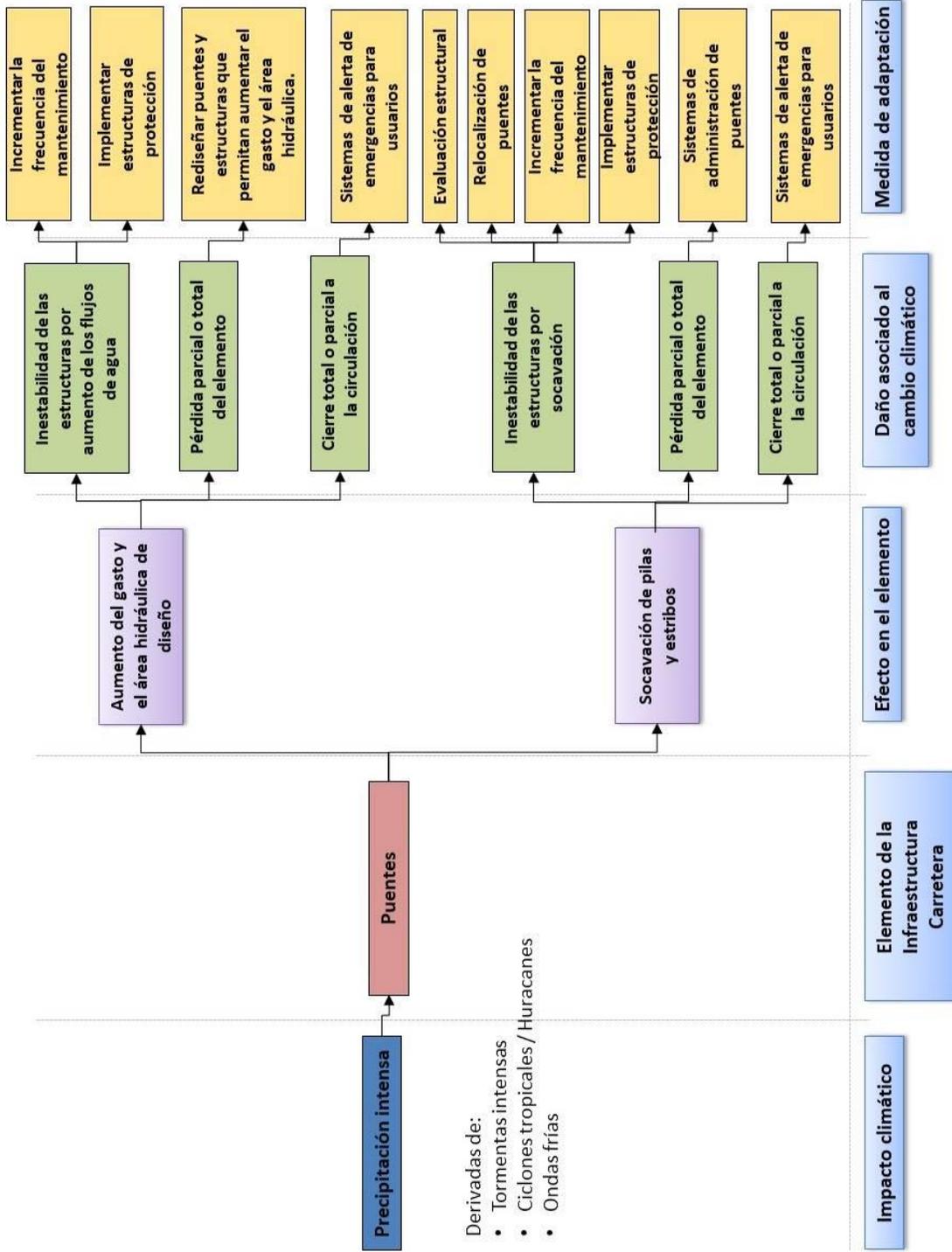


Figura 3.13 Red causa-efecto, precipitación intensa y puentes

Fuente: Elaboración propia.

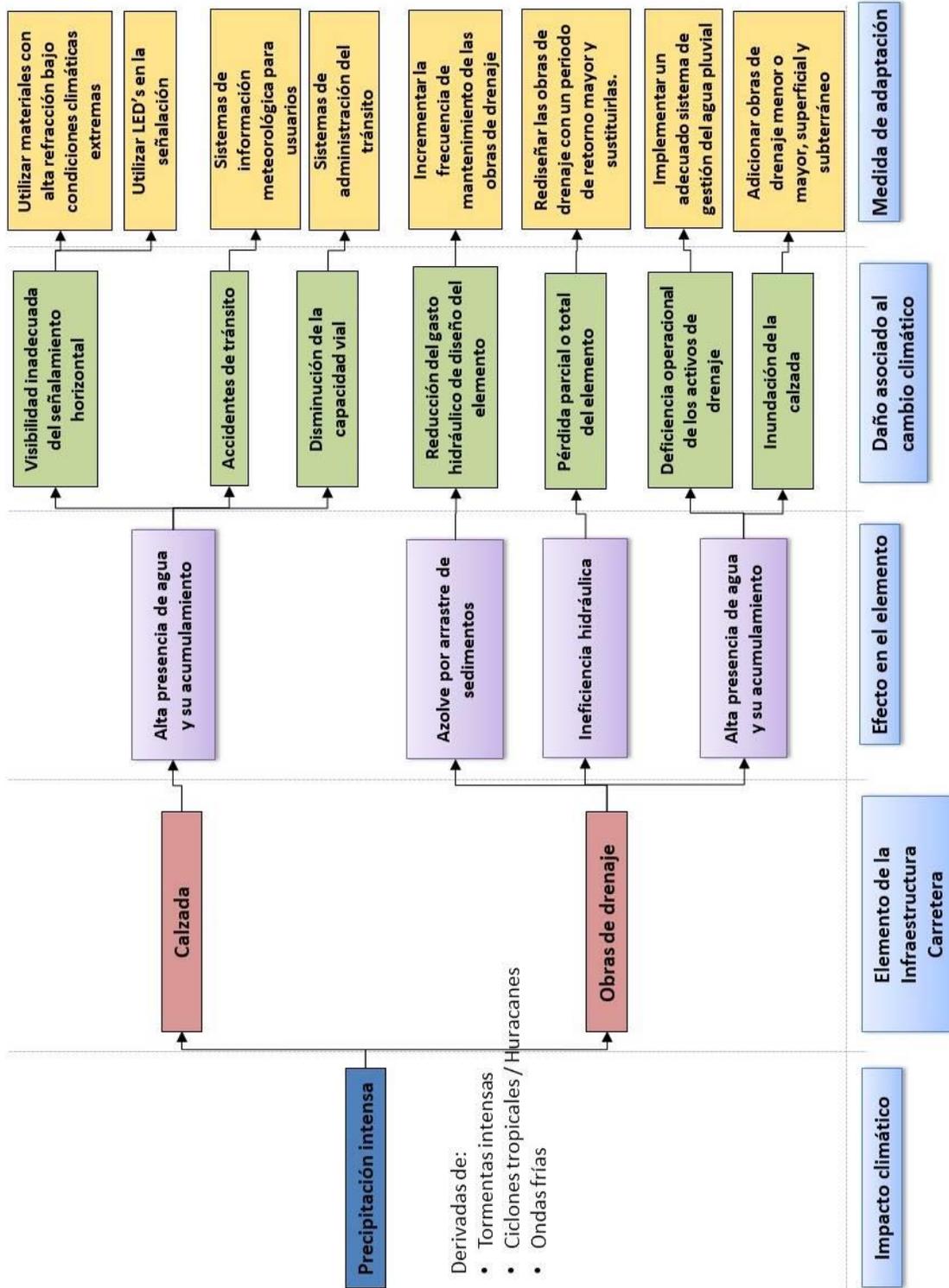


Figura 3.14 Red causa-efecto, precipitación intensa y, calzada y obras

Fuente: Elaboración propia.

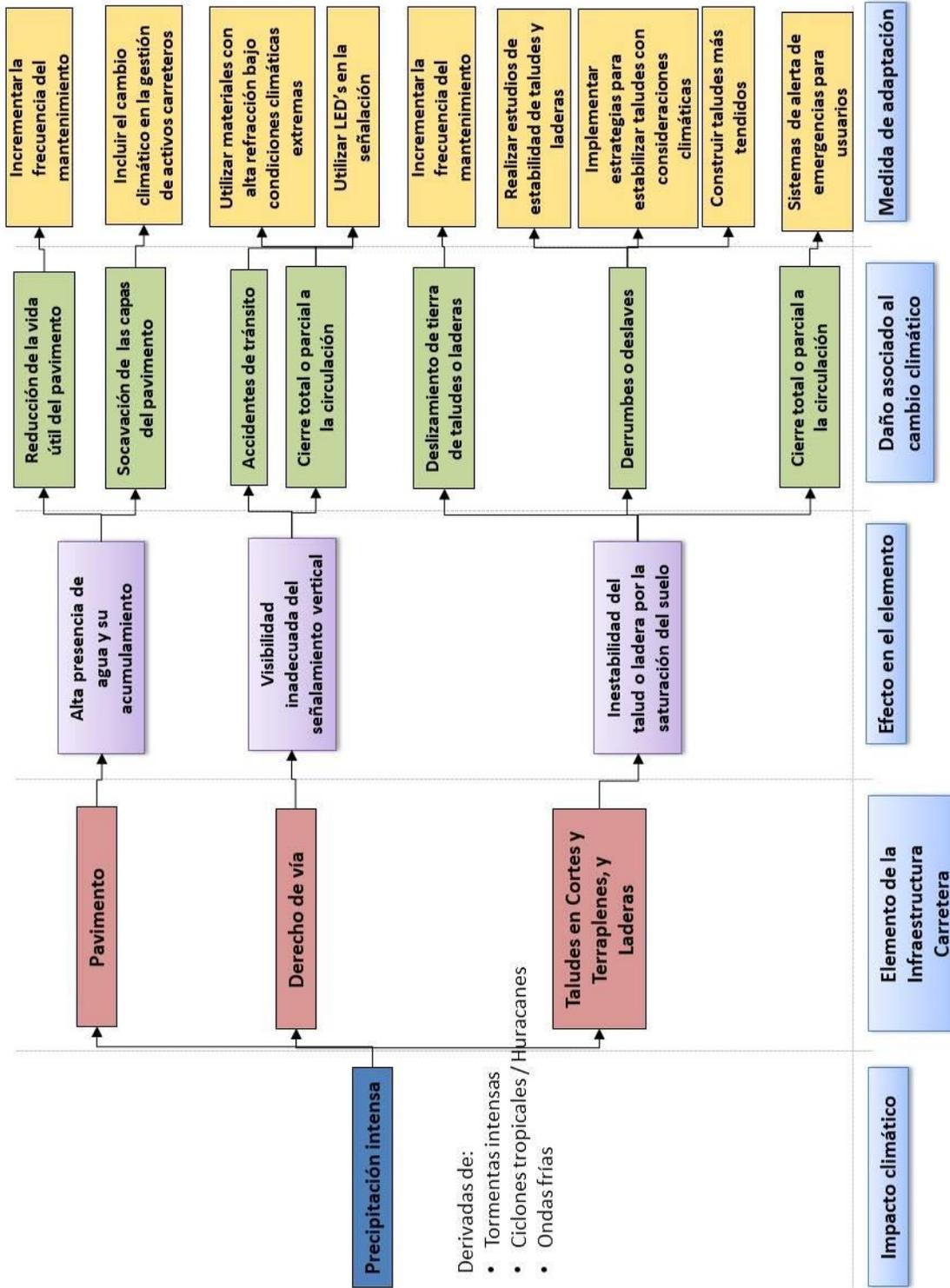


Figura 3.15 Red causa-efecto, precipitación intensa y otros elementos

Fuente: Elaboración propia.

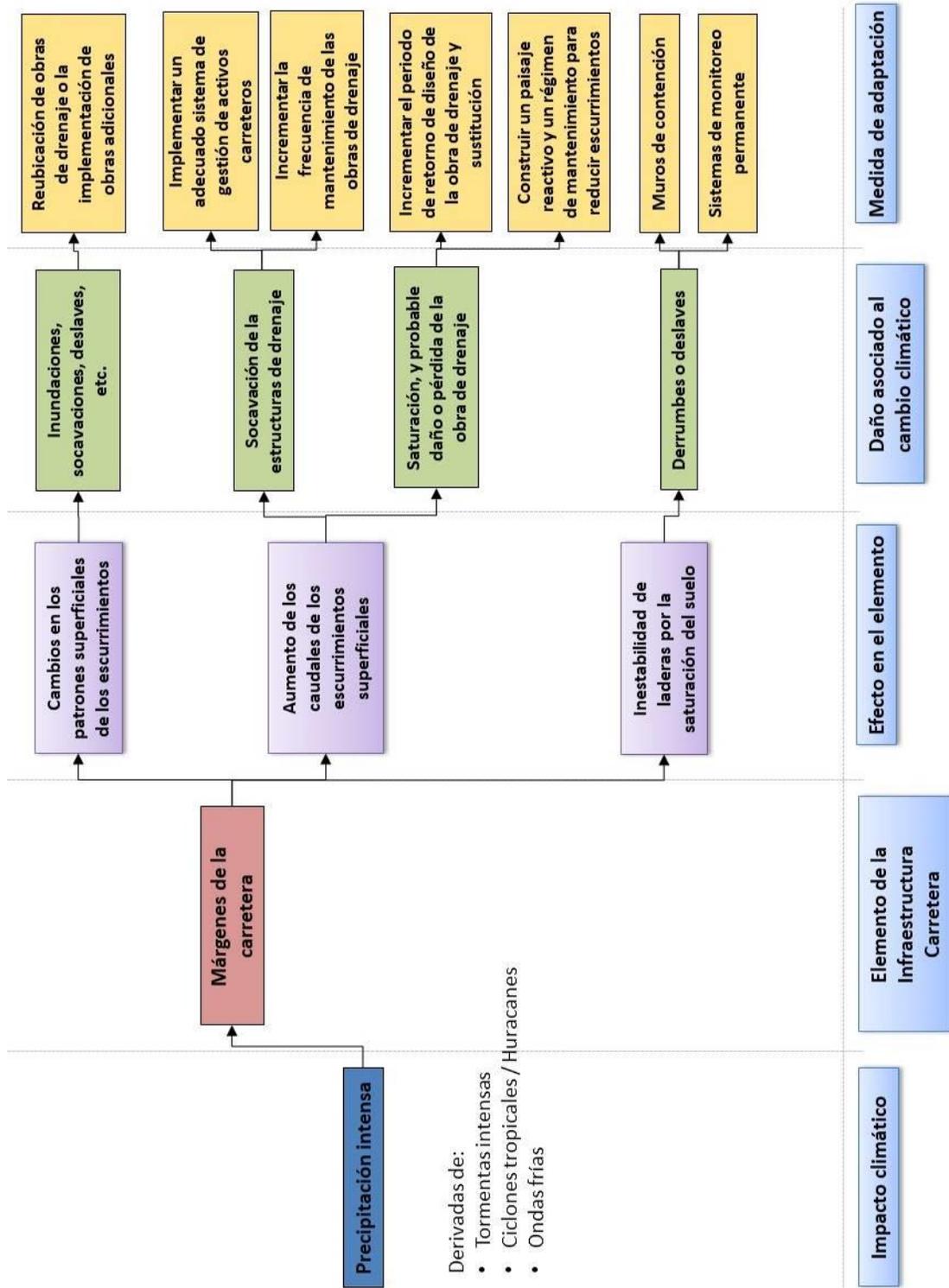


Figura 3.16 Red causa-efecto, precipitación intensa y márgenes

Fuente: Elaboración propia.

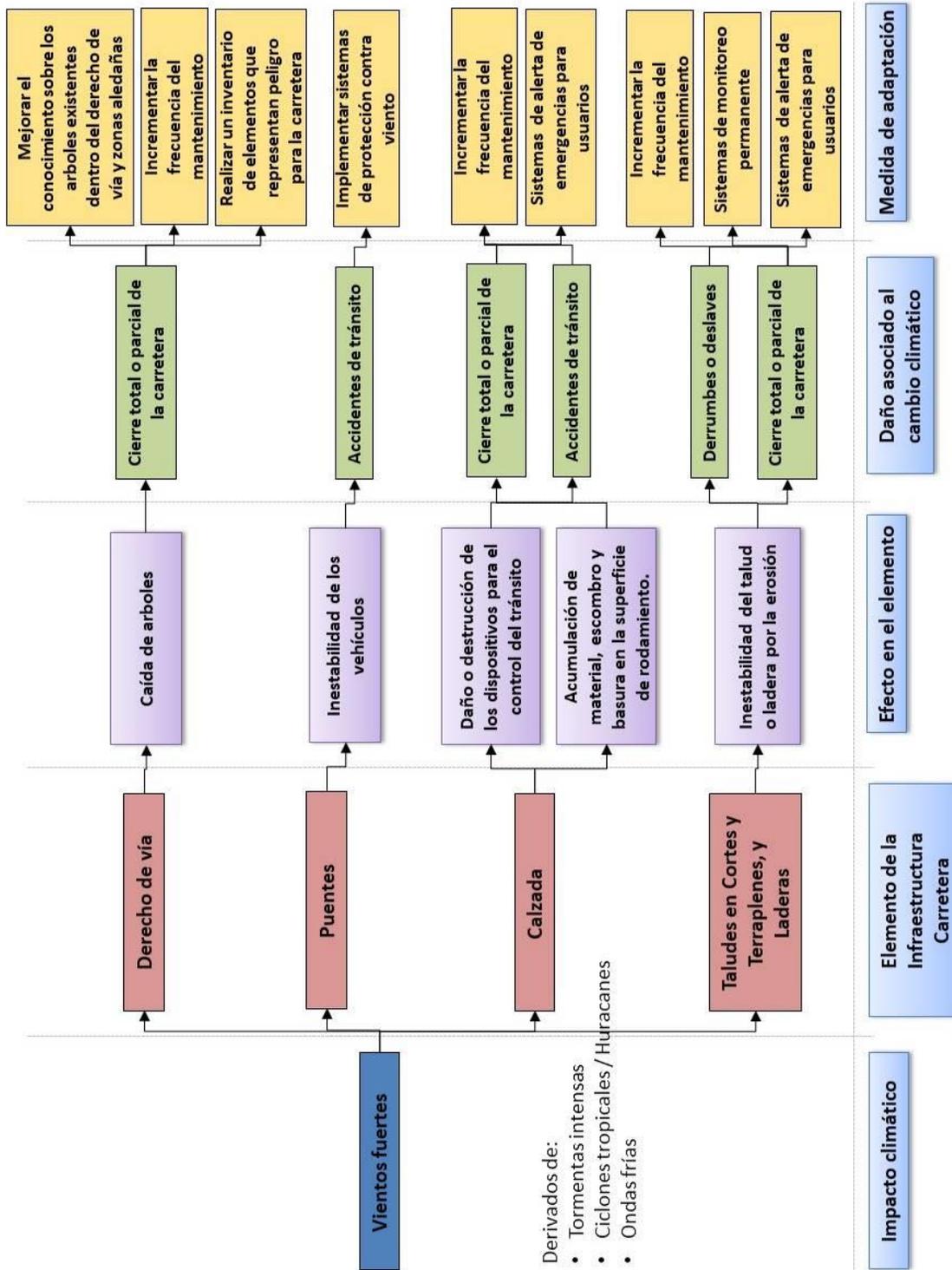


Figura 3.17 Red causa-efecto, vientos fuertes y varios elementos

Fuente: Elaboración propia.

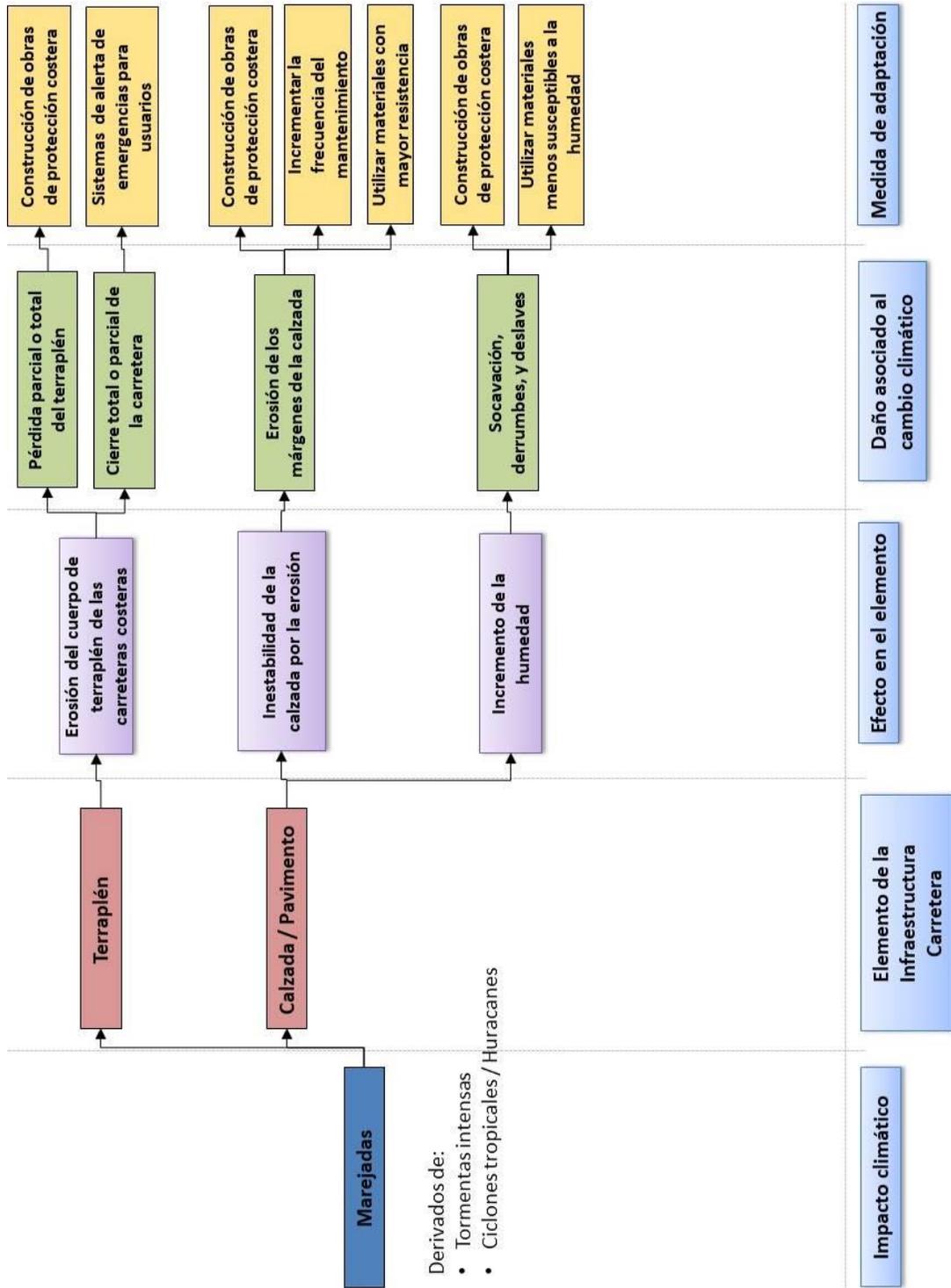


Figura 3.18 Red causa-efecto, marejadas y diversos elementos

Fuente: Elaboración propia.

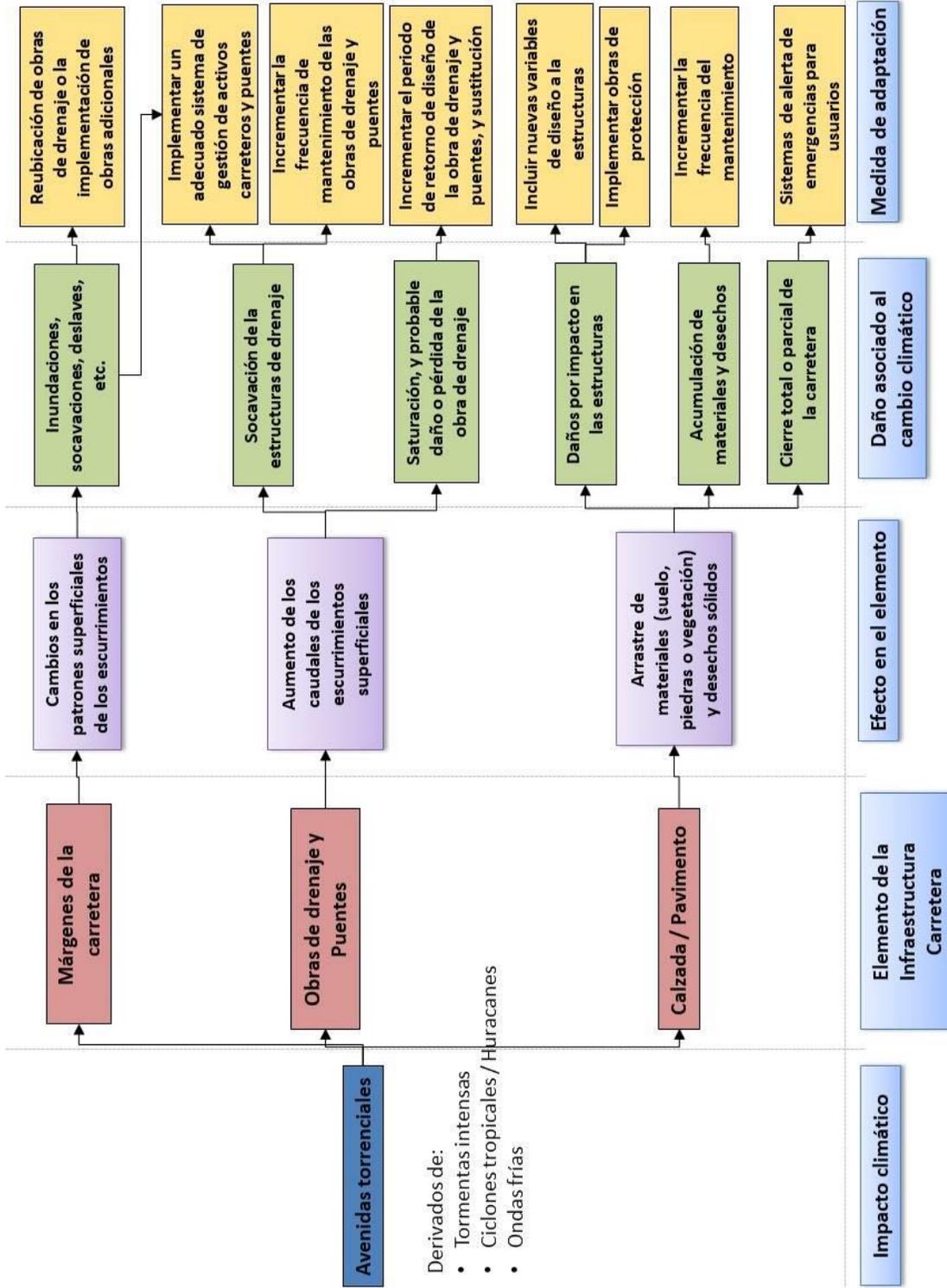


Figura 3.19 Red causa-efecto, avenidas torrenciales y varios elementos

Fuente: Elaboración propia.

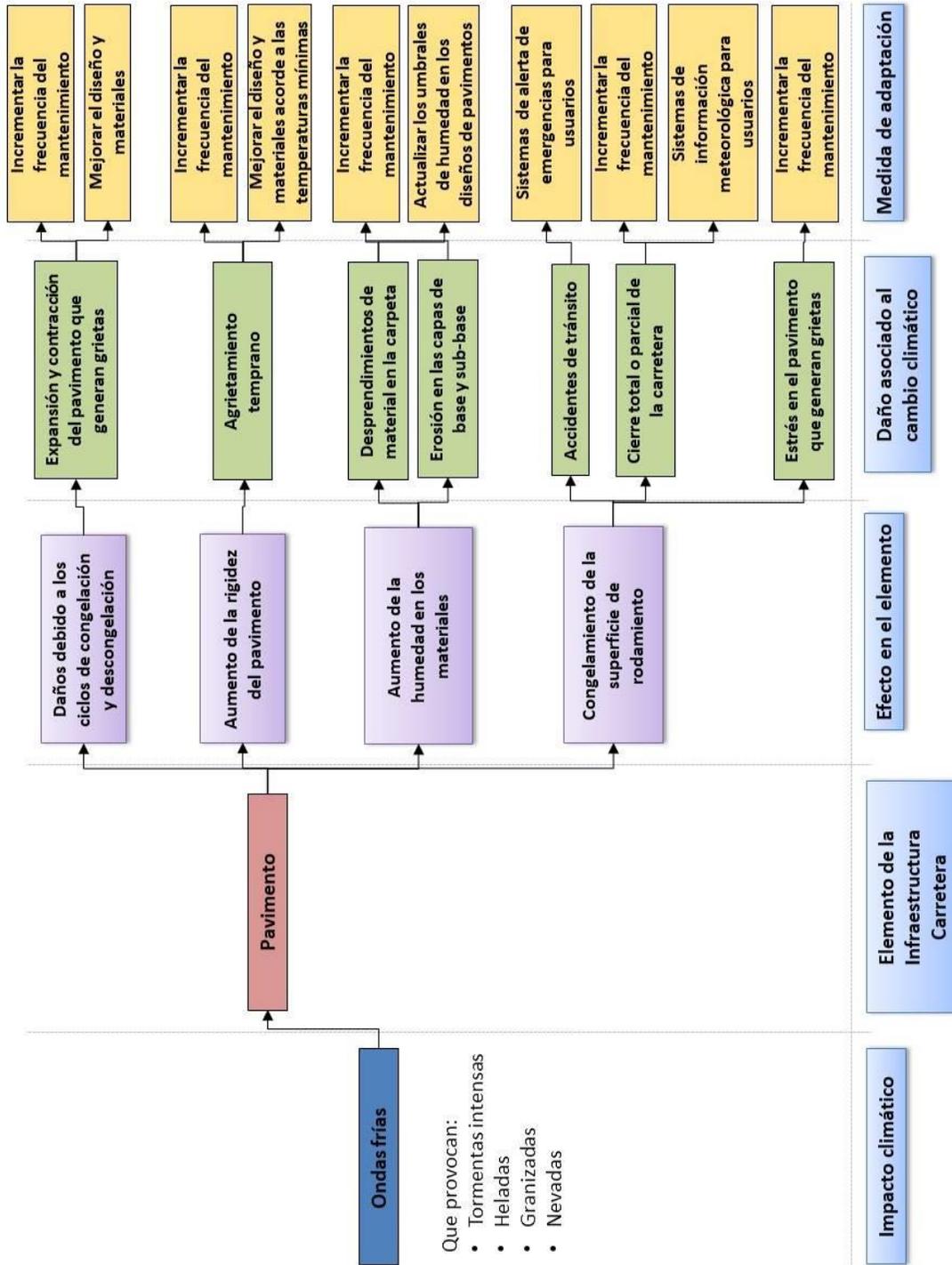


Figura 3.20 Red causa-efecto, ondas frías y pavimentos

Fuente: Elaboración propia.

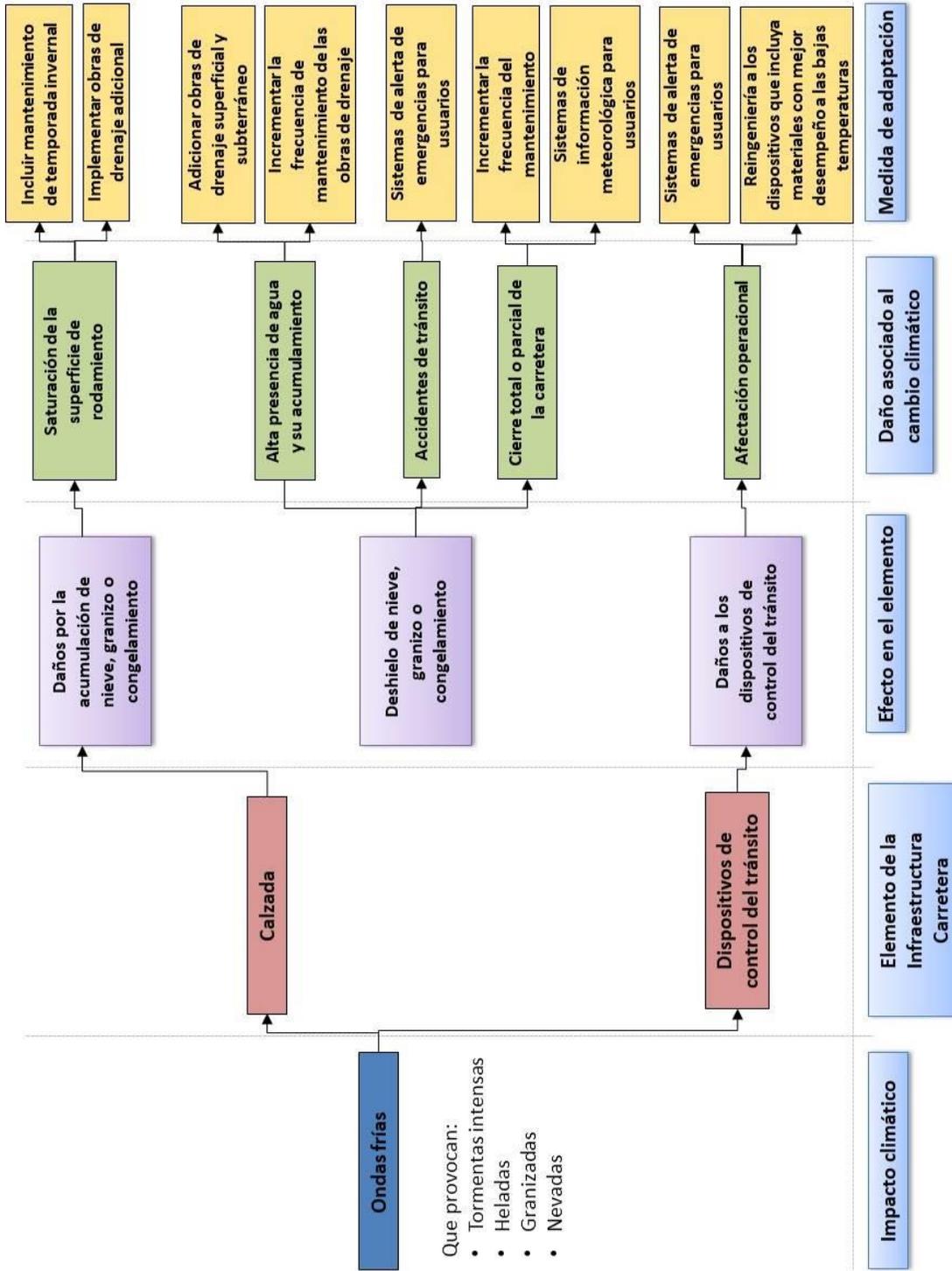


Figura 3.21 Red causa-efecto, ondas frías y diversos elementos

Fuente: Elaboración propia.

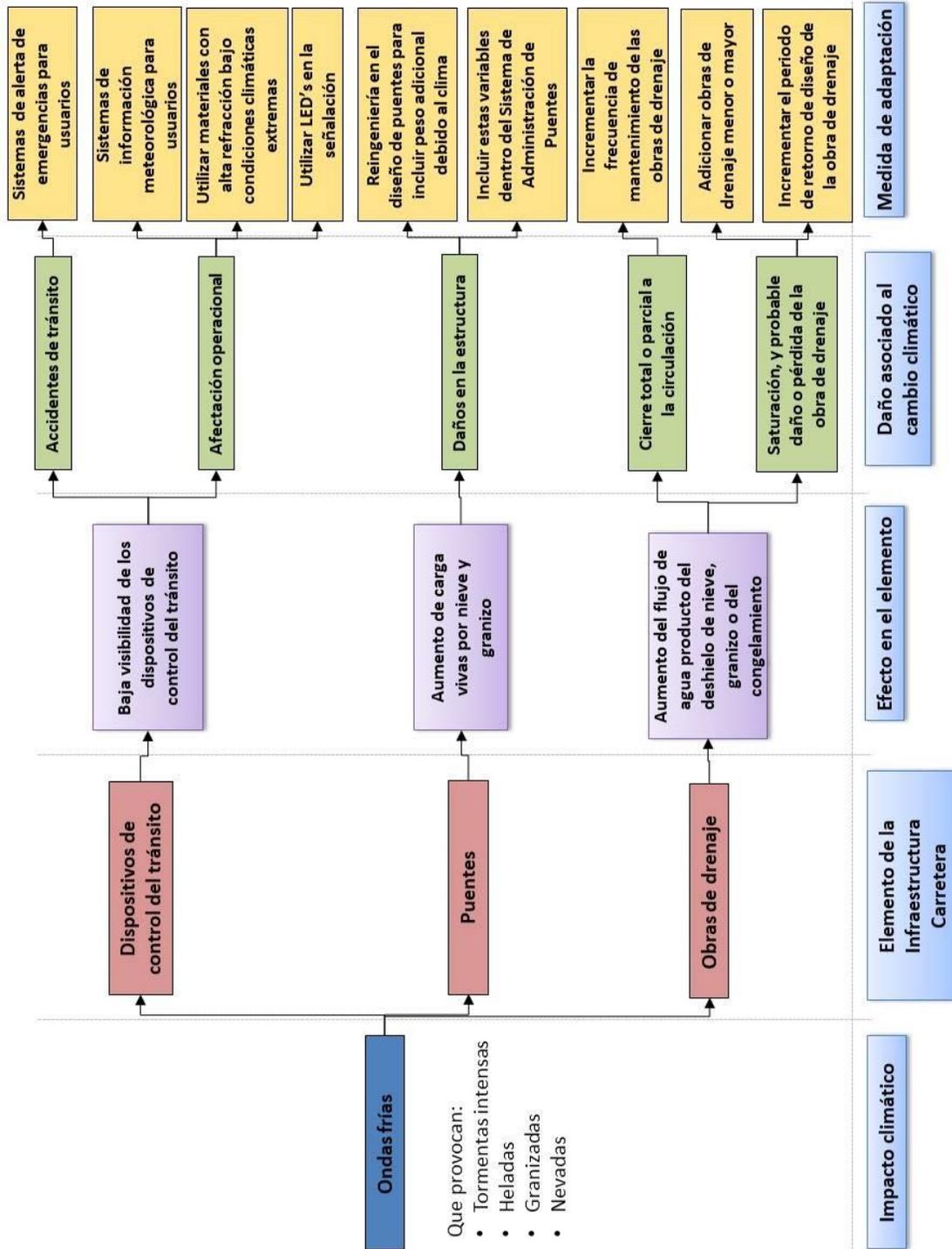


Figura 3.22 Red causa-efecto, ondas frías y diversos elementos

Fuente: Elaboración propia.

Con el apoyo de las redes causa-efecto anteriores podemos identificar sitios de riesgo asociados al cambio climático. En la figura 3.23 se muestra un par de ejemplos de sitio de riesgo identificados.



**Figura 3.23 Ejemplo de sitios de riesgo identificados en carreteras federales en México**

Fuente: DGST, 2016.

Una vez identificado los riesgos se deberá generar una base de datos con toda la información necesaria, mediante la cual se puede comenzar el análisis de vulnerabilidad de los riesgos. Algunos de los datos e información a recabar se muestran en la tabla 3.4.

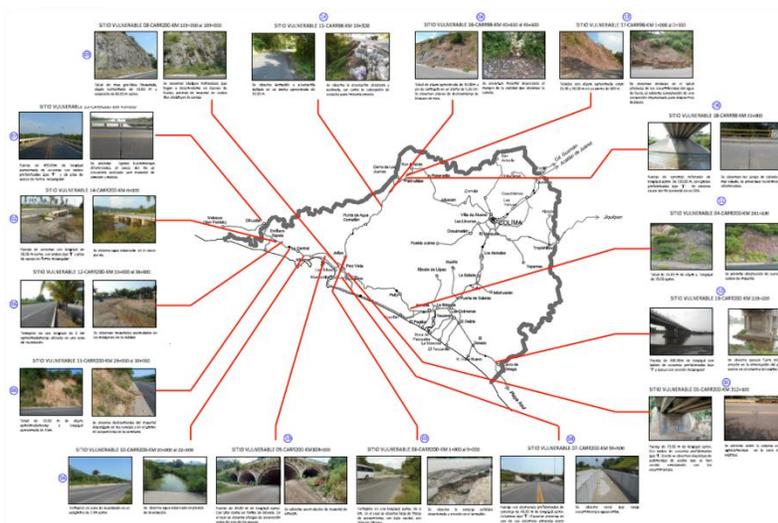
**Tabla 3.4 Tipo de información a recopilar**

Tipo de activo	Características
Carretera	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización (coordenadas GPS)</li> <li>• Estado físico (característica de los materiales, vida útil, registro de fallas previas, etc.)</li> <li>• Geotecnia (características del suelo, etc.)</li> <li>• Jerarquía (federal o estatal, primaria o secundaria, eje troncal, etc.)</li> <li>• Tipo de servicio (regional, conecta comunidades, corredor comercial, etc.)</li> <li>• Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) y el porcentaje de vehículos pesados</li> <li>• Uso del suelo de los terrenos aledaños a la carretera</li> </ul>

Puentes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización (coordenadas GPS)</li> <li>• Estado físico (característica de los materiales, vida útil, registro de fallas previas, etc.)</li> <li>• Diseño (características del diseño estructural, etc.)</li> <li>• Tipo de flujo (velocidad, gasto, tasa de socavación, etc.)</li> </ul>
Túneles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización (coordenadas GPS)</li> <li>• Estado físico (característica de los materiales, vida útil, registro de fallas previas, etc.)</li> <li>• Diseño (características del diseño estructural, etc.)</li> <li>• Geotecnia (características del suelo, etc.)</li> </ul>
Obras de drenaje	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización (coordenadas GPS)</li> <li>• Estado físico (característica de los materiales, vida útil, registro de fallas previas, etc.)</li> <li>• Diseño (características del diseño estructural, etc.)</li> <li>• Tipo de flujo (gasto, sedimentos y socavación, etc.)</li> </ul>
Señalización	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización (coordenadas GPS)</li> <li>• Estado físico (característica de los materiales, etc.)</li> </ul>
Taludes y Laderas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Localización (coordenadas GPS)</li> <li>• Estado físico (característica de los materiales de los muros de retención, vida útil, registro de fallas previas, etc.)</li> <li>• Geotecnia (características del suelo, taludes, terraplenes, laderas, etc.)</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia basada en FHWA (2018).

Es importante georreferenciar los riesgos, ya que permitirá dar un seguimiento al monitoreo de la efectividad de las medidas de adaptación, si es que se implementan, o de la evolución del riesgo en el tiempo. La visualización de los riesgos a nivel de red como se muestra en la figura 3.24 facilita el entendimiento para los tomadores de decisiones.



**Figura 3.24 Ejemplo de mapa de riesgos de la red federal carretera del estado de Colima**

Fuente: DGST, 2016.

Adicionalmente la información puede ser de utilidad para el sistema de protección civil para la atención de emergencias, así como también para el procedimiento interno de SCT para la atención de emergencias.

De acuerdo al marco metodológico, cada uno de los riesgos identificados deberán continuar a la siguiente fase, la cual permite evaluar el nivel de vulnerabilidad de cada uno de los sitios de riesgo identificados.

## 4 Evaluación de la vulnerabilidad en la infraestructura carretera al cambio climático

---

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.

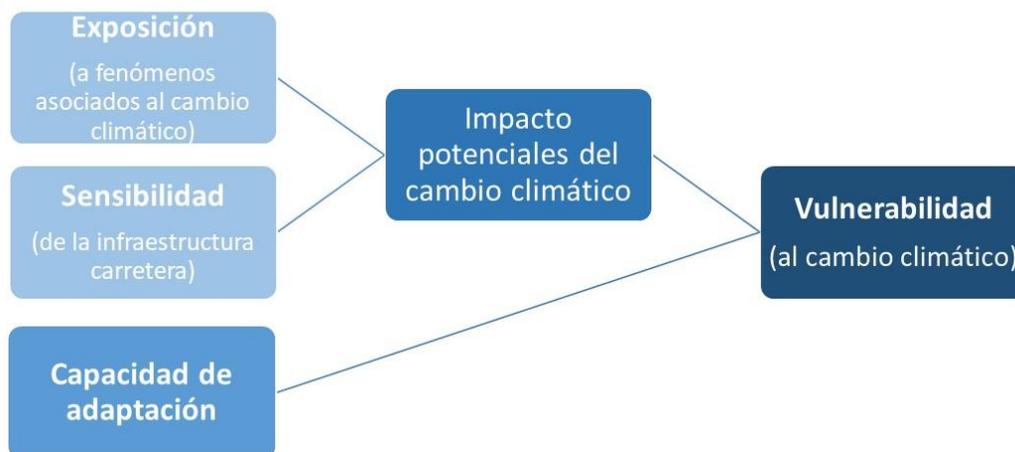
**Vulnerabilidad:** La propensión o predisposición a verse afectada negativamente. La vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacer frente y adaptarse (IPCC, 2014).

**Vulnerabilidad:** es el grado en que un sistema es susceptible e incapaz de 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 velocidad del cambio climático y la variación a la que está expuesto un sistema, su sensibilidad y su capacidad de adaptación (IPCC, 2007)

De esta manera, la vulnerabilidad describe el grado de susceptibilidad a la que un sistema se encuentra frente a los efectos adversos del cambio climático.

Las evaluaciones de vulnerabilidad permiten identificar la naturaleza y el grado en el que el cambio climático puede afectar a un sector, tal como el transporte. La evaluación de la vulnerabilidad es un componente central dentro del proceso de adaptación, pues la información que proporciona esta evaluación permite diseñar medidas que minimicen o eviten el daño. Para aplicar el concepto de vulnerabilidad es necesario cuantificarlo/medirlo para evaluar el grado de vulnerabilidad, por lo que es necesario establecer variables que permitan hacerlo.

En el Marco desarrollado por la Asociación Mundial de la Carretera (PIARC, 2015), la vulnerabilidad está en función del carácter, magnitud y rapidez del cambio climático, así como la variación a la que un sistema está expuesto (exposición); y el grado en que se ve afectado algo, ya sea adversa o benéfica, por estímulos relacionados con el clima (sensibilidad). 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 figura 4.1 muestra la relación entre los componentes de la vulnerabilidad.



**Figura 4.1 Relación entre los componentes de la vulnerabilidad**

Fuente: Elaboración propia basada en Shrestha et al, 2014.

La vulnerabilidad de una carretera depende en gran medida del cambio que pudiera tener al estar expuesto a un fenómeno climático y cómo responderá la infraestructura al estar sometida a dicho estrés climático, y como el sistema carretero puede reducir/eliminar el impacto potencial.

Las siguientes secciones describen como evaluar la vulnerabilidad de un sitio en riesgo previamente identificado en las carreteras, mediante indicadores que describan la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación, y con ellos establecer una calificación que defina el grado de vulnerabilidad del sitio en riesgo.

Este nivel de vulnerabilidad de acuerdo al presente marco metodológico permitirá tener una lista priorizada de riesgos.

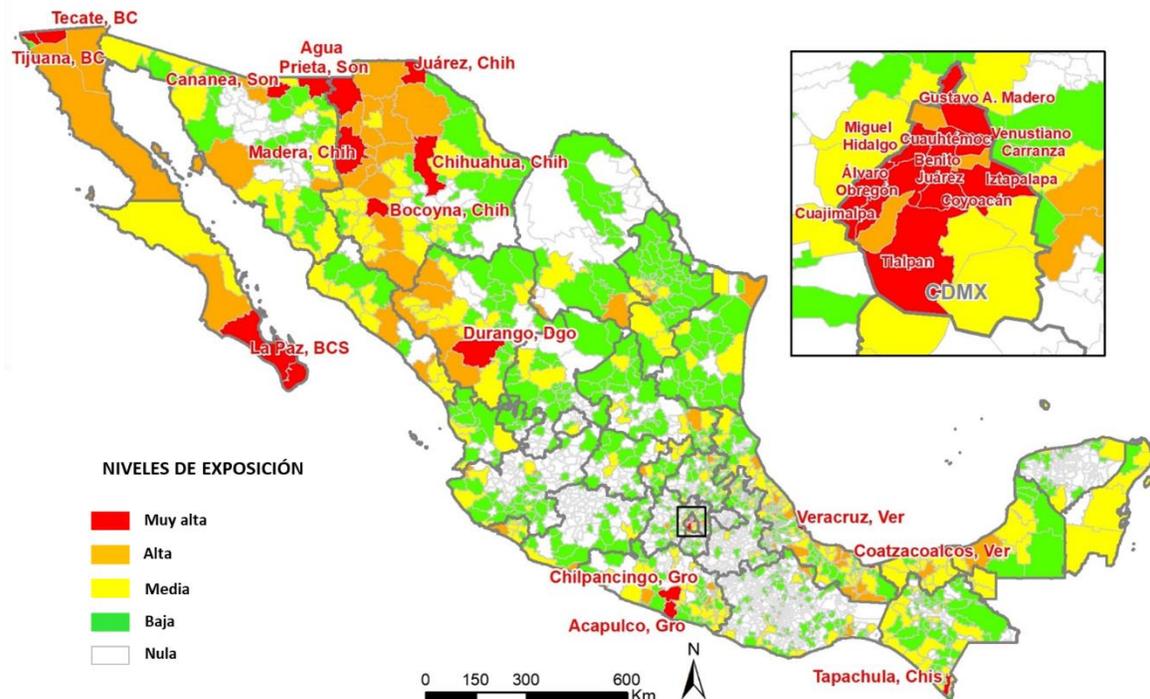
## 4.1 Exposición

Los niveles de exposición en un sitio y que lo convierte en vulnerable puede estar dado por datos históricos y recientes, que se han registrado para generar conocimiento, o también basarse en proyecciones climáticas.

**Exposición:** 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).

Por lo tanto, la exposición es el grado en que un sistema ambiental se pone en contacto con las condiciones climáticas o los impactos climáticos específicos y la probabilidad, de que este estrés afecte a la infraestructura de transporte.

Para evaluar el nivel de exposición actual, como se comentó en la sección 2.3.4.1 se utilizan mapas donde se pueden georeferenciar registros históricos de desastres naturales que tuvieron efectos negativos en la infraestructura del transporte. La suma acumulada de impactos por municipio permite determinar el nivel de exposición a la que la infraestructura carretera en el país ha sido sometida, representándose dichos niveles de exposición en la figura 4.2.

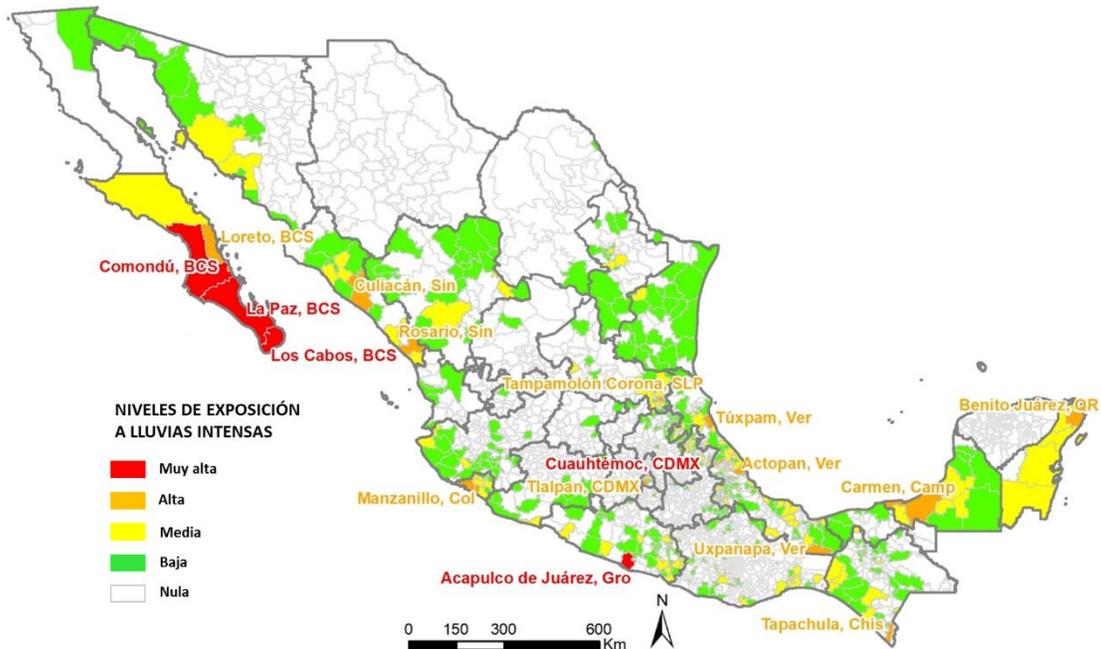


**Figura 4.2 Niveles de exposición actual de la infraestructura de transporte en México**

Fuente: Adaptada de Gradilla et al, 2018.

Sí se requieren análisis específicos de exposición a diferentes fenómenos climáticos se pueden utilizar también mapas que representen los niveles de exposición a huracanes/ciclones tropicales, precipitación, deslizamientos, aumento del nivel del mar, olas de calor u ondas frías, etc. Estos mapas pueden ser consultados en la Publicación Técnica No. 523 del Instituto Mexicano del Transporte titulada “Aproximación Geoespacial en la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera en México”.

La figura 4.3 muestra los niveles de exposición actual de la infraestructura de transporte debido a lluvias intensas, mediante los cuales se puede determinar la exposición en la red de carreteras que pudiera estar inmersa en los municipios afectados por este fenómeno climático mediante la superposición de mapas.



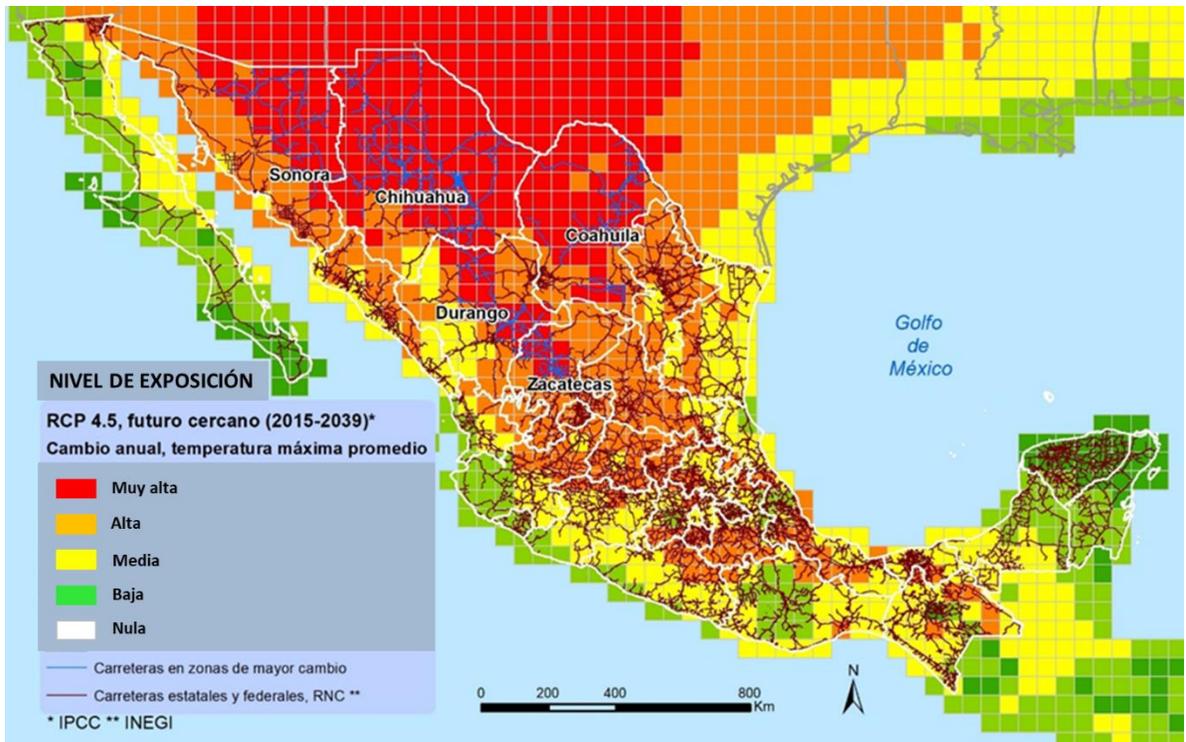
**Figura 4.3 Niveles de exposición actual de la infraestructura de transporte debido a lluvias intensas en México**

Fuente: Adaptada de Gradilla et al, 2018.

Para evaluar los niveles de exposición futura, se requiere construir mapas con proyecciones climáticas, los cuales se pueden realizar a través de modelos climático y escenarios de acuerdo al IPCC. Las diferentes proyecciones climáticas pueden ser consultadas en la Publicación Técnica No. 523, donde se evalúan los cambios en el tiempo del nivel del mar, los cambio en la temperatura y la precipitación.

A manera de ejemplo, la figura 4.4 muestra el nivel de exposición futura con base en las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) 4.5, que representa un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario con una alta mitigación).

La figura 4.4 muestras los niveles de exposición de acuerdo al cambio en la temperatura máxima, para un escenario RCP 4.5, para un futuro cercano (2015-2039).



**Figura 4.4 Niveles de exposición futura de la infraestructura carretera debido al cambio de la temperatura máxima en México**

Fuente: Adaptada de Gradilla et al, 2018.

Los niveles de exposición se pueden calificar de la siguiente manera:

Nivel de exposición	Escala
Muy baja (nula) o exposición insignificante actual y / o en el futuro	1
Baja exposición actual y / o en el futuro	2
Media exposición actual y / o en el futuro	3
Alta exposición actual y / o en el futuro	4
Muy alta exposición actual y / o en el futuro	5

Estos valores, que se pueden asignar de manera espacial ayudarán para evaluar la exposición actual o futura de la red de carreteras o del activo carretero, y que cualquier organización de carreteras en el país puede utilizar.

Esta calificación permitirá cuantificar el nivel del impacto asociados a un fenómeno climático o al cambio climático, pero se requiere la cuantificación del grado de sensibilidad de la carretera o del elemento carretero en análisis.

La calificación de la exposición será por fenómeno/amenaza climática.

## 4.2 Sensibilidad

De acuerdo a la AMC (2015), la sensibilidad es el grado en que un sistema se ve afectado, ya sea adversa o benéficamente, por estímulos relacionados con el clima.

La sensibilidad permite medir las condiciones prevalecientes de la carretera o de los elementos que la integran.

Una carretera puede ser menos o más sensible, debido a 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 a la metodología de la Agencia Federal de Carreteras (FHWA, 2018), sugiere incluir las siguientes variables: edad del activo, etapa de acuerdo a su vida útil, localización geográfica, información sobre su desempeño o condición actual, nivel de servicio, mantenimiento, calidad del pavimento, entre otras.

Considerando las variables que pueden reducir o aumentar la sensibilidad de un activo carretero debido al cambio climático, para este Marco se construyeron matrices, mediante las cuales se podrá calificar el estado de sensibilidad del activo carretero.

El nivel de sensibilidad para cada factor/variable será calificada en una escala de 1 a 5, conforme la siguiente tabla.

**Tabla 4.1 Escala para evaluar el nivel de sensibilidad**

Factor de sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Calificación
	Muy Baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta	
Calificación	1	2	3	4	5	

Cada factor/variable recibe una calificación según la escala de la tabla 4.1. Cada activo tendrá un número diferente de factores, mediante los cuales se pueda determinar el nivel de sensibilidad, el cual resultará de un promedio simple de estos valores.

Para el presente Marco se construyeron matrices que permitirán evaluar la sensibilidad de un corte (tabla 4.2), de un terraplén (tabla 4.3), de un puente (tabla 4.4) o de un pavimento (tabla 4.5).

Para fines de utilización, se podrán adicionar o eliminar factores conforme el criterio experto y el tipo de activo que se desee evaluar.

Tabla 4.2 Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un corte carretero

Factor de sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Calificación
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
<b>Tipo de suelo</b>	Material con baja sensibilidad a la erosión (rocas rígidas)	Material con baja sensibilidad a la erosión (rocas suaves)	Material medianamente propenso a la sensibilidad a la erosión (suelos compactados)	Material con alta sensibilidad a la erosión (suelos sueltos)	Material con muy alta sensibilidad a la erosión (suelos muy sueltos)	
<b>Ángulo de inclinación</b>	-	La inclinación del corte es menor a 30°.	La inclinación del corte es mayor a 30° y hasta 40°.	La inclinación del corte es mayor a 40° y hasta 60°.	La inclinación del corte es mayor a 60°.	
<b>Cubierta vegetal</b>	El corte está cubierto con vegetación arbustiva/arbórea	El corte está cubierto con vegetación arbustiva	El corte está cubierto con vegetación herbácea	El corte está semidescubierto con vegetación herbácea/arbustiva	El corte está descubierto, presenta muy poca presencia de vegetación	
<b>Grado de erosión</b>	No se observa erosión	Se observa erosión inicial	Se observa erosión en al menos el 20% del área del corte	Se observa erosión en más del 20% y menos del 50% del área del corte	Se observa erosión en más del 50% del área del corte	
<b>Resistencia mecánica</b>	Su composición y estructura tienen muy alta resistencia a los esfuerzos	Su composición y estructura tienen una alta resistencia a los esfuerzos	Su composición y estructura tienen una mediana resistencia a los esfuerzos	Su composición y estructura tienen una baja resistencia a los esfuerzos	Su composición y estructura tienen muy baja resistencia a los esfuerzos	
<b>Altura del corte</b>	Menor a 50 cm	Mayor a 50 cm y menor a 5.0 metros	Entre 5 a 10 metros	Mayor a 10 metros y hasta 20 metros	Es mayor de 20 metros	
<b>Infiltración / Agua presente</b>	El corte no presenta humedad	El corte presenta humedad	El corte se encuentra mojado	En el corte se presenta agua goteando	En el corte se presenta agua escurriendo	
<b>Patrones de escurrimiento superficial</b>	No se observan escurrimientos en el corte	Se observa formación de pequeños torrentes en el corte	Se observa formación de torrentes y surcos en al menos 50% del corte	Se observa formación de torrentes y surcos en más 50% del corte	Se observa presencia de cárcavas, y concentración de sólidos por arrastre en el pie del corte	
<b>Mantenimiento</b>	No se presentan desprendimientos en el corte	El corte presenta pequeños desprendimientos y desgranamientos, que son de fácil limpieza.	El corte presenta desprendimientos tienen tamaños que oscilan entre los 30 y 60 cm. Se requiere equipo para el mantenimiento.	El corte presenta desprendimientos y escombros que tienen tamaños que oscilan entre los 60 y 150 cm. Se requiere maquinaria para el mantenimiento.	El corte presenta desprendimientos mayores a 1.50 metros y presencia de escombros. Se requiere mantenimiento mayor del corte.	
<b>Área de captación</b>	El área de captación incluye los anchos de acotamiento, cuneta y más de un metro de superficie libre	El área de captación incluye los anchos de acotamiento, cuneta y hasta un metro de superficie libre	El área de captación incluye los anchos de acotamiento, y de cuneta y menos de un metro de superficie libre	El área de captación incluye los anchos de acotamiento, y de cuneta únicamente	No existe área de captación	
<b>Promedio</b>						

**Tabla 4.3 Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un terraplén carretero**

Factor de sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Calificación
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
<b>Ángulo de inclinación</b>	La inclinación del talud del terraplén es menor a 20°	La inclinación del talud del terraplén se encuentra entre 20° y 40°	La inclinación del talud del terraplén es mayor a 40° y hasta 50°	La inclinación del talud del terraplén es mayor a 50° y hasta 60°	La inclinación del talud del terraplén es mayor a 60°	
<b>Altura del terraplén</b>	La altura es menor a 50 cm.	La altura se encuentra en 0.50 y 5 metros	La altura es mayor a 5 metros y hasta 10 metros	La altura es mayor a 10 metros y hasta 20 metros	La altura es mayor a 20 metros	
<b>Cobertura vegetal</b>	El terraplén presenta más del 75% y hasta un 100% de cobertura vegetal	El terraplén presenta más del 50% y hasta un 75% de cobertura vegetal	El terraplén presenta más del 25% y hasta un 50% de cobertura vegetal	El terraplén presenta un 25% de cobertura vegetal	El terraplén esta descubierto sin presencia vegetal	
<b>Grietas en el pavimento</b>	No hay presencia de grietas en el pavimento	Se identifican fisuras selladas en el pavimento	El pavimento presenta grietas menores a 3mm	El pavimento presenta grietas entre 3 y 10 mm	El pavimento presenta grietas mayores a 10 mm	
<b>Erosión</b>	Sin presencia de erosión	Se observa erosión leve en el talud del terraplén (erosión laminar)	Se observa erosión moderada en el talud del terraplén (pequeños surcos)	Se observa alta erosión en el talud del terraplén (surcos grandes asociados con zanjas o cárcavas)	Se observa muy alta erosión en el talud del terraplén (zanjas y cárcavas)	
<b>Asentamiento en la calzada</b>	No hay evidencia de asentamientos	Existe asentamiento poco perceptible en la calzada	El asentamiento es evidente en al menos un carril de la calzada	El asentamiento es evidente en toda la calzada	El asentamiento es muy evidente en toda la calzada	
<b>Infiltración/Agua a presente</b>	El terraplén no presenta humedad	El terraplén presenta humedad	El terraplén se encuentra mojado	En el terraplén se presenta agua goteando	En el terraplén se presenta agua escurriendo	
<b>Patrones de escurrimientos superficial</b>	No se observan escurrimientos en el terraplén	Se observa formación de pequeños torrentes en el terraplén	Se observa formación de torrentes y surcos en al menos 50% del terraplén	Se observa formación de torrentes y surcos en más 50% del terraplén	Se observa presencia de cárcavas, y concentración de sólidos por arrastre en el pie del terraplén	
<b>Promedio</b>						

Tabla 4.4 Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un puente carretero

Factor de sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Calificación
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
<b>Edad del activo</b>	Menos de 10 años	Entre 11 y 30 años	Entre 31 y 50 años	Entre 51 y 70 años	Más de 70 años	
<b>Estado del mantenimiento</b>	Excelente	Muy bueno	Bueno	Satisfactorio	Pobre	
<b>Estado de la cubierta superior</b>	La cubierta superior del puente no presenta daños	La cubierta superior del puente presenta daños por colisión en sus elementos	La cubierta superior del puente presenta daños, tales como grietas pequeñas	La cubierta superior del puente presenta daños, tales como pérdidas ligeras de material	La cubierta superior del puente presenta daños, tales como pérdidas grietas significativas	
<b>Estado de los estribos</b>	El estribo del puente no presenta daño alguno	El estribo del puente presenta daños ligeros (grietas pequeñas)	El estribo del puente presenta daños moderados (grietas mayores)	El estribo del puente presenta daños severos (grietas mayores, asentamientos)	El estribo del puente presenta daños muy severos (grietas mayores, asentamientos, socavación)	
<b>Estado de las pilas/pilotes</b>	No se observan daños o deficiencias estructurales	Se observan grietas y fisuras en cabezales y columnas	Además de grietas y fisuras, se observa humedad generalizada	Se observa corrosión en los elementos, además de humedades, grietas y fisuras	Se observa socavación en la base, además de corrosión, humedades, grietas y fisuras	
<b>Elementos del canal del flujo</b>	El flujo y el lecho no presentan cambios con respecto a su diseño	El flujo tiene un ligero incremento y el lecho presenta poca acumulación del material de arrastre	El flujo tiene un ligero incremento y el lecho presenta acumulación moderada del material de arrastre	El flujo tiene un incremento significativo y el lecho presenta acumulación moderada del material de arrastre	El flujo tiene un incremento significativo y el lecho presenta acumulación extrema del material de arrastre	
<b>Socavación en pilas/pilotes</b>	No se observa socavación	Se observa poca socavación	Se observa socavación significativa en una extensión pequeña	Se observa socavación significativa en una extensión mediana	Se observa socavación altamente significativa en una extensión grande	
<b>Concreto</b>	No se observan daños en el concreto (fisura capilar menor a 0.2mm)	Se observan grietas pequeñas y no profundas (fisuras desde 0.2 mm hasta 0.5mm)	Se observa daño en el concreto y corrosión del acero de refuerzo (surcos desde 0.5mm hasta 1.5 mm)	Se observa daño en el concreto y acero expuesto (ranuras desde 1.5 mm hasta 5mm)	Se observa daño severo en el concreto, descomposición y acero expuesto (fracturas mayores a 5mm)	
<b>Acero</b>	Se observa corrosión en los elementos de la armadura	Se observan además impactos de vehículos en los elementos	Se observan además deflexiones en elementos y pérdida de elementos (pasadores)	Se observan además contraventeos deformados, elementos alabeados, pandeo local y pérdida de soldadura	Se observa además fisuras por cortante, deficiencias en uniones y pérdida de elementos (pernos)	
<b>Estado de las juntas</b>	La junta se observa en buen estado, no requiere intervención	La junta requiere mantenimiento (resello)	La junta requiere mantenimiento (reparación y resello)	La junta requiere mantenimiento (rehabilitación, reparación y resello)	La junta requiere mantenimiento (reemplazamiento)	

<b>Corrosión</b>	No se observa corrosión	Se observa corrosión superficial	Se observan áreas corroidas	Se observa corrosión avanzada	Se observa corrosión avanzada, penetrando en el acero y pueden llevar a perforaciones en las piezas	
<b>Promedio</b>						

**Tabla 4.5 Matriz para evaluar el nivel de sensibilidad de un pavimento flexible carretero**

Factor de sensibilidad	Nivel de Sensibilidad					Calificación
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
<b>Edad del activo</b>	Menos de 5 años	Mayor a 6 y hasta 10 años	Mayor a 11 y hasta 15 años	Mayor a 16 y hasta 20 años	Más de 20 años	
<b>Estado del mantenimiento</b>	Excelente	Muy bueno	Bueno	Satisfactorio	Pobre	
<b>Deformaciones</b> (roderas, canalizaciones, baches, ondulaciones)	Menores a 1 cm	Mayor a 1 cm y hasta 2 cm	Mayor a 2 cm y hasta 3 cm	Mayor a 3 cm y hasta 4 cm	Mayor a 4 cm	
<b>Estado superficial</b> (índice de rugosidad internacional - IRI)	El IRI es menor a 2.0 m/Km	El IRI se encuentra entre 2.1 y 4.0 m/Km	El IRI se encuentra entre 4.1 y 8.0 m/Km	El IRI se encuentra entre 8.1 y 16.0 m/Km	El IRI es mayor a 16.0 m/Km	
<b>Desprendimientos</b> (pérdida de agregados, de carpeta o de base)	Menos del 5% de la superficie	Entre el 6% y 15% de la superficie	Entre el 16% y 30% de la superficie	Entre el 31% y 40% de la superficie	Más del 40% de la superficie	
<b>Erosión</b>	Sin presencia de erosión	Se observa erosión leve en el pavimento (erosión inicial en las orillas de la carpeta asfáltica)	Se observa erosión moderada en los extremos de las capas de pavimentos (pequeños surcos)	Se observa alta erosión en el cuerpo del pavimento (socavación y desprendimientos)	Se observa muy alta erosión en el pavimento (pérdida parcial)	
<b>Agrietamientos</b>	Grietas menores a 2mm en menos del 20% de la superficie	Grietas longitudinales mayores a 3mm en 20% de la superficie	Grietas longitudinales y transversales mayores a 3mm (entre el 20% y 50% de la superficie del pavimento)	Grietas longitudinales y transversales mayores a 3mm (entre el 20% y 50% de la superficie, pero las grietas transversales cruzan toda la calzada del pavimento)	Grietas longitudinales y transversales mayores a 3mm (malla cerrada) en más del 50% de la superficies del pavimento	
<b>Bombeo/Agua presente</b>	El pavimento no presenta humedad	El pavimento presenta humedad	El pavimento se encuentra mojado	En el pavimento se presenta agua acumulada	En el pavimento se presenta agua estancada en las deformaciones	
<b>Asentamiento en la calzada</b> (pérdida de capacidad estructural)	No hay evidencia de asentamientos	Existe asentamiento poco perceptible en la calzada	El asentamiento es evidente en al menos un carril de la calzada	El asentamiento es evidente en toda la calzada	El asentamiento es muy evidente en toda la calzada	
<b>Promedio</b>						

La calificación obtenida para cada elemento es el resultado del promedio simple del valor elegido en cada factor. Este promedio será utilizado para determinar el indicador de impacto del cambio climático.

### 4.3 Indicador de impacto del cambio climático

De acuerdo al Marco Conceptual de Füssel y Klein (2006), la relación entre exposición (E) y la sensibilidad (S) resulta en impactos potenciales (IP) del cambio climático, es decir, una relación causa-efecto que se representa en la siguiente ecuación.

$$E + S = IP$$

La escala de exposición y sensibilidad son evaluados mediante niveles que permiten asignar una calificación desde 1 hasta 5.

La suma de la Exposición y la Sensibilidad, permiten determinar el grado del impacto al cambio climático, el cual se representa en la siguiente tabla.

		Sensibilidad				
		Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Exposición	Muy Alta	6 (Media)	7 (Alta)	8 (Alta)	9 (Muy alta)	10 (Muy alta)
	Alta	5 (Media)	6 (Media)	7 (Alta)	8 (Alta)	9 (Muy alta)
	Media	4 (Baja)	5 (Media)	6 (Media)	7 (Alta)	8 (Alta)
	Baja	3 (Baja)	4 (Baja)	5 (Media)	6 (Media)	7 (Alta)
	Muy baja	2 (Muy baja)	3 (Baja)	4 (Baja)	5 (Media)	6 (Media)

Los riesgos que se evalúan con niveles de impacto altos o muy altos, son aquellos que deben ser priorizados y atendidos de manera inmediata en el proceso de adaptación al cambio climático.

Sin embargo, aún se requiere incluir la capacidad de adaptación dentro de la evaluación de la vulnerabilidad.

## 4.4 Capacidad de Adaptación

La capacidad de adaptación, tal y como se definió en la sección 2.3.1.2, se entiende como la capacidad o el potencial que un sistema tiene para poder responder o recuperarse con éxito a los impactos de la variabilidad del clima, el cambio climático, y el clima extremo.

Las acciones de adaptación son manifestaciones de la capacidad de adaptación de un sistema, las cuales representan la forma en que pueden reducir la vulnerabilidad.

La capacidad de adaptación está estrechamente relacionada con otros conceptos de uso común, que incluyen adaptabilidad, capacidad para enfrentar, capacidad de gestión, estabilidad, robustez, flexibilidad y resiliencia (Smit, 2006).

Para medir la capacidad de adaptación actual se requiere conocer el nivel en que se encuentra el activo carretero o la red, en referencia a diferentes aspectos que pueden ser ligados. El objetivo de establecer variables asociadas a la capacidad de adaptación, es poder determinar esa característica del sistema, y con ello completar el análisis de vulnerabilidad.

A continuación, se definen las características de las variables a incluir para evaluar la capacidad de adaptación de las carreteras en México.

- **Atención de emergencias**

Un activo carretero tiene una mayor capacidad de resiliencia cuando éste es rápidamente atendido por la organización de carreteras, la cual debe contar con políticas claramente establecidas para la atención de emergencias, así como contar con un área responsable para responder ante las emergencias y tener claramente establecidos los procedimientos de trabajo, de comunicación y recuperación de los servicios de la carretera, así como la disponibilidad de equipo, maquinaria y materiales disponibles.

- **Nivel de conocimiento de la amenaza y sus consecuencias**

El personal de la organización de carreteras, debe conocer las amenazas potenciales asociadas al cambio climático y sus potenciales consecuencias, ya que de ello dependerá su actuación ante una amenaza, para enfrentar, responder y recuperarse de los impactos residuales de los fenómenos naturales.

- **Tecnología**

Un activo carretero que cuenta con tecnología para monitorear el comportamiento de sus elementos, así como obtener información del clima en la carretera, se considera tiene una mayor capacidad de adaptación, al proporcionar información a los usuarios para la toma de decisiones antes o durante su viaje, así como informar a los ingenieros de mantenimiento el comportamiento de los componentes de la carretera.

- **Localización**

La ubicación del activo carretero, en términos de su topografía (relieve), el grado de erosión del suelo, la cubierta vegetal, el tipo de suelo, control de flujos superficiales, etc., pueden limitar las acciones de adaptación a implementar, por su capacidad de adaptación es más limitada.

- **Reparación**

Una organización de carreteras para hacer frente a las consecuencias debido a fenómenos perturbadores de corto plazo (inundaciones, reducción de visibilidad, deslizamientos, etc.), que son relativamente menores comparadas con catástrofes, debe demostrar capacidad de adaptación mediante la atención de la interrupción de la red, midiendo su capacidad de respuesta en el tiempo que toma resolverla y reabriendo al tránsito la carretera.

- **Costos de reparación**

El costo de reemplazo de la infraestructura se utiliza para evaluar la facilidad con la que un activo puede repararse o reemplazarse. En las organizaciones de carreteras es común que los recursos para inversiones en reparaciones de menor costo son más fáciles de obtener, comparados con los costos de reemplazar algunos elementos de la carretera, los cuales además se incrementan según la magnitud de la misma. Entonces la capacidad de adaptación será más alta cuando se requiera de menores inversiones.

La organización de carretera puede establecer los límites en moneda nacional para cada rango, según la magnitud de su red.

- **Redundancia**

La robustez mide la capacidad de un sistema de ser insensible a las perturbaciones. La redundancia en una red es necesaria para protegerla de la pérdida de conectividad debido a la falla de una carretera. En una red regional o nacional, la redundancia se representa mediante la existencia de rutas carreteras alternas que permiten acceder a destinos, a pesar de un cierre parcial o total de la carretera que la conecta de manera directa o de forma más rápida.

De esta manera la red de carreteras para demostrar su capacidad de adaptación debe contar con alternativas que minimicen el impacto en los tiempos de viaje de las personas y las mercancías.

En una situación de desastre, las redes de carreteras desempeñan un papel esencial como rutas de evacuación y para la logística humanitaria postdesastre.

- **Resiliencia**

La resiliencia tiene que ver con la respuesta del sistema ante el estrés que le puede provocar un fenómeno asociado al cambio climático. Una carretera resiliente será aquella que continúa prestando sus servicios y manteniendo sus niveles de operación a pesar de los estímulos climáticos.

Una carretera donde no se han afectado los tiempos de viaje y no ha demandado recursos para reparaciones debido a fenómenos climáticos, se considera con una mayor capacidad de adaptación, que aquella que periódicamente es afectada y requiere recursos.

Se requiere información histórica de cierres parciales/totales, impactos en los tiempos de viaje o económicos en las cadenas logísticas, y de las inversiones requeridas para reparar o reemplazar elementos en las carreteras.

#### 4.4.1 Indicador de capacidad de adaptación

La capacidad de adaptación será calificada en un rango de 1 a 5, que representan desde la muy baja capacidad hasta la muy alta.

Con base en los criterios descritos en el apartado anterior, la organización de carreteras podrá establecer su capacidad de adaptación, en función de sus capacidades para hacer frente y de gestión, de la adaptabilidad del sitio, de la robustez y resiliencia de la red.

La tabla 4.6 muestra la matriz para evaluar la capacidad de adaptación de una carretera o de la red.

**Tabla 4.6 Matriz para evaluar la capacidad de adaptación**

Criterios	Capacidad de Adaptación					Calificación
	Muy Baja (1)	Baja (2)	Media (3)	Alta (4)	Muy Alta (5)	
<b>Capacidad para enfrentar/recuperar/responder una amenaza climática</b>						
<b>Atención de emergencias</b>	La organización de carreteras no cuenta con políticas para la atención de emergencias	La organización de carreteras cuenta con políticas para la atención de emergencias	La organización de carreteras cuenta con políticas y un área para la atención de emergencias	La organización de carreteras cuenta con políticas, procedimientos y un área para la atención de emergencias	La organización de carreteras cuenta con políticas, procedimientos, equipo/maquinaria y un área para la atención de emergencias	

<b>Nivel de conocimiento de la amenaza y sus consecuencias</b>	El personal no conoce, ni comprende los riesgos asociados al cambio climático	El personal conoce los riesgos asociados al cambio climático	El personal conoce los riesgos asociados al cambio climático y comprende las consecuencias (nivel reactivo)	El personal conoce los riesgos asociados al cambio climático y comprende las consecuencias (nivel preventivo)	El personal conoce los riesgos asociados al cambio climático y comprende las consecuencias (nivel proactivo)	
<b>Tecnología (en el camino)</b>	La organización de carreteras no utiliza tecnología para monitorear el camino.	La organización de carreteras utiliza tecnología para monitorear algunos elementos críticos del camino.	La organización de carreteras utiliza tecnología para monitorear todo el camino.	La organización de carreteras utiliza tecnología para monitorear una red de carreteras (regionalmente).	La organización de carreteras utiliza tecnología para monitorear toda la red de carreteras.	
<b>Tecnología (sobre el clima)</b>	La organización de carreteras no utiliza tecnología para monitorear el clima en las carreteras	La organización de carreteras utiliza tecnología sobre el clima en las carreteras de otras organizaciones indirectamente	La organización de carreteras utiliza tecnología sobre el clima en las carreteras de otras organizaciones directamente (compartida)	La organización de carreteras tiene su propio sistema para la obtención de información climática	La organización de carreteras tiene su propio sistema para la obtención de información climática y la comparte con sus usuarios	
<b>Capacidad de adaptabilidad en el sitio</b>						
<b>Localización</b>	El sitio es altamente complicado en todos los aspectos	El sitio es altamente complicado en dos o tres de los aspectos	El sitio es altamente complicado, excepto en dos aspectos	El sitio es poco complicado, excepto uno de los aspectos	El sitio tiene una óptima ubicación considerando todos los aspectos	
<b>Capacidad de gestión de la organización</b>						
<b>Reparación (debido a eventos perturbadores a corto plazo)</b>	Las acciones de reparación toman más de 3 días para reabrir la carretera al tránsito	Las acciones de reparación toman entre 24 y menos de 72 horas para reabrir la carretera al tránsito	Las acciones de reparación toman entre 12 y menos de 24 horas para reabrir la carretera al tránsito	Las acciones de reparación toman entre 4 y menos de 12 horas para reabrir la carretera al tránsito	Las acciones de reparación toman menos de 4 horas para reabrir la carretera al tránsito	
<b>Costos de reparación</b>	El costo de reemplazo del activo es muy alto	El costo de reemplazo del activo es alto	El costo de reparación del activo es alto	El costo de reparación del activo es medio	El costo de reparación del activo es bajo	
<b>Robustez de la red</b>						
<b>Redundancia</b>	No existen alternativas disponibles	Se pueden utilizar otras rutas que conllevan más del doble del tiempo de viaje (Más del 100%)	Se pueden utilizar otras rutas que duplican el tiempo de viaje (51%-100%)	Existe otra alternativa que incrementa el tiempo de viaje entre un 21-50%	Existe otra alternativa que incrementa el tiempo de viaje en un 20%	
<b>Resiliencia</b>						
<b>Resiliencia</b>	La carretera es afectada anualmente por impactos asociados al clima	La carretera ha sido afectada en más de tres ocasiones no consecutivas por impactos asociados al clima	La carretera ha sido afectada en dos ocasiones no consecutivas por impactos asociados al clima	La carretera ha sido afectada en una ocasión por impactos asociados al clima	La carretera no ha sido afectada por impactos asociados al clima	
<b>Promedio</b>						

El esquema propuesto es enunciativo y no limita a que cada organización de carreteras pueda incluir otros aspectos que consideren importantes para evaluar su capacidad de adaptación.

Una vez realizado el promedio se determina el nivel correspondiente como se indica a continuación:

Resultado	Niveles de capacidad de adaptación	Calificación
>4.0	Muy alta capacidad de adaptación	5
3.0<X≤4.0	Alta capacidad de adaptación	4
2.0<X≤3.0	Moderada capacidad de adaptación	3
1.0<X≤2.0	Baja capacidad de adaptación	2
=1.0	Muy baja capacidad de adaptación	1

El valor a utilizar para el cálculo de la vulnerabilidad, será el valor asignado como calificación.

## 4.5 Indicador de vulnerabilidad

La determinación del nivel de vulnerabilidad es mediante los indicadores que expresan el nivel de exposición, el grado de sensibilidad y su capacidad de adaptación obtenidos en las secciones anteriores.

La exposición (E) y la sensibilidad (S) resulta en impactos potenciales (IP) del cambio climático, la cual se representa en la siguiente ecuación.

$$E + S = IP$$

El indicador de vulnerabilidad se expresa como:

$$V = f(IP - CA)$$

Donde CA es la capacidad de adaptación.

Para cada sitio de riesgo identificado, se evaluará entonces su exposición, su sensibilidad y su capacidad de adaptación, mediante el cual se podrá obtener una calificación de la vulnerabilidad mediante el indicador propuesto.

## 4.6 Nivel de vulnerabilidad

Del análisis anterior se obtiene una evaluación cuantitativa de la vulnerabilidad, la cual permite definir a través del cálculo del indicador el nivel de vulnerabilidad al que se encuentra el activo.

El conocer el nivel de vulnerabilidad permite realizar una priorización de los sitios en riesgo de acuerdo a su vulnerabilidad, y con ello poder asignar prioridades a aquellos que se encuentre en niveles altos de vulnerabilidad.

<b>Vulnerabilidad</b>	<b>&gt;7</b>	<b>Muy Alta</b>	La red carretera o el activo carretero son extremadamente vulnerables, por lo que se recomienda adaptación inmediata para evitar la pérdida.
	<b>&gt;4</b>	<b>Alta</b>	La red carretera o el activo carretero son altamente vulnerables, por lo que se recomienda incorporar la adaptación al programa de mantenimiento del ciclo inmediato para evitar la pérdida o daño.
	<b>&gt;1</b>	<b>Media</b>	La red carretera o el activo carretero son moderadamente vulnerables, por lo que se requerirá adaptación para mitigar posibles daños .
	<b>&gt;-2</b>	<b>Baja</b>	La red carretera o el activo carretero son poco vulnerables, por lo que podría requerir adaptación para reducir los riesgos.
	<b>= -3</b>	<b>Muy baja</b>	La red carretera o el activo carretero no se consideran vulnerables, por lo que no se requerirá adaptación. Se recomienda seguimiento de los riesgos detectados.

Fuente: Elaboración propia, basada en PIARC, 2015.

En el caso de tratarse de una evaluación a nivel de red, el resultado hasta aquí obtenido puede ayudar a la toma de decisiones para la adaptación. Sin embargo, es posible que el nivel de vulnerabilidad detectado no tenga consecuencias importantes en el caso de materializarse el impacto, por lo que se recomienda entonces realizar un análisis de riesgo.

El análisis de riesgo se recomienda para los activos extremadamente y altamente vulnerables, pero la organización de carreteras en función de sus políticas y prioridades puede definir el alcance para el análisis de riesgos.



## **5 Análisis del riesgo al cambio climático en la infraestructura carretera**

---

En el capítulo anterior se realizó una evaluación de la vulnerabilidad de los activos en riesgo de una red carretera, o de un elemento de una carretera, para obtener una lista priorizada de riesgos altamente vulnerables. El siguiente paso consiste en analizarlos para determinar el nivel de riesgo, de acuerdo a la probabilidad de que un activo pueda experimentar un impacto, así como de la gravedad/severidad y/o consecuencia del impacto.

El proceso de evaluación de riesgos está conformado por la identificación de riesgos (ver capítulo 3), el análisis de riesgos y la valoración de riesgos (IEC/ISO 31010-2009). La utilización de este proceso permite determinar que riesgos deben ser tratados y como priorizarlos.

Para una organización de carreteras, la evaluación de riesgos permite conocer los riesgos y como estos pueden afectar la operación de una carretera, en el caso de materializarse. Comprender las consecuencias en términos de una valoración de la gravedad y/o severidad de los impactos del cambio climático, permitiría tomar las decisiones más adecuadas para la atención de los riesgos en las carreteras.

De acuerdo a la norma ISO 31010 en su versión 2009, el análisis de riesgo consiste en determinar las consecuencias y sus probabilidades para los eventos de riesgo identificados. Las consecuencias y la probabilidad del impacto se combinan para determinar un nivel de riesgo.

Los fenómenos climáticos son la causa y fuente de variados riesgos en las carreteras, y cada riesgo, puede tener múltiples consecuencias, las cuales pueden ser graves o no. El análisis de riesgos permite identificar las posibles consecuencias que pueden surgir de un impacto.

Por otra parte, la probabilidad de ocurrencia de un evento en un tiempo determinado, puede ser determinado mediante diferentes técnicas para que la organización de carreteras pueda conocer que tan posible o tan cierto será que la causa del riesgo se materialice.

Los resultados del análisis podrán determinar consecuencias insignificantes, y que su probabilidad de presentarse sea extremadamente baja, o también que la probabilidad de un impacto pueda ser baja en ciertas circunstancias, y las consecuencias pueden ser altas y, a la inversa. Estos resultados permiten a la organización de carreteras la toma de decisiones informada sobre las implicaciones económicas de un impacto del cambio climático en las carreteras.

Los métodos utilizados para analizar los riesgos pueden ser cualitativos, semicuantitativos o cuantitativos. El método a utilizar dependerá de la información disponible.

Los métodos cualitativos permiten otorgar una valoración del riesgo, tanto a la probabilidad como a las consecuencias, mediante niveles tales como “alto”, “medio” o “bajo”, los cuales resultan del criterio experto del evaluador. Una valoración semicuantitativa requiere la utilización de escalas numéricas para determinar los niveles de riesgo, en combinación con valoraciones cualitativas. Finalmente, el método cuantitativo estima los niveles de riesgo en función de unidades específicas, la cual requiere información y datos, que permitan valorar el impacto.

En el presente marco metodológico se utilizará una combinación de los métodos descritos para poder expresar más adecuadamente la evaluación de los riesgos.

El nivel de riesgo se expresará entonces como:

$$R = P \times C$$

Donde el riesgo (R) será igual a la probabilidad (P) multiplicados por las consecuencias (C), las cual serán determinadas por la gravedad y severidad del impacto.

A continuación, se muestra como determinar cada uno de los elementos indicados.

## 5.1 Evaluación de la probabilidad de impacto

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. Sin embargo, es posible obtener ciertas aproximaciones (a pesar de la incertidumbre futura del clima) basados en diferentes enfoques.

La norma IEC/ISO 31010-2009, sugiere tres enfoques:

- a) El uso de datos históricos relevantes para identificar eventos o situaciones que han ocurrido en el pasado y, por lo tanto, ser capaz de extrapolar la probabilidad de su ocurrencia en el futuro.
- b) La utilización de técnicas de predicción, las cuales permiten realizar pronósticos de probabilidad de ocurrencia de un fenómeno climático.
- c) La opinión de los expertos se puede utilizar en un proceso sistemático y estructurado para estimar la probabilidad, con base en toda la información relevante disponible.

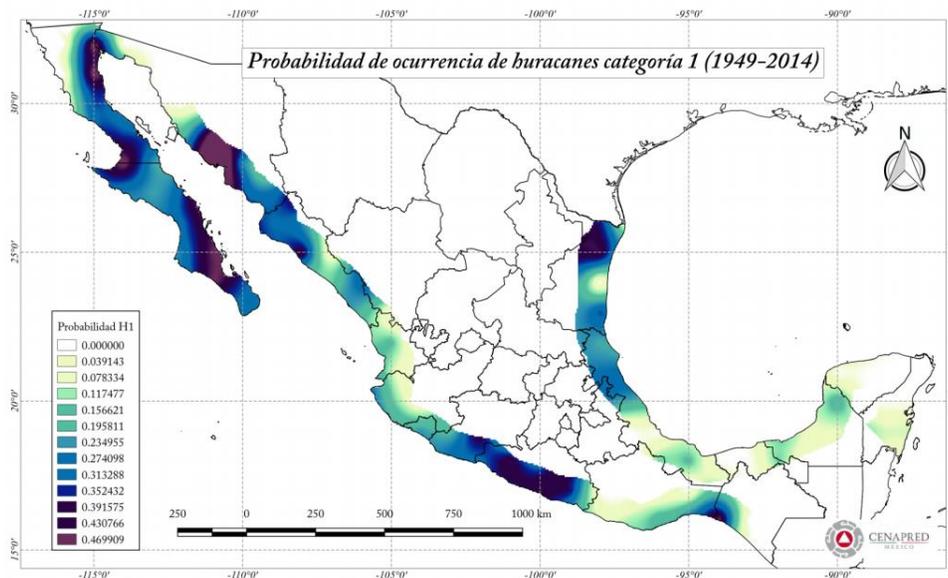
Para evaluar y valorar la probabilidad de los riesgos del cambio climático que enfrentan las redes de carreteras mexicanas, se utilizaran los mapas de peligro

realizados por CENAPRED los cuales permiten estimar los índices de riesgos a escala municipal para los diferentes fenómenos asociados al cambio climático.

Para cada fenómeno contemplado en la Ley General de Protección Civil, CENAPRED estudió las variables que permiten caracterizar en su parte física a dichos fenómenos, mediante los cuales se construyeron mapas de peligro. El peligro está en función de la probabilidad de que un fenómeno impacte al país.

En el caso de los fenómenos hidrometeorológicos (huracanes o ciclones tropicales, tormentas, nevadas, granizadas, tormentas eléctricas, heladas, ondas frías, ondas de calor, sequías, etc.), la función de peligro está relacionada a una de las variables denominada periodo de retorno. El período de retorno es una representación usada comúnmente para representar un estimativo de la probabilidad de ocurrencia de un evento determinado en un periodo determinado.

Como ejemplo, Baeza & Jiménez (2016), determinaron para CENAPRED las probabilidades de ocurrencia para ciclones tropicales/huracanes. La figura 5.1 muestra un ejemplo de la probabilidad de ocurrencia para huracanes categoría 1.



**Figura 5.1 Probabilidad de ocurrencia de huracán categoría 1 en la escala Saffir-Simpson (1949-2014)**

Fuente: Baeza & Jiménez, CENAPRED (2016).

La metodología utilizada por CENAPRED integró las diferentes probabilidades de ocurrencia para cada intensidad asociadas a las diferentes categorías de ciclones tropicales según la escala Saffir-Simpson (depresión tropical, tormenta tropical, huracanes categoría 1 a la 5), permitiendo obtener un mapa de probabilidad de ocurrencia de ciclones tropicales (ver figura 5.2).



**Figura 5.2 Probabilidad de ciclones tropicales en México**

Fuente: CENAPRED (2012).

Para los diferentes riesgos, las capas de peligro pueden ser consultadas en <http://www.atlasmacionalderiesgos.gob.mx/archivo/visor-capas.html>.

Los niveles de peligro expresados, corresponden a la probabilidad de ocurrencia del fenómeno climático.

La escala para valorar la probabilidad de un impacto puede ser definida como se establece en la tabla 5.1, donde se establece el nivel de probabilidad del impacto, su efecto, la escala y una breve descripción para el nivel correspondiente.

Cuando no se cuente con mapas de probabilidades de algún fenómeno en particular, o que se requiere un análisis más específico, el nivel de probabilidad se puede asignar de acuerdo al criterio experto del evaluador conforme a la tabla 5.1.

**Tabla 5.1 Escala de probabilidades de los impactos del cambio climático**

Nivel de probabilidad	Escala	Probabilidad del efecto	Descripción
Muy Alta	5	Casi cierto	Es más probable que ocurra que no (probabilidad cercana al 100%)
Alta	4	Probable	Es bastante probable que se produzca (probabilidad mayor a 50%)
Media	3	Posible	Es posible que pueda ocurrir (probabilidad menor al 50%)
Baja	2	Raro	Es poco probable que suceda pero no es imposible (mayor que cero)
Muy baja	1	Improbable	Es improbable que ocurra (cercano a cero)

Fuente: Elaboración propia basada en PIARC (2015).

Una vez establecida la escala de probabilidad para el sitio o el activo carretero, se requiere estimar el nivel de severidad del impacto en función de sus consecuencias.

## 5.2 Evaluación de las consecuencias del impacto

Al materializarse un evento asociado al cambio climático en una carretera, éste puede tener un rango de impactos diferentes y de magnitudes diversas, que afectan la función de la carretera.

El análisis de las consecuencias permite evaluar la gravedad o severidad de los daños ocurridos bajo la presencia de un fenómeno climático en particular.

Las consecuencias están ligadas al contexto establecido en la fase de planeación, particularmente el denominado contexto externo, tales como las partes interesadas y la población objetivo, las cuales pueden verse afectadas.

El análisis de consecuencias puede llevarse a cabo mediante una descripción simple de los resultados, hasta la implementación de modelaciones que permitan obtener resultados cuantitativos de manera detallada, para estos últimos se requiere información complementaria para determinar la gravedad del impacto.

Las organizaciones de carreteras deben determinar las consecuencias considerando aspectos relevantes, tales como:

- Pérdida de vidas y/o impactos en la salud
- Costo económico que representa el reemplazar/ reparar el activo carretero o el elemento (puente, corte, terraplén, pavimento, obra de drenaje, etc.).
- Interrupciones o retrasos del tránsito por el clima (determinación de las demoras que afectan el tránsito de personas y mercancías).

- Incremento de los costos operacionales para los vehículos (valor del tiempo para pasajeros o para las mercancías).
- Pérdidas económicas debido a accidentes de tránsito (daños a vehículos, personas lesionadas, etc.).
- Pérdida de señalamiento vertical bajo y elevado en las carreteras, así como el daño a dispositivos para el control de tránsito.
- Degradación acelerada de los elementos de la carretera que reducen la vida útil de proyecto.
- Incremento de los costos de la prima de seguros para el activo carretero.
- Aumento de los costos asociados a los programas de mantenimiento de carreteras.
- Aumento de los costos para la atención de emergencias en carreteras.
- Número de empresas/negocios afectados.
- Impactos ambientales y/o degradación ambiental (erosión de suelo).

Es importante que el evaluador identifique que no todas las consecuencias asociadas al clima se manifiestan de manera directa, o son medibles. La tabla 5.2 se proporciona una clasificación general de los tipos de daños asociados a amenazas naturales.

**Tabla 5.2 Tipología de daños asociados a amenazas naturales**

Tipo	Tangible	Intangible
<b>Directo</b>	Daños físicos a los activos: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Edificios.</li> <li>• Infraestructura carretera.</li> <li>• Puentes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdidas de vidas.</li> <li>• Efectos en la salud.</li> <li>• Pérdida de servicios ambientales.</li> </ul>
<b>Indirecto</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pérdida de producción industrial.</li> <li>• Interrupción del tránsito.</li> <li>• Costos de las emergencias.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inconvenientes de recuperación (parciales de las carreteras).</li> <li>• Incremento de vulnerabilidad de sobrevivientes.</li> </ul>

Fuente: Elaboración propia basada en Bubeck & Kreibich, 2011

Para determinar el nivel de las consecuencias del impacto, la organización de carreteras puede hacer uso de la tabla 5.3, la cual ejemplifica una matriz multicriterio para evaluar la severidad/gravedad de las consecuencias. Se recomienda que la

tabla sea ajustada conforme a la economía regional y su movilidad, ya que algunos atributos varían regionalmente en el país.

**Tabla 5.3 Matriz para la determinación de la escala de severidad/gravedad con base en potenciales consecuencias**

Escala	1 (Muy baja)	2 (Baja)	3 (Media)	4 (Alta)	5 (Muy alta)
Criterio	Consecuencias				
<b>Población afectada<sup>a</sup></b>	Menos del 1% de la población afectada	Entre el 1-2% de la población afectada	Entre el 2-5% de la población afectada	Entre el 5-10% de la población afectada	Más del 10% de la población afectada
<b>Costo del reemplazo/reparación del activo<sup>b</sup></b>	Menos del 5 MDP	Entre el 5-10 MDP	Entre el 10-20 MDP	Entre el 20-50 MDP	Más del 100 MDP
<b>Tránsito afectado (TDPA)<sup>c</sup></b>	<3,000	3,001-10,000	10,001-20,000	20,001-40,000	>40,000
<b>Tránsito pesado afectado (% del TDPA)<sup>d</sup></b>	<5%	6-10%	11-20%	21-30%	>30%
<b>Tipo de camino</b>	Carretera Tipo "D" (red alimentadora)	Carretera Tipo "C" de 2 carriles (red secundaria)	Carretera Tipo "B" de 2 y 4 carriles (red primaria)	Carretera Tipo "A" de 2 y 4 carriles	Eje de Transporte de 2 y 4 carriles
<b>Costos de mantenimiento<sup>e</sup></b>	Menos del 1%	Entre el 2-5%	Entre el 6-10%	Entre el 11-20%	Más del 20%

Fuente: Elaboración propia, basada de PIARC (2015) y DGST, 2016.

Notas:

- Se puede cuantificar en número de habitantes que se encuentren la zona de influencia del impacto con respecto de la población total del país o de la región.
- El valor debe ajustarse conforme la inflación de los costos (MDP, Millones de Pesos Mexicanos).
- El TDPA debe ser cuantificado en ambos sentidos en la carretera que podría verse afectada.
- El porcentaje de vehículos pesados del TDPA representa el impacto que podría darse en el movimiento de mercancías, el cual refleja las afectaciones a las empresas en las afectaciones en sus cadenas logísticas.

- e) Se estima en cuanto se incrementa el presupuesto del mantenimiento debido a la conservación de los pavimentos o de las obras de drenaje, las cuales requieren una mayor intervención por el cambio climático. La estimación se puede realizar con el gasto histórico de la carretera o activo en mantenimiento, considerando la tasa de inflación anual.

Los criterios de la tabla 5.3 pueden utilizarse como están establecidos en la matriz o ajustarse por la organización de carreteras, considerando que se pueden agregar todos los que crea necesarios.

El resultado de la tabla 5.3 debe ser un promedio simple de los valores asignados a cada criterio. Una vez realizado el promedio se determina el nivel correspondiente como se indica a continuación:

Resultado	Niveles de consecuencias	Calificación
>4.0	Muy alta	5
3.0<X≤4.0	Alta	4
2.0<X≤3.0	Moderada	3
1.0<X≤2.0	Baja	2
=1.0	Muy baja	1

El valor a utilizar para el cálculo del nivel de riesgo, será el valor asignado como calificación.

Conjuntamente se recomienda realizar un registro de riesgos, indicando las causas y la información utilizada para la valoración.

### 5.3 Nivel de riesgo

Para evaluar el nivel de riesgo se debe calcular el riesgo, conforme la ecuación indicada al inicio del capítulo, donde el riesgo será igual a la probabilidad multiplicados por las consecuencias del impacto.

La tabla 5.4 muestra la matriz para la valoración de riesgos, en los cuales se observa la escala de probabilidad y de consecuencias, y su respectiva calificación del riesgo. El contexto permite determinar la importancia del nivel y el tipo de riesgo.

**Tabla 5.4 Matriz para la valoración de riesgos**

Escala de probabilidad	Escala de consecuencias				
	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	2	4	6	8	10

3	3	6	9	12	15
4	4	8	12	16	20
5	5	10	15	20	25

Fuente: Elaboración propia, basada de PIARC (2015).

Con los valores obtenidos de la matriz de valoración de riesgos, se puede elaborar un mapa de riesgos para identificar los que requieran atención inmediata. La figura 5.3 muestra el mapa de riesgos.

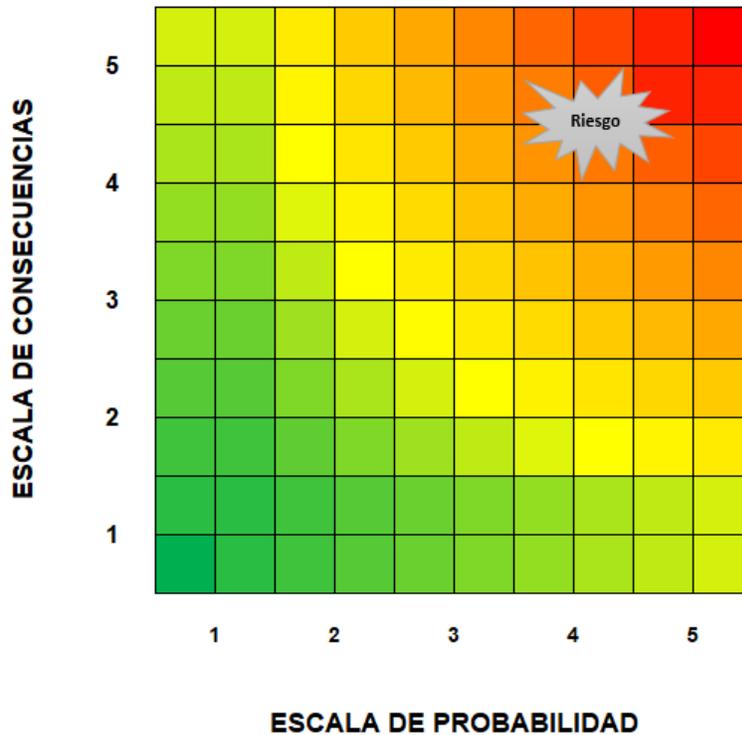


Figura 5.3 Mapa de riesgos

Fuente: Elaboración propia.

Con información de las posibles consecuencias y la probabilidad del impacto, es posible establecer una categoría de riesgos. La tabla 5.5 muestra las categorías para el presente marco metodológico.

Tabla 5.5 Categorías de riesgo

<b>Muy alto <math>\geq 20</math></b>	Los activos que tienen una alta probabilidad de verse afectados por una condición climática futura y sus probables consecuencias pueden ser graves/severas al verse afectados por esa condición.
<b>Alto <math>\geq 12</math></b>	Los activos que tienen una alta probabilidad de verse afectados por un fenómeno climático futuro y sus probables consecuencias son

	moderadas al verse afectados por esa condición.
<b>Medio <math>\geq 5</math></b>	Los activos tienen una probabilidad baja de verse afectados por una condición climática futura, pero sus probables consecuencias son de magnitud importante al verse afectados por esa condición.
<b>Bajo <math>&lt; 5</math></b>	Los activos que tienen una baja probabilidad de ser afectados por un fenómeno climático futuro y sus probables consecuencias son mínimas al verse afectados por esa condición.

Fuente: Elaboración propia basada en PIARC (2015) y FHWA (2018).

## 5.4 Atención de riesgos

La categorización de riesgos permite establecer la línea base para la toma de decisiones futuras para la atención de los riesgos.

Algunas de las decisiones que sugiere la norma IEC/ISO 31010-2009 emprender son:

- Si el riesgo requiere tratamiento.
- Priorizar los riesgos para su atención.
- Tomar decisiones sobre si debe emprender o no actividades de adaptación.
- El camino a seguir, de acuerdo a las opciones disponibles

Los riesgos se pueden atender en tres direcciones:

- a) La atención prioritaria (Nivel muy alto y alto), en la que el nivel de riesgo se considera intolerable, independientemente de los beneficios que pueda aportar la actividad, y el tratamiento del riesgo es esencial a cualquier costo;
- b) La atención media (nivel medio) (o área neutral) donde los costos y beneficios se toman en cuenta y las oportunidades se comparan con las posibles consecuencias;
- c) La atención baja (nivel bajo), donde el nivel de riesgo se considera insignificante, o tan pequeño que no se requieren medidas de tratamiento de riesgo.

Cada organización de carreteras debe establecer el nivel aceptable de riesgos, para priorizar y definir a aquellos que serán atendidos.

Los activos carreteros que requieran atención inmediata deberán continuar a la etapa siguiente del presente marco para determinar las medidas de adaptación óptimas.

## 6 Determinación de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático

---

La adaptación consiste en acciones deliberadas emprendidas para reducir las consecuencias adversas, así como aprovechar cualquier oportunidad beneficiosa.

Adaptación es un concepto que se entiende como la acción y el efecto de adaptar o adaptarse, un verbo que hace referencia a la acomodación o ajuste de algo respecto a otra situación, esto implica para las organizaciones de carreteras emprender acciones para aumentar la resiliencia de su red de carreteras.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, 2008 (OCDE, por sus siglas en inglés), el proceso de adaptación al clima y al cambio climático es complejo y multifacético. Como tal, es muy difícil hacer una adaptación analítica y justa. Una serie de tipologías se han desarrollado para clasificar las acciones de adaptación. Por ejemplo, las medidas de adaptación se han clasificado de acuerdo con: tiempo (anticipada vs. reactiva); alcance (local vs. regional; corto plazo vs. largo plazo); propósito (autónomo vs. planeado; adaptación activa o pasiva); y agente de adaptación (sistemas naturales vs. humanos; individuos vs. colectivos; privados vs. públicos).

Las estrategias de adaptación en el sector de transporte pueden clasificarse de acuerdo al Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2014) en tres categorías principales:

- i) las que se dirigen a identificar los riesgos y vulnerabilidades.
- ii) las que procuran proteger y fortalecer la infraestructura vulnerable, y
- iii) las que tienen por objetivo crear otras vías para mejorar la resiliencia del sistema de transporte.

Las opciones de adaptación en el sector en general, de acuerdo al Banco Asiático de Desarrollo (2011), pueden dividirse en opciones de ingeniería (estructurales) tales como: las condiciones del subsuelo, especificaciones de materiales, proyecto geométrico, drenaje y erosión, y estructuras de ingeniería para la protección; y las opciones que no son de ingeniería: planificación del mantenimiento y los sistemas de alerta temprana, planificación del uso del suelo y la gestión ambiental.

La atención de los riesgos del cambio climático es esencial dentro del proceso de adaptación al cambio climático, donde existen tres enfoques para abordarlos y se muestran en la tabla 6.1, la cual se adaptó para mostrar únicamente aquellas que puedan tener un impacto para el sector transporte.

**Tabla 6.1 Enfoques para la gestión de riesgos del cambio climático**

Enfoque	Categoría	Ejemplos
Reducción de la vulnerabilidad y la exposición	Gestión de riesgos de desastres	Sistemas de alerta temprana; cartografía de peligros y vulnerabilidades; drenaje mejorado; refugios contra inundaciones y ciclones; códigos y prácticas de edificación; gestión de tormentas y aguas residuales; mejoras del transporte y la infraestructura vial.
	Planificación espacial o de uso del suelo	Infraestructuras y servicios adecuados; gestión del desarrollo en las zonas inundables y otras zonas de alto riesgo; planificación urbanística y programas de mejoras; legislación sobre división territorial.
Adaptación	Estructura física	<u>Opciones de ingeniería</u> : malecones y estructuras de protección costera; diques para el control de crecidas; drenaje mejorado; refugios contra inundaciones y ciclones; elaboración de códigos y prácticas; gestión de tormentas y aguas residuales; mejoras del transporte y la infraestructura vial. <u>Opciones tecnológicas</u> : elaboración de esquemas y vigilancia de los peligros y vulnerabilidades; sistemas de alerta temprana; aislamiento de edificios; desarrollo, transferencia y difusión de tecnología. <u>Opciones ecosistémicas</u> : restauración ecológica; conservación del suelo; forestación y reforestación.
	Institucional	<u>Opciones económicas</u> : incentivos financieros; seguros; bonos de catástrofe; fondos para imprevistos en casos de desastre; asociaciones público-privadas. <u>Leyes y reglamentos</u> : normas y prácticas de edificación; legislación en apoyo de la reducción de riesgos de desastre; legislación en favor de la contratación de seguros. <u>Políticas y programas nacionales y gubernamentales</u> : planes de adaptación nacionales y regionales e incorporación general de la adaptación; planes de adaptación subnacionales y locales; planificación y preparación para casos de desastre; ordenación integrada de los recursos hídricos; ordenación integrada de las zonas costeras; adaptación de la comunidad.
Transformación	Social	<u>Opciones educativas</u> : sensibilización e integración en la educación; intercambio de conocimientos; investigación; plataformas de intercambio de conocimientos y aprendizaje. <u>Opciones de información</u> : elaboración de esquemas de peligros y vulnerabilidades; sistemas de alerta temprana y respuesta; vigilancia y teledetección sistemáticas; servicios climáticos. <u>Opciones de comportamiento</u> : preparación de viviendas y planificación de la evaluación; conservación del suelo y el agua; desatasco de drenajes pluviales.
	Cambios	<u>Práctica</u> : innovaciones sociales y técnicas, cambios de comportamiento o cambios institucionales y de gestión que produzcan modificaciones sustanciales en los resultados. <u>Política</u> : decisiones y medidas de carácter político, social, cultural y ecológico en sintonía con la disminución de la vulnerabilidad y el riesgo y el apoyo de la adaptación, la mitigación y el desarrollo sustentable. <u>Personal</u> : presunciones, creencias, valores y visiones del mundo individuales y colectivos que influyan en las respuestas al cambio climático.

Fuente: Elaboración propia, basado en: IPCC, 2014

Una de las mayores complicaciones para adaptarse al cambio climático es la incertidumbre de los escenarios climáticos. Estas incertidumbres complican la estandarización de las medidas de adaptación, por lo que cada acción adaptativa deberá tener cierto grado de flexibilidad para continuar adaptándose a condiciones futuras del clima no previstas inicialmente.

El reto para las organizaciones de carreteras es aumentar la resiliencia de la red para prevenir incidentes o reducir el impacto que las condiciones meteorológicas extremas están teniendo sobre la infraestructura carretera, para ello se requiere elegir acciones de adaptación generales para la organización y específicas que permitan asegurar la integridad física de su infraestructura.

Las fases anteriores permitieron identificar sitios en riesgos, a los cuales se les pudo evaluar su grado de vulnerabilidad y su nivel de riesgo con la finalidad de priorizar aquellos que requieran una atención inmediata o en un corto plazo. Esto implicará en la presente etapa, identificar y seleccionar la medida de adaptación para cada caso en particular.

## **6.1 Identificación de las medidas de adaptación**

Esta sección resume la práctica internacional de las acciones de adaptación en el sector carretero, para los diferentes eventos asociados al cambio climático, esto significa que son recomendaciones generales, que permiten guiar a la agencia de carreteras para la identificación de acciones específicas.

El conocimiento local y el involucramiento 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.

A continuación, se presentan una lista enunciativa basada en una búsqueda bibliográfica sobre las mejores prácticas para el sector carretero.

### **6.1.1 Aumento del nivel del mar**

Un efecto importante para las carreteras es el aumento del nivel del mar, el cual está asociado al deshielo de los polos, aunque también el agua al aumentar su temperatura aumenta su volumen, incrementando su nivel, el cual rebasa las líneas de costa históricas.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) En Nueva Zelanda se cuenta con una guía para amenazas costeras, la cual sugiere, para los proyectos carreteros nuevos, que la línea principal se ubique fuera de las zonas de riesgo y que las carreteras secundarias se construyan perpendiculares a la línea de costa (NZCCO, 2004).
- b) Para carreteras costeras es necesario aumentar el nivel de la subrasante para evitar inundaciones, cierres por marejadas y por el futuro creciente nivel del mar (Richardson, 2010) (AIPCR, 2011) (PIARC, 2015). Las medidas pueden incluir relocalización o rediseño de la infraestructura, tanto carreteras como sus puentes, o reingeniería de las estructuras de protección (GOC,

2004) (AIPCR, 2011) (PIARC, 2015) (Asian Development Bank, 2011), o diseñar los terraplenes para que hagan su función como diques (PIARC, 2015). En la medida de lo posible mover las instalaciones tierra adentro de la línea de costa (IDB, 2015)

- c) Utilizar pintura anti-corrosión debido al aumento en los niveles de salinidad en la superficie en algunos lugares. (PIARC, 2015).
- d) En zonas costeras, sustituir alcantarillas metálicas por las de concreto armado (PIARC, 2015).
- e) Desarrollar una estrategia costera, que identifique el plan más adecuado para la gestión y de esa forma identificar las defensas costeras que serán necesarias para implementarse (PIARC, 2015).
- f) Re-ubicación de la infraestructura crítica de las zonas que se prevé se encuentren en mayor riesgo de aumento del nivel del mar (PIARC, 2015).

### **6.1.2 Altas temperaturas y olas de calor**

El aumento en la frecuencia y severidad de temperaturas extremadamente altas pueden conducir a diferentes impactos en la infraestructura carretera, tales como el deterioro del pavimento y la formación de roderas.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) Considerar la posibilidad de modificar la temporada de construcción para comenzar anticipadamente a lo habitual y finalizar antes del aumento de las temperaturas. Durante el verano, el trabajo de la construcción deberá considerar moverse a turnos de horas tempranas de la mañana y por la noche (FHWA, 2015).
- b) Redirigir el tráfico pesado durante tiempos prolongados en condiciones calientes y secas (3CAP, 2009), (AIPCR, 2011).
- c) Considerar la posibilidad de cambiar las especificaciones de los rendimientos de trabajo para que incluyan los efectos adversos del cambio climático (3CAP, 2009).
- d) Considerar el uso de módulos altos para los materiales de base, carpeta y de la corona. (3CAP, 2009).
- e) Asegurarse de una buena compactación y curado del pavimento y sus capas. (3CAP, 2009), (AIPCR, 2011).
- f) Usar asfaltos modificados que son menos propensos al desgaste de la carpeta y otros materiales con una mayor rigidez. (3CAP, 2009).

- g) Construir pavimentos de concreto para evitar problemas con el asfalto en caso de temperaturas extremas (IDB, 2015), (AIPCR, 2011).
- h) En la repavimentación considerar el uso de mezclas asfálticas en frío para reducir las temperaturas superficiales (FHWA, 2015), (AIPCR, 2011).
- i) Utilizar materiales resilientes y procesos que tengan propiedades más resistentes al calor. (PIARC, 2015).
- j) Inducir las grietas transversales en los pavimentos durante la repavimentación y actividades para reparar y reducir el riesgo de agrietamiento en altas temperaturas. (3CAP, 2009).
- k) Considerar usar agregado color claro y/o asfalto de color modificado en la corona para incrementar la refracción solar y reducir la temperatura del pavimento (3CAP, 2009), (PIARC, 2015).
- l) En Japón para mantener la temperatura del pavimento baja, durante el transcurso del día inducen un riego con agua (AIPCR, 2011).

### **6.1.3 Ciclones tropicales, huracanes y marejadas**

En México la presencia de fenómenos meteorológicos como ciclones y huracanes es más frecuente y sus efectos en ocasiones tienen dimensiones catastróficas, derivados de fuertes lluvias, fuertes vientos y grandes oleajes.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) Especificar las dimensiones de la estructura, de tal manera que sean compatibles con las condiciones meteorológicas en el lugar donde se propone la construcción de esta. (AIPCR, 2011).
- b) Construir carreteras elevadas con zanjas de drenaje llenas de rocas a lo largo de sus costados para aumentar la infiltración (IDB, 2015).
- c) Evaluación estructural de puentes colgantes, señalamiento y estructuras altas (PIARC, 2015).
- d) Construir muros verticales, escolleras, rompeolas mar adentro, espigones, diques y protecciones marginales para prevenir la erosión de las costas, la sumersión y su hundimiento en carreteras costeras (PIARC, 2015).
- e) En cuanto a la energía, los eventos climáticos pueden comprometer su continuidad y no proveer el servicio adecuado en las instalaciones, por lo que se deberán tomar medidas para garantizar el suministro a pesar de tormentas intensas y ciclones, así como brindar las líneas de conducción adicionalmente para las altas temperaturas (RAI, 2011).

- f) Serán necesarios durante la operación sistemas automáticos para reportar las condiciones de la infraestructura de acuerdo al clima actual y el estado del tiempo, mediante la utilización de tecnología de sensores (RAI, 2011). Este tipo de tecnología se le ha denominado “Sistemas de Información Meteorológica/Climática para los Usuarios de las Carreteras”.

#### **6.1.4 Incremento de tormentas y de la precipitación**

El aumento de la precipitación suele causar interrupciones en las carreteras debido, principalmente, a las inundaciones, mientras que las tormentas y los huracanes lo hacen de forma más repentina y severa, dañando la infraestructura carretera.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) Se debe hacer un estudio más a fondo del pronóstico, ya que el clima tiene un comportamiento inherente y como el cambio climático puede afectar la inversión económica y el ciclo de mantenimiento. (J. Neumann, 2015).
- b) Considerar periodos de retorno más largos para eventos excepcionales, así como para estimar los volúmenes de las tormentas en un mayor periodo, para el diseño de obras hidráulicas. (3CAP, 2009).
- c) La administración de carreteras en Suecia (SRA), comenzó con pruebas enfocadas para identificar las deficiencias de drenajes por capacidad de cargas, con el objetivo de construir drenajes más efectivos. (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).
- d) Utilizar puentes de armaduras en muelles y alcantarillas para aumentar el gasto y área hidráulica (IDB, 2015), (Asian Development Bank, 2011).
- e) Utilizar materiales que sean menos propensos a ser afectados por el agua (PIARC, 2015), (Asian Development Bank, 2011).
- f) Aumentar el número y la frecuencia de los trabajos de mantenimiento para los puentes que se hayan identificado en riesgo susceptible por el cambio climático, para que se realicen los trabajos de refuerzo y reparación necesarios (3CAP, 2009). Así también la del drenaje en relación al aumento de la frecuencia de grandes tormentas. (World Bank, 2010).
- g) Para asegurar un mejor funcionamiento de las obras de drenaje, tales como cunetas, contracunetas, alcantarillas, etc., es necesario revisar la ingeniería y modificar la capacidad de sus gastos hidráulicos, con la finalidad de adaptarlas a las nuevas condiciones de intensidad y duración de las lluvias (Infraestructure Canada, 2006) (Asian Development Bank, 2011)

### **6.1.5 Vendavales o vientos fuertes**

Las tormentas suelen estar acompañadas de vientos fuertes que provocan daños severos en la infraestructura vial y principalmente afectan su operación.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) El diseño de carreteras deberá ser en base a predicciones futuras para que estas sean resilientes al cambio climático que puedan enfrentar en otro momento. (3CAP, 2009). Ej. Debido al aumento de las fuerzas del viento, deberán modificar el diseño de soportes y anclajes. (PIARC, 2015).
- b) Considerar la aplicación de geomallas para reducir vacíos en las capas de interfaces. (3CAP, 2009). Y mallas de recubrimiento para el control de la erosión.
- c) Proteger la superficie para evitar la posible erosión por viento en zonas con alta intensidad de vendavales. (AIPCR, 2011).
- d) Mejorar el conocimiento sobre los árboles existentes dentro del derecho de vía y zonas aledañas, evaluar riesgos probables para establecer un esquema de prioridad para su inspección y mantenimiento (3CAP, 2009).
- e) Mejorar los códigos de construcción para manejar las ráfagas de viento más altas y con ellos evitar la pérdida de señalamiento vertical (IDB, 2015).

### **6.1.6 Alta presencia de agua, inundaciones y avenidas torrenciales**

Las precipitaciones excesivas y las tormentas traen consigo daños adicionales a la infraestructura, principalmente por la cantidad de precipitación en un tiempo corto, generando su acumulación.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) Se debe revisar los códigos de diseño enfocados al periodo de retorno de avenidas. (AIPCR, 2011).
- b) Las estrategias de adaptación deben incluir gestión del uso del suelo en las zonas aledañas al camino para reducir el riesgo, así como utilizarse para aprovechar el potencial de los sistemas naturales ante amenazas climáticas (NTPP, 2009).
- c) Elaborar planes para el manejo de agua superficial y manejo de riesgos de inundación. (PIARC, 2015).

- d) Incrementar el conocimiento del comportamiento del agua en la construcción de carreteras y sus alrededores. (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).
- e) Reacondicionar los drenajes con dispositivos que permitan incrementar la capacidad de descarga, así como adicionar zanjas, tuberías y alcantarillas. (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).
- f) Establecer represas para el control de flujos. (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).
- g) Los pavimentos asfálticos porosos permiten una alta permeabilidad de los flujos de agua, por eso aproximadamente el 90% de las carreteras en Holanda están construidos con este tipo de pavimento, aunque reconocen que, a pesar de este beneficio para controlar inundaciones por el cambio climático, este tipo de pavimento tiene una vida útil limitada (Kwiatkowski et al., 2013). La implementación de pavimentos permeables en caminos peatonales (CCAP, 2010) reduce la acumulación del agua, que adicionalmente en carreteras de altos volúmenes podría implementarse en los acotamientos u otras instalaciones para el transporte tales como los estacionamientos. Así también, como aumentar la pendiente del pavimento en las zonas donde se puede esperar que se requiera la extracción de agua. (Asian Development Bank, 2011).
- h) Construir o mejorar diques en los principales ríos, para evitar inundaciones de las redes carreteras interurbanas, en la proximidad a ciudades (IDB, 2015).
- i) Reforzar determinados elementos de drenaje (cunetas, bordillos, bajantes). (Gobierno de España, 2013)
- j) Construir infraestructura de protección en ríos para disminuir la velocidad de los flujos de agua en las proximidades de las pilas y estribos de los puentes, para evitar la socavación.
- k) Utilizar dispositivos para prevenir la obstrucción de instalaciones de drenajes. (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).
- l) Renovación de estaciones de bombeo de zonas en barrancos o cañadas que usualmente están sujetas a inundaciones (PIARC, 2015). En zonas previstas de inundación se deben instalar sistemas de bombeo, particularmente en pasos a desnivel inferiores (IDB, 2015).
- m) Mejorar los sistemas de infiltración en carreteras, mediante el uso de pavimentos porosos, estanques de bioretención o pozos de alivio, etc. (IDB, 2015).
- n) Asegurar el funcionamiento de presas, estanques y otras construcciones localizadas aguas arriba. (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).

- o) Una adecuada gestión del agua pluvial, sobre todo en carreteras urbanas, ayuda a eliminar las inundaciones, por lo que es necesario modificar y conectar los sistemas de drenaje pluvial de los sistemas de transporte (CCAP, 2010).

### **6.1.7 Sequía e incendios**

Las condiciones de sequía y falta de agua también provocan impactos a la infraestructura carretera y a su operación.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) Revisar las especies de vegetación del lugar para asegurar que las que se implementen sean las más apropiadas de acuerdo al cambio climático y los fenómenos climáticos de la zona (3CAP, 2009), (PIARC, 2015) (Juan José Campos López, 2014).
- b) A falta de agua, ignorar la cohesión del suelo en el cálculo de estabilidad de la estructura y tomar en cuenta técnicas bio-ingenieriles para estabilizar las pendientes. (AIPCR, 2011).
- c) Durante la construcción asegurarse de una buena compactación y curado del pavimento y sus capas. (3CAP, 2009)
- d) Plantar una vegetación más tolerante a la sequía que sea menos propensa a aportar combustible para incendios forestales (FHWA, 2015), (PIARC, 2015).
- e) Mejorar la cobertura de los equipos de extinción de incendios (PIARC, 2015).

### **6.1.8 Bajas temperaturas y olas frías**

Las temperaturas extremadamente bajas provocan daños a la infraestructura carretera, particularmente a los pavimentos.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) Para los pavimentos asfálticos se deben seleccionar cementos asfálticos o emulsiones asfálticas que consideren las variaciones de temperatura para evitar craqueo térmico con temperaturas frías o deformaciones bajo temperatura calientes, las innovaciones relacionadas con el diseño y la construcción pueden reducir la vulnerabilidad actual y futura de la red de carreteras (GOC, 2004).

- b) Arenar de asfalto (polvo de arena bituminosa) las superficies en verano, para prevenir la pérdida de resistencia contra el patinaje. (3CAP, 2009).
- c) Identificar las rutas que tienen el mayor riesgo de formación de hielo para implementar acciones que disminuyan el riesgo de estabilidad de los vehículos (3CAP, 2009). Incluye una revisión de los recursos disponibles para atender las acciones de mitigación para la operación segura de la carretera.
- d) Utilizar “sistemas de recuperación de calor con el agua de drenaje” para facilitar la extracción de calor desde la orilla durante el invierno (PIARC, 2015).
- e) Extracción del calor mediante convección de aire en los terraplenes en el permacongelamiento (esto implica terraplenes de refrigeración como un esfuerzo por mantener en condiciones de frío el suelo congelado) (PIARC, 2015). Actualmente no es un caso de aplicación en México.

### **6.1.9 Aluviones y deslizamientos**

Estos impactos geológicos al conjuntarse con eventos del tipo hidrometeorológicos traen consigo impactos para las carreteras.

Para mitigar el impacto, las organizaciones de carreteras han implementado o sugerido las siguientes acciones:

- a) Construir taludes más tendidos. (Gobierno de España, 2013).
- b) Reforzar las obras de protección a pie de terraplén en causes de río. (Gobierno de España, 2013) (AIPCR, 2011).
- c) Realizar estudios de estabilidad de taludes y laderas para minimizar los deslizamientos de tierra y rocas por consecuencia del aumento de la precipitación, así también como estudios para incrementar su estabilidad (PIARC, 2015).
- d) En zonas identificadas como potencialmente peligrosas por la inestabilidad de laderas, es importante implementar medidas de vigilancia permanente, utilizando: probetas para conocer la cantidad de lluvia, sensores para detectar movimientos, medición periódica de las deformaciones y agrietamientos, verificar la inclinación de árboles o postes (CENAPRED, 2007).

## **6.2 Medidas de adaptación**

Adicionalmente a las medidas de adaptación a la estructura física de los elementos que integran la carretera, es necesario implementar políticas que coadyuven a mejorar la operación institucional, y sustancialmente modifiquen la forma de diseñar

las carreteras, incorporando al cambio climático en la normativa para diseño de carreteras, obras hidráulicas y puentes.

A continuación, se presentan una lista de recomendaciones internacionales para el sector carretero, clasificadas en medidas normativas, institucionales, concientización y de investigación.

### **6.2.1 Medidas normativas**

Uno de los pasos más críticos en la adaptación de la infraestructura es la integración de las consideraciones de adaptación al cambio climático en las normas.

A continuación, se sugieren algunas propuestas que pueden influir para la adaptación en las organizaciones de carreteras:

- a) Una de las principales respuestas de adaptación para la infraestructura carretera en el Reino Unido y otras organizaciones es revisar las especificaciones para diseño y construcción de nueva infraestructura, incluyendo factores del cambio climático y la implementación de estos nuevos estándares (DETR, 2000). (Nordic Development, 2016) (PIARC, 2015) (World Bank, 2010). Las normas y procedimientos deben considerar los efectos probables del clima, tanto para infraestructura nueva como la existente, para que sea más resiliente al estado del tiempo y el clima actual (GOC, 2004). Actualización de los requisitos de diseño, incluidas las normas y especificaciones técnicas, para proporcionar capacidad/funcionalidad adicional para el caso del cambio climático, con la finalidad de que el activo o la actividad tengan un desempeño satisfactorio a lo largo de su ciclo de vida [HA, 2012].
- b) Integrar herramientas para introducir la adaptación al cambio climático de la nueva infraestructura en la planeación, tales como la evaluación estratégica ambiental o la evaluación del impacto ambiental, que actualmente se utiliza para evaluar proyectos o programas (DETR, 2000), (Nordic Development, 2016) (Bipartisan Policy Center).
- c) Los proyectos en su fase de planeación deberán contar con una evaluación sistemática del riesgo, basados en registros y sistemas de información precisos, mediante los cuales se pueda evaluar el riesgo del cambio climático. Será esencial un análisis de riesgo complejo, más que un análisis de partes aisladas de la infraestructura o un análisis de riesgos individuales (RAI, 2011) (Willwat et al, 2008) (CDKN & Gobierno de Colombia, 2014) (EEA, 2014) (Bipartisan Policy Center) (Axelsen et al, 2016).
- d) La administración de carreteras en Suecia, sugiere evitar los cambios por uso de suelo que puedan afectar negativamente el drenaje carretero. (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).

- e) Revisar las especificaciones actuales de los materiales para evaluar su idoneidad para su resiliencia a los efectos del cambio climático (3CAP, 2009). (Gobierno de España, 2013). (Juan José Campos López, 2014) (Asian Development Bank, 2011).
- f) Incorporar el cambio climático en el análisis del ciclo de vida de los activos carreteros y sus elementos, tales como los pavimentos (RAI, 2011). Las medidas de adaptación deben incorporarse a los procesos de mantenimiento de rutina y al reemplazo del ciclo de vida de los activos.

## 6.2.2 Medidas institucionales

La reevaluación y modificación de los criterios técnicos y de planificación influirá potencialmente en la organización, por lo que se verán forzados a implementar medidas institucionales para la adaptación al cambio climático.

A continuación, se sugieren algunas propuestas que pueden influir en la adaptación en las organizaciones de carreteras:

- a) Desarrollar redundancia en los servicios, mediante estrategias que permitan prepararse para la pérdida intermitente de servicio, por lo que será necesario el desarrollo de rutas o servicios alternativos para mantener la continuidad de los viajes cuando éste sea interrumpido por las consecuencias de un fenómeno climático (NTPP, 2009), (PIARC, 2015).
- b) Para la planeación de una correcta adaptación de carreteras el fondo de desarrollo nórdico definió los impactos potenciales al cambio climático en la red de carreteras, mediante un mapeo de vulnerabilidades en donde se pueda identificar las áreas o regiones a lo largo de estas carreteras, las cuales sean las más propensas a ser afectadas. (NORDIC DEVELOPMENT, 2016). Realizar un mapeo de las zonas o puntos críticos propensos a ser afectados por el cambio climático (PIARC, 2015).
- c) Recolectar información climática creíble para preparar los perfiles del cambio climático y escenarios vulnerabilidades. Esta información se compara con la verificación en campo para habilitar el mapeo de las vulnerabilidades en la red carretera. (NORDIC DEVELOPMENT, 2016).
- d) Registrar y monitorear los efectos del clima en las carreteras locales y compartir esta información y lecciones aprendidas con otras localidades. (T. Willway, S. Reeves, 2008).
- e) Desarrollar herramientas para evaluar el potencial de impacto del clima en la infraestructura del transporte durante el proceso de planeación. (NORDIC DEVELOPMENT, 2016), (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).
- f) Planes de mantenimiento para las instalaciones del drenaje, con inspección y limpieza. (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).

- g) Asegurar que los planes de gestión de activos de infraestructura tomen en cuenta las adaptaciones requeridas para el cambio climático en los programas de repavimentación (3CAP, 2009).
- h) Asegurar que el mantenimiento debe incluir limpieza de las obras de drenaje (cunetas, contracunetas, alcantarillas, etc.) (World Bank, 2010), levantamiento de material caído de los taludes, retiro de sedimentos y basura, retiro de materia vegetal. etc. (Infraestructure Canada, 2006), (Gobierno de España, 2013), (AIPCR, 2011).
- i) Aumentar la inspección y seguimiento de las condiciones de la carretera para programar el mantenimiento adecuado (FHWA, 2015), (AIPCR, 2011).
- j) Invertir en la gestión de activos, llevar a cabo estudios de drenaje y mejorar la información de los activos de drenaje, capacidad hidráulica y características técnicas (3CAP, 2009). (Kalantari, Z. & Folkenson, L., 2013).
- k) Identificar la naturaleza y frecuencia de los cambios que se necesitan para los regímenes de inspección y mantenimiento de puentes y otras estructuras (3CAP, 2009).
- l) Incorporar sistemas de alerta en los activos que se ubiquen en zonas vulnerables (FHWA, 2015) (PIARC, 2015).
- m) Empezar una auditoria de sustentabilidad de mantenimiento y administración de planes, asegurándose de que la adaptación no genere más gases que contribuyen al efecto invernadero (T. Willway, S. Reeves, 2008).
- n) Mejora de los métodos para informar a los usuarios de la red en el caso de una emergencia (PIARC, 2015).
- o) En la operación se requiere información detallada en tiempo real de las condiciones climáticas y del estado físico de la infraestructura, por lo que será necesario contar con más Sistemas Inteligentes para el Transporte (ITS, por sus siglas en inglés), los cuales podrán proporcionar información a los usuarios de la red carreteras (GOC, 2004).
- p) El desarrollo de programas para la gestión de desastres resulta necesario para los corredores de transporte principales, para preparar la respuesta para la atención de emergencias, incluyendo escenarios de crisis que permitirán evaluar la capacidad de robustez de la infraestructura (Cochran, 2009).
- q) Desarrollar rutas para la evacuación dentro del sistema carretero para salvaguardar la vida y evitar demoras en la respuesta para hacer frente a las emergencias.

### 6.2.3 Concientización

El conocimiento del cambio climático y las implicaciones necesarias, que los actores involucrados requieren para hacer frente, son vitales para fortalecer toda acción de adaptación, destacando las siguientes recomendaciones:

- a) Aumentar la conciencia sobre la necesidad de la adaptación con la sociedad, los tomadores de decisiones y los ingenieros de caminos (DETR, 2000). Ayudar a los ciudadanos, las comunidades y las industrias a comprender los riesgos de los impactos del cambio climático y su papel en los esfuerzos de adaptación (NTPP, 2009).
- b) Capacitar al personal existente sobre los impactos potenciales del cambio climático y cómo esto puede afectar sus roles y responsabilidades (FHWA, 2015).
- c) Se requieren cambios en los procesos de toma de decisiones para incorporar evaluaciones del riesgo de cambio climático para hacer infraestructura más resiliente y con mayor rentabilidad (NTPP, 2009).

### 6.2.4 Investigación

Es necesario realizar más investigaciones para comprender mejor cómo se establecen y aplican actualmente los criterios del cambio climático y cómo sus resultados pueden auxiliar a la toma de decisiones para la adaptación, por lo que en este apartado se describen las experiencias recabadas sobre el alcance de la investigación sobre cambio climático e infraestructura carretera. A continuación, se sugieren algunas oportunidades de investigación identificadas en la búsqueda bibliográfica:

- a) Un objetivo básico es realizar investigación para reducir la incertidumbre, cuando ésta presenta una barrera para determinar las opciones de adaptación óptimas con un nivel razonable de confianza. Podría también enfocarse para proporcionar una mejor comprensión de la probabilidad y las consecuencias del riesgo para la red. Alternativamente, podría ayudar a determinar o refinar las opciones de adaptación apropiadas (HA, 2012).
- b) Una de las acciones de mitigación es el uso de vehículos eléctricos o híbridos, pero poco se ha evaluado el impacto que éstos tendrán en su operación (sobrecalentamiento de las baterías, temperatura de las estaciones de recarga, etc.) por lo que se requiere investigación sobre cómo

se verán afectadas estas tecnologías e infraestructuras con los efectos del cambio climático (RAI, 2011).

- c) Existe la necesidad de generar un compendio del conocimiento sobre la recuperación de desastres relacionados con el cambio climático (RAI, 2011). Crear informes de eventos posteriores que evalúen lo que funcionó y lo que no. Revisar los planes basados en las lecciones aprendidas (FHWA, 2015).
- d) Se requiere investigar las limitaciones asociadas a los propietarios de los terrenos aledaños a la infraestructura carretera, ya que influyen negativamente en la vulnerabilidad del activo y, en ocasiones, son obstáculo para la implementación de las acciones de adaptación (RAI, 2011).
- e) Investigar otras tecnologías que sean adecuadas para una construcción más rápida durante condiciones climáticas adversas (FHWA, 2015).
- f) Trabajar con meteorólogos y climatólogos para desarrollar un proceso que incluya los eventos futuros previstos del clima (FHWA, 2015).
- g) Realizar estudios de inundación con ayuda de otras organizaciones (3CAP, 2009).
- h) Los programas de investigación federales y de otro tipo deberían desarrollar tecnologías de monitoreo que proporcionen advertencias anticipadas de fallas inminentes debido al clima (NTPP, 2009).
- i) Existe una gran parte significativa de la red de carreteras que se encuentran situadas en diferentes tipos de uso de suelo o administradas por diferentes autoridades y empresas, por lo que, para una mejor estrategia de adaptación para el cambio climático, se recomienda incorporar a socios relevantes en la investigación de mejoras. (Axelsen, C, Grauert, M, Liljegren, E, Bowe, M, & Sladek, B, 2016)
- j) Desarrollar tecnologías para eliminar la humedad del suelo y prevenir el deterioro de la integridad estructural de las carreteras, puentes y túneles. (PIARC, 2015).
- k) Crear una base de datos para los puentes, alcantarillas y un extenso inventario de los materiales de construcción de carreteras. (World Bank, 2010).

### **6.3 Diseño de las medidas de adaptación**

En esta sección, la organización de carreteras y sus actores clave, habrán identificado las posibles acciones de adaptación, mediante las cuales buscarán minimizar los efectos de los impactos de los diferentes fenómenos extremos asociados al cambio climático.

El paso siguiente es diseñar/concebir la medida de adaptación óptima, que permite garantizar la resiliencia del activo carretero.

A continuación, se muestran algunos ejemplos.

### 6.3.1 Caso México

En el estudio realizado a finales de 2015 y principios de 2016 por la Dirección de Servicios Técnicos, utilizando el Marco de adaptación de PIARC, fueron identificado sitios de riesgo, y determinado medidas de adaptación. Para cada sitio evaluado como niveles de vulnerabilidad alto y riesgo alto, se desarrollaron propuestas de mitigación.

La figura 6.1, muestra un ejemplo básico de adaptación en las carreteras, la cual implica un rediseño de la obra de drenaje. El riesgo identificado es la pérdida de capacidad hidráulica por azolve, donde la primera acción a tomar sería la limpieza y mantenimiento, sin embargo, la alcantarilla es muy vieja y su diseño versus la necesidad de gasto actual (debido al cambio climático) es insuficiente. Para ello se propone sustituirla por una de concreto, aumentado su sección hidráulica y eliminando las superficies rugosas que contribuyen al azolve.

Los costos de los trabajos de sustitución de la alcantarilla deben ser estimados.

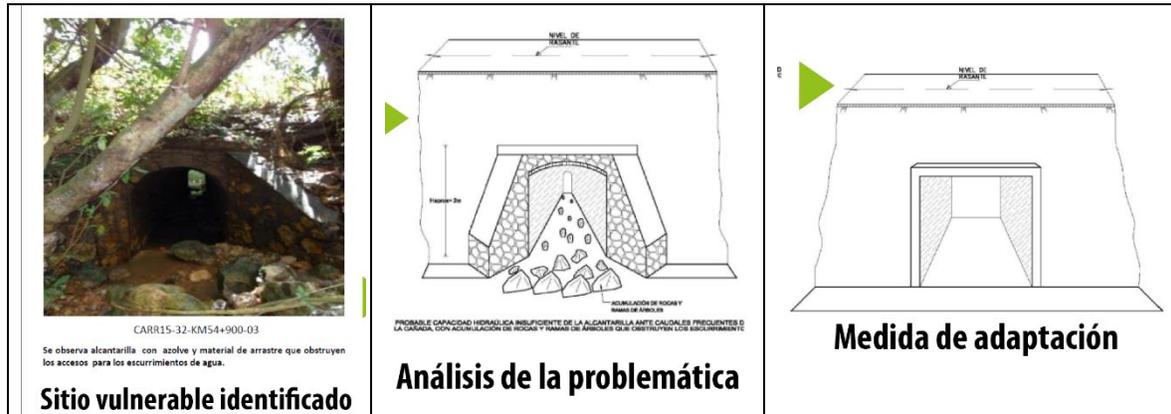


Figura 6.1 Ejemplo de medida de adaptación para alcantarillas

Fuente: DGST, 2016.

### 6.3.2 Caso Nueva Zelanda

La ruta de circunvalación oeste de Auckland, Nueva Zelanda, que promueve el tránsito nacional y regional, se encontraba expuesta al aumento del nivel del mar y a las marejadas de tormenta que generaban inundaciones de la calzada. El proyecto de adaptación implicó aumentar el nivel de la rasante, proteger los extremos de la calzada con diques y mejorar el diseño geométrico de la vialidad.

La figura 6.2 muestra la configuración del antes y después de la adaptación.



**Figura 6.2 Ejemplo de medida de adaptación para carretera costera**

Fuente: <https://www.nzta.govt.nz/projects/the-western-ring-route/sh16-causeway-upgrade/> y PIARC , 2015.

### 6.3.3 Caso Isla Reunión

La nueva carretera costera se está desarrollando para reemplazar la carretera costera existente en la Isla de la Reunión, la cual se encontraba en la costa sujeta a múltiples deslizamientos, provocando cierres de la carretera y muertes.



**Carretera costera existente**

Fuente: Imaz Press



**Proyecto nueva carretera costera**

Fuente: EGIS

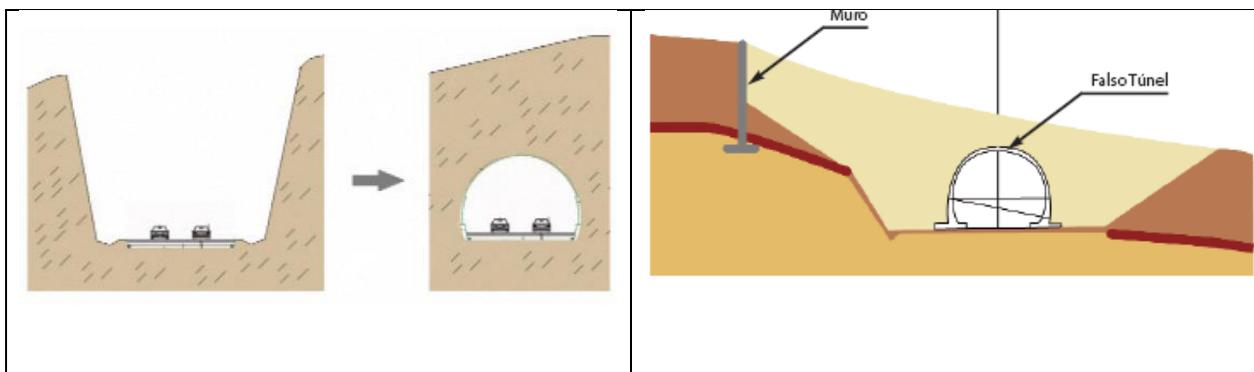


**Figura 6.3 Ejemplo de medida de adaptación para carretera costera**

### 6.3.4 Casos CAF

El Banco Latinoamericano para el Desarrollo (CAF, de su nombre original “Cooperación Andina de Fomento”, elaboró una “Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima”, donde se insertaron una serie de recomendaciones para la adaptación que permiten mitigar efectos negativos ocasionado por los fenómenos climáticos extremos.

La figura 6.4 muestra un ejemplo de cómo adaptar un corte cuando existen problemas frecuentes de deslizamientos, caídas de material, etc, que provocan el cierre de carreteras y afectaciones a las personas y los vehículos. Para cortes mayores a 40 metros de altura se recomienda construir túneles falsos.



**Figura 6.4 Ejemplo de medida de adaptación para cortes carreteros**

Fuente: CAF, 2018.

Otras múltiples opciones pueden ser consultadas en el documento original.

## 6.4 Selección de las medidas de adaptación

En todas las agencias de carreteras, la limitación de recursos reduce los alcances para incorporar todas las acciones de adaptación identificadas, para ello se requiere el uso de herramientas para seleccionar las medidas de adaptación.

La selección implica un proceso de análisis para asegurar que la medida identificada pueda lograr el alcance previsto para mitigar el efecto adverso del cambio climático.

Para ello se desarrolló la siguiente matriz, mediante la cual la organización de carreteras mediante su equipo de trabajo podrá cuestionarse sobre diversos factores que permitirán tener un panorama sobre la practicidad de la medida diseñada y su potencial beneficio.

La matriz siguiente requiere reflexionar sobre los factores establecidos bajo criterio experto, y responder si se considera que se cumple o no.

No.	Criterios / Factores	¿Se acepta?		Nivel de cumplimiento		
		SI	NO	Alto	Medio	Bajo
1	¿La medida es acorde para el impacto identificado?					
2	¿La medida es efectiva?					
3	¿La estrategia contempla escenarios de cambio climático?					
4	¿La medida es flexible? Para permitir adecuaciones futuras conforme el conocimiento aumenta y la incertidumbre del cambio climático disminuya					
5	¿El diseño de la medida permite cuantificar su costo aproximado?					
6	¿La medida tiene beneficios adicionales?					
7	¿La medida fue consensuada y aceptada por el equipo de trabajo?					
8	¿La medida cae dentro de los alcances de la organización de carreteras?					
9	¿La medida es realizable conforme las capacidades de la organización de carreteras?					
10	¿Se prevé que la organización de carreteras contará con los recursos y financiamiento necesario?					

**NOTA.** Marca con una equis la respuesta en la celda correspondiente.

Si al responder al menos el 80% de las preguntas con un "SI" incluyendo la pregunta 8, la medida de adaptación identificada y diseñada, será seleccionada para ser evaluada desde el punto de vista económico y priorizada en la siguiente etapa del presente marco metodológico.

Si una medida no puede cumplir cabalmente con los factores mencionados en la matriz, se debe reflexionar sobre su nivel de cumplimiento y revisar si la propuesta identificada era la más adecuada. Esto permitirá definir una nueva acción de adaptación que sea más realizable y efectiva conforme a las capacidades de la organización de carreteras.

Como resultado de esta etapa, la organización de carreteras tendrá una lista de acciones de adaptación realizables y con alto potencial de efectividad, las cuales deberán ser priorizadas en la siguiente etapa.

## 7 Priorización de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático

Las organizaciones de carreteras suelen tener restricciones presupuestales para implementar todas las acciones de adaptación, ya que se suman a los costos anuales de conservación de carretera, cuyas necesidades están por encima del presupuesto asignado, esto hace que se deban priorizar las acciones de adaptación, ya que el conjunto total de medidas no puede ser implementadas en el ciclo de trabajo anual siguiente.

La priorización apoya a los tomadores de decisiones para evaluar los proyectos de inversión y asignar prioridades para las medidas de adaptación seleccionadas a través de criterios económicos, técnicos, sociales y ambientales.

Actualmente existen varios métodos disponibles, tales como análisis costo-beneficio; análisis costo-efectividad; análisis multicriterio u otros métodos que derivan en estrategias robustas de adaptación bajo incertidumbres y riesgos, en particular, de naturaleza catastrófica, los cuales pueden ser útiles para priorizar las medidas de adaptación.

La tabla 7.1 resume los principales grupos de herramientas económicas y su uso potencial, en ella se explica una comparativa de sus fortalezas y debilidades realizada por Rouillard et. al. (2016).

**Tabla 7.1. Herramientas económicas de apoyo para la toma de decisiones sobre la adaptación**

Método	Fortalezas	Oportunidades	Manejo de la incertidumbre
<b>Análisis Costo-Beneficio</b>	Es más útil cuando se conocen la probabilidad del riesgo climático y la cuando la sensibilidad es pequeña. También se pueden usar valores claros de mercado.	Valoración de sectores no mercantiles / opciones no técnicas. Incertidumbre limitada a riesgos probabilísticos / pruebas de sensibilidad	No aborda explícitamente la incertidumbre, pero puede combinarse con pruebas de sensibilidad y modelaciones de probabilidad.
<b>Análisis Costo-Efectividad</b>	Igual que el anterior, pero para sectores no monetarios y donde se deben alcanzar objetivos predefinidos.	Una sola métrica principal difícil de identificar y menos adecuado para riesgos complejos o intersectoriales. Baja consideración de la incertidumbre.	No aborda explícitamente la incertidumbre, pero puede combinarse con pruebas de sensibilidad y modelaciones de probabilidad.

<b>Análisis Multicriterio</b>	Cuando hay una mezcla de datos cuantitativos y cualitativos.	Se basa en el juicio de expertos o partes interesadas, y es subjetivo, incluyendo el análisis de la incertidumbre.	Puede integrar la incertidumbre como criterio de evaluación, sin embargo, generalmente se basa en el juicio experto subjetivo o en la opinión de las partes interesadas.
<b>Gestión iterativa de riesgos</b>	Es útil en desafíos en el largo plazo y con incertidumbre, especialmente cuando los umbrales de riesgo son claros.	Resultan un desafío cuándo son múltiples riesgos actuando juntos y los umbrales no siempre son fáciles de identificar.	Aborda explícitamente la incertidumbre promoviendo el análisis iterativo, el monitoreo, la evaluación y el aprendizaje.
<b>Análisis de opciones reales</b>	Para grandes decisiones irreversibles, donde se dispone de información sobre las probabilidades de riesgo climático.	Requiere una valoración económica (ACB), probabilidades y puntos de decisión claros.	Aborda explícitamente la incertidumbre analizando el desempeño de la adaptación para diferentes futuros potenciales.
<b>Toma de decisiones robusta</b>	Cuando la incertidumbre y el riesgo son grandes. Puede utilizarse una mezcla de información cuantitativa y cualitativa.	Requiere un alto análisis computacional y un gran número de corridas.	Incorpora explícitamente incertidumbres y riesgos, en particular, riesgos dependientes sistémicos, para obtener soluciones robustas.
<b>Análisis del portafolio</b>	Cuando son varias acciones complementarias de adaptación y se tiene buena información.	Requiere datos económicos y probabilidades. Tiene cuestiones de interdependencia	Aborda explícitamente la incertidumbre examinando la complementariedad de las opciones de adaptación para hacer frente al clima futuro.

Fuente: Elaboración propia basada en Rouillard et. al., 2016.

De acuerdo a los autores de la tabla, no existen reglas claras o rápidas sobre qué herramienta utilizar en cuál aplicación; sin embargo, ciertas técnicas se alinean con varios elementos de la política de este Marco.

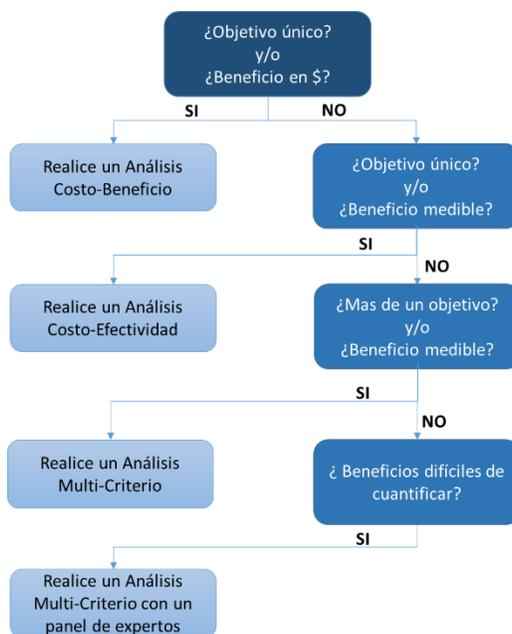


Figura 7.1 Esquema de ayuda para la selección del método de priorización

Fuente: Elaboración propia con base en UNFCCC, 2011.

Es importante seleccionar cuidadosamente el enfoque más apropiado para cada situación particular en la toma de decisiones de adaptación.

En el presente Marco se propone la utilización del análisis multicriterio (AMC) y análisis costo-beneficio (ACB).

## **7.1 Análisis Multicriterio**

El análisis multicriterio (AMC) tiene un enfoque estructurado a través de criterios que permiten analizar alternativas de adaptación.

Para el caso del AMC de acciones de adaptación del cambio climático, primero se debe asegurar que los criterios estén vinculados a los objetivos de la adaptación. Los criterios pueden ser tanto cualitativos como cuantitativos, y toma en cuenta aspectos monetarios y no monetarios.

El MCA4Climate resalta entre otros aspectos dentro de su Marco la importancia de:

- Establecer el contexto. Esto implica la ratificación del objetivo de la adaptación, la identificación de los tomadores de decisiones y las partes interesadas, considerando las circunstancias económicas, sociales, políticas, institucional y ambientales alrededor de la medida de adaptación.
- Identificar las opciones para ser evaluadas. Lo cual requiere la definición de las medidas de adaptación y su diseño.
- Definir los criterios e indicadores. Se deben establecer las áreas y los temas a evaluar, para identificar los indicadores y el nivel de aceptación y rechazo.
- Acordar escenarios, cronograma y métodos de evaluación. Establecer los escenarios climáticos y socioeconómicos para el futuro que se considerarán en el análisis. Acordar dinámicas y plazos, a corto plazo, a medio plazo, o a largo plazo.
- Calificar las diferentes opciones. Evalúa el desempeño de cada opción contra todos los criterios, utilizando los métodos de evaluación elegidos. Basándose en esta evaluación, se califican las opciones según los criterios (en cada escenario si se modelan explícitamente diferentes escenarios, si se establecen).
- Asignar ponderaciones a cada criterio calculado. Se asignan pesos a cada criterio y se calculan los puntajes ponderados agregados para cada opción.
- Examinar los resultados. Esto permite identificar opciones dominantes o dominadas (es decir, aquellas con las puntuaciones más altas y más bajas) y para resaltar fortalezas y debilidades particulares.

Para la aplicación de esta metodología se establecieron ciertos criterios basados en PIARC (2015), Trevor et al (2011), Alduce & Neri (2008), y DGST (2016).

**Tabla 7.2 Criterios para evaluar medidas de adaptación**

No.	Criterio	Descripción del criterio
<b>Adaptación</b>		
1	Cumplimiento del objetivo	Evalúa el grado en que la medida de adaptación propuesta permite atender con éxito el problema/riesgo identificado.
2	Nivel de resiliencia	Nivel en el cual la práctica de adaptación o estrategia conserva, restaura y/o contribuye a alcanzar adecuados niveles de resiliencia.
3	Vinculación	La medida de adaptación puede vincularse o ser incorporada a otros instrumentos sectoriales, tales como los programas de mantenimiento carretero.
<b>Económicos</b>		
4	Costo (inversión inicial)	El costo de inversión para implementar la propuesta de adaptación conforme a su proyecto
5	Costo (costo del ciclo de vida)	El costo total, que puede apoyarse en un análisis de costo de ciclo de vida de proyecto, el cual incluye los costos de mantenimiento y conservación de la medida de adaptación
<b>Técnicos</b>		
6	Factibilidad técnica	Evalúa la factibilidad de la medida de adaptación, en términos de disponibilidad de tecnología, procedimiento constructivo, personal capacitado, etc.
7	Duración	Establecer los plazos de implementación es necesario cuando se define una práctica o estrategia, así como para monitoreo.
8	Robustez	La robustez de una medida de adaptación refleja el grado en que ésta puede ser sensible frente a la incertidumbre asociada al cambio climático.
9	Flexibilidad	La medida de adaptación permite ser adaptada nuevamente para incorporar necesidades futuras durante su vida útil
10	Disponibilidad de recursos	Evalúa si se cuenta con los recursos disponibles (económicos, materiales y humanos), las habilidades y los conocimientos en la organización de carreteras para implementar las respuestas de adaptación inmediatamente.
<b>Sociales</b>		
11	Población beneficiada	En caso de existir un beneficio para la población, se busca que la medida de adaptación sea capaz de impacta positivamente a la mayor cantidad de personas.
12	Participación social	Es importante la participación de las comunidades vulnerables y población en general con los agentes públicos en el diseño, planificación e implementación de la práctica de adaptación.
13	Aceptación social y política	La medida de adaptación tiene o no aceptación social/política, forma parte de las preocupaciones públicas, etc.

14	Riesgo de no acción	Evalúa la implicación de no hacer nada, cuál sería el impacto en el medio o los servicios en caso de materializarse el riesgo.
<b>Ambientales</b>		
15	Impacto ambiental	Evalúa el impacto ambiental de la respuesta de adaptación
16	Grado de protección del medio ambiente	Se refiere a que si la medida(s), acción(es), y/o estrategia(s) de adaptación conserva, restaura y/o hace un uso sustentable de los recursos naturales.

Fuente: Elaboración propia, basado en PIARC (2015), Trevor et al (2011), Alduce & Neri (2008), y DGST (2016).

Cada criterio descrito en la tabla 7.2 debe ser evaluado y si se desea ponderado, es decir, asignar diferente peso a cada variable, a fin de darle más valor a los criterios que a juicio de la organización puedan tener un mayor impacto en su proceso de toma de decisiones.

La tabla 7.3 muestra un ejemplo de criterio de evaluación para cada medida de adaptación, o grupo de medidas.

**Tabla 7.3 Criterios de evaluación de las medidas de adaptación**

Criterio	Criterio de evaluación					Calificación
	5	4	3	2	1	
<b>Cumplimiento del objetivo</b>	La medida de adaptación supera lo esperado	La medida de adaptación cumple con lo esperado	La medida de adaptación puede cumplir con esperado	La medida de adaptación está por debajo de lo esperado	La medida de adaptación está muy por debajo de lo esperado	
<b>Nivel de resiliencia</b>	La medida contribuye a un nivel muy alto de resiliencia	La medida contribuye a un nivel alto de resiliencia	La medida contribuye a un nivel medio de resiliencia	La medida contribuye a un nivel bajo de resiliencia	La medida contribuye a un nivel muy bajo de resiliencia	
<b>Vinculación</b>	Existe vinculación o integración con cuatro o más políticas, programas, etc.	Existe vinculación o integración con al menos tres políticas, programas, etc.	Existe vinculación o integración con al menos dos políticas, programas, etc.	Existe vinculación o integración con al menos una política, programa, etc.	No existe vinculación o integración con otras políticas, programas, etc.	
<b>Costo (inversión inicial)</b>	El costo se considera muy bajo	El costo se considera bajo	El costo se considera medio	El costo se considera alto	El costo se considera muy alto	
<b>Costo (costo del ciclo de vida)</b>	El costo total se considera muy bajo	El costo total se considera bajo	El costo total se considera medio	El costo total se considera alto	El costo total se considera muy alto	
<b>Factibilidad técnica</b>	Todos los aspectos técnicos pueden implementarse	Un aspecto técnico limita su implementación	Dos aspectos técnicos limitan su implementación	Tres aspectos técnicos limitan su implementación	Cuatro o más aspectos técnicos limitan su implementación	
<b>Duración</b>	La implementación se puede hacer inmediatamente	La implementación se puede hacer en un corto plazo	La implementación se puede hacer en un corto-mediano plazo	La implementación se puede hacer en un mediano plazo	La implementación se puede hacer en un largo plazo	
<b>Robustez</b>	La medida de adaptación tiene	La medida de adaptación tiene una robustez alta	La medida de adaptación tiene	La medida de adaptación tiene una robustez baja	La medida de adaptación tiene	

	una robustez muy alta		una robustez media		una robustez muy baja	
<b>Flexibilidad</b>	La medida de adaptación es completamente flexible	La medida de adaptación permite modificaciones importantes	La medida de adaptación permite medianas modificaciones	La medida de adaptación permite pequeñas modificaciones	La medida de adaptación no permite modificaciones	
<b>Disponibilidad de recursos</b>	La organización cuenta con todos los recursos disponibles	La organización no cuenta con disponibilidad de uno de los recursos necesarios	La organización no cuenta con disponibilidad de dos de los recursos necesarios	La organización no cuenta con disponibilidad de tres de los recursos necesarios	La organización no cuenta con los recursos disponibles	
<b>Población beneficiada</b>	El porcentaje de beneficiarios se considera muy alto	El porcentaje de beneficiarios se considera alto	El porcentaje de beneficiarios se considera medio	El porcentaje de beneficiarios se considera bajo	El porcentaje de beneficiarios se considera muy bajo	
<b>Participación social</b>	La participación social se considera muy alta	La participación social se considera alta	La participación social se considera media	La participación social se considera baja	La participación social se considera muy baja	
<b>Aceptación social y política</b>	La medida de adaptación tiene una aceptación muy alta	La medida de adaptación tiene una aceptación alta	La medida de adaptación es medianamente aceptada	La medida de adaptación tiene una aceptación baja	La medida de adaptación tiene una aceptación muy baja	
<b>Riesgo de no acción</b>	El costo de la inacción será muy alto	El costo de la inacción será alto	El costo de la inacción será medio	El costo de la inacción será bajo	El costo de la inacción será muy bajo	
<b>Impacto ambiental</b>	El nivel de los impactos ambientales es nulo	El nivel de los impactos ambientales es poco significativo	El nivel de los impactos ambientales es medianamente significativo	El nivel de los impactos ambientales es significativo	El nivel de los impactos ambientales es muy significativo	
<b>Grado de protección del medio ambiente</b>	Grado de protección muy alto	Grado de protección alto	Grado de protección medio	Grado de protección bajo	Grado de protección nulo	
<b>Suma total</b>						

Fuente: Elaboración propia.

Como resultado de la tabla 7.3 se obtendrá un valor total de la suma de los valores asignados a cada criterio. Este valor obtenido permitirá priorizar a todas las medidas de adaptación obtenidas, de tal manera que aquellas que tiene un puntaje más alto son las que pueden/deben implementarse más fácilmente/rápidamente.

En caso de definir pesos para cada criterio, será necesario multiplicar el valor antes de sumarlo mediante las siguientes ecuaciones:

$$Cp = W * C$$

Donde:

Cp, es el criterio ponderado

W, es el peso asignado (de 0.01 hasta 0.99, donde la suma de todos los criterios deberá ser igual a 1.0)

C, calificación asignada al criterio

De esta manera la calificación de la medida de adaptación se obtendrá de:

$$\text{Valor de Prioridad} = \sum_{1}^{n} W_n * C_n$$

Pueden evaluarse los 16 criterios mostrados en la tabla 7.2, o únicamente aquellos que el grupo de expertos o la organización de carreteras determine. Adicionalmente, los parámetros para establecer la evaluación de la prioridad pueden adaptarse de acuerdo a las condiciones regionales del lugar y de la organización de carreteras.

## 7.2 Análisis Costo-Beneficio

El Análisis Costo-Beneficio (ACB) es una metodología utilizada para los proyectos de inversión, que auxilia a la toma de decisiones para asignar recursos financieros que usualmente en casi todas las organizaciones de carreteras son limitados.

Un ACB implica calcular y comparar todos los costos y beneficios, que se expresan en términos monetarios.

El costo de una medida de adaptación incluye los costos directos, por ejemplo, el costo de inversión, los costos de mantenimiento, etc., y costos indirectos, tales como los costos de financiamiento, etc.

Los beneficios de la implementación de una respuesta de adaptación deben incluir los daños evitados, es decir, las consecuencias de los impactos del cambio climático. Si no existe un mercado para los bienes o servicios proporcionados por la actividad de adaptación, los beneficios se pueden estimar de manera indirecta a través de enfoques no basados en el mercado, como la evaluación contingente.

La comparativa de los costos y beneficios esperados puede ayudar a informar a los tomadores de decisiones sobre la posible eficiencia de una inversión en adaptación sobre una base monetaria. También proporciona una base para priorizar las posibles medidas de adaptación.

Los costos y beneficios deben ser descontados para calcular adecuadamente su valor presente. De acuerdo a la UNFCCC (2011), los planificadores de adaptación pueden elegir entre tres indicadores de si sus opciones son rentables:

- El valor presente neto (VPN), es decir, la diferencia entre el valor presente de los beneficios y el valor presente de los costos. El VPN debe ser mayor que cero para que una opción sea aceptable.
- La relación beneficio-costos (B/C), es decir, la relación entre el valor presente de los beneficios y el valor presente de los costos. Si la relación es mayor que 1, la opción es aceptable.
- La tasa interna de retorno (TIR), es decir, la tasa de descuento que hace que el VPN sea igual a cero. Cuanto más alta sea la TIR de una opción, más deseable es.

La principal utilidad de un ACB es que es posible comparar y / o agregar diferentes categorías de beneficios o costos, para expresarlos en un solo valor de moneda. La limitación más importante del ACB es que se requiere que todos los beneficios se midan y expresen en términos monetarios.

Existen múltiples ejemplos, que pueden guiar a las organizaciones de carreteras para realizar este tipo de evaluaciones, siempre apoyados en expertos en ingeniería económica de proyectos carreteros.

La priorización mediante este método será para aquellas medidas de mitigación que tengan mayores beneficios económicos, en función del VPN, del B/C o del TIR. Se recomienda que para un grupo de medidas se utilice las mismas variables de aceptación o rechazo para una priorización homogénea.

## **8 Implementación y monitoreo de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático**

---

La fase final del proceso de adaptación es la implementación de las medidas y su seguimiento.

La evaluación de la vulnerabilidad, el análisis del riesgo, la definición y selección de la medida de adaptación, y su priorización, permitieron tener una lista de medidas/acciones/respuestas de adaptación que deberán ser implementadas conforme su nivel de prioridad y sus beneficios.

Adicionalmente la información puede ser utilizada por las organizaciones de carreteras para planificación de sus proyectos e inversiones, incluyendo los resultados de vulnerabilidad, con la finalidad de aumentar la resiliencia futura de su red carretera.

### **8.1 Implementación de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático**

La incorporación de las medidas/acciones/respuestas de adaptación dentro de los programas de mantenimiento e inversión en las organizaciones de carreteras permite garantizar el éxito del proceso de adaptación.

Para impulsar la implementación de proyectos de cambio climático en la organización, es importante estar preparado para La argumentación, tanto a favor como en contra (Axelsen et al, 2016).

Esta sección se sugieren algunas estrategias para la implementación de las medidas de adaptación.

#### **8.1.1 Planes de transporte**

Los planes de transporte proporcionan visión a mediano y largo plazo para las organizaciones de carreteras, por lo que es posible incorporar como objetivo el aumento de la resiliencia de las redes de transporte carretero, mediante la atención, por ejemplo, de los sitios vulnerables a inundaciones o de deslizamientos de laderas o taludes (corte o terraplén).

De esta manera los resultados del proceso de adaptación podrán alinearse a éste plan, y obtener los recursos necesarios para su implementación.

Adicionalmente, es posible que la información de vulnerabilidad fortalezca la planeación de proyectos que se puedan incorporar en los planes de transporte.

Los Planes Nacionales para la Adaptación (NAP's, por sus siglas en inglés) pueden proporcionar a las organizaciones de carreteras los lineamientos para que estos integren las medidas de adaptación dentro de sus planes de transporte, como una actividad sustantiva. En México no existe un plan de adaptación sectorial, únicamente la Estrategia Nacional sobre Cambio Climático y el Programa Especial de Cambio Climático.

### **8.1.2 Planes de inversión**

Las medidas de mitigación para la adaptación que requieren inversiones significativas de recursos requerirán ser incluidas en planes de inversión, tales como: elevación de la subrasante de un camino para evitar inundaciones de acuerdo a los escenarios climáticos; relocalización de carreteras costeras que son afectadas frecuentemente por huracanes, tormentas y sus marejadas, así como la elevación del mar; sustitución de puentes que requieren un diseño con un periodo de retorno mayor; etc.

Para este tipo de medidas, resulta más fácil incorporarlas en un plan de inversión, y posteriormente buscar el financiamiento de las mismas, a través del presupuesto de la federación, el Fondo para la Prevención de Desastres, el Programa Especial de Cambio Climático, ya sea el federal, estatal o locales, o con financiamiento de fondos nacionales o internacionales existentes.

### **8.1.3 Programas de mantenimiento carretero**

La mayoría de las medidas de adaptación de bajo costo pueden incorporarse en los programas de conservación carretera o de mantenimiento periódico, ya que son acciones tendientes a mejorar los taludes de corte y terraplén, o laderas; mantenimiento y mejora de las obras de drenaje menor; incorporación de cunetas o contracunetas; mejoramiento del bombeo; reparación y mantenimiento de pavimentos; limpieza de alcantarillas; desazolve de cauces, etc.

Aunque las medidas pueden requerir proyectos de ingeniería, estos no suelen ser costosos, y se pueden cubrir dentro del presupuesto asignado a la carretera para su mantenimiento, sin embargo, algunas carreteras pueden no tener un suficiente presupuesto asignado, y el requerimiento de adaptación supera la asignación, por lo que dependerá de la organización de carreteras si se transfiere presupuesto de otra partida o se maneja como una inversión.

### **8.1.4 Gestión de activos carreteros**

La gestión de activos, cuya función principal es priorizar las inversiones de mantenimiento carretero, puede ser una herramienta útil para incorporar el deterioro de los pavimentos, con la adición de variables relacionadas con el cambio climático, tales como el aumento de la temperatura, cambios en la temperatura, incremento de la precipitación, etc., las cuales aceleran la vida útil de los activos carreteros, particularmente los pavimentos.

Mediante la gestión de activos se podrán calendarizar y modelar las acciones de mantenimiento y conservación, y priorizar las asignaciones presupuestales conforme modelos más realistas.

La información obtenida de la vulnerabilidad podrá servir de insumo básico para comprender que activos son más vulnerables y están en riesgo, por el cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos.

La consideración de la resiliencia, sustitución y la restauración de activos puede ser integrado en el proceso de gestión de activos con eficacia.

### **8.1.5 Atención de emergencias y gestión de riesgos de desastres naturales**

Los riesgos identificados y su vulnerabilidad sirven de insumo para la generación de estrategias para la atención de emergencias y gestión de riesgos de desastres naturales.

La resiliencia ante desastres naturales, surge de la necesidad de promover la preparación y la prevención para reducir el impacto en la red de carreteras ante la ocurrencia de fenómenos perturbadores, así como también de utilizar todo el conocimiento disponible para responder y recuperar las operaciones de la red carretera de manera inmediata para reanudar el servicio que presta el camino.

La atención de emergencias es una labor coordinada entre las diferentes autoridades, desde la municipal hasta la federal, sin embargo, cada sector debe en su alcance, contar con herramientas y procedimientos que permitan reestablecer el servicio.

La Secretaría de Comunicaciones y Transportes ha publicado dos documentos para establecer las acciones para la atención de emergencias.

- Guía para la atención de emergencias en carreteras y puentes
- Manual de atención de emergencias en la red de caminos alimentadores y rurales

La recuperación implica la reconstrucción y la restauración de la infraestructura afectada en un plazo corto de tiempo generalmente. Esto implica la obtención de recursos del Fondo para la Atención de Emergencias (FONDEN), o la aplicación de recursos del sector, que algunas veces son recuperados por la contratación de seguros.

### **8.1.6 Normas y especificaciones de diseño**

Algunas de las acciones de adaptación requieren además de adaptar la infraestructura existente, ampliar su alcance para permear en las normas y las especificaciones de diseño de carreteras, diseño hidráulico e hidrológico, diseño geotécnico, etc.

De esta manera se requiere incorporar las acciones de adaptación en la normativa carretera, por ejemplo, los periodos de retorno para el diseño hidráulico de las obras de drenaje carretero, tanto longitudinal como transversal.

### **8.1.7 Plan de adaptación**

Las respuestas de adaptación también pueden incorporarse en planes específicos dentro de la organización de carreteras.

De acuerdo a PIARC (2015), un plan de adaptación deberá proporcionar detalles relativos a la medida de adaptación y el plazo en el que se implementarán estas medidas. Otros factores que podrían incluirse dentro de un plan para la adaptación son:

- **Medida/Esquema:** Los detalles de la respuesta de adaptación, lo que está tratando de lograr, y los riesgos que el objetivo enfrentará.
- **Responsable:** Organización / equipo / individuo que conducirá y / o apoyará la medida o esquema de adaptación.
- **Programa:** Inicio, fechas de revisión y finalización de la acción o plan.
- **Financiamiento:** Los costos estimados y fuente de financiación.
- **Prioridad:** Posición en el que la acción se ubica en relación con otras acciones de adaptación. Esta información es probable que sea de utilidad al determinar que acciones las organizaciones de carreteras y las autoridades en general deban emprender en un futuro próximo.

Un plan de adaptación debe ser visto como un documento dinámico y se recomienda su revisión de forma regular.

## 8.2 Monitoreo de las medidas de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático

La adaptación al cambio climático es un proceso iterativo que requiere ser monitoreada y evaluada para mantener los esfuerzos de adaptación dinámicos y estrechamente ligados a la mejora del conocimiento de los riesgos climáticos y la disminución de la incertidumbre de los escenarios climáticos.

De acuerdo con la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (UNFCCC, 2010):

“El monitoreo y evaluación de proyectos, políticas y programas constituye una parte importante del proceso de adaptación. En última instancia, el éxito de la adaptación se medirá, en cuánto las diferentes medidas contribuyen a la reducción efectiva de la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia. Las lecciones aprendidas, las buenas prácticas, las carencias y las necesidades identificadas durante el monitoreo y evaluación de los proyectos, políticas y programas en curso, y terminados, informarán las futuras medidas, la creación de un proceso de adaptación iterativo y evolutivo.”

De acuerdo a la Agencia de Carreteras de los Estados Unidos (FHWA, 2018), las agencias deben establecer procesos de monitoreo y evaluación para medir el éxito de las estrategias de adaptación y otras iniciativas que se establecieron con base al proceso de adaptación y las evaluaciones de vulnerabilidad y riesgo.

A medida que se disponen de nueva información y datos sobre el clima, las agencias pueden necesitar reevaluar la vulnerabilidad de los activos carreteros y sus redes.

El proceso de monitoreo y evaluación puede identificar la necesidad de revisar las suposiciones, los datos subyacentes o los enfoques utilizados en la evaluación de la vulnerabilidad original (como una línea base) y evaluar la efectividad de las acciones planteadas, versus los fenómenos climáticos.

Los resultados también se pueden usar para revisar y refinar periódicamente las estrategias y los procesos de adaptación según sea necesario para garantizar una resiliencia continua de la infraestructura de transporte bajo un clima cambiante.

El objetivo del monitoreo será garantizar que el proceso de gestión de riesgos sea correcto, que la acción implementada tiene el efecto deseado. Para ello se requiere establecer un plan de monitoreo, los indicadores, la periodicidad de medición, el método de seguimiento, etc.

## 8.2.1 Programa de monitoreo

El propósito del monitoreo ambiental es obtener información sobre el estado que guardan las diferentes respuestas de adaptación implementadas y su impacto en el área de influencia de una carretera, incluyendo la medición de la efectividad de las medidas adaptación, considerando los estándares establecidos en las normativas técnicas, las especificaciones del proyecto e indicadores establecidos para su seguimiento.

El programa de monitoreo evalúa de manera periódica, integrada y permanente el estado de las medidas de adaptación implementadas, con el fin de obtener información para la toma de decisiones dirigidas a la adaptación al cambio climático de la infraestructura para el transporte.

## 8.2.2 Responsabilidades del monitoreo

De acuerdo a la guía RIMAROCC de la Conferencia de Directores de Carreteras de Europa (CEDR, 2010), la responsabilidad del monitoreo debe estar claramente definidas, las cuales pueden ser:

- Asegurar que las medidas de adaptación implementadas sean efectivas y eficientes tanto en el diseño como en la operación;
- Obtener información adicional para mejorar la evaluación de riesgos;
- Análisis y lecciones aprendidas de eventos climáticos y su impactos, cambios, tendencias, éxitos y fracasos;
- Detectar cambios en el contexto externo e interno, incluidos los cambios en los criterios de riesgo y el riesgo en sí, lo que puede requerir la revisión del tratamiento y las prioridades del riesgo; e
- Identificar riesgos emergentes.

## 8.2.3 Recopilar datos sobre indicadores relevantes

El monitoreo implica la recolección sistemática de información. Debe ser una tarea periódica recurrente que comienza en la etapa de planificación del proyecto. El monitoreo permite que los resultados, procesos y experiencias se documenten y utilicen como base para dirigir la toma de decisiones y la planificación futura. El monitoreo también le permite a una agencia verificar el progreso en comparación con los planes. Los datos adquiridos a través del monitoreo son utilizados para la evaluación (FHWA, 2018).

## 8.2.4 Capitalización de la experiencia

Es importante capitalizar la experiencia de la implementación de las medidas de adaptación y su comportamiento bajo situación de estrés bajo fenómenos climáticos extremos, para evaluar su desempeño.

Los resultados del monitoreo deben utilizarse para actualizar, corregir y reorientar las acciones.

Los datos recopilados del monitoreo ayudarán a informar las decisiones en curso y sugerirán mejoras para los esfuerzos futuros.

## 8.2.5 Reingeniería de la adaptación

El seguimiento y evaluación puede ayudar a identificar la necesidad de revisar los resultados sobre los escenarios planteados, los datos de diseño y los enfoques utilizados en la evaluación de vulnerabilidad original, esto podrá requerir una revisión del estudio base del proceso de adaptación

Los datos sobre el desempeño de la medida de adaptación, extiende la posibilidad para realizar adecuación, si los resultados del comportamiento no son del todo favorables, o irse ajustando conforme se obtiene más información del clima.

La revisión continua de los datos, también puede arrojar que se identifique un nuevo riesgo emergente, y que requerirá ser tratado mediante una respuesta de adaptación.

## 8.2.6 Difusión de los resultados

La organización de carreteras debe difundir los resultados, mediante notas para la prensa, redes sociales, y en seminarios y congreso entres colegas del sector.

La transferencia de conocimiento es muy importante para aumentar el conocimiento, difundir las mejores prácticas, concientizar sobre la importancia de la adaptación, etc.

La información obtenida del monitoreo se puede usar también para informar los resultados de la planificación de proyectos y programas, identificar las posibles mejoras para los procesos, compartir las lecciones aprendidas y seguir involucrando a los grupos de interés.



## Conclusiones

---

El cambio climático y los fenómenos meteorológicos extremos en el país, continuaran siendo un desafío presente y futuro para la infraestructura carretera.

La vulnerabilidad de la infraestructura del transporte se ha incrementado por estos fenómenos naturales asociados al cambio climático, produciendo impactos tales como inundaciones en las carreteras; derrumbes y deslizamientos de material en taludes de corte o terraplén; daños en puentes y obras de drenaje por cambios en los patrones de lluvia; fallas en los pavimentos, entre otros.

Para mitigar estos efectos adversos sobre los sistemas y los ecosistemas es importante adaptarse. La adaptación, es definida como la habilidad de un sistema para ajustarse al cambio climático (incluida la variabilidad del clima y sus extremos) para contener daños posibles, aprovecharse de oportunidades o enfrentarse con capacidad de resiliencia a las futuras consecuencias. De esta manera se busca que la adaptación al cambio climático sea el mecanismo para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura carretera en México

El Marco metodológico propuesto busca ayudar a las organizaciones de carreteras en definir o establecer una visión sobre la adaptación al cambio climático, para que la dependencia pueda continuar prestando con calidad el servicio a los usuarios y a las cadenas logísticas en el transporte de mercancías.

El Marco propuesta establece una base sólida de planeación que permite a las organizaciones de carreteras en establecer los objetivos y alcances de un proceso de adaptación de la infraestructura carretera al cambio climático, basados en la información disponible, la contextualización interna y externa para la adaptación, y con ello definir el producto entregable y las tareas necesarias para alcanzar el objetivo.

Posterior a la fase de planeación, el proceso de adaptación se realiza mediante 5 etapas:

- Identificación de riesgos
- Evaluación de la vulnerabilidad
- Análisis del riesgo
- Determinación de las medidas de adaptación
- Priorización de las medidas de adaptación

Los resultados de estas etapas proponen cambios en el diseño, la operación o la gestión de la infraestructura, incluidos los mecanismos de respuesta, para aumentar

la capacidad de resiliencia de la infraestructura a fin de minimizar los impactos negativos de estas amenazas cuando se materializan.

Finalmente, la última etapa del proceso es la implementación y monitoreo de las medidas de adaptación, basados en su capacidad de adaptación y el grado de resiliencia de la red o el activo carretero.

No obstante, los sistemas de gestión de riesgos y la resiliencia de la infraestructura en la mayoría de los países ya es sub-óptima, independientemente de cualquier cambio potencial en el clima, por lo que las políticas para aumentar la capacidad de resiliencia deben ser acciones de adaptación denominadas "sin remordimientos".

El tiempo de adaptar es ahora, por un lado, se tiene que trabajar en la adaptación de la infraestructura carretera existente para aumentar su resiliencia y evitar mayores riesgos, y por otro lado en generar nuevas especificaciones técnicas que involucren variables climáticas para el diseño de las futuras carreteras

La formulación de políticas para lograr esto seguirá siendo complicada por el hecho de que el cambio climático futuro sigue siendo extremadamente incierto.

## Bibliografía

---

- Adger, W. Neil; Brooks, N.; Bentham, G.; Agnew, M.; Eriksen, S. (2004). New indicator of vulnerability and adaptive capacity. Technical Report Co. 7. Tyndall Centre for Climate Change Research. University of East Anglia. United Kingdom.
- Aldunce, P. y Debels, P. (2008). Diseño y descripción del IUAP, Aldunce, P., Neri, C. y Szlafsztein, C. (Ed), Hacia la Evaluación de Prácticas de Adaptación ante la Variabilidad y el Cambio Climático. Editorial NUMA/UFGA, Belém, Brasil. ISBN 978-85-88998-23-0. [Aldunce & Neri, 2008]
- Asian Development Bank. (2011). Guidelines for climate proofing investment in the transport sector: Road infrastructure projects. Mandaluyong City, Philippines.
- Axelsen, Christian ; Grauert, Marianne ; Liljegren, Eva; Bowe, Mary; Sladek, Brigitte. (2016). Implementing Climate Change Adaptation for European Road Administrations. Transportation Research Procedia, Volume 14, 2016, Pages 51-57, ISSN 2352-1465.
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2013). Integración de la Gestión de Riesgo de Desastres y la Adaptación al Cambio Climático en la Inversión Pública. Washington, D.C
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID). (2014). Evaluación Temática. El Cambio Climático y el BID: Creación de Resiliencia y Reducción de Emisiones. Washington, D.C. [BID, 2014]
- Banco Latinoamericano para el Desarrollo (CAF). (2018). Guía de buenas prácticas para la adaptación de las carreteras al clima. Caracas, Venezuela.
- Benedetto, A.; Chiavari, A. (2010). A new approach for roads vulnerability assessment in flood events. Proceedings of the International Conference on risk management, assessment and mitigation. University of Roma. Roma, Italia.
- Bubeck, Philip; Kreibich, Heidi. (2011). Natural Hazards: direct costs and losses due to the disruption of production processes. CONHAZ Consortium. Germany Research Centre for Geosciences. Potsdam, Germany.
- Cambridge Systematics, Inc. (2009). Transportation Adaptation to Global Climate Change. Bipartisan Policy Center - National Transportation Policy Project (NTPP). Cambridge, Massachusetts, USA. [NTPP, 2009]

Cavazos, Teresa; Salinas, José Antonio; Martínez, Benjamín; Colorado, Gabriela; De Grau, Pamela; Prieto González, Ricardo; Conde Álvarez, Ana Cecilia; Quintar Isaías, Arturo; Santana Sepúlveda, Julio Sergio; Romero Centeno, Rosario; Maya Magaña, María Eugenia; Rosario de la Cruz, José Guadalupe; Ayala Enríquez, Ma. del Rosario; Carrillo Tlazazanatza, Heriberto; Santiesteban, Oscar; Bravo, María Elena. (2013). Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. México, DF.

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2012). Mapas de índices de riesgo a escala municipal por fenómenos hidrometeorológicos. México, DF.

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2016). Metodología para elaborar mapas de riesgo por Temperaturas máximas (1ª etapa ondas de calor). México, DF.

Centro Nacional de Prevención de Desastres. (2016). Actualización de las probabilidades de ocurrencia de ciclones tropicales en México para el cálculo de marea de tormenta (para el periodo 1949-2014). México, DF.

City of Chicago. (2010). Chicago Climate Action Plan. Chicago, USA. [CCAP, 2010]

Cochran, Ian. (2009). Climate change vulnerabilities and adaptation possibilities for transport infrastructures in France. Climate Report No. 18. Research on the economics of climate change. Paris, France.

Consultora Ambiental Sol Ambiente. (2013). Diplomado “Elaboración y evaluación de estudios de impacto ambiental”, Modulo V “Taller de metodologías para la evaluación de impactos ambientales. Universidad Nacional de Trujillo. Perú. [CASA,2013]

Conference of European Directors of Roads (CEDR). (2010). Risk management for roads in a changing climate. A Guidebook to the RIMAROCC Method. ERA-NET ROAD.

Conference of European Directors of Roads (CEDR). (2015). ROADAPT. Guideline – Part C: GIS-aided vulnerability assessment for roads – Existing methods and new suggestions.

Department of the Environment, Transport and the Regions, of United Kingdom. (2000). Potential UK adaptation strategies for climate change. West Yorkshire, United Kingdom. [DETR, 2000]

Federal Highway Administration. (2012). Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework. Washington, DC, USA.

- Federal Highway Administration. (2015). Climate change adaptation guide for transportation systems management, operations, and maintenance. Washington, DC, USA.
- Federal Highway Administration. (2018). Vulnerability Assessment and Adaptation Framework, 3rd Edition. Washington, DC, USA.
- Füssel, Hans-Martin; Klein, Richard J. (2006). Climate Change Vulnerability Assessments: An Evolution of Conceptual Thinking. *Climatic Change* (2006) 75: 301–329.
- Garnica Anguas, Paul; Pérez García, Carlos. (2012). Metodología para la Gestión de Cortes Carreteros. Publicación Técnica No. 370 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
- Garnica Anguas, Paul; Ramírez Culebro, José Antonio. Gestión de terraplenes y riesgos ante la inestabilidad. Publicación Técnica No. 423 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
- Germanwatch. (2018). Global Climate Risk Index 2018. Berlin, Germany.
- Gianoli, Alberto; Grafakos, Stelios; Olivotto, Veronica; Haque, Anika. (2016). Application of Multi-Criteria Analysis on Climate Adaptation Assessment in the Context of Least Developed Countries: Application of MCA on Climate Adaptation Assessment in LDC Context. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*
- Gobierno de la República. (2015). Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030. Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. Ciudad de México, México.
- Government of Canada. (2004). Climate Change Impacts and Adaptation Program. A Canadian Perspective. Ottawa, Canada. [GOC, 2004]
- Gradilla Hernández, L.A.; Mendoza Sánchez, J. F.; Orantes Olvera, H. Marcos Palomares, O. A. (2018). Aproximación Geoespacial en la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera en México. Publicación Técnica No. 523 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
- Highways Agency of United Kingdom. (2012). Climate Change Adaptation Strategy and Framework. London, UK. [HA, 2012]
- Infraestructure Canada. (2006). Adapting Infrastructure to Climate Change in Canada's Cities and Communities. A Literature Review. Canada.
- International Electrotechnical Commission. (2009). IEC/ISO 31010: 2009, Risk Management-Risk Assessment Techniques. Geneva, Switzerland

- Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2012). *Adaptación al Cambio Climático en México: Visión, elementos y criterios para la toma de decisiones*. México, DF.
- Inter-American Development Bank (IDB). (2014). *Climate services: a tool for adaptation to climate change in Latin America and the Caribbean. Action plan and case study applications*. Washington, DC, USA.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change (2007). Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR4)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [IPCC, 2007]
- Intergovernmental Panel on Climate Change. *Climate Change (2014). Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [IPCC, 2014]
- Kamelifar MJ, Rustaei Sh, Ahadnejad M, Kamelifar Z. 2013. The Assessment of Road Network Vulnerability in Formal and Informal (slum) Urban Tissues to Earthquake Hazards With Crisis Management Approach (Case study: Zone 1 Tabriz). *J. Civil Eng. Urban.*, 3(6): 380-385.
- Kwiatkowski, Kyle P.; Stipanovic Oslakovic, Irina; ter Maat, H.W.; Hartmann, Andreas; Chinowsky, Paul; Dewulf, G.P.M.R. (2013). *Climate Change Adaptation and Roads: Dutch Case Study of Cost Impacts at the Organization Level*. Engineering Project Organization Conference. Working Paper Proceedings. Colorado, USA.
- Li, Quiang; Mills, Lesli; McNeil, Sue. (2011). *The implications of climate change on pavements performance and design*. University of Delaware, University Transportation Center (UD-UTC). United States.
- Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Marcos Palomares, Omar Alejandro. (2017a). *Panorama Internacional de la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático*. Publicación Técnica No. 488 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
- Mendoza Sánchez, J. F.; Marcos Palomares, O. A.; Mobayed Vega, N. J.; Orantes Olvera, H. (2017b). *El clima y las Carreteras en México*. Publicación Técnica 498. Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.
- National Academy of Sciences. (2008). *New Directions in Climate Change Vulnerability, Impacts, and Adaptation Assessment: Summary of a Workshop*. ISBN: 0-309-13007-7. [NAS, 2008]

- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2019). Guidelines to Improve the Quality of Element-Level Bridge Inspection Data. Washington, DC. The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/25397>.
- National Cooperative Highway Research Program. (2014). Strategic Issues Facing Transportation. Volume 2: Climate Change, Extreme Weather Events, and the Highway System: Practitioner's Guide and Research Report. NCHRP REPORT 750. Washington, DC.
- New Zealand Climate Change Office (NZCCO) of the Ministry for the Environment (2004). Coastal hazards and climate change: a Guidance Manual for local government in New Zealand. New Zealand.
- Omer, M., Mostashari, A., & Nilchiani, R. (2013). Assessing resilience in a regional road-based transportation network. *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 13(4), 389-408.
- Organisation for Economic Co-operation & Development. (2008). Economic Aspects of Adaptation to Climate Change. Costs, benefits and policy instruments. Paris, France. [OCDE, 2008]
- Panda, Architesh; Govindarajulu. (2014). Climate Change Vulnerability Assessment Gaps and Challenges. *Economic & Political Weekly*. Vol. XLIX Nos. 26 & 27.
- Ramirez Matías, L. G.; Valverde Delgado, R.; Lozano Torres, S.; Galván Torres, A. E.; Cruz García, L. E. (2016). Índice de peligro por inundación. Centro Nacional de Prevención de Desastres. México, DF.
- Scheraga, J. D., & Grambsch, A. E. (1998). Risks, opportunities, and adaptation to climate change. *Climate research*, 11(1), 85-95.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2013). Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes. México, DF.
- Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). Aplicación del Marco Internacional de Adaptación al Cambio Climático para la Infraestructura Carretera. Dirección General de Servicios Técnicos. Cd. de México, México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC), Visión 10-20-40. México, DF. [ENCC, 2013]
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2014). Programa Especial de Cambio Climático 2014-2018. México, DF.
- Shrestha, Sangam; Babel, Mukand S.; Pandey, Vishnu Prasad. (2014). *Climate Change and Water Resources*. CRC Press, 2014. ISBN 1466594667, 9781466594661.

- Smit, B., & Wandel, J. (2006). Adaptation, adaptive capacity and vulnerability. *Global environmental change*, 16(3), 282-292.
- The 3 Counties Alliance Partnership (3CAP). (2009). *The Effect of Climate Change on 3CAP's Highway Network Policies and Standards*. London, United Kingdom.
- The Royal Academy of Engineering. (2011). *Infrastructure, Engineering and Climate Change Adaptation – ensuring services in an uncertain future*. Engineering the Future. London, United Kingdom. [RAI, 2011]
- Trevor, M., Scrieciu, S., Bristow, S., & Puig, D. (2011). *MCA4climate - A practical framework for pro-development climate policy*. United Nations Environment Programme.
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2011). *Assessing the Costs and Benefits of Adaptation Options*. An overview of approaches. Bonn, Germany
- United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC). (2010) *Synthesis Report on Efforts Undertaken to Monitor and Evaluate the Implementation of Adaptation Projects, Policies and Programmes and the Cost and Effectiveness of Completed Projects, Policies, and Programmes and Views on Lessons Learned, Good Practices, Gaps and Needs*. Bonn, Germany
- U.S. Department of Transportation. (2012). *Bridge Inspector's Reference Manual*. Federal Highway Administration. Publication No. FHWA NHI 12-050. Volume 2.
- U.S. Department of Transportation. (2014). *Assessing Criticality in Transportation Adaptation Planning*. Center for Climate Change and Environmental Forecasting. Washington, DC.
- U.S. Department of Transportation. (2015). *Vulnerability Assessment Scoring Tool (VAST)*. Center for Climate Change and Environmental Forecasting. Washington, DC.
- Willway, T.; Baldachin, L.; Reeves, S.; Harding, M.; McHale, M. Nunn, M. (2008). *The effect of climate change on highway pavements and how to minimize them*. Transportation Research Laboratory. Technical Report No. 184. United Kingdom.
- World Road Association. (2015). *International Climate Change Adaptation Framework for Road Infrastructure*. Paris, France. [PIARC, 2015]
- Zhou, Y., Sheu, J. B., & Wang, J. (2017). Robustness assessment of urban road network with consideration of multiple hazard events. *Risk Analysis*, 37(8), 1477-1494.

Zorrilla, Maria; Kuhlman, Andrea. (2015). Metodología para la Priorización de Medidas de Adaptación frente al Cambio Climático. Guía de uso y difusión. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). México DF.

Žurovec, O.; Čadro, S.; Sitaula, B.K. (2017). Quantitative Assessment of Vulnerability to Climate Change in Rural Municipalities of Bosnia and Herzegovina. Sustainability 2017, 9, 1208.

**Páginas web:**

Dirección General para la Gestión de Riesgos, Recursos autorizados por declaratoria de desastre, [http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/Recursos\\_Autorizados\\_por\\_Declaratoria\\_de\\_Desastre](http://www.proteccioncivil.gob.mx/es/ProteccionCivil/Recursos_Autorizados_por_Declaratoria_de_Desastre) (recuperada Enero 2017). [DGGR, 2017]

Sistema de inventario de efectos de desastres, <http://www.desinventar.org/es/> [OSSO, 1994-2016]

Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS), <http://uniatmos.atmosfera.unam.mx/ACDM/> y <http://atlasclimatico.unam.mx/VulnerabilidadalCC/Vulnerabilidad/> (recuperada Junio 2017)

Climate Change-Induced Water Disaster and Participatory Information System for Vulnerability Reduction in North Central Vietnam (CPIS) <http://danida.vnu.edu.vn/cpis/en/cat/1> (recuperada Diciembre 2018)



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado-Galindo”  
Parque Tecnológico San Fandila  
Mpio. Pedro Escobedo, Querétaro, México  
CP 76703  
Tel +52 (442) 216 9777 ext. 2610  
Fax +52 (442) 216 9671

[publicaciones@imt.mx](mailto:publicaciones@imt.mx)

<http://www.imt.mx/>

Esta publicación fue desarrollada en el marco de un sistema de gestión de calidad  
certificada bajo la norma ISO 9001:2015