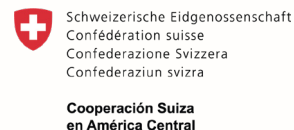
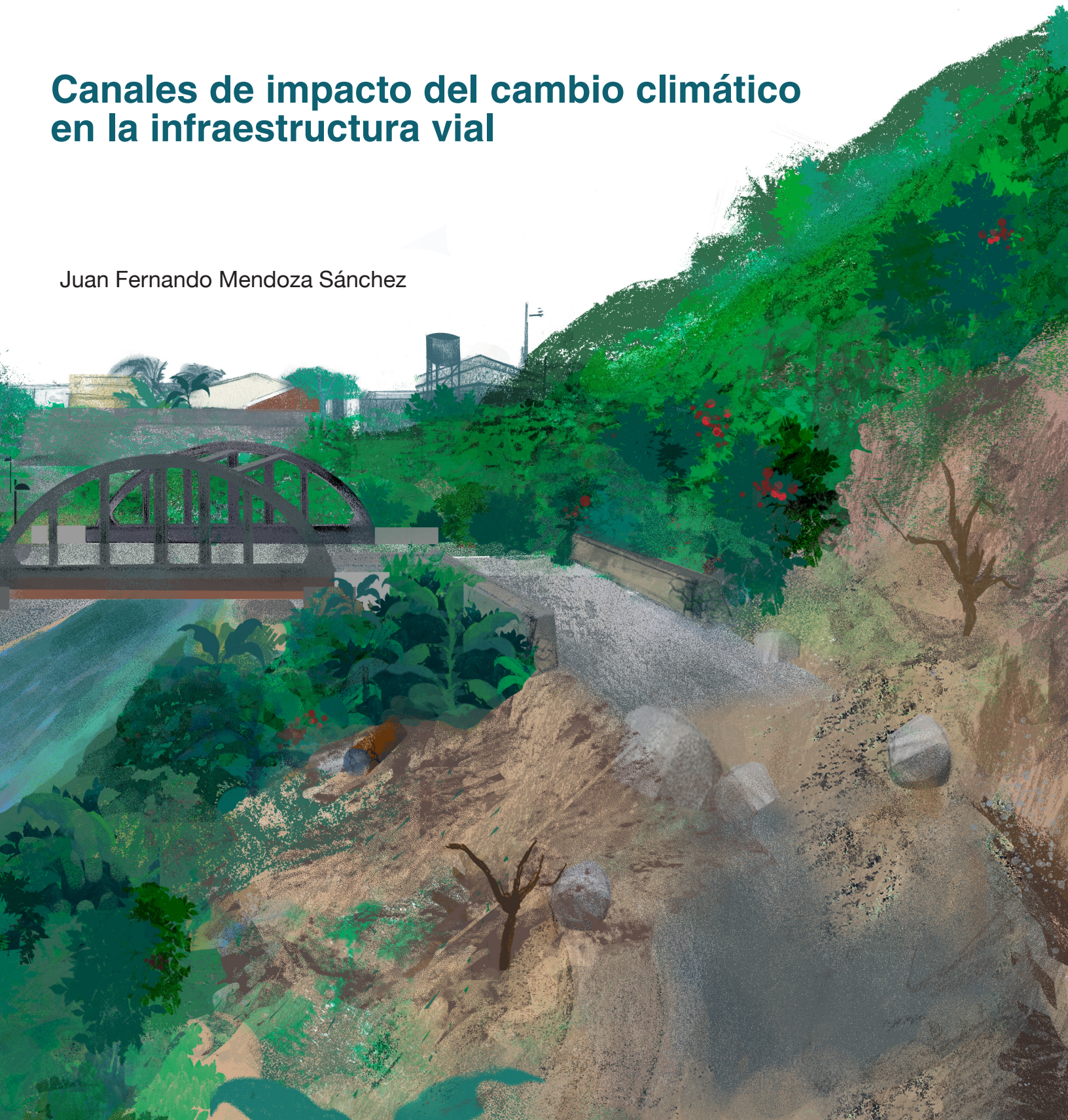


# Canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial

Juan Fernando Mendoza Sánchez



# Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

**Deseo registrarme**



NACIONES UNIDAS



[www.cepal.org/es/publications](http://www.cepal.org/es/publications)



[www.instagram.com/publicacionesdelacepal](https://www.instagram.com/publicacionesdelacepal)



[www.facebook.com/publicacionesdelacepal](https://www.facebook.com/publicacionesdelacepal)



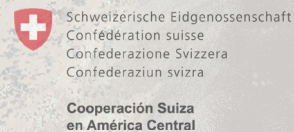
[www.issuu.com/publicacionescepal/stacks](http://www.issuu.com/publicacionescepal/stacks)



[www.cepal.org/es/publicaciones/apps](http://www.cepal.org/es/publicaciones/apps)

# Canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial

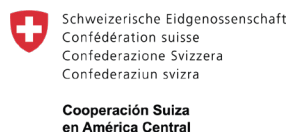
Juan Fernando Mendoza Sánchez





# Canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial

Juan Fernando Mendoza Sánchez



Este documento fue preparado por Juan F. Mendoza Sánchez, Consultor, con las aportaciones de Edwin Castellanos, Lenin Corrales, Pablo Imbach y Roger Vega, Consultores del Proyecto RIDASICC, bajo la supervisión de Julie Lennox, Jefa de la Unidad de Desarrollo Agrícola y Cambio Climático (UDACC) de la sede subregional de la CEPAL en México y Coordinadora del Proyecto RIDASICC, y de Carlos A. Moreno, Director de Transporte, Infraestructura y Logística de la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA), en el marco del Proyecto RIDASSIC “Fortalecimiento de capacidades para la incorporación de la reducción del riesgo de desastres y la adaptación sostenible e incluyente al cambio climático en la inversión pública en los países miembros del COSEFIN/SICA”, coejecutado por la CEPAL y la Secretaría Ejecutiva del Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (SE-COSEFIN) con siete ministerios de hacienda/finanzas y tres secretarías/ministerios de planificación, con el apoyo financiero de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE).

Se agradecen las contribuciones de César A. Castillo, Jefe del Departamento de Movilidad y Logística de la Dirección de Transporte, Infraestructura y Logística (DITIL), y José Vinicio Martínez, Especialista en Consejos Técnicos, ambos de la SIECA; José Manuel Iraheta, Jaime Olivares y Santa Centeno, funcionarios de la UDACC; Verónica Quiroz y Nelly Torres, funcionarias del Proyecto RIDASICC, y Róger Vega, Asesor Técnico Principal del Proyecto RIDASICC. Se agradece la valiosa labor de Adriana del Río y Andrea Jiménez.

Se agradece la colaboración de los funcionarios de la Comisión Regional de Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático (CR-GRACC) en la gestión y revisión de la publicación: Ismael Murillo y Fabián Sánchez, del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOPT) de Costa Rica; Brenda Sandoval y Deyman Pastora, del Ministerio de Obras Públicas y Transporte (MOP) de El Salvador; Víctor Barrios y Pedro Martínez, del Ministerio de Comunicaciones, Infraestructura y Vivienda (MCIV) de Guatemala; Hugo Martínez y Hammerly Argueta, de la Secretaría de Infraestructura y Servicios Públicos (INSEP) de Honduras; Maycol Rugama y Jerónimo Sánchez, del Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI) de Nicaragua; Porfirio Rangel y Manuel Rodríguez, del Ministerio de Obras Públicas de Panamá.

Las Naciones Unidas y los países que representan no son responsables por el contenido de vínculos, enlaces o marcadores a sitios externos incluidos en esta publicación, ni por las menciones de sociedades mercantiles o nombres comerciales de productos y servicios, y no deberá entenderse que existe adhesión a sitios, su contenido, sus responsables ni a los productos o servicios que se mencionen u ofrezcan.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

#### Notas explicativas:

Los tres puntos indican que los datos faltan, no constan por separado o no están disponibles.

La raya indica que la cantidad es nula o despreciable.

La coma se usa para separar los decimales.

La palabra “dólares” se refiere a dólares de los Estados Unidos, salvo cuando se indique lo contrario.

La barra puesta entre cifras que expresen años (por ejemplo, 2022/2023) indica que la información corresponde a un período de 12 meses que no necesariamente coincide con el año calendario.

Debido a que a veces se redondean las cifras, los datos y los porcentajes presentados en los elementos gráficos no siempre suman el total correspondiente.

Publicación de las Naciones Unidas

LC/MEX/TS.2023/41

Distribución: L

Copyright © Naciones Unidas, 2023

Todos los derechos reservados

Impreso en Naciones Unidas, Santiago

Esta publicación debe citarse como: J. F. Mendoza Sánchez, *Canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial* (LC/MEX/TS.2023/41), Ciudad de México, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2023.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

# Índice

|  |    |
|--|----|
| <b>Mensajes clave</b> .....  | 7  |
| <b>Introducción</b> .....  | 11 |
| <b>I. Desastres y cambio climático en los países de SICA</b> .....               | 13 |
| <b>II. Casos de estudio</b> .....  | 21 |
| <b>III. Escenarios de cambio climático en los países de la región SICA</b> ..... | 25 |
| <b>IV. Políticas y leyes sobre cambio climático</b> .....                        | 29 |
| <b>V. Impactos del cambio climático en la infraestructura vial</b> .....         | 33 |
| <b>A. Impactos de las altas temperaturas y las olas de calor</b> .....           | 35 |
| 1. Pavimentos.....   | 35 |
| 2. Puentes.....  | 35 |
| 3. Operación.....  | 35 |
| <b>B. Sequía</b> .....   | 36 |
| 1. Pavimentos.....   | 37 |
| 2. Terracerías.....  | 37 |
| 3. Taludes.....  | 37 |
| 4. Operación.....  | 37 |
| <b>C. Aumento de la temperatura y del nivel del mar</b> .....                    | 37 |
| 1. Pavimento.....  | 37 |
| 2. Operación.....  | 37 |
| 3. Materiales.....   | 38 |
| <b>D. Ciclones tropicales y marejadas de tormenta tropical</b> .....             | 38 |
| 1. Operación.....  | 38 |
| 2. Drenaje.....  | 38 |
| 3. Taludes.....  | 38 |
| <b>E. Incremento de tormentas y de precipitación</b> .....                       | 38 |
| 1. Operación.....  | 39 |
| 2. Pavimentos.....   | 39 |
| 3. Taludes.....  | 39 |
| 4. Drenaje.....  | 39 |
| 5. Puentes.....  | 39 |
| 6. Mantenimiento y construcción.....   | 39 |
| <b>F. Vendavales o vientos fuertes</b> .....                                     | 41 |
| 1. Operación.....  | 41 |
| 2. Taludes.....  | 41 |
| 3. Puentes.....  | 41 |
| <b>G. Alta presencia de agua, inundaciones y avenidas torrenciales</b> .....     | 41 |
| 1. Pavimento.....  | 42 |
| 2. Drenaje.....  | 42 |
| 3. Puentes.....  | 42 |
| 4. Operación.....  | 42 |

|                 |  |           |
|-----------------|--|-----------|
| H.              | Bajas temperaturas y empujes fríos.....  | 44        |
| 1.              | Pavimentos.....  | 44        |
| 2.              | Drenaje.....   | 44        |
| 3.              | Operación.....   | 44        |
| 4.              | Puentes.....   | 44        |
| <b>VI.</b>      | <b>Impactos del cambio climático en la interrupción del servicio.....</b>  | <b>45</b> |
| <b>VII.</b>     | <b>Canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial.....</b>   | <b>49</b> |
| <b>VIII.</b>    | <b>Adaptación sostenible e incluyente al cambio climático .....</b>  | <b>61</b> |
| <b>IX.</b>      | <b>Conclusiones .....</b>  | <b>67</b> |
|                 | <b>Bibliografía.....</b>   | <b>69</b> |
|                 | <b>Anexo.....</b>  | <b>73</b> |
| <b>Cuadros</b>  |  |           |
| Cuadro 1        | Índice de riesgo climático 2000-2019 en los países de la región SICA.....  | 14        |
| Cuadro 2        | Índice de riesgo mundial 2020 de los países de los países de la región SICA....  | 15        |
| Cuadro 3        | Desastres registrados en los países de la región SICA .....  | 16        |
| Cuadro 4        | Registros de impactos de fenómenos climáticos en los países de la región SICA .....  | 17        |
| Cuadro 5        | Escenarios de aumento de la temperatura en Centroamérica.....  | 26        |
| Cuadro 6        | Escenarios de cambios en la precipitación media en Centroamérica.....  | 27        |
| Cuadro 7        | Propuesta de eventos y variables climáticos para el análisis del cambio climático en el sector de infraestructura vial .....     | 28        |
| Cuadro 8        | Umbral de riesgo de la precipitación.....  | 41        |
| Cuadro 9        | Tipología de daños asociados a amenazas climáticas en la infraestructura vial .....  | 45        |
| Cuadro 10       | Canales de impacto del aumento de temperaturas.....  | 50        |
| Cuadro 11       | Canales de impacto del aumento en nivel del mar: inundaciones costeras .....   | 51        |
| Cuadro 12       | Canales de impacto del aumento del nivel del mar: marejadas.....   | 52        |
| Cuadro 13       | Canales de impacto de la sequía.....   | 52        |
| Cuadro 14       | Canales de impacto del aumento en duración e intensidad de la precipitación: pavimento, derecho de vía, taludes y laderas.....   | 53        |
| Cuadro 15       | Canales de impacto del aumento en duración e intensidad de la precipitación: puentes.....  | 54        |
| Cuadro 16       | Canales de impacto del aumento en duración e intensidad de la precipitación: calzada, obras de drenaje y márgenes de la vía..... | 54        |
| Cuadro 17       | Canales de impacto de inundaciones.....  | 55        |
| Cuadro 18       | Canales de impacto de avenidas torrenciales .....  | 57        |
| Cuadro 19       | Canales de impacto de vientos fuertes .....  | 58        |
| Cuadro 20       | Canales de impacto de ondas, empujes o frentes frías.....  | 59        |
| Cuadro 21       | Criterios para evaluar medidas de adaptación con un enfoque incluyente y sostenible .....  | 63        |
| Cuadro A1       | Decisiones sensibles al clima .....  | 74        |
| <b>Gráficos</b> |  |           |
| Gráfico 1       | Eventos extremos registrados en los países de la región SICA .....   | 16        |
| Gráfico 2       | Registros de desastres en el sector transporte en los países de la región SICA .....   | 18        |

**Recuadros**

|             |   |    |
|-------------|---|----|
| Recuadro 1  | Impacto de lluvias torrenciales y el huracán Stan en Guatemala, 2005 .....  | 21 |
| Recuadro 2  | Impacto de los huracanes Eta e Iota en Honduras, 2020.....  | 22 |
| Recuadro 3  | Impacto de la tormenta tropical Agatha en El Salvador, 2010 .....   | 22 |
| Recuadro 4  | Impacto de la depresión tropical 12-E en Centroamérica, 2011 .....  | 23 |
| Recuadro 5  | Impacto de los huracanes Nicole y Tomas en Costa Rica, 2010 .....   | 23 |
| Recuadro 6  | Impactos: efectos sobre los sistemas naturales y humanos .....  | 33 |
| Recuadro 7  | Estudio: cambios estacionales y a largo plazo en la vida útil del pavimento<br>causados por el aumento de las temperaturas debido al cambio climático .....     | 36 |
| Recuadro 8  | Estudio: método para evaluar las implicaciones del cambio climático<br>para el diseño y desempeño de pavimentos flexible .....                                  | 36 |
| Recuadro 9  | Estudio: cambio climático y carreteras, un modelo dinámico<br>de estrés-respuesta .....   | 40 |
| Recuadro 10 | Estudio: la influencia ambiental del pavimento asfáltico<br>y las contramedidas .....   | 40 |
| Recuadro 11 | Estudio: desarrollo de una metodología y una herramienta<br>para la evaluación de la vulnerabilidad de las carreteras<br>al daño inducido por inundaciones..... | 43 |
| Recuadro 12 | Estudio: pronóstico de deterioro en pavimentos flexibles<br>por inundaciones y tormentas de nieve.....  | 43 |

**Diagramas**

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Diagrama 1 | Esquema para la identificación de impactos con base en registros históricos .....                 | 34 |
| Diagrama 2 | Esquema para la identificación de impactos con base en clima futuro<br>con cambio climático ..... | 34 |



## Mensajes clave

**E**n los países miembros del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), la infraestructura vial y los servicios que proporciona a la población enfrentan amenazas asociadas a los desastres que son tradicionalmente reconocidos, como inundaciones y deslizamientos, los cuales se están exacerbando por el cambio climático antropogénico. Al mismo tiempo, se hacen evidentes nuevas amenazas de desarrollo lento, como el alza de temperatura y la degradación de los ecosistemas por la actividad humana. Esta compleja combinación de factores adversos está aumentando los riesgos que afrontan la población y la infraestructura que le provee servicios como la infraestructura vial.

Conocer los potenciales daños y pérdidas que podrían afectar los sistemas de infraestructura vial debido a esta combinación compleja es de suma importancia para identificar los riesgos, los factores que contribuyen a ellos y las medidas de reducción de riesgos de desastres y de adaptación incluyente y sostenible al cambio climático.

Daños y pérdidas de esta infraestructura implican costos de conservación y rehabilitación más elevados, y ocasionan interrupciones más frecuentes en la circulación de bienes y personas, lo que genera costos adicionales de diversas índoles y tienen consecuencias directas sobre la productividad económica.

Tener en cuenta los escenarios de cambio climático que permiten conocer, evidenciar y valorar las potenciales implicaciones de estos en las actividades humanas, los ecosistemas y los elementos de la infraestructura vial es fundamental para la toma de decisiones en los proyectos de inversión pública considerando que la mayoría de la infraestructura que provee bienes y servicios públicos debe tener una vida útil de varias décadas. Es necesario analizar tanto las tendencias históricas de las amenazas y las vulnerabilidades como los escenarios de cambio climático con objeto de estimar los riesgos de daños y pérdidas durante la vida útil de esta infraestructura.

Todos los países miembros del Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN) del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) han instituido leyes y políticas nacionales en materia de cambio climático que abarcan todos los sectores, y en algunos casos para infraestructura vial en específico.

El Consejo Sectorial de Ministros de Transporte (COMITRAN) ha establecido que la adaptación de la infraestructura pública al cambio climático es estratégica para incrementar la resiliencia de esta ante la amenaza de los fenómenos climáticos extremos que se presentan en la región. En adición, el COMITRAN plantea que la gestión integral de riesgo de desastres debe ser considerada parte intrínseca de los procesos de planificación e inversión pública, partiendo de una perspectiva social, económica, ambiental y político-institucional del desarrollo.

Se ha aprobado una serie de normativas técnicas para los procesos de planificación, construcción, operación y mantenimiento de infraestructura vial, que han buscado incorporar elementos de reducción de riesgo de desastres, construidas en procesos con grupos técnicos regionales de funcionarios/as de los Ministerios miembros. En particular, la Comisión Regional de Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático (CR-GRACC) ha sido muy activa en liderar estos procesos. Asimismo, el COMITRAN, con el apoyo de la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA), ha establecido la Política Marco Regional de Movilidad y Logística (PMRML) para desarrollar un Sistema Regional de Movilidad y Logística articulando y modernizando infraestructura logística multimodal resiliente en seis ejes sectoriales, a efecto de hacer más competitivo, eficiente, rápido, confiable y seguro el traslado de las cargas y personas.

Este Plan incluye provisiones para la generación de infraestructura verde y resiliente, amigable al ambiente natural y resguardada ante los fenómenos del cambio climático.

Para medir el nivel de exposición y la vulnerabilidad a los fenómenos climáticos extremos en los países de la región se utilizan diferentes indicadores como el índice de Riesgo Climático Global (IRC) de Germanwatch, que analiza los impactos de tormentas, inundaciones, olas de calor, y los impactos socioeconómicos asociados a estos. Seis de los países de la región se encuentran en las primeras 50 posiciones de 180 países en la evaluación efectuada en 2019. Otro, el índice de Riesgo Mundial del Instituto de Derecho Internacional de la Paz y los Conflictos Armados (IFHV, 2018), estima que los países de la región SICA se encuentran en niveles altos y muy altos de riesgo es su análisis desde 2018 por en 181 países, que se integra de cuatro componentes: exposición, susceptibilidad, capacidades de afrontamiento y capacidades de adaptación, y que se miden desde muy bajo, bajo, medio, hasta alto y muy alto.

Según (Bello, Ortiz y Samaniego, 2014), los daños asociados al clima en América Latina se concentran en el sector productivo (52,1%) como promedio de las evaluaciones de daños y pérdidas reportadas en dicha publicación. En el sector infraestructura el impacto económico es del 27,5%. En este mismo sector, predominan los daños en el subsector transporte y vialidad, con un 85% (el cálculo de los impactos corresponde al período de 1972 a 2010). Por su parte, la base de datos de DesInventar, que permite conocer los impactos por sector económico, reporta que el 25% del total corresponde al sector transporte en la región del SICA, cuyos registros datan de 1900 para el caso de El Salvador. Las principales causas de las afectaciones en la infraestructura del transporte que identifica son las inundaciones, los deslizamientos y las lluvias intensas, que puedan generar encharcamientos y desbordamiento de ríos, colapsos en puentes y el cierre de vialidades. Los impactos de los eventos extremos reportados en el sector transporte han tenido repercusiones económicas significativas para el subsector vial o carretero.

Según los escenarios de cambio climático disponibles para la región SICA, incluyendo los de la plataforma CENTROCLIMA del Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH), se tendrían significativos aumentos de temperatura, así como cambios en los patrones de precipitación promedio anual e intraanuales. Esto daría origen a probables incrementos de la frecuencia de huracanes, tormentas tropicales e inundaciones, así como la duración de las sequías, con el deterioro ambiental como condición atenuante.

La determinación de los impactos —daños y pérdidas sociales— en la infraestructura vial presentada en este documento se basa en las experiencias publicadas por diferentes países y en la información disponible. Mendoza Marcos Palomares y Orantes (2019) plantearon un esquema para la identificación de impactos del cambio climático, con un enfoque temporal, ya sea para analizar información con base en registros históricos o en los escenarios de cambio climático. Los impactos identificados según los diferentes fenómenos climáticos y meteorológicos se resumen de la siguiente manera:

- El aumento de las temperaturas medias y extremas y las olas de calor pueden provocar daños en la infraestructura vial, con una disminución de la vida útil de los pavimentos por el deterioro de la capa de rodadura, la formación de roderas y otras deformaciones. Estos impactos son progresivos en el tiempo y pueden corregirse a través del mantenimiento rutinario y cambios en el diseño o materiales en la fase de diseño y construcción. Los análisis indican que, si no se considera el alza de temperatura asociada al cambio climático antropogénico en el diseño de pavimentos, es muy probable que el desempeño y la duración de estos se reduzca significativamente.

- Las condiciones de sequía y falta de agua también tendrían impactos en la infraestructura carretera y en la operación de esta por medio de la degradación de las capas de cimentación. Asimismo, el riesgo de deslizamientos o erosión de material en los taludes aumentaría por la disminución de humedad y la pérdida de cubierta vegetal en la orilla del camino.
- El aumento del nivel del mar ocasionaría filtración del agua salina en el asfalto y los cimientos, lo que degradaría el pavimento. También se agravarían las inundaciones costeras, lo que podría causar una interrupción del servicio.
- Los ciclones tropicales pueden destruir puentes y derribar señalamientos viales a causa de los fuertes vientos y deslizamientos e inundaciones que estos provocan. Se pueden presentar carreteras bloqueadas por caída de árboles u otros materiales.
- El aumento de episodios de precipitaciones intensas a causa de las tormentas podría ocasionar interrupciones en la operación de la infraestructura vial por inundaciones. Adicionalmente, el agua se filtra en el asfalto y en los cimientos, lo que haría que se degraden y se vuelvan inestables. En ríos, los flujos de agua pueden erosionar las pilas o estribos de los puentes.
- En las zonas afectadas por frentes fríos, las temperaturas extremadamente bajas asociadas a heladas o granizadas que se acompañan de lluvias y vientos fuertes aumentan la rigidez de la carpeta asfáltica y los cambios en el comportamiento de los materiales generando agrietamiento en la superficie.

Como ejemplo, para las cadenas de transporte y el tránsito en las ciudades, el impacto de fenómenos climáticos más significativo hasta la actualidad es el tiempo perdido por las inundaciones. Las pérdidas debidas a una interrupción del servicio varían desde el nivel micro (cambios en producción, ventas y precios), cuya medición depende de la duración de la interrupción, hasta el nivel macro (reubicación de puestos de trabajo, cambios en el comercio exterior, cambios en el uso de la tierra, entre otros).

Los canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial presentados en esta publicación trazan la manera en que las variables asociadas a desastre-cambio climático llegan a afectar la infraestructura vial, con impactos en la disponibilidad y la capacidad del servicio que esta presta a los sistemas de transporte. Se desarrollaron con los siguientes pasos:

- Identificación de las amenazas asociadas con desastres y/o cambio climático.
- Identificación de los elementos de la infraestructura vial que son vulnerables y sometidos a estrés por el clima.
- Identificación de los riesgos asociados al cambio climático de la infraestructura vial, incluyendo daños y pérdidas sociales con respecto a la provisión del servicio.
- A partir de esta identificación de los riesgos, se genera recomendaciones de medidas de reducción de riesgos de desastres y adaptación al cambio climático.

Estas medidas consisten en acciones deliberadas realizadas para reducir las consecuencias adversas de dichos riesgos y para aprovechar cualquier oportunidad que pudiera traer beneficios. Es así como, las medidas de adaptación pueden aplicarse en la formulación de proyectos de inversión pública para generar nuevas capacidades de producción de bienes y/o servicios públicos y/o realizar obras a partir de las existentes, para rehabilitarlas, reemplazarlas, recuperarlas o ampliar las capacidades de estas (Vega y Lennox, 2023).

Especialmente en la región de los países SICA, las medidas de adaptación deben procurar la continuidad del servicio a la población, la inclusión social y la sostenibilidad ambiental. Como la infraestructura vial se ubica en múltiples entornos naturales, es útil tomar en cuenta diversas medidas derivadas del enfoque de “soluciones basadas en la naturaleza” (SbN) que se apoyen en los ecosistemas y servicios para reducir el riesgo de desastres y del clima y generar una adaptación con múltiples beneficios, incluso en la reducción de gases de efecto invernadero. Para ello, los beneficios de mediano plazo asociados a las medidas de reducción del riesgo de desastres-cambio climático pueden incluir, reducir la pobreza y la desigualdad, transitar hacia economías sostenibles, bajas en emisiones de gases de efecto invernadero y otros contaminantes, eficientes en el uso de los recursos naturales y en la protección de los ecosistemas, así como aminorar la presión fiscal.

## Introducción

El objetivo del proyecto “Fortalecimiento de capacidades para la incorporación de la reducción del riesgo de desastres (RRD) y la adaptación sostenible e incluyente al cambio climático (ASICC) en la inversión pública en los países miembros del COSEFIN/SICA” (RIDASICC) es fortalecer las capacidades para formular y evaluar proyectos de inversión pública incorporando variables críticas relacionadas con el cambio climático y la RRD en el ciclo de los proyectos de inversión pública.

La gestión de dicha iniciativa está a cargo de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y de la Secretaría Ejecutiva del COSEFIN (SE-COSEFIN). En el proyecto participa el Consejo Sectorial de Ministros de Transporte de Centroamérica (COMITRAN) del SICA, a través de una instancia técnica, que es la Comisión Regional de Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático (CR-GRACC).

Esta publicación presenta una propuesta de canales de impacto que trazan la causalidad del riesgo de desastres-cambio climático en la infraestructura vial con una adecuada consideración de su entorno socioambiental para determinar los daños y pérdidas sociales sobre la provisión del servicio derivada de este riesgo.

El capítulo I aborda los desastres y el cambio climático en los países del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA) incluyendo cuáles son los cambios esperados en el clima según el último reporte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC por sus siglas en inglés); toma en cuenta índices mundiales para explicar riesgos haciendo énfasis en los fenómenos climáticos y desastres en el sector transporte de la región.

En el capítulo II aborda algunos casos de estudio sobre eventos registrados para el sector transporte y como estos tienen repercusiones económicas significativas para el subsector vial o carretero, hace énfasis en la tormenta Stan y los huracanes Eta e Iota entre otros eventos.

Con una breve descripción de los escenarios del cambio climático el capítulo III profundiza sobre la identificación de los cambios futuros proyectados para las principales variables climáticas y, con base en esto, determina los cambios proyectados en la infraestructura vial.

En el capítulo IV se construye un marco de referencia sobre las leyes y políticas en materia de cambio climático para cada país de la región, menciona el involucramiento de los Ministerios de Ambiente y de Finanzas en el compromiso que cada país ha adoptado frente al cambio climático y como la políticas y leyes que rigen para minimizar los impactos en el sector vial.

Para conocer la vulnerabilidad de la infraestructura vial en Centroamérica se realizó un diagnóstico, incluido en el capítulo IV, que muestra cómo diversas instituciones han evaluado el nivel de riesgo y la vulnerabilidad de los países de la región. En el diagnóstico se incluyen los análisis realizados por la CEPAL, y los efectuados de manera particular para el proyecto, de la base de datos de EM-DAT y de DesInventar. Los resultados muestran cuál es el impacto de los fenómenos climáticos en la infraestructura de transporte, particularmente en la infraestructura vial. Se incluyen también valoraciones generales y específicas de estudios de caso, sobre el impacto económico que ha representado el impacto del cambio climático en la infraestructura vial.

Para los tomadores de decisiones es importante conocer y evaluar los daños potenciales que estresan los sistemas viales debido al impacto del clima, de esta manera, se puede conocer la vulnerabilidad del sistema y los factores inherentes a dicha vulnerabilidad. Para ello, en el capítulo V se describen los impactos potenciales de las diferentes amenazas climáticas en los

diversos elementos que integran la infraestructura, así como los impactos en la operación. Asimismo, se incluyen ejemplos de investigaciones anteriores en las que se evalúa el impacto del cambio climático en diferentes elementos de la infraestructura vial.

En el capítulo VI se analizan los posibles impactos del cambio climático en la interrupción del servicio. Aunque la valoración de los impactos directos (daños) en la infraestructura es muy importante para los tomadores de decisiones, también resulta muy significativo conocer las pérdidas económicas asociadas a la interrupción del servicio.

Los canales de impactos representan las maneras cómo el cambio climático afecta la infraestructura vial, con impactos en la continuidad y capacidad del servicio que prestan dentro de los sistemas de transporte; estos se presentan en el capítulo VII. Para visualizar los canales de impacto, se elaboraron cuadros que muestran las interdependencias entre las amenazas, la infraestructura, el riesgo potencial, el impacto potencial y la propuesta de adaptación

En el capítulo VIII se presenta una propuesta para considerar cuáles aspectos sociales y ambientales deben incluirse para que una medida de adaptación sea sostenible e incluyente al cambio climático.

Finalmente, las conclusiones resaltan la importancia de que la adaptación debe verse también como una oportunidad de mejora de las actividades económicas y de desarrollo actuales, permitiendo que estas se ajusten y adapten a los impactos del cambio climático para asegurar un futuro incluyente y sostenible.

## I. Desastres y cambio climático en los países de SICA

De acuerdo con los estudios publicados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) que evalúan miles de publicaciones científicas, el clima en el mundo está cambiando, principalmente por las elevadas concentraciones de dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero en la atmósfera que provienen de actividades de la humanidad. Estas alteraciones antropogénicas del clima están aumentando la temperatura de la atmósfera y de la superficie, modificando los patrones de precipitación, aumentando la temperatura, acidez y el nivel del mar y produciendo cambios en la frecuencia y la severidad de los fenómenos climáticos extremos, tales como los ciclones tropicales y las lluvias intensas. Los fenómenos meteorológicos extremos ponen en riesgo la infraestructura y pueden provocar la pérdida del servicio que esta ofrece e importantes pérdidas económicas, que tienen gran impacto social en los países.

El más reciente reporte sobre cambio climático del IPCC, “La base de la ciencia física” (AR6, Grupo de Trabajo I), manifiesta que de manera inequívoca la influencia humana ha calentado la atmósfera, el océano y la tierra (IPCC, 2021). Desde el año 2011, las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI) han seguido aumentando en la atmósfera, alcanzando en 2019 promedios anuales de 410 partes por millón (PPM) de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), 1.866 partes por billón (PPB) de metano (CH<sub>4</sub>) y 332 PPB de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O). La temperatura global de la superficie fue 1.09 [0,95 a 1,20] °C más alta en 2011-2020 que en 1850-1900, con un mayor aumento sobre la tierra, de 1,59 [1,34 a 1,83] °C, que sobre el océano, de 0,88 [0,68 a 1,01] °C. Es prácticamente seguro que los extremos cálidos (incluidas las olas de calor) se han vuelto más frecuentes e intensos en la mayoría de las regiones terrestres desde la década de 1950, mientras los extremos fríos (incluidas las olas de frío) se han vuelto menos frecuentes y severas (IPCC, 2021).

Las sequías también se han incrementado de manera significativa en la región. En la década de 1970 se reportaron cinco eventos de sequía en los 11 países; en la década de 1980, siete; en la década de 1990, 16; en el período 2000-2009, 15, y de 2010 a 2019, 19 eventos. El reporte especial de eventos extremos (SREX) (IPCC, 2012) indica que existe una confianza media de que las sequías se intensificarán en el siglo XXI en algunas regiones como Centroamérica y México, a causa de la reducción de las precipitaciones y el aumento de la evapotranspiración. Un estudio realizado por Pascale y otros (2021) sugiere una alta probabilidad de que las sequías ocurridas en Centroamérica en el período 2015-2019 hayan sido influidas por el cambio climático antropogénico. Además, todos los resultados del modelo sugieren que, en escenarios de emisiones intermedias y altas, es probable que eventos de sequía similares continúen aumentando sustancialmente durante las próximas décadas.

El reporte AR6 también indica que es probable que el promedio mundial de precipitaciones sobre la tierra se haya incrementado desde 1950, con una tasa de aumento más rápida desde la década de 1980 (nivel de confianza medio). Asimismo, es probable que la actividad humana haya contribuido al patrón de cambios en las precipitaciones observados desde mediados del siglo XX.

De acuerdo con el informe, en cuanto al nivel medio global del mar, este aumentó 0,20 [0,15 a 0,25] metros (m) entre 1901 y 2018. La tasa media de aumento del nivel del mar fue de 1,3 [0,6 a 2,1] milímetros (mm) por año entre 1901 y 1971; de 1,9 [0,8 a 2,9] mm por año entre 1971 y 2006, y aumentó aún más, a 3,7 [3,2 a 4,2] mm por año, entre 2006 y 2018 (nivel de confianza alto). Es muy probable que la influencia humana sea el principal impulsor de estos aumentos desde, al menos, 1971. Las observaciones satelitales de 1984 a 2015 muestran tasas de retroceso de las costas arenosas del sur de Centroamérica. Durante el período 1982-2016, las costas experimentaron al menos una ola de calor marina (MHW, Marine Heat Waves) por año, y más a lo largo de la costa del Pacífico del norte de América Central (IPCC, 2021).

Instituciones internacionales publican periódicamente indicadores sobre el nivel de riesgo en que se encuentran los diferentes países. El índice de riesgo climático global (IRC) de Germanwatch es un análisis basado en datos disponibles sobre los impactos de los eventos climáticos extremos (tormentas, inundaciones, olas de calor, etcétera) y los impactos socioeconómicos asociados a ellos. El análisis comprende el período 2000-2019, en el cual seis de los países de la región se encuentran en las primeras 50 posiciones de 180 países (véase el cuadro 1).

**Cuadro 1**  
**Índice de riesgo climático 2000-2019 en los países de la región SICA**

| Posición (rank) | País                 | Calificación | Pérdidas económicas (MDD) (rank) | Pérdidas por unidad del PIB (rank) |
|-----------------|----------------------|--------------|----------------------------------|------------------------------------|
| 33              | Belice               | 48,68        | 96                               | 8                                  |
| 89              | Costa Rica           | 84,5         | 89                               | 80                                 |
| 50              | República Dominicana | 59,5         | 69                               | 82                                 |
| 28              | El Salvador          | 43,67        | 57                               | 29                                 |
| 16              | Guatemala            | 37,50        | 45                               | 48                                 |
| 44              | Honduras             | 57,00        | 78                               | 41                                 |
| 35              | Nicaragua            | 53,00        | 88                               | 42                                 |
| 118             | Panamá               | 107,00       | 115                              | 119                                |

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de D. Eckstein, V. Künzel y L. Schäfer, *Global Climate Risk Index 2021. Who Suffers Most from Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2019 and 2000-2019*, Bonn, Alemania, Germanwatch, 2021.

Nota: MDD = millones de dólares; PIB = producto interno bruto.

Se estima que para la siguiente edición del IRC se hayan producido cambios significativos en algunos países de la región, ya que se incluirán los daños y las pérdidas económicas causados por los eventos que impactaron a Centroamérica y la República Dominicana durante 2020, tales como las tormentas tropicales Amanda, Cristóbal y Marco, los huracanes Isaías, Laura, Nana, Eta e Iota.

El índice de riesgo mundial proporciona un nuevo enfoque para evaluar el riesgo y la vulnerabilidad frente a los peligros naturales a escala nacional, y permite la comparación de países a escala global. En el reporte publicado en 2020, los países de la región de Centroamérica fueron evaluados como se indica en el cuadro 2, de acuerdo con su nivel de exposición, vulnerabilidad, sensibilidad y falta de capacidades para la adaptación.

**Cuadro 2**  
**Índice de riesgo mundial 2020 de los países de la región SICA**

| Índice de riesgo | País                 | Exposición | Vulnerabilidad | Susceptibilidad | Falta de capacidad de adaptación |
|------------------|----------------------|------------|----------------|-----------------|----------------------------------|
| 7,95             | Belize               | 16,82      | 47,24          | 27,94           | 40,26                            |
| 17,25            | Costa Rica           | 43,49      | 39,67          | 20,03           | 30,08                            |
| 11,57            | República Dominicana | 24,85      | 46,57          | 24,03           | 37,46                            |
| 15,33            | El Salvador          | 31,69      | 48,39          | 24,67           | 42,44                            |
| 20,09            | Guatemala            | 36,52      | 55,02          | 33,09           | 46,76                            |
| 11,02            | Honduras             | 20,25      | 54,43          | 32,11           | 46,45                            |
| 14,67            | Nicaragua            | 25,67      | 57,15          | 32,00           | 56,18                            |
| 7,96             | Panamá               | 18,03      | 44,13          | 23,85           | 36,29                            |

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Instituto de Derecho Internacional de la Paz y los Conflictos Armados (IFHV), *World Risk Report 2020*, Alemania, 2020.

El *Informe de riesgo mundial* contiene el índice de riesgo mundial, que ha sido estimado desde 2018 por el Instituto de Derecho Internacional de la Paz y los Conflictos Armados (IFHV) de la Universidad Ruhr de Bochum. El cálculo del riesgo de desastres se ha realizado para 181 países, y se basa en cuatro componentes: exposición, susceptibilidad, capacidades de afrontamiento y capacidades de adaptación.

La exposición del riesgo de desastres se basa en la utilización del índice de riesgo, y sus cuatro componentes. Este expone los focos de riesgo de desastres a nivel mundial y los campos de acción para lograr la necesaria reducción de riesgos. Los valores del índice de riesgo mencionados en el cuadro 2 indican que los niveles se establecen conforme los siguientes rangos: muy bajo (0,3-3,25), bajo (3,26-5,54), medio (5,55-7,66), alto (7,67-10,71) y muy alto (10,72-47,73). Como se puede observar, los países que integran la región de Centroamérica y la República Dominicana se hallan en niveles altos y muy altos de riesgo.

Existen varias fuentes internacionales tales como la Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT), que integra un padrón de desastres, o la base de datos de DesInventar, la cual permite conocer el tipo de impactos y el sector económico al que corresponden, como lo es el transporte.

En 1988, el Centro de Investigación sobre Epidemiología de Desastres (CRED) lanzó la Base de Datos de Eventos de Emergencia (EM-DAT<sup>1</sup>). Esta se creó con el apoyo inicial de la Organización Mundial de la Salud (OMS) y el Gobierno de Bélgica. El objetivo principal de la EM-DAT es servir a los propósitos de la acción humanitaria y la preparación ante desastres, en los niveles nacional e internacional. La EM-DAT contiene datos básicos sobre la ocurrencia y los efectos de más de 22.000 desastres masivos en el mundo desde 1900 hasta la actualidad. Los datos se compilan a partir de varias fuentes, incluidas agencias de las Naciones Unidas, organizaciones no gubernamentales (ONG), compañías de seguros, institutos de investigación y agencias de prensa.

En la región de Centroamérica y en República Dominicana se encuentran registrados 447 desastres asociados a eventos como tormentas, inundaciones, deslizamientos, sequías y temperaturas extremas (véase el cuadro 3). Aunque el primer registro corresponde al año 1930, la regularidad de los registros comenzó en los sesenta.

<sup>1</sup> Véase EM-DAT. The International Disaster Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED) [base de datos en línea] <https://www.emdat.be/>.

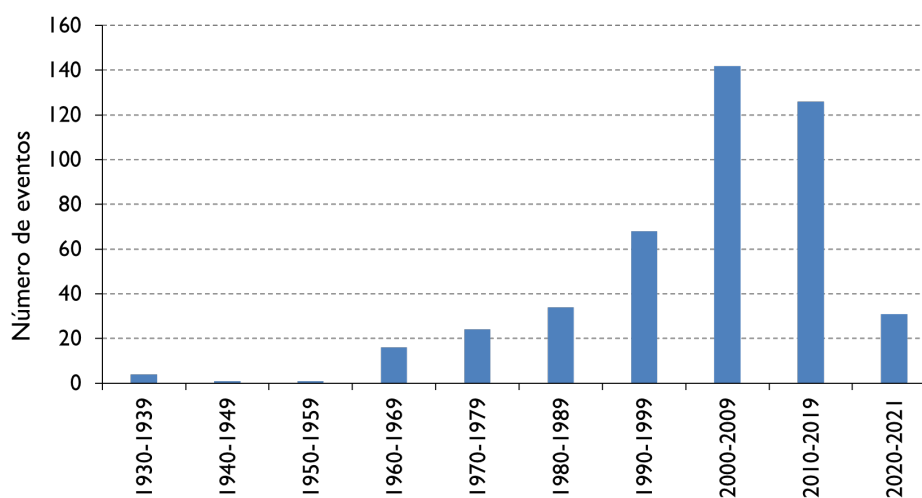
**Cuadro 3**  
Desastres registrados en los países de la región SICA

| País                 | Tormenta | Inundación | Sequía | Deslizamientos | Temperatura extrema |
|----------------------|----------|------------|--------|----------------|---------------------|
| República Dominicana | 40       | 29         | 1      | 0              | 0                   |
| Belice               | 16       | 5          | 0      | 0              | 1                   |
| Honduras             | 26       | 38         | 12     | 1              | 0                   |
| Guatemala            | 20       | 36         | 7      | 11             | 4                   |
| El Salvador          | 19       | 18         | 7      | 3              | 1                   |
| Nicaragua            | 24       | 23         | 6      | 1              | 0                   |
| Panamá               | 8        | 40         | 4      | 0              | 0                   |
| Costa Rica           | 10       | 30         | 5      | 1              | 0                   |
| Totales              | 163      | 219        | 42     | 17             | 6                   |

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de EM-DAT. The International Disaster Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED) [base de datos en línea] [www.emdat.be](http://www.emdat.be) [fecha de consulta: 9 de febrero de 2022].

Con los datos de EM-DAT2 se graficaron los registros de los eventos extremos (tormenta, inundación, sequía y deslizamiento) por décadas, y se puede observar en el gráfico 1 que estos se han incrementado en las últimas dos décadas, aunque pudiera ser atribuible en parte a mejores registros.

**Gráfico 1**  
Eventos extremos registrados en los países de la región SICA



Fuente: Elaboración propia, sobre la base de EM-DAT. The International Disaster Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED) [base de datos en línea] <https://www.emdat.be> [fecha de consulta: 9 de febrero de 2022].

Nota: Solo se contemplan los países miembros de SICA.

DesInventar es una herramienta para la generación de los inventarios nacionales de desastres y la construcción de bases de datos de daños, pérdidas y, en general, los efectos de los desastres.

<sup>2</sup> Para que un evento sea registrado en la base de datos de EM-DAT se deben de cumplir al menos uno de los siguientes criterios: diez o más muertes de personas; 100 o más personas sean afectadas, lesionadas o hayan perdido sus hogares; haya una declaración del estado de emergencia del país o una apelación para asistencia internacional. Notar que posiblemente haya un subregistro de eventos en las primeras décadas de la serie (CEPAL, 2020).

El Sistema de Gestión de Información sobre Desastres es un arreglo sostenible dentro de una institución para la recopilación, documentación y análisis sistemáticos de datos sobre pérdidas causadas por desastres asociados con peligros naturales, cuya iniciativa es actualmente apoyada por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, por sus siglas en inglés). La base de datos cuenta con 44.809 registros de desastres, de los cuales 11.328 se materializaron en la infraestructura del transporte en los países SICA (véase el gráfico 2).

Los impactos para el sector transporte representan cerca del 25% del total de los desastres registrados, aunque no todos se refieren a infraestructura vial, ya que se incluyen impactos para los otros modos de transporte. Las principales causas de las afectaciones en la infraestructura del transporte son las inundaciones (4.715 registros), los deslizamientos (3.994 registros) y las lluvias intensas (1.590 registros). Es importante aclarar que los deslizamientos son consecuencia, y no una causa, ya que se requiere una alta saturación del suelo (por precipitaciones intensas) para que el grado de cohesión se pierda y se produzcan desprendimientos/deslizamientos de material, ya sea en cortes o en laderas, aunque también pudieran tener un origen geológico, y ya no se consideraría un impacto climático, sino un desastre por evento natural.

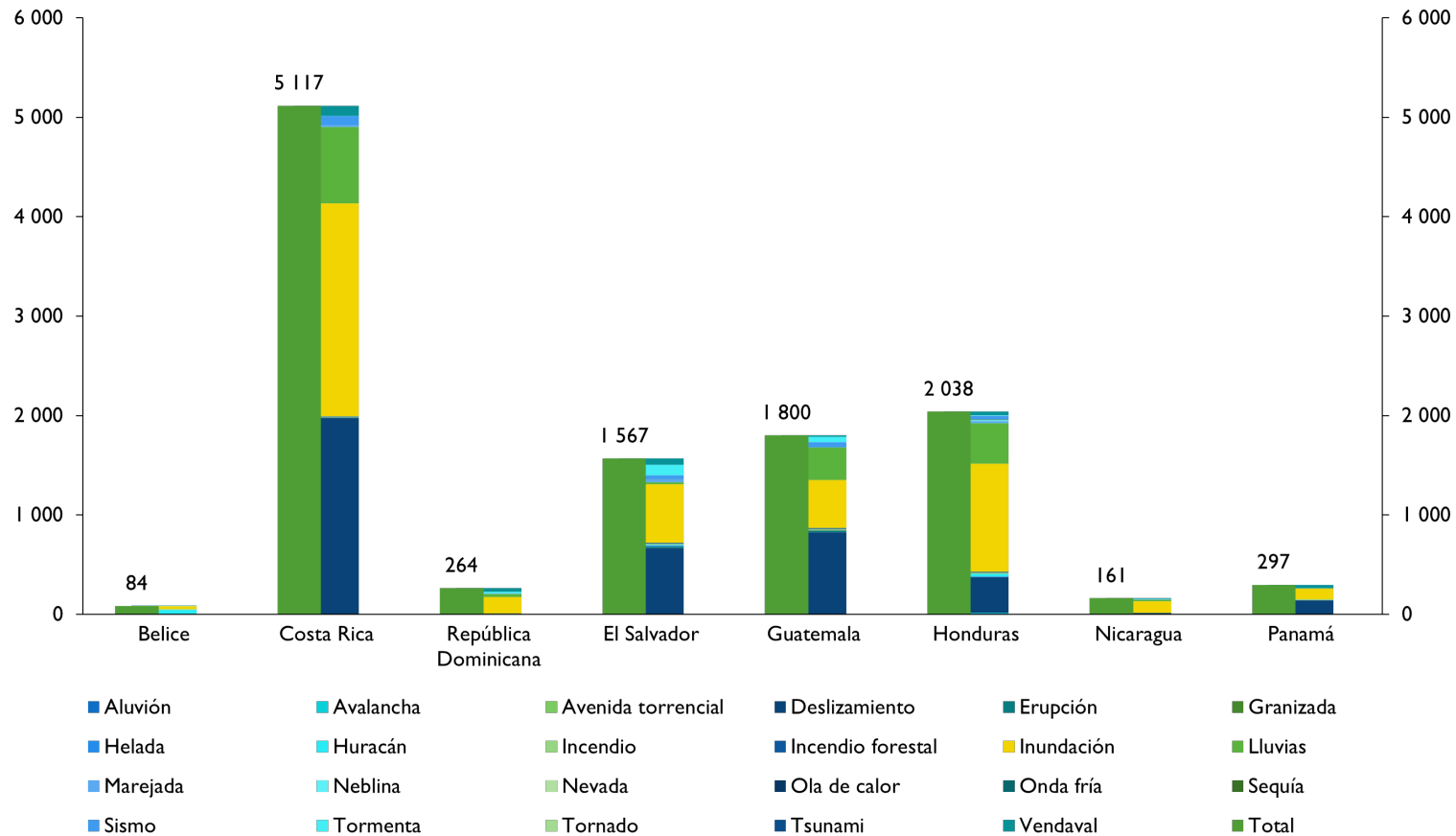
Las principales afectaciones a la infraestructura vial para cada evento se presentan de diferentes maneras, que se resumen en el cuadro 4.

**Cuadro 4**  
**Registros de impactos de fenómenos climáticos en los países de la región SICA**

| Núm. | Evento             | Impactos registrados   |
|------|--------------------|--|
| 1    | Aluvión            | Afectaciones en puentes por avenidas de lodo y agua<br>Cierre de vialidades por presencia de lodo y agua   |
| 2    | Avenida torrencial | Puentes colapsados por el arrastre de ríos<br>Daño a vialidades por el desbordamiento de ríos<br>Cierre a la circulación de vialidades debido a las crecientes y desbordamiento de ríos                              |
| 3    | Deslizamientos     | Puentes colapsados por deslizamientos, deslaves y derrumbes<br>Pérdida de vialidades por derrumbes y deslaves<br>Cierre de vías por presencia de material a causa de deslaves, deslizamientos y derrumbes            |
| 4    | Granizada          | • Cierre de vialidades por encharcamiento de la calzada  |
| 5    | Helada             | • Cierre de vialidades   |
| 6    | Incendio           | Cierre de vialidades debido a la poca visibilidad causada por el fuego.  |
| 7    | Incendio forestal  | Afectación en vialidades debido a la poca visibilidad por el humo y la proximidad del fuego a la vía   |
| 8    | Inundación         | Puentes destruidos a causa de fuertes lluvias y desbordamiento de ríos<br>Vialidades cerradas por inundación<br>Vialidades parcialmente destruidas y cerradas debido a los desbordamientos de ríos y fuertes lluvias |
| 9    | Lluvias            | Puentes derrumbados o destruidos por crecientes de ríos<br>Vialidades cerradas debido a las fuertes lluvias e inundación de estas<br>Vialidades parcialmente destruidas por lluvias torrenciales                     |
| 10   | Marejadas          | Daños del pavimento por inundación<br>Cierres de vialidades por inundación   |
| 11   | Neblina            | Cierres de vialidades debido a la intensa neblina  |
| 12   | Sequía             | Vialidades afectadas en la carpeta asfáltica   |
| 13   | Tormenta           | Puentes derrumbados o destruidos por la creciente del agua debido a las lluvias<br>Vialidades afectadas por inundación<br>Vialidades interrumpidas o cerradas debido a las fuertes lluvias y vientos                 |
| 14   | Vendaval           | Vialidades interrumpidas o cerradas debido a las fuertes lluvias y vientos<br>Vialidades cerradas debido a los fuertes vientos y tolvaneras  |

Fuente: Elaboración propia, sobre la base del Sistema para el Monitoreo del Marco de Sendai: DesInventar, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) [en línea] <https://www.desinventar.net/index.html> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2021].

**Gráfico 2**  
**Registros de desastres en el sector transporte en los países de la región SICA**



Fuente: Elaboración propia sobre la base del Sistema para el Monitoreo del Marco de Sendai: DesInventar, Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) [en línea] <https://www.desinventar.net/index.html> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2021].

De acuerdo con la base de DesInventar, las pérdidas económicas por afectaciones en la infraestructura vial ascienden a más de 13.500 millones de dólares, y anotando que y no están considerados en la cifra indicada algunos impactos solo valorados en moneda local.

La estimación de pérdidas económicas por eventos extremos en Centroamérica, basada en las evaluaciones DaLA<sup>3</sup> que realizó la CEPAL, los gobiernos y otras agencias para eventos ocurridos entre 1974 y 2011, indica que, respecto a la vulnerabilidad de los sectores económicos, poco más de la mitad de las pérdidas registradas correspondieron a los sectores productivos y una cuarta parte de las pérdidas totales recayó en infraestructura. En infraestructura, el subsector telecomunicaciones y transportes registra el 79% de las pérdidas en la región, debido principalmente a la destrucción de caminos y vías de comunicación (CEPAL/CAC-SICA, 2013).

---

<sup>3</sup> La metodología Damage and Loss Assessment (DaLA) puede ser consultada [en línea] <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/35894>.



## II. Casos de estudio

Los eventos registrados para el sector transporte tienen repercusiones económicas significativas para el subsector vial o carretero. Así, se han incluido casos de estudio que permiten evaluar los daños y las pérdidas que representan para el subsector vial.

### Recuadro I Impacto de lluvias torrenciales y el huracán Stan en Guatemala, 2005

Tras una estación de lluvia con un nivel de precipitaciones observado por encima de la media anual normal, se desarrolló Stan, la tormenta tropical número 18 de la temporada ciclónica del Atlántico en 2005, que alcanzó la categoría 1 como huracán (28 de septiembre-5 de octubre).

El monto total del impacto fue estimado en un equivalente a 983 millones de dólares, es decir, un 3,4% del PIB de 2004.

Los principales daños ocasionados por el huracán Stan afectaron al subsector de carreteras y caminos, produciendo pérdidas económicas en el transporte carretero debido a la necesidad de desviar algunos flujos por la obstrucción de las vías que se utilizaban tradicionalmente antes del desastre. La vialidad existente en las áreas afectadas resultó severamente afectada a consecuencia de las inundaciones, en particular las dos vías longitudinales principales que articulan la red troncal (CA-1 y CA-2), las cuales estuvieron obstruidas durante dos semanas. El tránsito se restituyó a través de vías alternas.

Los principales daños corresponden a colapsos de puentes, terraplenes y obras en general; desestabilizaciones de taludes, deslaves, deslizamientos y derrumbes; hundimientos y asentamientos de calzadas. La longitud vial afectada superó los 1.500 km de vías pavimentadas y unos 6.000 km de vías no pavimentadas.

Existen algunas limitaciones en la cuantificación de daños en el mediano y largo plazo, por ejemplo, en pavimentos que estuvieron inundados durante varios días. Los daños asociados a la infiltración a las capas se presentarán en el futuro cercano, y no son cuantificados como causa directa del impacto climático debido a las lluvias torrenciales y al huracán Stan. El daño estimado para la infraestructura vial fue de 1.800 millones de quetzales.

Las pérdidas estimadas representaron más de 1.300 millones de quetzales se dieron en las siguientes tres situaciones:

- Desvíos de flujos que optan por vías alternativas.
- Redistribuciones submodales, es decir, transferencias de un submodo a otro del mismo subsector; por ejemplo, del camión articulado al unitario, cuando el primero carece de maniobrabilidad en las rutas alternas disponibles; del camión liviano a la camioneta, de buses grandes a pequeños, de buses a vehículos livianos, entre otros.
- Supresiones de tránsitos.

Las pérdidas económicas ocasionadas por los desvíos de flujos son bastante significativas debido a la duración de las obstrucciones, el incremento de la longitud de los viajes, las bajas especificaciones de las vías alternas, el aumento del tránsito en vías alternas, etcétera.

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y la tormenta tropical Stan* (LC/MEX/R.985), Ciudad de México, octubre de 2005.

### **Recuadro 2** **Impacto de los huracanes Eta e Iota en Honduras, 2020**

El huracán Eta tuvo su formación el 31 de octubre y se disipó el 13 de noviembre. Caracterizado por un comportamiento errático, con numerosas variaciones en su intensidad, se estimó que dejó un total de 380 a 635 mm de precipitación en casi todo el territorio hondureño. Por su parte, el huracán Iota se formó el viernes 13 de noviembre y se disipó el 18 de noviembre. Este último fue catalogado categoría 4 y 5.

Los impactos totales causados por los huracanes Eta e Iota fueron valorados en aproximadamente 45.676 millones de lempiras. El daño estimado a la infraestructura de transporte es de aproximadamente 2.050 millones de lempiras para todo el país; las pérdidas económicas estimadas asociadas a la interrupción de los servicios de transporte ascienden a 1.470 millones de lempiras y, finalmente, los costos adicionales relacionados con la reconstrucción y remoción de escombros son 450 millones de lempiras.

En específico para vialidades, los daños ascienden a 1.074 millones de lempiras, las pérdidas a 1.252 millones de lempiras y los costos adicionales a 355 millones de lempiras; para los puentes, se estiman daños por 799 millones de lempiras y costos adicionales de 48 millones de lempiras.

Los daños en las vialidades fueron mayores en zonas cercanas a las cuencas y riveras de los ríos, así como en laderas en zonas de montaña donde se produjeron derrumbes y deslizamientos que obstruyeron total o parcialmente la vía. Otros impactos se debieron a la falta de obras de drenaje o a la falta de capacidad para el control del agua para su cruce transversal, a causa de los niveles de escurrimientos por las tormentas. Muchos puentes, cajas puente y vados no tuvieron capacidad para manejar la cantidad y velocidad del agua junto con los sólidos y sedimentos que venían en la corriente. La principal razón del colapso fue la subestimación de los flujos hidráulicos debajo del puente. Las carreteras que corren en las márgenes de los ríos sufrieron una fuerte erosión en sus bordes de encausamiento deteriorando la vía.

Las pérdidas en el sector se debieron a la disminución del cobro de peaje, por baja frecuencia vehicular; disminución en la cantidad de carga que transportar; por la pérdida de cosecha y disminución del consumo de bienes y servicios como combustible, y disminución de pasajeros en el transporte público. Las pérdidas en el transporte terrestre se estiman en 1.252 millones de lempiras.

Fuente: Banco Interamericano de Desarrollo (BID)/Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *Evaluación de los efectos e impactos causados por la tormenta tropical ETA y el huracán IOTA en Honduras*, Gobierno de la República de Honduras, 2021.

### **Recuadro 3** **Impacto de la tormenta tropical Agatha en El Salvador, 2010**

En el período comprendido entre el 23 de mayo y el 1 de junio de 2010, el fenómeno natural de la tormenta tropical Agatha ocasionó en El Salvador daños y pérdidas económicas considerables. Las zonas más afectadas fueron las localizadas en la zona próxima a la línea de costa y partes altas del territorio salvadoreño.

El paso de esta tormenta tropical afectó todo el territorio nacional y produjo deslizamientos y derrumbes en laderas, desbordamientos e inundaciones, especialmente en las zonas costeras del centro y occidente del país, con un muy grave incremento de la colmatación de los lechos de los ríos. El valor de los daños y pérdidas por el paso de la tormenta tropical Agatha asciende a 112,1 millones de dólares, esto es, poco más del 0,5% del PIB del país.

Los daños y pérdidas en el transporte ocasionados por el desastre afectaron con especial severidad los puentes y algunas estructuras. También tuvieron lugar deslizamientos que obstruyeron las carpetas de rodadura, con los consecuentes costos de operación.

Los daños por el desastre en las carreteras y puentes fueron estimados en 8.420 millones de dólares, de los cuales 4.519 millones de dólares corresponden a puentes y el resto a daños en la red vial (especial, primaria, secundaria y terciaria, rural y urbana).

La estimación de pérdidas se refiere a los costos de operación en que incurren los flujos al desviarse desde las rutas tradicionales hacia otras menores. Este fenómeno es frecuente en flujos de carga que obedecen a la necesidad de llegar a sus destinos o regresar a sus orígenes. También los costos por cierres totales de la vía, cuyo caso más representativo es el daño de puentes que cortan el paso vehicular en tres tramos.

Las pérdidas se estimaron en 24.005,7 millones de dólares, repartidos entre los sectores público (19.864,2 millones de dólares) y privado (12.562,2 millones de dólares).

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *Evaluación de daños y pérdidas en El Salvador ocasionados por la tormenta tropical Agatha* (LC/MEX/L.982), Ciudad de México, 2010.

Como se puede observar en todos los casos de estudio, los daños y las pérdidas son altamente significativos para los países, ya que afectan el PIB del país y, por lo tanto, su desarrollo.

#### **Recuadro 4** **Impacto de la depresión tropical 12-E en Centroamérica, 2011**

El 7 de octubre de 2011 la Administración Oceanográfica Nacional de los Estados Unidos (NOAA) emitió el primer informe sobre un evento que caracterizó como un área de perturbación climática. La depresión tropical 12-E se inició el 9 de octubre al suroeste de Guatemala. Este fenómeno evolucionó rápidamente, y se definió como un fenómeno con lluvias y tormentas eléctricas. Persistió sobre el territorio centroamericano hasta el 20-21 de octubre.

El Salvador registró un máximo de lluvia acumulada de 1.513 mm, por lo que este evento meteorológico fue considerado como el más severo registrado en el país.

La valoración de los daños y las pérdidas acumuló 1.968.872.746,14 de dólares, de los cuales 561.439.459,46 corresponden al subsector transporte y comunicaciones; esto representa poco más del 28% del impacto económico total y el 83,7% del sector infraestructura.

Fuente: Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), *Resumen regional del impacto de la depresión tropical 12-E en Centroamérica: cuantificación de daños y pérdidas sufridos por los países de la región en el mes de octubre de 2011. Algunas reflexiones sobre la nueva "normalidad" de los desastres* (LC/MEX/L.1060), Ciudad de México, 2011.

#### **Recuadro 5** **Impacto de los huracanes Nicole y Thomas en Costa Rica, 2010**

Durante la temporada ciclónica de 2010, dos eventos fueron importantes por sus efectos en Costa Rica. El efecto de Matthew (23 y 24 de septiembre) contribuyó a saturar los suelos y a potenciar los efectos de Nicole (28 al 30 de septiembre), sumándose la influencia del huracán Thomas (2 al 7 de noviembre). El estimado total del valor de los daños acumulados por Nicole y Thomas alcanza 283,95 millones de dólares, de los cuales 132,3 corresponden a los costos de reposición de infraestructura vial, es decir, el 46,6% del total de los daños y el 0,37% del PIB del sector.

Fuente: R. Flores Verdejo y otros, *Evaluación del impacto económico provocado por los fenómenos ciclónicos Nicole y Thomas en Costa Rica en el año 2010*, San José de Costa Rica, Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), 2011.

Con base en las evaluaciones "DaLA", los daños asociados al clima en América Latina se concentran en el sector productivo (52,1%); en el sector infraestructura, el impacto económico es de 27,5% (Bello, Ortiz y Samaniego, 2014). Estos valores varían por región. En el sector infraestructura, los daños se encuentran de manera predominante en el subsector transporte y vialidad, con un 85%. La estimación de los impactos corresponde al período 1972-2010, cuando los desastres provocados por los diferentes fenómenos climáticos representaron para el subsector transporte daños del 89,1% y pérdidas de un 70% (Bello, Ortiz y Samaniego, 2014) en la región de Centroamérica.



### III. Escenarios de cambio climático en los países de la región SICA

La temperatura de la superficie global seguirá aumentando hasta al menos mediados de siglo en todos los escenarios de emisiones considerados. El calentamiento global podrá limitarse durante el siglo XXI de 1,5 °C o 2 °C solo si se producen reducciones profundas de las emisiones de CO<sub>2</sub> y otros GEI en las próximas décadas y se logra alcanzar la condición de “carbono neutral” o cero emisiones netas para el año 2050 (para limitarse a 1,5 °C de calentamiento) o el año 2070 (para limitarse a 2 °C de calentamiento). De acuerdo con el AR6 (IPCC, 2021), se prevé que la precipitación terrestre global anual se ubique entre el 1,5% y el 8% en el escenario intermedio de emisiones de GEI (SSP2-4,5) y entre el 1% y el 13% en el escenario de muy altas emisiones de GEI (SSP5-8.5)<sup>4</sup>.

Según el informe AR6 (IPCC, 2021), para la región de Centroamérica se tiene evidencia de que las olas de calor extremo aumentarán, para la sequía existe un alto nivel de confianza de que aumentará, mientras que para las precipitaciones intensas no se cuenta con suficientes datos e investigaciones para establecer los cambios esperados en el futuro. También se prevé que algunas regiones tropicales experimenten una mayor aridez, incluida la cuenca del Amazonas y Centroamérica con un nivel de confianza alto. De acuerdo con los escenarios proyectados para Centroamérica y el Caribe, el índice de calentamiento (Heat Index, HI) excederá los 41°C. Se proyecta que la cantidad de días secos aumentará en los subtrópicos, la Amazonía y Centroamérica con un nivel de confianza medio (IPCC, 2021).

Giorgi (2006) elaboró un índice de cambio climático regional (RCCI, por sus siglas en inglés) basado en los cambios proyectados en la temperatura media y su variabilidad y en la precipitación regional en relación con sus valores globales para 26 regiones terrestres del mundo. Este índice comparativo demuestra que Centroamérica y México (CAM) es un *hot-spot* del cambio climático, en particular debido a una reducción en la precipitación y un aumento de la variabilidad de la precipitación en los escenarios futuros. Ninguna otra región de los trópicos muestra cambios tan grandes como Centroamérica.

En un estudio realizado por Karmalkar, Bradley y Diaz (2011) se prevé una gran reducción de la precipitación en la estación húmeda para la región, mientras partes de Centroamérica que reciben una cantidad considerable de humedad en forma de precipitación orográfica mostrarán una significativa disminución de las precipitaciones en la estación seca.

El IPCC (2021) indica que, por cada incremento adicional en el calentamiento global, los cambios extremos continúan en aumento. Por ejemplo, cada 0,5 °C adicional de calentamiento global provoca aumentos claramente perceptibles en la intensidad y la frecuencia de los extremos cálidos, incluidas las olas de calor (muy probable) y las fuertes precipitaciones (nivel de confianza alto), así como sequías agrícolas y ecológicas en algunas regiones (alta confianza).

En relación con los eventos extremos, el IPCC ha determinado que habrá una ocurrencia cada vez mayor de algunos eventos extremos, sin precedentes en el registro de observación con calentamiento global adicional. El *Informe AR5* señala que se ha detectado la influencia humana en cambios climáticos en unos 20 eventos extremos. Un capítulo dedicado en el informe AR6 concluye que ahora es un hecho que las emisiones de gases de efecto invernadero inducidas

<sup>4</sup> El reporte AR6 evalúa la respuesta climática en ocho escenarios ilustrativos que combinan cinco escenarios socioeconómicos (SSP) con diferentes trayectorias de concentración (RCP), que cubren el rango de posible comportamiento futuro de los impulsores antropogénicos del cambio climático que se encuentran en la literatura. Para mayor información se puede referir a otra publicación de la serie RIDASICC sobre información climático disponible para la región SICA.

por el ser humano han dado lugar a un aumento de la frecuencia y/o la intensidad de algunos fenómenos meteorológicos y climáticos extremos desde 1850, en particular de las temperaturas extremas. La evidencia de los cambios observados y la atribución a la influencia humana se han fortalecido para varios tipos de eventos extremos desde el informe AR5, en particular para precipitaciones extremas, sequías, ciclones tropicales y otros eventos extremos compuestos (incluidos los incendios) (IPCC, 2021).

Un estudio publicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe y el Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericana (CEPAL/CAC-SICA, 2020) actualiza los escenarios climáticos con la información del AR5 del IPCC para distintos niveles subnacionales en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana.

De acuerdo con los resultados, en la última década se han registrado temperaturas más altas respecto al período 1960-1990 en todos los países de la región: Guatemala (0,89 °C), Belice (0,86 °C), El Salvador (0,82 °C), Honduras (0,76 °C), Nicaragua (0,68 °C), la República Dominicana (0,62 °C), Panamá (0,61 °C) y Costa Rica (0,59 °C). En el futuro se esperan aumentos de la temperatura en función de los diferentes escenarios del cambio climático. Para la región, de acuerdo con las proyecciones realizadas en el estudio referido (CEPAL/CAC-SICA, 2020), se prevén incrementos desde 0,8 °C hasta temperaturas mayores a 4,4 °C, según se muestra en el cuadro 5.

**Cuadro 5**  
**Escenarios de aumento de la temperatura en Centroamérica**

| País                 | Futuro cercano (2030) |              | Futuro lejano (2080) |              |
|----------------------|-----------------------|--------------|----------------------|--------------|
|                      | Escenarios            |              | Escenarios           |              |
|                      | RCP4.5                | RCP8.5       | RCP4.5               | RCP8.5       |
| Belice               | 1,2 - 1,6 °C          | 1,6 - 2 °C   | 2 - 2,4 °C           | > 4,4 °C     |
| Costa Rica           | 0,8 - 1,2 °C          | 1,2 - 1,6 °C | 1,6 - 2 °C           | 3,2 - 3,6 °C |
| El Salvador          | 0,8 - 1,2 °C          | 1,6 - 2 °C   | 2 - 2,4 °C           | > 4,4 °C     |
| Guatemala            | 0,8 - 1,2 °C          | 1,2 - 1,6 °C | 2 - 2,4 °C           | > 4,4 °C     |
| Honduras             | 1,2 - 1,6 °C          | 1,6 - 2 °C   | 2 - 2,4 °C           | > 4,4 °C     |
| Nicaragua            | 0,8 - 1,2 °C          | 1,2 - 1,6 °C | 2 - 2,4 °C           | 3,2 - 3,6 °C |
| Panamá               | 0,8 - 1,2 °C          | 1,2 - 1,6 °C | 1,6 - 2 °C           | 3,2 - 3,6 °C |
| República Dominicana | 1,2 - 1,6 °C          | 1,6 - 2 °C   | 2 - 2,4 / 1,6 - 2 °C | 3,6 - 4 °C   |

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericana (CAC-SICA), *Análisis espacial de datos históricos y escenarios del cambio climático en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana* (LC/MEX/TS.2020/43), Ciudad de México, 2020.

En cuanto a la precipitación, a partir de 2030, según los escenarios analizados, habría cambios en el nivel de precipitación promedio acumulada al año, con disminuciones de hasta el 10% en toda la región, excepto en Panamá y ciertas regiones del Pacífico, que experimentarían un incremento de la precipitación. En el escenario RCP4.5 se esperan aumentos de precipitación y en el escenario RCP8.5 disminuciones a largo plazo, ambos a nivel nacional. Los cambios más notables podrían ocurrir en la distribución de la precipitación dentro de los países y en la distribución interanual, con cambios en los patrones en los períodos de lluvia. No obstante, existe una gran variabilidad que es parte de la incertidumbre respecto a la precipitación (véase el cuadro 6).

**Cuadro 6**  
**Escenarios de cambios en la precipitación media en Centroamérica**  
*(En porcentajes)*

| País                 | Futuro cercano (2030) |     | Futuro lejano (2080) |     |
|----------------------|-----------------------|-----|----------------------|-----|
|                      | Escenario             |     | Escenario            |     |
|                      | 4,5                   | 8,5 | 4,5                  | 8,5 |
| Belice               | -3                    | -1  | -4                   | -13 |
| Costa Rica           | +4                    | +6  | +2                   | -3  |
| El Salvador          | +2                    | +2  | +1                   | -5  |
| Guatemala            | +1                    | +1  | +4                   | -3  |
| Honduras             | -1                    | +1  | -4                   | -12 |
| Nicaragua            | +3                    | +5  | 0                    | -5  |
| Panamá               | +8                    | +10 | +8                   | 6   |
| República Dominicana | +1                    | -1  | -5                   | -9  |

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)/Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericana (CAC-SICA), *Análisis espacial de datos históricos y escenarios del cambio climático en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana* (LC/MEX/TS.2020/43), Ciudad de México, 2020.

Un estudio realizado por la CEPAL (2011a) sobre el impacto económico que representa el cambio climático en los sectores económico y social, de manera directa o indirecta, estima tal impacto entre 31.000 y 52.000 millones de dólares<sup>5</sup> sin medidas de adaptación y a 2100, en los escenarios B2 y A2 respectivamente contemplando una tasa de descuento del 0,5%. Esto equivale al 32% y al 54% del producto interno bruto (PIB) de acuerdo con el año base (2008). La variación está sujeta al escenario futuro de emisiones elegido para el análisis. Los costos incluidos en el estudio son iniciales y están asociados a los impactos analizados en el sector agrícola, recursos hídricos (disponibilidad y consumo municipal y agrícola), biodiversidad (costos registrados económicamente e impacto indirecto en agricultura) y aumento de intensidad de huracanes, tormentas e inundaciones (no incluyendo aumento en la frecuencia de estos y otros tipos de eventos extremos). Entonces, los cálculos representan una visión reservada e inicial de los costos completos del impacto económico. Se prevé que la mayoría de los costos ocurrirán en la segunda mitad del siglo, cuando los efectos de las emisiones serán mayores y, en general, los costos serán muy elevados al finalizar el siglo en un escenario de inacción.

Stern (2006) calcula que, si no se actúa, los costos y los riesgos globales del cambio climático equivaldrán a perder al menos el 5% del PIB mundial cada año, en la actualidad y en el futuro. Si se tiene en cuenta una gama más amplia de riesgos e impactos, las estimaciones de daños se elevarían hasta un 20% del PIB o más. Por el contrario, los costos de la acción (por ejemplo, la reducción de las emisiones de GEI para evitar los peores impactos del cambio climático) pueden limitarse a alrededor del 1% del PIB mundial cada año.

EL IPCC cuenta con su atlas interactivo<sup>6</sup>, el cual contiene información histórica del clima y los escenarios climáticos por región, incluyendo la región de Centroamérica (CAM). Este Atlas incluye proyecciones de la temperatura (máxima, media y mínima), precipitación, aumento del nivel del mar, entre otras variables climáticas. Los escenarios se encuentran disponibles para las diferentes trayectorias de concentración de emisiones y para los diferentes plazos futuros (corto, 2021-2040; mediano, 2041-2060; y largo, 2081-2100).

<sup>5</sup> A precios de 2002.

<sup>6</sup> Véase [en línea] <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>.

El proyecto RIDASICC cuenta con una publicación sobre la oferta de escenarios de cambio climático en documentos y plataformas en instituciones nacionales, regionales e internacionales (Olivares y otros, 2023). Este análisis de la oferta da una recomendación para su aplicación en los proyectos de inversión pública de los países SICA y proporciona un análisis más amplio sobre el clima histórico y los escenarios de cambio climático en la región.

En resumen, las variables climáticas relevantes para la infraestructura vial son generalmente conocidas. La información de los escenarios del cambio climático es particularmente útil para estimar el comportamiento futuro de las variables climáticas conocidas para su potencial de afectar la infraestructura vial, y permitirán actualizar los umbrales de diseño de los diferentes elementos que integran la infraestructura vial. Lo importante sería identificar la manera en que estas variables pueden afectar el diseño de la infraestructura desde una perspectiva operacional.

Una propuesta acerca de las variables climáticas críticas para el análisis del cambio climático en el sector vial se resume en el cuadro 7, basada en lo reportado en la guía RIMAROCC (Bles y otros, 2010). Los eventos climáticos se ponderan según su importancia para el sector vial, incluyendo su impacto y frecuencia: desde 0, irrelevante, hasta 4, de importancia principal. Algunas variables, como oleaje o nivel del mar, pueden afectarla infraestructura vial en ciertas ubicaciones geográficas de las costas.

**Cuadro 7**  
**Propuesta de eventos y variables climáticas para el análisis del cambio climático en el sector de infraestructura vial**

| Nivel de afectación | Evento climático que afecta la infraestructura vial                       | Variable climática asociada   |
|---------------------|---|---|
| 4                   | Precipitación intensa   | • Intensidad máxima (mm/h) y (mm/24h)   |
| 4                   | Precipitación estacional  | • Promedio total (mm/ 3 meses)  |
| 4                   | Aumento del nivel del mar   | • Aumento (m)   |
| 4                   | Marejadas de tormenta   | • Altura de la ola (m)<br>• Frecuencia (s)  |
| 3                   | Temperatura máxima y número consecutivo de días calientes (olas de calor) | • Temperatura máxima promedio (°C en 24h)<br>• Temperatura máxima (°C)<br>• Duración de la ola de calor (número consecutivo de días) (hw/año) |
| 3                   | Sequía (días secos consecutivos)  | • Duración de la sequía (d/año)   |
| 2                   | Vientos extremos  | • Velocidad máxima (km/h)   |
| 2                   | Temperatura mínima  | • Temperatura mínima (°C)   |
| 1                   | Neblina   | • Días con neblina (número de días con neblina)   |

Fuente: Elaboración propia sobre la base de T. Bles y otros, *Risk Management for Roads in a Changing Climate: A Guidebook to the RIMAROCC Method*, Londres, ERA-NET ROAD Project, 2010.

La información de los cuadros 6 y 7 es particularmente útil para identificar los parámetros climáticos que afectan la infraestructura vial y las variables que se deben observar para considerarlas correctamente en las medidas de adaptación.

## IV. Políticas y leyes sobre cambio climático

En un proceso de integrar análisis del riesgo de desastres-cambio climático y proponer medidas de reducción de este riesgo y de adaptación sostenible e incluyente, es útil hacer un breve recuento de los instrumentos normativos de los países y de la región SICA. Todos los países de la región cuentan con marcos normativos nacionales sobre el cambio climático, que incluyen a todos los sectores; sin embargo, no necesariamente ha llegado a una implementación de medidas en el sector de infraestructura vial en todos los países.

Belice cuenta con un Marco de Políticas Nacionales sobre Energía (Government of Belize, 2011) y con el Plan Nacional de Inversiones sobre Resiliencia Climática (Government of Belize, 2013), los cuales promueven un desarrollo económico y social, sostenible, eficiente (con respecto a la energía) y resiliente. La Política, Estrategia y Plan de Acción Nacional de Cambio Climático (CCCC, 2014) orienta los procesos de adaptación y mitigación del cambio climático a corto, mediano y largo plazo de acuerdo con los objetivos nacionales de desarrollo sostenible y los compromisos regionales e internacionales. Para el sector transporte se establecieron las siguientes acciones:

- Hacer una evaluación integral de la infraestructura de transporte/comunicaciones y la vulnerabilidad de esta a las marejadas de tormenta, inundaciones y otras formas de desastres derivados de eventos naturales, especialmente en los principales sectores productivos (turismo, agricultura, entre otros).
- Revisar y actualizar los estándares para la construcción y el mantenimiento de infraestructura de transporte a fin de incluir un margen de protección adicional para los riesgos esperados asociados con el cambio climático.
- Desarrollar evaluaciones de riesgos y planes de respuesta, incluido el mapeo y la identificación de infraestructura crítica y de alto riesgo (relacionada con los sectores productivos), e implementar refuerzos y reubicaciones de infraestructura clave.

Costa Rica cuenta con múltiples instrumentos para hacer frente al cambio climático tales como el Plan Nacional de Descarbonización (Gobierno de Costa Rica, 2019) y el Plan Nacional de Adaptación (MINAE, 2022). Este último, cuenta con un eje 4, “Servicios públicos adaptados e infraestructura resiliente”, lo cual busca garantizar a la sociedad la continuidad de los servicios públicos de alta calidad y una adecuada protección de los activos, incluyendo la infraestructura vial, ya sean públicos o privados, para mejorar la capacidad de adaptación al cambio climático, con base en normas y lineamientos para la inversión pública. En específico, el lineamiento 4.3, “Reducción en el número de días de servicio público interrumpido por eventos climáticos extremos”, busca la continuidad de las instituciones a cargo de brindar servicios públicos vitales (salud, educación, agua y saneamiento, energía, transporte) ante los efectos adversos del cambio climático, mediante la aplicación de normas y lineamientos con criterios de adaptación.

El Salvador cuenta con la Estrategia Nacional de Cambio Climático (MARN, 2013), cuyo eje 2 se encuentra enfocado en la adaptación al cambio climático, incluyendo el desarrollo de estrategias sectoriales, tales como la relativa a la infraestructura vial. En 2018 el país publicó la Política de Cambio Climático para el Sector de la Obra Pública, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano 2018-2036 (MOPTVDU, 2017), en la que se establece que la infraestructura pública deberá incorporar medidas de adaptación al cambio climático orientadas a afrontar los riesgos climáticos, con cobeneficios para revertir las islas de calor en las ciudades, evitar colapsos estructurales por fenómenos climatológicos extremos, entre otras.

Guatemala cuenta con la Ley Marco para Regular la Reducción de la Vulnerabilidad, la Adaptación Obligatoria ante los Efectos del Cambio Climático y la Mitigación de Gases de Efecto Invernadero (Gobierno de Guatemala, 2013), aprobada en 2013. También cuenta con un Plan de Acción Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático (CNCC/SEGEPLAN, 2016), que hace referencia al artículo 15 de la Ley, para que las municipalidades e instituciones públicas correspondientes apliquen los estándares de diseño y construcción que tomen en cuenta la variabilidad y el cambio climático de acuerdo con las características y vulnerabilidad de las diferentes regiones. En particular, para el sector transporte indica que se deben adecuar/adaptar las normas y los estándares de diseño que se utilizan en el sector de construcción, incluyendo las vialidades, para que estas se ajusten a las condiciones climáticas del país.

Uno de los objetivos del Plan es “Mejorar y construir infraestructura sociovital (sistemas de saneamiento básico) y estratégica (escuelas, carreteras, puentes, hospitales, entre otros) considerando en el diseño la variabilidad climática, la gestión de riesgo y la vulnerabilidad y planes de ordenamiento territorial”. Las metas son: aumentar en un 5% la infraestructura estratégica, principalmente la red vial, que incluya estándares de construcción que consideran factores de riesgo, cambio climático y ordenamiento territorial en el ciclo de vida del proyecto (preinversión, inversión, postinversión), y reducir en un 5% la infraestructura de la red vial afectada por eventos extremos.

Honduras cuenta con su Ley de Cambio Climático (Honduras, 2014) y la versión actualizada de su Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) (SERNA, 2010). En su objetivo sobre gestión de riesgos, se busca fomentar el diseño, desarrollo, construcción y despliegue de infraestructura e instalaciones más apropiadas en términos de resistencia y versatilidad a fin de adaptarlas mejor a los efectos actuales y proyectados del cambio climático. De igual manera, cuenta con el Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (MiAmbiente, 2018), en el que también se considera el aumento de la resiliencia al cambio climático de la infraestructura gris.

Nicaragua publicó el decreto de la Política Nacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y de Creación del Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático (Nicaragua, 2019). Con relación al transporte, dicha Política indica que el Ministerio de Transporte e Infraestructura está implementando un conjunto de medidas para reducir la vulnerabilidad de la red de carreteras ante el cambio climático. El eje 4, “Desarrollo de infraestructuras adaptadas al cambio climático y con bajas emisiones de carbono”, busca contar con construcciones que incorporen durante el proceso de diseño, construcción y operación medidas y tecnologías que reduzcan la vulnerabilidad a los impactos del cambio climático, con bajas emisiones de carbono, armonizando la viabilidad y la factibilidad del bien público o privado, considerando la protección del medio ambiente y la prevención de riesgos de desastres. Igualmente, la estrategia c) versa sobre la gestión de recursos financieros para el desarrollo de la red vial, desde una visión de desarrollo para el sector transporte de Nicaragua, propiciando una red de transporte activa, fiable, estable y totalmente integrada, incluyendo un nivel de servicio que ayude al crecimiento económico sostenible; que mejore la accesibilidad, la movilidad y la seguridad de la población.

Panamá cuenta con su Ley Marco sobre Cambio Climático y Política Nacional de Cambio Climático<sup>7</sup> y su Política Nacional de Cambio Climático (PNCC) (Panamá, 2007) la cual constituye el marco orientador de las actividades a desarrollar por el sector público, privado y la sociedad civil para contribuir con la estabilización de los GEI, medidas de adaptación y el desarrollo sostenible. La propuesta del Plan Nacional de Adaptación (NAP) (PNUMA, 2023) actual pretende crear una capacidad sostenible en el país. Este Plan contempla cuatro sectores priorizados: recursos hídricos, agricultura, salud pública e infraestructura. Es importante resaltar que también cuenta con la Guía Técnica de Cambio Climático para Proyectos de Infraestructura de Inversión Pública (MiAMBIENTE, 2020).

<sup>7</sup> Desde la aprobación de la PNCC en 2007, las políticas y obligaciones internacionales de las partes han ido evolucionando al marco que actualmente conocemos y que está propuesto para venir. Para esto el MiAMBIENTE plantea un proyecto para la actualización de la PNCC y el desarrollo de una Ley Marco de Cambio Climático (MiAMBIENTE, 2023).

La República Dominicana cuenta con la Política Nacional de Cambio Climático (MEPyD, 2016) y el Plan Nacional de Adaptación para el Cambio Climático en la República Dominicana 2015-2030 (MMARN, 2016). Este último, cuenta con el eje estratégico 2 que busca fomentar el entorno construido y la infraestructura a prueba del clima. Aunque no especifica el tipo de infraestructura, el objetivo es garantizar que la infraestructura nueva y existente se planee, diseñe, localice y mantenga de modo que sea más resiliente a los fenómenos climáticos cada vez más extremos, priorizando la infraestructura verde y la adaptación basada en ecosistemas.

En la región de SICA, el Consejo Sectorial de Ministros de Transporte (COMITRAN) que cuenta con instituciones sectoriales de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua, Costa Rica y Panamá, incluye, como una de sus tres áreas estratégicas de trabajo el tema de la adaptación de la infraestructura pública al cambio climático. Esto, con el fin de incrementar la resiliencia de dichas obras ante la constante amenaza de los fenómenos naturales extremos que se presentan en la región. Por ello, dicho Consejo formula, desarrolla e impulsa una diversidad de medidas estructurales (infraestructura) y no estructurales; estas últimas, enmarcadas en una serie de normativas que buscan reducir la vulnerabilidad de las obras viales, y que aseguren una óptima conectividad y desarrollo de los países de la región, teniendo como propósito la resiliencia de la infraestructura. Frente a los desastres, se impulsan acciones y se adoptan normas técnicas aplicables a las carreteras, con objeto de reducir la vulnerabilidad de las redes viales.

En el área de movilidad, COMITRAN con el apoyo de la Secretaría de Integración Económica Centroamericana (SIECA), ha promovido el desarrollo y establecimiento de una normativa comunitaria denominada Política Marco Regional de Movilidad y Logística (PMRML) (COMITRAN/SIECA, 2017), validada en la 50a Cumbre de presidentes del SICA, el 14 de diciembre de 2017, en la ciudad de Panamá. Para poder ejecutar los lineamientos plasmados en la PMRML, se desarrolló el Plan Maestro Regional de Movilidad y Logística 2035 (COMITRAN/COMIECO/COSEFIN, 2023), con la cooperación de la JICA, en cuyo marco se realizará la Evaluación Ambiental Estratégica, que permitirá contar con lineamientos en materia de gestión del riesgo y adaptación al cambio climático.

La Política desarrollará un Sistema Regional de Movilidad y Logística, articulando y modernizando infraestructura logística multimodal resiliente en seis ejes sectoriales, a efecto de hacer más competitivo, eficiente, rápido, confiable y seguro el traslado de las cargas y personas. Así, se buscan dos impactos generales del Plan: en el ámbito productivo y del comercio y en el ámbito social y ambiental. En este último, se busca consolidar la generación de infraestructura verde y resiliente, amigable al medio ambiente y resguardada ante los fenómenos del cambio climático.

El COMITRAN plantea que la gestión integral de riesgo de desastres debe ser considerada parte intrínseca de los procesos de planificación e inversión pública, fundamentada en las dimensiones social, económica, ambiental y político-institucional del desarrollo, buscando la creación de condiciones de seguridad integral, tal como lo establece la Política Centroamericana para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (CEPREDENAC/SICA, 2017). En este sentido, ha aprobado una serie de normativas técnicas, que son referencia en los procesos de planificación, construcción, operación y mantenimiento de infraestructura vial, que han sido construidos a través de la conformación de grupos técnicos regionales, integrados por representantes de los Ministerios de Transporte.

En 2017, COMITRAN institucionalizó el Comité Regional de Gestión del Riesgo y Adaptación al Cambio Climático (CR-GRACC) como la comisión encargada de los asuntos específicos de la gestión de riesgos y la adaptación al cambio climático dentro del COMITRAN y colabora estrechamente en el desarrollo del plan operativo de COMITRAN en el marco del Proyecto RIDASICC. Entre las funciones de la CR-GRACC están:

- Contribuir con la elaboración de políticas de Gestión de Riesgo y Adaptación al Cambio Climático a nivel de Estado y de la Región, que promuevan principalmente la infraestructura de transporte y social sostenible.
- Dar seguimiento e impulsar la implementación de acciones en materia ambiental, gestión del riesgo y cambio climático de la Política Marco Regional de Movilidad y Logística de Centroamérica, así como apoyar en la formulación, seguimiento y monitoreo de su Plan Maestro Regional. Fomentar y alcanzar la eficiencia en la gestión de la reducción del riesgo de desastres en Centroamérica, en lo relativo a su área de competencia, mediante el intercambio de experiencias profesionales y la transferencia de conocimientos.
- Fomentar la adopción e implementación de políticas de control y reducción del riesgo en el desarrollo de las obras.
- Concientizar a la sociedad centroamericana acerca de la importancia de la participación ciudadana en la gestión del riesgo, como instrumento fundamental y potenciador del desarrollo socioeconómico y de la seguridad humana y física en los Estados parte.

En el marco del Plan de Trabajo de la CR-GRACC se incluyen las siguientes líneas de acción:

- Desarrollo de proyectos y programas que contribuyan a una infraestructura resiliente, verde, inclusiva, de calidad, productiva, logística e integrada, dentro de los cuales se incluye la importancia de la formación y capacitación en dichas temáticas y el intercambio de información.
- Impulso de normativas y herramientas técnicas orientadas al blindaje de la infraestructura social y productiva, en las que se incluyen actividades como la elaboración de nuevas normativas técnicas, una base de datos de registros hidrometeorológicos y un mapa regional de infraestructura bajo riesgo y amenazas.
- Articulación y acceso a los Fondos Climáticos, en apoyo al cumplimiento de los objetivos nacionales de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

## V. Impactos del cambio climático en la infraestructura vial

Para los tomadores de decisiones es importante conocer y evaluar los daños potenciales que estresan los sistemas viales debido al impacto del clima. De esta manera, se puede conocer la vulnerabilidad del sistema y los factores inherentes a dicha vulnerabilidad, así como el grado de exposición que tendrá la infraestructura al estar en contacto con las nuevas condiciones climáticas y el riesgo en términos de la probabilidad que la infraestructura falle y afecte el servicio.

Los métodos para determinar los impactos se han basado, principalmente, en las experiencias publicadas por diferentes países. Mendoza, Marcos y Orantes (2019) plantearon un esquema para la identificación de impactos del cambio climático, con un enfoque temporal, ya sea para analizar información con base en registros históricos o con base en los escenarios de cambio climático.

En la actualidad existe un gran número de impactos del cambio climático identificados, los cuales pueden variar por región, por sector económico o social al que pueden impactar. Por lo tanto, es necesario que, para cada estudio que analiza el cambio climático, sean precisados.

### Recuadro 6

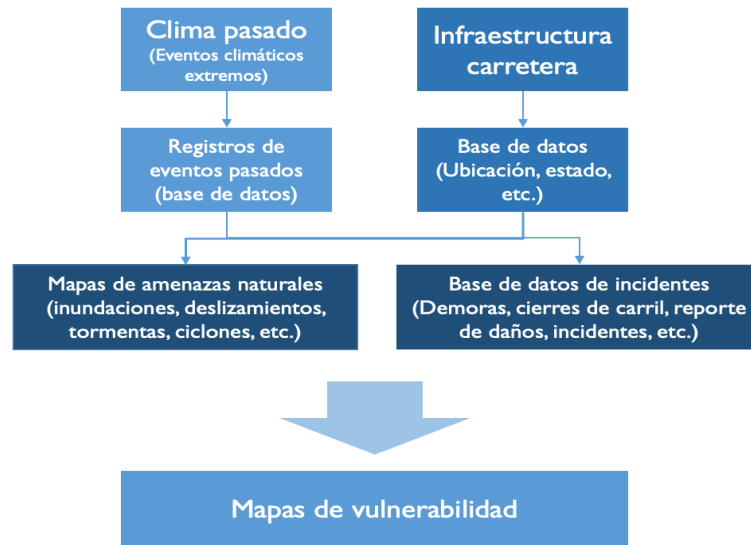
#### Impactos: efectos sobre los sistemas naturales y humanos

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 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.

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), *Climate Change 2014, Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects, Working Group II Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5)*, Cambridge, Cambridge University Press, 2014.

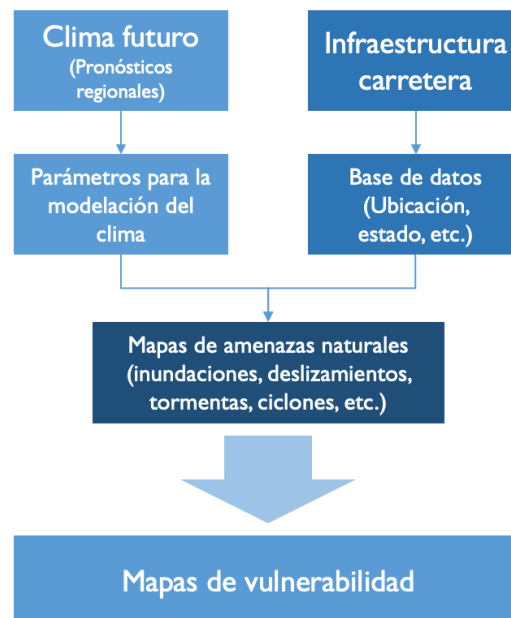
Al interrelacionar la infraestructura vial con los registros del clima pasado o los pronósticos del clima futuro, es posible identificar con claridad cuáles son las principales amenazas del cambio climático.

**Diagrama 1**  
**Esquema para la identificación de impactos con base en registros históricos**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de J. F. Mendoza Sánchez, O. A. Marcos Palomares y H. Orantes Olvera (2019), “Marco metodológico para la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático en México”, *Publicación Técnica*, N°557, Sanfandila, Querétaro, México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

**Diagrama 2**  
**Esquema para la identificación de impactos con base en clima futuro con cambio climático**



Fuente: Elaboración propia sobre la base de J. F. Mendoza Sánchez, O. A. Marcos Palomares y H. Orantes Olvera (2019), “Marco metodológico para la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático en México”, *Publicación Técnica*, N°557, Sanfandila, Querétaro, México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

A continuación, se describen algunos de los impactos de las variables climáticas sobre la infraestructura vial, basados en la experiencia del consultor y en la revisión bibliográfica.

## A. Impactos de las altas temperaturas y las olas de calor

El aumento en la frecuencia y severidad de las temperaturas extremas pueden producir diferentes impactos en la infraestructura vial, tales como la disminución de la vida útil de los pavimentos por el deterioro de la capa de rodadura, la formación de roderas y otras deformaciones. Estos impactos son lentos en el tiempo y pueden corregirse a través del mantenimiento rutinario. Los análisis indican que, de no considerarse el cambio climático en el diseño de pavimentos, es muy probable que el desempeño y la duración de estos se reduzcan de modo significativo.

Algunos impactos mayores se deben a las altas temperaturas y a la duración de los períodos de mucho calor (olas de calor). Enseguida se mencionan algunos de los efectos identificados de las altas temperaturas y las olas de calor en la infraestructura vial:

### 1. Pavimentos

- Las altas temperaturas y los períodos prolongados de calor provocan en la carpeta que la mezcla asfáltica exceda los límites plásticos, quedando propensa a las deformaciones asociadas al paso de las ruedas de los vehículos, lo cual ocasiona fallas y deterioros en la superficie de rodamiento.
- El módulo dinámico de la mezcla asfáltica es muy sensible a la temperatura, por lo que un perfil de distribución de temperaturas es necesario para la predicción de las fallas térmicas.
- Las propiedades mecánicas y reológicas del asfalto y otros materiales que conforman el pavimento dependen en gran medida de la temperatura. La degradación de las propiedades del material del pavimento genera agrietamientos por fatiga térmica.
- La degradación del asfalto por la radiación solar y los rayos UV repercute en el deterioro y envejecimiento de este en un lapso más corto.

### 2. Puentes

- Aumento de la expansión térmica en las juntas de los pavimentos de concreto o en las uniones/articulaciones de los puentes, que puede provocar estrés en la integridad de la estructura.

### 3. Operación

- Limitación en las horas de trabajo durante el período diurno para la construcción y mantenimiento de carreteras. Las olas de calor pueden limitar también las actividades de construcción, especialmente en áreas con alta humedad.
- En la operación, implica afectaciones a los vehículos por el sobrecalentamiento y un mayor desgaste de neumáticos.
- Períodos de excesivo calor en verano promueven el aumento de los incendios forestales.
- Las altas temperaturas pueden afectar los circuitos eléctricos de los sistemas de señalización.

A fin de estimar el impacto de la temperatura sobre la infraestructura vial, se han desarrollado algunos modelos para estimar el impacto de los estresores climáticos. A continuación, se presentan dos casos de estudio.

#### Recuadro 7

##### Estudio: cambios estacionales y a largo plazo en la vida útil del pavimento causados por el aumento de las temperaturas debido al cambio climático

Los pavimentos son vulnerables a una reducción de su vida útil con el aumento de temperatura inducido por el cambio climático.

Existen dos enfoques para evaluar la reducción de la vida útil de un pavimento: un enfoque de arriba hacia abajo, en el que se eligen escenarios de cambio climático y se aplican para predecir la reducción de la vida útil del pavimento, y un enfoque de abajo hacia arriba, centrado en la respuesta de un pavimento al cambio de temperatura incremental, lo que da como resultado una comprensión más completa del daño del pavimento inducido por la temperatura.

Los cambios en la duración de la temporada, las temperaturas promedio estacionales y el módulo de resiliencia dependiente de la temperatura se utilizaron en el análisis elástico en capas para simular la respuesta del pavimento al aumento de la temperatura. El aumento de temperatura proyectado a partir de modelos climáticos globales reducidos se superpuso a los resultados para determinar los efectos.

El enfoque híbrido utilizado en este estudio permitió analizar el efecto del cambio climático en el pavimento. Mediante este, se cuantificó el impacto estacional y de las temperaturas cambiantes del pavimento, durante su vida útil, considerando un cambio de temperatura incremental de 0 °C a 5 °C en un sitio de la costa de New Hampshire.

Como resultado, se recomienda un aumento del 7% al 32% en el espesor de la capa de asfalto para proteger la base y la subrasante del aumento de las temperaturas, desde principios de siglo hasta finales de mediados de siglo.

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de J. F. Knott y otros, "Seasonal and long-term changes to pavement life caused by rising temperatures from climate change", *Journal of Transportation Research Record*, vol. 2673, N° 6, 2019.

#### Recuadro 8

##### Estudio: método para evaluar las implicaciones del cambio climático para el diseño y desempeño de pavimentos flexible

La atención se centra en la preparación y el uso de conjuntos de datos de modelos climáticos como entradas para el modelo de la Guía de Diseño Empírico-Mecanicista de Pavimentos (MEPDG) para simular el rendimiento y el deterioro de los pavimentos flexibles a lo largo del tiempo. El método se ilustra con un estudio de caso que utiliza datos de temperatura del modelo climático futuro de tres escenarios del Programa de Evaluación del Cambio Climático Regional de América del Norte en cuatro sitios de Nueva Inglaterra.

La metodología del estudio para evaluar el impacto del cambio climático en el deterioro del pavimento, además del MEPDG, utilizó pronósticos desarrollados por modelos de circulación general atmósfera-océano.

Los resultados permitieron identificar que en el modelo de deterioro con relación a las grietas no es significativo el cambio del clima, mientras en la deformación permanente (formación de surcos) las grietas o surcos fueron lo suficientemente grandes para considerar que el cambio climático y su variabilidad podrían afectar el diseño y la evaluación de los pavimentos.

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de W. Meagher y otros, "Method for evaluating implications of climate change for design and performance of flexible pavements", *Transportation Research Record*, vol. 2305, N° 1, 2012.

## B. Sequía

Las condiciones de sequía y falta de agua también tienen impactos en la infraestructura carretera y en la operación de esta.

A continuación, se mencionan algunos de los efectos identificados de las sequías en la infraestructura vial:

## 1. Pavimentos

- Se acelera la degradación de las capas de cimentación por la pérdida de humedad y la contracción del suelo.
- La contracción significativa del suelo de cimentación ocasiona agrietamientos en el resto de las capas del pavimento.

## 2. Terracerías

- La falta de agua hará necesaria la realización de mejoras en los procedimientos constructivos, en particular durante la compactación, ya que se requerirá el uso de materiales secos para la construcción de las carreteras.

## 3. Taludes

- Habrá una disminución de la humedad en la orilla del camino, por lo que no se podrá mantener la cubierta vegetal adecuada, generando erosión y deslizamientos de material en los taludes de corte o terraplén, lo que provocará, además, cambios en el paisaje.

## 4. Operación

- Incremento de la probabilidad de incendios forestales, lo que provocará el cierre temporal de carreteras debido a la amenaza de incendio o a la reducción de la visibilidad.
- En las áreas deforestadas a causa de incendios forestales se reduce la capacidad de absorción del suelo y se incrementan los escurrimientos superficiales, lo cual impacta en las obras de drenaje.
- Aumento de la generación de polvo en los caminos no pavimentados.

## C. Aumento de la temperatura y del nivel del mar

Un cambio en la temperatura del mar tiene impactos importantes para la flora y la fauna marinas. El aumento del nivel del mar tiene un efecto considerable para las carreteras mismo que está asociado al deshielo de los polos, aunque también al aumentar la temperatura del agua esta aumenta su volumen, lo que incrementa su nivel, el cual rebasa las líneas de costa históricas.

Enseguida se mencionan algunos de los efectos identificados del aumento de la temperatura y el nivel del mar en la infraestructura vial:

### 1. Pavimento

- El agua producto de las marejadas se filtra en el asfalto y en los cimientos, lo que hace que se degraden y se vuelvan inestables. Cuando los cimientos se ven comprometidos, el pavimento pierde su soporte estructural, lo que da como resultado baches, grietas y hendiduras o puntos bajos en su estacionamiento o calzada de asfalto.

### 2. Operación

- El incremento esperado del nivel del mar agravará las inundaciones costeras en la infraestructura vial, ya que las marejadas de tormenta tendrán niveles más altos.
- Si el nivel del mar continúa aumentando, las carreteras costeras quedarán parcial o completamente cubiertas de agua.
- Un incremento de la altura de las olas implica más erosión en la línea de costa, lo que dañará la estructura de las vialidades costeras.

### 3. Materiales

- En los océanos se están produciendo algunos cambios químicos como, por ejemplo, el aumento de la acidez. Estos cambios podrían repercutir en el comportamiento físico-químico de los materiales que actualmente se utilizan en la construcción de infraestructura vial.

## D. Ciclones tropicales y marejadas de tormenta tropical

En Centroamérica, los ciclones y huracanes son cada vez más frecuentes y de mayor intensidad. En ocasiones, sus efectos han llegado a dimensiones catastróficas, por eventos como fuertes lluvias, fuertes vientos y grandes oleajes.

Su impacto en la línea de costa es mucho más severo al erosionar y remover la arena, porque destruye la flora, entre otros; y tierra adentro provoca precipitaciones intensas que, a su vez, generan inundaciones y deslizamientos en zonas de montaña.

### 1. Operación

- Los fuertes vientos pueden dañar o destruir vehículos, puentes e infraestructura vial (señales, semáforos, entre otros).
- En ocasiones, la intensidad de los huracanes es tan fuerte que las probabilidades de que la carretera sea bloqueada son altas a causa de objetos caídos en la calzada (árboles, señalamiento, entre otros).
- Las carreteras en zonas costeras son especialmente sensibles a inundaciones más frecuentes y permanentes debidas a la subida del nivel del mar y a las marejadas.
- Se registran inundaciones de las calzadas en zonas bajas y con drenaje poco suficiente.
- Se pueden presentar derrumbes y deslaves con mayor frecuencia, ya que los suelos saturados están expuestos a más agua de lluvia, en particular en zonas de montaña.
- Las marejadas de tormenta tenderán a modificar la forma de la línea costera, lo cual afectará a las carreteras localizadas en esa zona; asimismo, socavarán las capas de base del pavimento y del suelo de cimentación.

### 2. Drenaje

- Aumento del gasto hidráulico en las obras de drenaje menor y mayor, lo cual compromete la estabilidad y la capacidad de estas.

### 3. Taludes

- La saturación del suelo provoca la inestabilidad de este, lo que ocasiona deslizamientos de tierra de los taludes de corte o terraplén, o de las laderas.

Los aspectos relacionados con los impactos de las precipitaciones intensas y de los vientos serán abordados por separado.

## E. Incremento de tormentas y de precipitación

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

Algunos de los impactos en la infraestructura y la operación de esta son los siguientes:

## 1. Operación

- Interrupciones o retrasos del tránsito por el clima, debido a una precipitación excesiva que obliga a bajar velocidades de operación o a detenerse, y provoca visibilidad inadecuada de los dispositivos para el control del tránsito, accidentes de tránsito, entre otros.
- Impactos en el nivel de servicio de la vialidad.
- Inundación de las carreteras que obligan a su cierre temporal.
- En zonas costeras, las carreteras pueden inundarse debido a las marejadas de tormenta.

## 2. Pavimentos

- El agua producto de la inundación se filtra en el asfalto y en los cimientos, lo que hace que se degraden y se vuelvan inestables. Cuando los cimientos se ven comprometidos, el pavimento pierde su soporte estructural, lo que da como resultado baches, grietas y hendiduras en la superficie de rodamiento; en casos más extremos, se generan cárcavas.
- Aumento de la humedad del suelo que puede poner en riesgo la integridad estructural de los pavimentos, puentes, alcantarillas, entre otros.
- El exceso de precipitación puede lavar el hombro/acotamiento de la carretera y socavar/erosionar las capas del pavimento de la carretera.

## 3. Taludes

- Deslizamiento y deslaves de material de los taludes y terraplenes por una alta penetración de agua sobre suelos ya saturados, por los incrementos de precipitación.
- Erosión de los taludes.

## 4. Drenaje

- Obras de drenaje insuficientes, debido a un incremento del gasto por precipitaciones excesivas y de larga duración.
- Incremento de escombros provenientes de taludes, de la vegetación o sedimentos de las escorrentías superficiales, debido a la erosión de estas. Estos pueden reducir la capacidad hidráulica o bloquear los sistemas de drenaje.

## 5. Puentes

- En ríos, los cambios en los flujos de agua pueden erosionar/socavar los apoyos de los puentes (pilas y estribos).

## 6. Mantenimiento y construcción

- La precipitación puede afectar los costos de construcción o de mantenimiento de carreteras directamente debido a la interrupción del trabajo y a la disminución de horas laborables.

A fin de estimar el impacto de la precipitación sobre la infraestructura vial, se han desarrollado algunos modelos para calcular el impacto de los estresores climáticos. A continuación, se presentan dos casos de estudio.

### Recuadro 9

#### Estudio: cambio climático y carreteras, un modelo dinámico de estrés-respuesta

En un estudio de caso de la red vial de Mozambique que usa el Modelo Dinámico de Estrés-Respuesta se introducen funciones de estrés-respuesta para cuantificar el impacto en el costo de mantenimiento por un factor de estrés específico en función de la intensidad del factor de estrés y el tipo de infraestructura que está afectando.

En este análisis, los impactos del cambio climático se cuantifican en términos de kilómetros totales de caminos degradados antes del fin de su vida útil de diseño y el costo total de reparación o mitigación de daños futuros.

Los impactos están determinados por una metodología de respuesta-estresor, en la que los factores exógenos (es decir, los estresores) tienen un efecto directo sobre los elementos focales (y una respuesta posterior). En el contexto del cambio climático y la infraestructura, estos factores incluyen cambios en los niveles de precipitación, temperaturas, frecuencia e intensidad de las tormentas y velocidades del viento.

En particular se examinan tres factores climáticos estresantes: cambios de temperatura, cambios de precipitación y cambios de intensidad y frecuencia de las inundaciones, en seis tipos de caminos pavimentados y sin pavimentar. El estudio no considera las diferencias en la conservación existente de los caminos analizados.

Todos los costos se aplican con el objetivo de mantener una carretera funcional durante la vida útil de diseño de esta.

El enfoque de los costos de mantenimiento se realiza en dos etapas: i) estimación de la disminución de la vida útil que resultaría de un cambio unitario en el estrés climático, y ii) estimación de los costos de evitar esta reducción de la vida. Se supone que tal reducción de la vida útil causada por un cambio incremental en el estrés climático es igual al cambio porcentual en el estrés climático, escalado para el efecto del factor estresante en los costos de mantenimiento.

Como resultado, se establece que un enfoque reactivo al cambio climático podría resultar en una pérdida del inventario vial de más del 11% a consecuencia de la reasignación de fondos. Sin embargo, si se adopta un enfoque proactivo y enfoques de adaptación efectivos, estas pérdidas de inventario podrían reducirse en un 14% o más.

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de P. Chinowsky y C. Arndt, "Climate change and roads: a dynamic stressor-response model", *Review of Development Economics*, vol. 16, N° 3, 2012.

### Recuadro 10

#### Estudio: la influencia ambiental del pavimento asfáltico y las contramedidas

Los análisis para el diseño de pavimentos asfálticos muestran que los efectos a largo plazo del medio ambiente no son directamente considerados.

La influencia del agua se puede resumir en el impacto de la precipitación y el impacto de la congelación en la carretera.

El diseño da las exigencias de materiales y estructuras para evitar daños por agua en el pavimento asfáltico. Los siguientes son ejemplos:

Para el entorno donde la precipitación anual es abundante, la especificación [National Standards of the P.R. China, Specifications for Design of Highway Asphalt Pavement, Beijing, 2006] establece:

- Para autopistas y carreteras de primera clase en el área donde la precipitación anual promedio es superior a 1.000 mm, el grado de asfalto en la capa superficial debe alcanzar el grado 5.
- Con el fin de evitar la lluvia y la nieve en la capa de pavimento y la subrasante, el material de la capa superficial de asfalto debe ser mezclas asfálticas graduadas densas. Al usar la base de drenaje, la capa impermeable y el sistema de drenaje interno deben colocarse debajo de su parte inferior, para garantizar que el agua fluya y sea descargada fuera del terraplén.

Estas medidas buscan contrarrestar el efecto de la precipitación en los pavimentos. Sin embargo, la influencia del clima en la estructura debe ser estimada cuantitativamente para cada caso.

El estudio sugiere que para incrementar la confiabilidad de los pavimentos de asfalto y evitar la falla prematura de estos se requiere que el daño estimado cuantitativamente permita establecer indicadores de largo plazo de los materiales con los que diseñan los pavimentos asfálticos, es decir, desarrollar el coeficiente de adaptación al cambio climático que permita ser incorporado en los métodos de diseño de pavimentos flexibles.

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de Q. Yang y J. Ning, "The environmental influence of asphalt pavement and countermeasures", *Energy Procedia*, vol. 5, diciembre, 2011.

Algunos indicadores útiles para evaluar el impacto de la precipitación se sugieren a continuación:

**Cuadro 8**  
**Umbral de riesgo de la precipitación**

| Indicador climático | Umbral de riesgo    |                       |                        |                          |
|---------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|--------------------------|
|                     | Bajo                | Medio                 | Alto                   | Crítico                  |
| Duración            | Horas               | Días                  | Semanas                | Meses                    |
| Intensidad          | < 15 mm/h           | 15 a 30 mm/h          | 30 a 60 mm/h           | > 60 mm/h                |
| Magnitud            | 100 km <sup>2</sup> | 1 000 km <sup>2</sup> | 10 000 km <sup>2</sup> | > 10 000 km <sup>2</sup> |

Fuente: Elaboración propia sobre la base de T. Bles y otros, *Risk Management for Roads in a Changing Climate. A Guidebook to the RIMAROCC Method*, Londres, Reino Unido, ERA-NET ROAD Project, 2010.

## F. Vendavales o vientos fuertes

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

Algunos de los impactos de los vientos fuertes son:

### 1. Operación

- Caída de árboles, postes de energía eléctrica y anuncios publicitarios sobre la calzada del camino.
- Inestabilidad de los vehículos sobre las vialidades y en los puentes.
- Pérdida de señalamiento vertical bajo y elevado en las carreteras, así como daño en los dispositivos para el control del tránsito para cuya operación se requiere suministro eléctrico.

### 2. Taludes

- Incremento de la erosión de taludes y terraplenes, que provoca acarreo de escombros y basura sobre la superficie de rodadura.

### 3. Puentes

- Daños estructurales en elementos que conforman los puentes.

## G. Alta presencia de agua, inundaciones y avenidas torrenciales

Las precipitaciones excesivas y las tormentas traen consigo daños adicionales en la infraestructura, principalmente por la cantidad de precipitación en un tiempo corto, fenómeno que provoca una acumulación de agua de manera repentina. Factores como la topografía y el tipo de suelo influyen significativamente para la formación de zonas de inundación.

La alta presencia de agua y el cambio de uso de suelo provocan un aumento de los escurrimientos superficiales, que al sumarse con una topografía montañosa ocasionan avenidas torrenciales. Estas resultan inesperadas cuando la lluvia se presenta en la parte alta de la montaña, lejos de la carretera; tiempo después, los flujos de agua y material llegan de modo descontrolado a la carretera.

Algunos efectos adicionales a los descritos en ciclones, tormentas y precipitaciones se mencionan a continuación:

## 1. Pavimento

- El agua estancada puede tener efectos adversos sobre las capas de base de la carretera.
- Daños causados por la fuerza del agua en la carpeta o la estructura del pavimento, y daño debido a colisiones con desechos sólidos o materiales (suelo, piedras o vegetación).
- Las deformaciones en los pavimentos están presentes en climas húmedos y se agravan a medida que aumentan los días húmedos.
- La variación de la humedad altera el módulo de resiliencia en los materiales granulares que componen la base, la subbase y las terracerías (subrasante).
- La humedad y la temperatura pueden calentar la carpeta separando la capa de asfalto del agregado, con lo que inicia una pérdida de adhesión que deteriora y desintegra la carpeta asfáltica.

## 2. Drenaje

- Cambios en los patrones superficiales de los escurrimientos que requieren reubicación de obras de drenaje o la implementación de obras adicionales.
- Mayor presencia de agua en la superficie de rodamiento, por lo que el bombeo en la calzada, las obras de drenaje y las alcantarillas resultan insuficientes para desalojar el agua en menor tiempo.
- Inestabilidad de las estructuras por aumento de los flujos de agua.

## 3. Puentes

- El aumento de los caudales pico podría afectar las tasas de socavación e influir en los requisitos de diseño para los puentes y alcantarillas, tales como el período de retorno.
- Los escurrimientos causados por el aumento de los niveles de precipitación afectan el flujo del cauce del arroyo o río y la distribución de sedimentos.

## 4. Operación

- Erosión de las terracerías en caminos no pavimentados.
- Los pasos a desnivel inferiores y túneles de los sistemas viales son más susceptibles a las inundaciones.
- El aumento de los niveles de precipitación en algunas regiones afecta los niveles de humedad en el suelo y la acumulación hidrostática detrás de los muros de contención, las capas de los pavimentos y los apoyos de puentes y alcantarillas.

Para estimar el impacto de la precipitación sobre la infraestructura vial, se han desarrollado algunos modelos para estimar el impacto de los estresores climáticos. A continuación, se presentan dos casos de estudio.

### Recuadro 11

#### Estudio: desarrollo de una metodología y una herramienta para la evaluación de la vulnerabilidad de las carreteras al daño inducido por inundaciones

La evaluación adecuada del pavimento inundado es muy importante para reducir el riesgo. El estudio presenta un procedimiento racional para la evaluación de la vulnerabilidad de los pavimentos asfálticos al daño inducido por inundaciones.

En el estudio se desarrolló una metodología basada en la dinámica del sistema para determinar el tiempo crítico (T<sub>crítico</sub>) para la saturación total de la base no ligada y para la falla de la capa superficial ligada.

El marco metodológico permite predecir la probabilidad de daño en los pavimentos asfálticos bajo condiciones de inundación con base en el nivel de profundidad y la duración de la inundación.

La metodología y la herramienta de simulación basada en la web que se presenta ayudarán a los usuarios a identificar tramos de carretera potencialmente vulnerables antes de la inundación y tomar medidas para mejorarlos o monitorearlos de cerca para obtener condiciones previas a la inundación que se pueden comparar con las condiciones posteriores a la inundación para detectar deterioro.

El estudio concluye que:

- Los pavimentos de superficie delgada que se encuentran en áreas propensas a inundaciones deben reforzarse para resistir los efectos de las inundaciones; de lo contrario, las inundaciones, incluso de corta duración y poca profundidad, pueden causar daños irreversibles, que requerirán una reconstrucción extensa, y pueden impedir que los vehículos de emergencia y los vehículos de construcción utilicen estas carreteras.
- El tiempo crítico (más allá del cual se puede esperar que el pavimento se dañe) se ve significativamente afectado por la permeabilidad de la capa de HMA (Hot Mix Asphalt) y su espesor. Un mayor espesor y una capa de baja permeabilidad pueden ralentizar de forma muy eficaz la entrada de agua en la base no ligada y su deterioro.
- En casi todos los casos, el tiempo crítico fue dentro de las seis horas, y con frecuencia dentro de las dos horas. Esto indica que incluso las inundaciones a corto plazo pueden comprometer la resistencia de la capa de HMA. Por lo tanto, las carreteras en las regiones costeras o las llanuras aluviales de los ríos son particularmente vulnerables a los impactos de futuras inundaciones.

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de R. B. Mallick y otros, "Development of a methodology and a tool for the assessment of vulnerability of roadways to flood-induced damage", *Journal of Flood Risk Management*, vol. 10, N° 3, 2014.

### Recuadro 12

#### Estudio: pronóstico de deterioro en pavimentos flexibles por inundaciones y tormentas de nieve

Las agencias viales requieren de modelos confiables para predecir el deterioro de los pavimentos que incluyan variables ambientales dentro de los sistemas de gestión de pavimentos.

Este estudio cuantificó el impacto de las tormentas de nieve e inundaciones en las infraestructuras viales, utilizando las bases de datos de rendimiento del pavimento a largo plazo (LTPP) y de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) con un modelo de deterioro natural confiable. Luego se llevó a cabo un enfoque estadístico basado en regresión para modelar el efecto de las tormentas de nieve y las inundaciones en las capacidades de servicio del pavimento en función de la gravedad de los eventos y la condición del pavimento antes de estos eventos.

Los modelos finales arrojaron una correlación de más del 90% con los valores de impacto cuantificados de las tormentas de nieve y las inundaciones, y obtuvieron correlaciones estadísticas asociadas al cambio del Índice de Rugosidad Internacional (IRI) de la superficie de los pavimentos.

Las ecuaciones del estudio serán particularmente útiles para determinar la pérdida de IRI debido a las inundaciones y las tormentas de nieve.

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de S. Shamsabadi y otros, "Deterioration forecasting in flexible pavements due to floods and snow storms", *EWSHM – 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, IFFSTTAR, Inria, Nantes, Francia, Université de Nantes, 2014.

## H. Bajas temperaturas y empujes fríos

Las temperaturas extremadamente bajas provocan daños en la infraestructura carretera, en particular en los pavimentos. Las bajas temperaturas y las ondas frías se asocian a fenómenos como heladas, granizadas o nevadas, acompañadas de lluvia y vientos fuertes.

### 1. Pavimentos

- Las bajas temperaturas aumentan la rigidez de la carpeta asfáltica. Dicha tensión puede ser excedida y fallar generando agrietamientos en la superficie de rodamiento.
- Los ciclos de congelación-descongelación y las heladas afectan la superficie de la carretera, lo cual provoca cambios en el comportamiento de los materiales que generan agrietamientos en los pavimentos rígidos.
- El agua se expande cuando se congela y cuando se funde. Esta propiedad causa problemas cuando la humedad del suelo se congela y deshiela, lo que altera la estabilidad de las capas de subbase y base causando que el pavimento se agriete.
- Cuando la adherencia de la carpeta y de la base no es suficientemente buena, se pueden generar grietas por contracción de enfriamiento.
- El límite de tensión es más bajo para un asfalto envejecido, lo que lo hace más susceptible al agrietamiento a causa de las bajas temperaturas.

### 2. Drenaje

- El deshielo del granizo o de una nevada eventual genera una cantidad mayor de agua, que aumenta el flujo de los escurrimientos superficiales y puede colapsar los sistemas de drenaje.

### 3. Operación

- El estrés causado por el agua y la nieve puede ocasionar daños, por lo que se requiere mantenimiento, reparaciones y reconstrucción más frecuentes.
- Es posible que se presenten inundaciones invernales si el suelo congelado no puede absorber la precipitación.
- Las heladas pueden provocar el congelamiento de la superficie de rodamiento de forma inesperada, lo cual aumenta el riesgo de circulación para los vehículos provocando efectos negativos en la seguridad.
- Las granizadas ocasionan cierres parciales de las carreteras por el acumulamiento del hielo sobre la superficie de rodamiento; y dependiendo del tamaño del granizo, este puede provocar daños en los vehículos y en la señalización vial.
- En México es poco común la presencia de nieve, aunque llega a nevar durante la temporada invernal en la zona norte del país en lugares altos, lo que ha provocado cierres parciales de las vialidades. En Centroamérica es mucho menos común, aunque en las partes altas de Guatemala se presentan heladas durante diciembre y enero.
- Se produce un incremento de accidentes por la falta de pericia de los conductores o por la falta de equipamiento en los vehículos.
- Es posible que las bajas temperaturas afecten los circuitos eléctricos de sistemas de señalización.

### 4. Puentes

- Se produce un aumento del peso muerto de la infraestructura, particularmente en puentes y alcantarillas, que puede provocar su colapso, si el diseño no contempla estas cargas.

## VI. Impactos del cambio climático en la interrupción del servicio

Las condiciones del entorno socionatural combinado con variables climáticas impactadas por el cambio climático derivan en riesgos de daños y pérdidas que reducen el bienestar social.

Los daños se refieren a efectos físicos y/o funcionales sobre los activos que provocan una reducción de sus capacidades para prestar servicios o elevan sus costos. Las pérdidas se refieren a los costos sociales que los usuarios del servicio y/o operadores de este o autoridades competentes enfrentan para satisfacer la demanda. En el caso de infraestructura vial, la pérdida parcial de un tramo de la carpeta de rodamiento (daño físico) provoca costos sociales por las actividades para restablecer el servicio y durante la afectación costos sociales (pérdida) de los usuarios por mayores costos generalizados de viaje.

Adicionalmente, se producen efectos indirectos sobre el volumen de negocios de las empresas, por ejemplo, cuando los suministros se interrumpen (Bubeck y Kreibich, 2011). Los efectos indirectos ejemplifican las reacciones negativas a la economía en general, por ejemplo, las pérdidas de producción de los proveedores.

En el cuadro 9 se proporciona una clasificación general de los tipos de daños asociados a amenazas climáticas.

**Cuadro 9**  
**Tipología de daños asociados a amenazas climáticas en la infraestructura vial**

| Tipo  | Efectos sobre la infraestructura y el servicio  | Efectos indirectos (sobre otras actividades socioeconómicas)  |
|---|---|---|
| Daños físicos y/o funcionales                 | <p>Daños físicos y/o funcionales sobre los activos</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estructura de pavimento</li> <li>• Terraplenes</li> <li>• Obras de drenaje menor</li> <li>• Puentes;</li> <li>• Deterioros acelerados de los componentes de la infraestructura</li> </ul> <p>Derivan en costos de restablecimiento del servicio y en mayores y crecientes costos de mantenimiento y de rehabilitación</p> | Pérdidas en producción industrial, actividades comerciales, actividades sociales (acceso a servicios de salud, por ejemplo) |
| Pérdidas (efectos sobre el nivel de servicio) | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Interrupción del tránsito: congestión y desvíos.</li> </ul> <p>Derivan en mayores costos generalizados de viaje (costos de operación vehicular, costos de tiempo de viaje)</p>   |   |

Fuente: Elaboración propia sobre la base de P. Bubeck y H. Kreibich, *Natural Hazards: Direct Costs and Losses due to the Disruption of Production Processes*, Potsdam, Alemania, CONHAZ Consortium, Germany Research Centre for Geosciences, 2011.

De acuerdo con la investigación realizada por Bubeck y Kreibich (2011), es posible aplicar varios enfoques para estimar las pérdidas debidas a la interrupción de los procesos de producción. Estos abarcan análisis detallados de insumo-producto (*input-output analyses*) de procesos económicos en áreas propensas a riesgos, comparando el promedio de producción durante años sin riesgo con el de la producción durante años con riesgo. Este enfoque aproxima las pérdidas estimadas causadas por la interrupción de los procesos de producción como un cierto porcentaje de los daños directos potenciales.

Los principales métodos para la estimación de las pérdidas por la interrupción del proceso de producción pueden mostrar diferentes grados de detalle, dependiendo principalmente de la escala espacial, pero también temporal, del análisis.

- Escala micro. En este nivel, por ejemplo, la pérdida por interrupción de un negocio puede evaluarse en toda la empresa identificando el valor agregado perdido o de los costos incurridos.
- Escala macro. En este nivel, las pérdidas debidas a la interrupción de los procesos de producción se especifican de manera más agregada representando sectores o ramas económicas.

En el transporte, los impactos de las interrupciones en el movimiento de mercancías son significativos. Los impactos económicos se presentan de inmediato por la incapacidad de los viajeros y las empresas para adaptarse a las circunstancias transformadas después de una interrupción del servicio en una vía.

La cuantificación del impacto económico por las interrupciones en un sistema vial ofrece la oportunidad a los tomadores de decisiones de desarrollar e implementar políticas para la pronta recuperación de la red vial reduciendo los efectos adversos.

Para cuantificar los impactos económicos, es necesario estimar con detalle las consecuencias de la interrupción del servicio de transporte. La capacidad para estimar los impactos económicos a corto y largo plazo requiere la utilización de metodologías cuantitativas y herramientas de simulación, las cuales deben incluir la integración de marcos de ingeniería, económicos y políticos. Lo anterior se debe principalmente a que las perturbaciones en el transporte tienen impactos a mediano y largo plazo en las economías locales, regionales y nacionales (Mesa-Arango, 2013).

El desarrollo de metodologías para cuantificar el impacto de las interrupciones en el movimiento de mercancías es aún más crucial debido al importante valor económico que representa la carga. Estos temas han surgido con la creciente comprensión de la interdependencia de las cadenas de suministro entre el transporte nacional y el mundial, en la que una red de transporte local forma parte integral de una red global de transporte.

Las pérdidas causadas por una interrupción del servicio varían desde el nivel macro (reubicación de puestos de trabajo, cambios en las importaciones y exportaciones, cambios en el uso de la tierra, etcétera) hasta los niveles microeconómicos (cambios en la producción, ventas y precios). Dependiendo de la duración de la interrupción, la disponibilidad de alternativas y la resiliencia del sistema, se puede medir el alcance de los impactos económicos (Mesa-Arango y otros, 2013).

La resiliencia depende de la capacidad de los sistemas para superar en lo posible la interrupción, ya sea ajustándose a la nueva situación o reestructurando la entrega de bienes cuando sea posible. Los vínculos extendidos están relacionados con la respuesta al comportamiento de todo el sistema ante la falla en su servicio, la cual puede conducir a períodos prolongados para reconstruir y llevar el sistema de nuevo a la funcionalidad y restablecimiento del servicio.

Mesa-Arango y otros (2013) realizaron un estudio basado en el Multiclass Traffic Assignment Data, usando el modelo de insumo-producto para estimar los impactos económicos relacionados con el transporte. Este modelo implica multiplicar el número de camiones retrasados en la carretera por un factor predeterminado del valor del tiempo, con lo cual se calcula un valor económico del retraso. Sin embargo, una encuesta estadísticamente válida de negocios afectados relacionados con el transporte de mercancías podría haber cuantificado los costos reales incurridos por las empresas dependientes del transporte como resultado del cierre de las carreteras.

Esta metodología puede ser aplicada para cualquier tipo de interrupción del tránsito. Sin embargo, existen trabajos previos que han estimado los impactos económicos asociados a eventos climáticos particulares, tales como los realizados por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) o por la Dirección de Adaptación al Cambio Climático y Gestión Estratégica del Riesgo (DACGER).

Otro tipo de impactos como los provocados por las inundaciones en la operación del tránsito a menudo son intangibles: pérdida de tiempo, frustración, degradación ambiental debido a emisiones adicionales de CO<sub>2</sub>. No obstante, también pueden tener dimensiones monetarias: los costos de operación adicionales y el consumo de combustible tienen precios de mercado, y la pérdida de tiempo también podría ser monetizada.

Los enfoques para monetizar los impactos intangibles y la importancia emergente del análisis multicriterio para las evaluaciones del impacto de las amenazas crean las condiciones necesarias para la adecuada evaluación de los impactos de las inundaciones en el tránsito (Pyatkova y otros, 2015).

Para las cadenas de transporte y el tránsito en las ciudades, el impacto del cambio climático más significativo es el tiempo perdido en las inundaciones, de acuerdo con el estudio realizado por Pyatkova y otros (2015). Esto impone la necesidad de monetizar las horas de negocio perdidas en el tránsito, de modo que puedan ser comparadas con otros impactos tangibles de la inundación como los daños en la infraestructura construida o la interrupción del negocio.



## VII. Canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial

**E**n el capítulo anterior se describieron los impactos de los diferentes fenómenos climáticos que la infraestructura vial ha tenido por eventos climáticos pasados; pero estos se seguirán presentando en el futuro.

No todos los cambios en el clima futuro serán significativos para la red de transporte local o regional. Por lo tanto, limitar el estudio a las variables clave de interés permite realizar proyecciones más profundas de estas variables (FHWA, 2012); es decir, seleccionar aquellas amenazas climáticas que muy probablemente sí tendrán un impacto significativo en la infraestructura vial.

Las variables y los fenómenos climáticos que se deben seleccionar para el proceso de adaptación normalmente están influidos por las experiencias pasadas y por los registros históricos de los impactos en el sector transporte ocurridos en los últimos años, para evaluar, en específico, el desempeño del sistema vial en respuesta a las amenazas climáticas y, en especial, durante condiciones climáticas extremas como vientos fuertes, olas de calor, inundaciones causadas por fuertes precipitaciones, tormentas o ciclones tropicales.

Para identificar los impactos del cambio climático, pasados, actuales y futuros, es necesario contar con un criterio experto y apoyarse en herramientas que faciliten la comprensión de los riesgos que la infraestructura vial tiene en relación con el cambio climático.

Los canales de impactos exponen la manera en que el cambio climático afecta la infraestructura vial, con impactos en la confiabilidad y la capacidad del servicio que esta presta a los sistemas de transporte.

Para construir los canales de impacto del cambio climático en la infraestructura vial se desarrolló la siguiente estrategia:

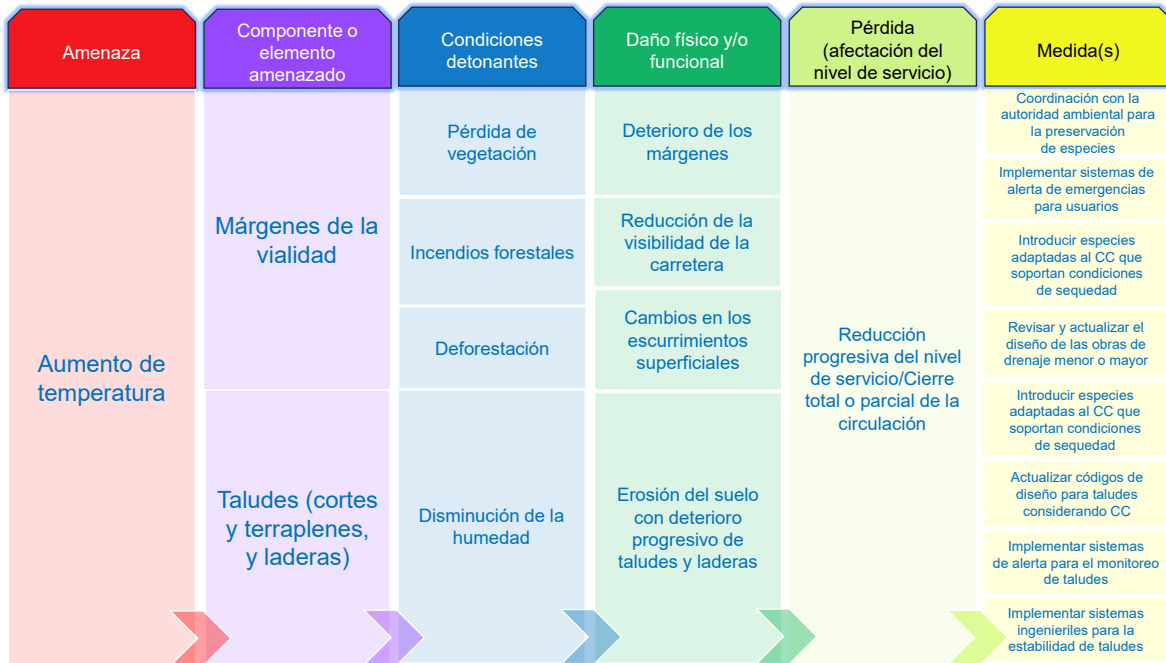
- Identificar las amenazas del cambio climático y de los fenómenos climáticos asociados. Estas amenazas incluyen inundaciones, inundaciones costeras, altas temperaturas, precipitación intensa, vientos fuertes, marejadas de tormenta, avenidas torrenciales, frentes fríos, etcétera.
- Identificar los elementos de la infraestructura vial que, sometidos a estrés por el clima y vulnerabilidad del entorno ambiental (por la acción humana o por su naturaleza), están en riesgo de presentar vulnerabilidades que pudieran afectar la integridad estructural, y que comprometan el servicio que presta la vialidad.
- Identificar las interdependencias entre la infraestructura vial y las amenazas climáticas a fin de identificar, a su vez, los riesgos asociados al cambio climático.
- Evaluar el impacto de daño y pérdida que se produciría en el elemento de la infraestructura o en el sistema vial (servicio).
- Buscar soluciones para la adaptación del elemento de la infraestructura vial, ya sea definiendo políticas, proponiendo innovaciones o elementos tecnológicos, con objeto de evitar/reducir/minimizar/eliminar el riesgo, construir capacidades (conocimiento y fortalecimiento de las instituciones), actualizar códigos/normativas de diseño, entre otros.

Para visualizar los canales de impacto se construyeron matrices en las que se muestran las interdependencias entre las amenazas, la degradación ambiental y el estado de los ecosistemas (condiciones detonantes), la infraestructura amenazada, el daño y la pérdida y la propuesta de medida de reducción del riesgo y de adaptación al cambio climático. Estas son matrices sencillas y comprensibles, que permitirán entender los impactos del cambio climático y cómo hacerles frente.

Se muestran a continuación las matrices que ilustran los canales de impacto para la infraestructura vial.

**Cuadro 10**  
**Canales de impacto del aumento de temperaturas**

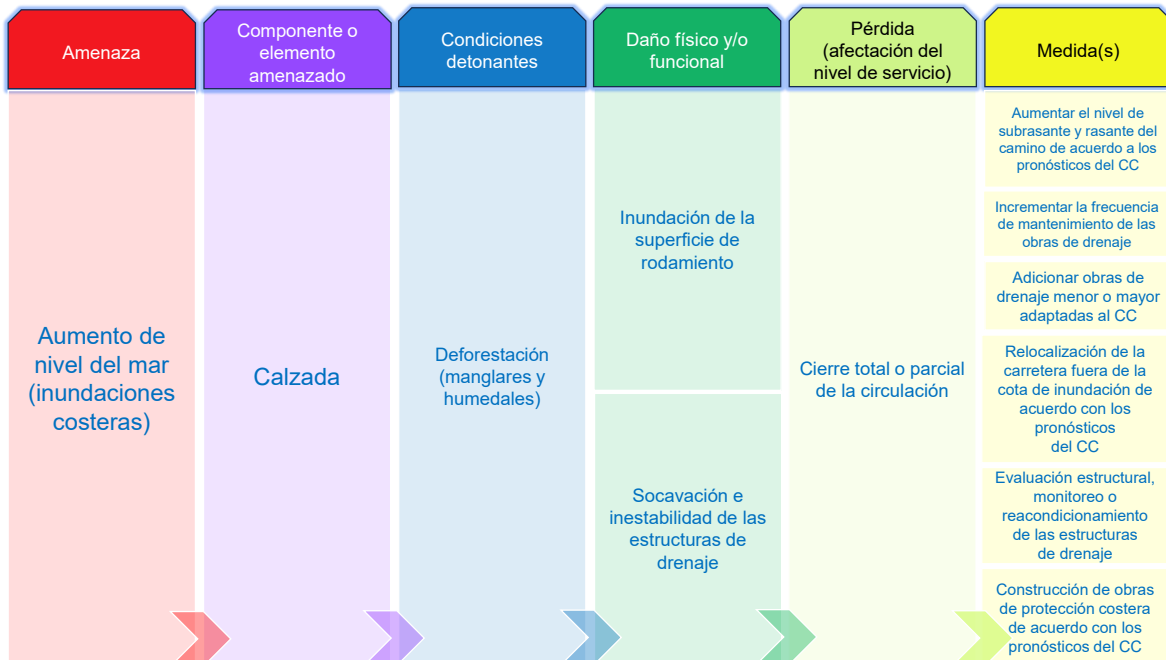
| Amenaza                | Componente o elemento amenazado | Condiciones detonantes  | Daño físico y/o funcional   | Pérdida (afectación del nivel de servicio)   | Medida(s)   |
|------------------------|---------------------------------|---|---|--|---|
| Aumento de temperatura | Pavimento                       | Disminución de la humedad en los márgenes de la calzada de la vía | Erosión de los márgenes de la calzada   | Reducción progresiva del nivel de servicio/Cierre total o parcial de la circulación  | Utilizar materiales con un mejor desempeño por la sequedad  |
|                        |                                 |   | Degradación de las capas de cimentación   |  | Actualizar los estándares de diseño considerando el CC  |
| Aumento de temperatura | Pavimento                       | Cambios en el comportamiento de los materiales                    | Fatiga y degradación del asfalto, grietas, exudación del asfalto, deformaciones estructurales | Reducción progresiva del nivel de servicio/ Cierre total o parcial de la circulación | Introducir especies adaptadas al CC que soportan condiciones de sequedad  |
|                        |                                 |   |   |  | Deterioro progresivo y prematuro de la carpeta asfáltica: surcos, ondulaciones, filtración de agua a las capas de pavimento |
| Aumento de temperatura | Derecho de vía                  | Disminución de la humedad en los márgenes del camino              | Erosión del suelo con deterioro progresivo del pavimento                                      | Reducción progresiva del nivel de servicio/ Cierre total o parcial de la circulación | Utilizar métodos de diseño de pavimentos que consideren el clima  |
|                        |                                 | Pérdida de la cubierta vegetal                                    |   |  | Considerar un grado de desempeño del asfalto adaptado al CC   |
| Aumento de temperatura | Derecho de vía                  | Pérdida de la cubierta vegetal                                    | Erosión del suelo con deterioro progresivo del pavimento                                      | Reducción progresiva del nivel de servicio/ Cierre total o parcial de la circulación | Incrementar la frecuencia del mantenimiento rutinario   |
|                        |                                 |   |   |  | Selección de especies adaptadas al CC que soportan condiciones de sequedad  |
| Aumento de temperatura | Derecho de vía                  | Pérdida de la cubierta vegetal                                    | Erosión del suelo con deterioro progresivo del pavimento                                      | Reducción progresiva del nivel de servicio/ Cierre total o parcial de la circulación | Seleccionar asfaltos y aditivos con mejor desempeño climático   |
|                        |                                 |   |   |  | Mantener una gestión activa del uso del suelo en las zonas aledañas a las vías  |



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro II**  
**Canales de impacto del aumento en nivel del mar: inundaciones costeras**



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro 12**  
**Canales de impacto del aumento del nivel del mar: marejadas**

| Amenaza                               | Componente o elemento amenazado                       | Condiciones detonantes                                      | Daño físico y/o funcional                             | Pérdida (afectación del nivel de servicio)                         | Medida(s)  |
|---------------------------------------|---|---|---|--|--|
| Aumento del nivel del mar (marejadas) | Terraplén   | Erosión del cuerpo del terraplén de las vialidades costeras | Pérdida total o parcial del terraplén                 | Cierre total o parcial de la carretera                             | <ul style="list-style-type: none"> <li>Construcción de obras de protección costera de acuerdo con los pronósticos del CC</li> <li>Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios</li> </ul> |
|                                       |   | Calzada/Pavimento   | Deforestación (manglares y humedales)                 | Inestabilidad de la calzada por la erosión                         | Reducción del nivel de servicio  |
|                                       | Deterioros en la superficie y estructura de pavimento |   |   | Incrementar la frecuencia de mantenimiento                         |  |
|                                       | Incremento de la humedad en las capas del pavimento   |   | Socavación y derrumbes de la estructura del pavimento | Modificar los códigos de diseño de los pavimentos en vías costeras |  |
|                                       |   |   |   |  |  |
|                                       |   |   |   | Utilizar materiales menos susceptibles a la humedad y a la erosión |  |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro 13**  
**Canales de impacto de la sequía**

| Amenaza | Componente o elemento amenazado | Condiciones detonantes                                      | Daño físico y/o funcional  | Pérdida (afectación del nivel de servicio) | Medida(s)  |   |
|---------|---------------------------------|---|--|--|--|---|
| Sequía  | Derecho de vía                  | Disminución de la humedad en los márgenes del camino        | Pérdida de la cubierta vegetal                                     | Reducción del nivel de servicio            | Introducir especies adaptadas al CC que soportan condiciones de sequedad |   |
|         |                                 | Pérdida de la cubierta vegetal                              | Erosión del suelo y polvos   |  | Implementar campañas de reforestación con especies adaptadas al CC       |   |
|         |                                 |   |  | Incendios forestales                       | Accidentes de tránsito   | Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios                     |
|         | Pavimento                       | Pérdida de humedad en las capas del pavimento               | Falta de riegos superficiales                                      | Alteración del suelo de cimentación        | Reducción del nivel de servicio  | Considerar materiales con mejor desempeño a la sequedad                         |
|         |                                 |   |  | Agrietamientos por fatiga                  |  | Utilizar estabilizadores que mejoren el comportamiento de los suelos arcillosos |
|         |                                 | Obstrucción de las obras de drenaje por polvos o vegetación | Pérdida de la capacidad hidráulica de las obras de drenaje         | Envejecimiento prematuro del pavimento     |  | Evitar reforestar con árboles que absorban humedad del suelo de cimentación     |
|         |                                 |   |  |  |  | Utilizar asfaltos, materiales y aditivos adaptados al CC                        |
|         |                                 |   | Incrementar la frecuencia de mantenimiento de las obras de drenaje |  |  |   |
|         |                                 |   | Construir trincheras para atrapar sedimentos y vegetación rodadora |  |  |   |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro I4**  
**Canales de impacto del aumento en duración e intensidad de la precipitación:**  
**pavimento, derecho de vía, taludes y laderas**

| Amenaza  | Componente o elemento amenazado          | Condiciones detonantes                                       | Daño físico y/o funcional                        | Pérdida (afectación del nivel de servicio)   | Medida(s)  |
|--|--|--|--|--|--|
| Aumento en duración e intensidad en la precipitación | Pavimento                                | Alta presencia de agua y su acumulamiento                    | Socavación de las capas del pavimento            | Reducción del nivel de servicio  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementar la frecuencia del mantenimiento considerando el CC</li> <li>Incluir el cambio climático en la gestión de activos carreteros</li> </ul>  |
|  | Derecho de vía                           | Deforestación (aumento de tasas de erosión del suelo)        | Visibilidad inadecuada del señalamiento vertical | <ul style="list-style-type: none"> <li>Accidentes de tránsito</li> <li>Reducción del nivel de servicio/Cierre total o parcial de la circulación</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>Utilizar materiales con alta refracción bajo condiciones climáticas extremas</li> <li>Utilizar LED u otros materiales para mejorar la visibilidad del señalamiento vertical</li> <li>Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios</li> </ul>   |
| Aumento en duración e intensidad en la precipitación | Taludes (cortes y terraplenes) y laderas | Inestabilidad del talud o ladera por la saturación del suelo | Deslizamiento de tierra de los taludes o laderas | Reducción del nivel de servicio/Cierre total o parcial de la circulación   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Incrementar la frecuencia del mantenimiento considerando el CC</li> <li>Realizar estudios de estabilidad en taludes y laderas</li> <li>Implementar estrategias para estabilizar taludes y laderas</li> <li>Construir taludes más tendidos</li> <li>Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios</li> </ul> |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro 15**  
**Canales de impacto del aumento en duración e intensidad de la precipitación: puentes**

| Amenaza  | Componente o elemento amenazado | Condiciones detonantes                           | Daño físico y/o funcional  | Pérdida (afectación del nivel de servicio) | Medida(s)  |
|--|---------------------------------|--|--|--|--|
| Aumento en duración e intensidad en la precipitación | Puentes                         | Aumento del gasto y el área hidráulica de diseño | Inestabilidad de las estructuras por aumento de los flujos de agua | Cierre total o parcial de la circulación   | Incrementar la frecuencia del mantenimiento considerando el CC   |
|  |                                 |  | Pérdida parcial o total del elemento                               |  | Implementar estructuras de protección  |
|  |                                 | Socavación de pilas y estribos                   | Inestabilidad de las estructuras                                   | Cierre total o parcial de la circulación   | Rediseñar puentes y estructuras que permitan aumentar el gasto y el área hidráulica de acuerdo con el CC |
|  |                                 |  |  |  | Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios  |
|  |                                 |  |  |  | Evaluación estructural del puente considerando los cambios en los flujos de agua debido al CC            |
|  |                                 |  |  |  | Relocalización de puentes  |
|  |                                 |  |  |  | Incrementar la frecuencia del mantenimiento considerando el CC   |
|  |                                 |  |  |  | Implementar estructuras de protección  |
|  |                                 |  |  |  | Implementar un sistema de gestión de puentes   |
|  |                                 |  |  |  | Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios  |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro 16**  
**Canales de impacto del aumento en duración e intensidad de la precipitación: calzada, obras de drenaje y márgenes de la vía**

| Amenaza  | Componente o elemento amenazado | Condiciones detonantes                            | Daño físico y/o funcional                             | Pérdida (afectación del nivel de servicio)                               | Medida(s)  |
|--|---------------------------------|---|---|--|--|
| Aumento en duración e intensidad en la precipitación | Calzada                         | Alta presencia de agua y su acumulación           | Visibilidad inadecuada del señalamiento horizontal    | Reducción del nivel de servicio/ Accidentes de tránsito                  | Utilizar materiales con alta refracción bajo condiciones climáticas extremas                     |
|  |                                 |   | Inundación de la superficie de rodamiento             |  | Utilizar LED u otros materiales para mejorar la visibilidad del señalamiento horizontal          |
|  |                                 |   | Disminución de la capacidad visual                    |  | Implementar sistemas de información meteorológica para usuarios                                  |
|  | Obras de drenaje                | Azolve por arrastre de sedimentos                 | Reducción del gasto hidráulico de diseño del elemento | Reducción del nivel de servicio/Cierre total o parcial de la circulación | Elevar el nivel de la rasante de la vialidad y aumentar el bombeo de la calzada                  |
| Ineficiencia hidráulica                              |                                 | Implementar sistemas para la gestión del tránsito |   |  |  |
|  |                                 |   |   |  | Incrementar la frecuencia del mantenimiento de las obras de drenaje considerando el CC           |
|  |                                 |   |   |  | Rediseñar las obras de drenaje con un periodo de retorno mayor considerando el CC y sustituirlas |

| Amenaza  | Componente o elemento amenazado | Condiciones detonantes   | Daño físico y/o funcional  | Pérdida (afectación del nivel de servicio)                               | Medida(s)  |
|--|---------------------------------|--|--|--|--|
| Aumento en duración e intensidad en la precipitación | Obras de drenaje                | Alta presencia de agua y su acumulamiento  | Deficiencia operacional de los activos de drenaje<br>Inundación de la calzada  | Reducción del nivel de servicio/Cierre total o parcial de la circulación | Implementar sistemas de gestión del agua pluvial en el sistema vial<br>Adicionar obras de drenaje menor o mayor, superficial y subterráneo considerando el CC  |
|  | Márgenes de la vialidad         | Cambios en los patrones superficiales de los escurrimientos<br>Aumento de los caudales de los escurrimientos superficiales | Inundaciones, socavaciones, deslaves, entre otros<br>Socavación e inestabilidad de las estructuras de drenaje<br>Daño de la obra de drenaje por saturación | Cierre total o parcial de la circulación                                 | Reubicación de obras de drenaje e implementación de obras adicionales considerando el CC<br>Implementar un adecuado sistema de gestión de activos carreteros considerando el CC<br>Incrementar la frecuencia del mantenimiento de las obras de drenaje considerando el CC<br>Construir obras de protección para el control de flujos<br>Incrementar el período de retorno de diseño de la obra de drenaje considerando el CC y su reemplazo<br>Construir un paíse reactivo y un régimen de mantenimiento para reducir escurrimientos |
| Aumento en duración e intensidad en la precipitación | Márgenes de la vialidad         | Inestabilidad de laderas por la saturación del suelo   | Derrumbes o deslaves   | Cierre total o parcial de la circulación                                 | Construir muros de contención o trincheras para controlar los flujos de material<br>Implementar sistemas de monitoreo permanente en laderas  |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro 17**  
**Canales de impacto de inundaciones**

| Amenaza      | Componente o elemento amenazado | Condiciones detonantes                    | Daño físico y/o funcional  | Pérdida (afectación del nivel de servicio)                               | Medida(s)   |
|--------------|---------------------------------|---|--|--|---|
| Inundaciones | Pavimento                       | Alta presencia de agua y su acumulamiento | Filtración de agua a capas de base y subbase                                       | Reducción del nivel de servicio  | Garantizar el grado de compactación adecuado en cada capa y su contenido de agua<br>Incluir todo el drenaje subterráneo necesario en el pavimento para evitar que el agua se introduzca en las capas de pavimento   |
|              |                                 |   | Incremento de grietas por la presión hidráulica de neumáticos de vehículos pesados | Reducción del nivel de servicio/Cierre total o parcial de la circulación | Aumentar el bombeo de la calzada<br>Incrementar el mantenimiento rutinario para sellado de grietas<br>Incrementar el mantenimiento rutinario para tratamiento superficial<br>Revisar la factibilidad de utilizar pavimentos permeables o mezclas de granulometría abierta<br>Utilizar material granulométrico menos susceptible al desgaste |

| Amenaza      | Componente o elemento amenazado | Condiciones detonantes                  | Daño físico y/o funcional                                      | Pérdida (afectación del nivel de servicio) | Medida(s)   |
|--------------|---------------------------------|---|--|--|---|
| Inundaciones | Pavimento                       | Aumento de la humedad en los materiales | Desprendimiento de agregados de las diferentes capas           | Reducción del nivel de servicio            | Utilizar materiales con un mejor desempeño hidráulico en la base o en las capas de cimentación<br>Incrementar la frecuencia del mantenimiento rutinario (bacheo, calafateo, entre otros)<br>Adicionar drenaje subterráneo y superficial para eliminar el agua del pavimento |
|              |                                 | Azolve por arrastre de sedimentos       | Reducción del gasto hidráulico de diseño de la obra de drenaje | Cierre total o parcial de la circulación   | Implementar sistemas de retención de sedimentos<br>Incrementar la frecuencia de mantenimiento de las obras de drenaje considerando el CC  |
|              | Obras de drenaje                | Socavación de la estructura             | Daño de la obra de drenaje<br>Inestabilidad de la estructura   |  | Rediseñar las obras de drenaje con un periodo de retorno mayor considerando el CC y sustituirlas<br>Evaluación estructural, monitoreo o reacondicionamiento de la estructura  |
|              |                                 | Ineficiencia hidráulica                 | Daño de la obra de drenaje por saturación                      |  | Reemplazar la obra de drenaje con otra de mayor capacidad hidráulica considerando el CC   |
| Inundaciones | Túneles o pasos vehiculares     | Condiciones topográficas desfavorables  | Inundación en las partes bajas de la rasante de la carretera   | Cierre total o parcial de la circulación   | Adicionar obras de drenaje superficial y subterráneo considerando el CC<br>Implementar señalamientos verticales y dispositivos diversos<br>Instalar sistemas de bombeo en zonas de inundación   |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro 18**  
**Canales de impacto de avenidas torrenciales**

| Amenaza               | Componente o elemento amenazado | Condiciones detonantes  | Daño físico y/o funcional                                | Pérdida (afectación del nivel de servicio) | Medida(s)  |
|-----------------------|---------------------------------|---|--|--|--|
| Avenidas torrenciales | Márgenes de la vialidad         | Cambios en los patrones superficiales de los escurrimientos             | Inundaciones, socavaciones, deslaves, entre otros        | Cierre total o parcial de la carretera     | Implementar obras de drenaje adicionales   |
|                       | Obras de drenaje y puentes      | Aumento de los caudales de los escurrimientos superficiales             | Socavación e inestabilidad de las estructuras de drenaje |  | Implementar un monitoreo de los escurrimientos superficiales                                     |
| Avenidas torrenciales | Calzada/Pavimento               | Arrastre de materiales (suelo, piedras o vegetación) y desechos sólidos | Saturación y probable daño de la obra de drenaje/puentes | Cierre total o parcial de la carretera     | Evaluar el entorno ambiental para reducir riesgos  |
|                       |                                 |   | Daños por impacto en las estructuras                     |  | Implementar un adecuado sistema de gestión de activos, incluyendo obras de drenaje y puentes     |
|                       |                                 |   | Acumulación de materiales y desechos                     |  | Incrementar la frecuencia del mantenimiento de las obras de drenaje y puentes considerando el CC |
|                       |                                 |   |  |  | Diseñar y sustituir las obras de drenaje y puentes, considerando periodos de retorno mayores     |
|                       |                                 |   |  |  | Incluir otras variables de diseño a las estructuras considerando el arrastre de materiales       |
|                       |                                 |   |  |  | Implementar obras de protección  |
|                       |                                 |   |  |  | Incrementar la frecuencia del mantenimiento rutinario (bacheo, calafateo, entre otros)           |
|                       |                                 |   |  |  | Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios                                      |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro 19**  
**Canales de impacto de vientos fuertes**

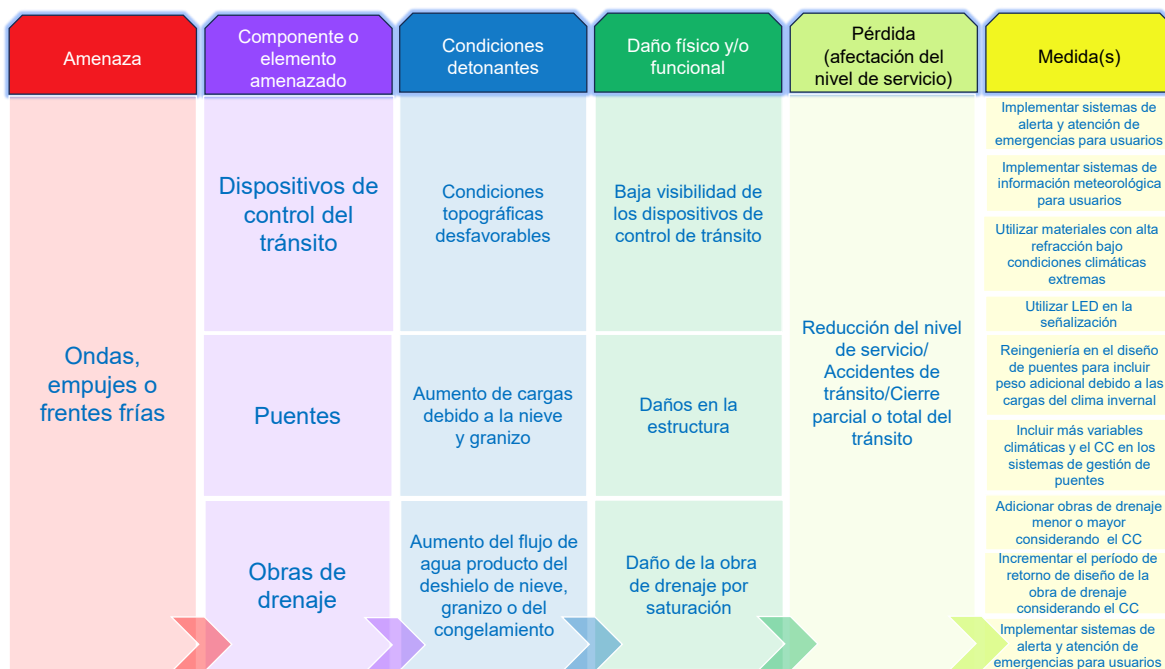
| Amenaza  | Componente o elemento amenazado           | Condiciones detonantes                          | Daño físico y/o funcional   | Pérdida (afectación del nivel de servicio)  | Medida(s)  |
|--|---|---|---|---|--|
| Vientos fuertes  | Márgenes de la vialidad                   | Caída de árboles                                | Elevada presencia de polvos   | Cierre total o parcial de la carretera      | Mejorar el conocimiento sobre la vegetación existente dentro del derecho de vía y zonas aledañas                           |
|  |   | Erosión del suelo                               |   |   | Realizar un inventario de elementos que representan peligro para la vialidad e implementar acciones para reducir el riesgo |
|  | Puentes                                   | Condiciones topográficas desfavorables          | Desprendimiento de barreras en el parapeto                          | Accidentes de tránsito                      | Reforestar con vegetación resistente al viento   |
|  | Calzada                                   | Condiciones topográficas desfavorables          | Daño o destrucción de los dispositivos para el control del tránsito | Cierre total o parcial de la carretera      | Asegurar que los dispositivos consideren diseño por viento de acuerdo con las condiciones del sitio                        |
| Acumulación de material, escombros y basura en la superficie de rodamiento |   |   | Accidentes de tránsito  | Incrementar la frecuencia del mantenimiento |  |
| Vientos fuertes  | Taludes (cortes y terraplenes, y laderas) | Inestabilidad del talud o ladera por la erosión | Derrumbes o deslaves  | Cierre total o parcial de la carretera      | Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios  |

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

**Cuadro 20**  
**Canales de impacto de ondas, empujes o frentes frías**

| Amenaza   | Componente o elemento amenazado      | Condiciones detonantes   | Daño físico y/o funcional  | Pérdida (afectación del nivel de servicio)   | Medida(s)  |
|---|--------------------------------------|--|--|--|--|
| Ondas, empujes o frentes frías  | Pavimento                            | Expansión y contracción del pavimento por ciclos de congelación y descongelación | Agrietamiento prematuro en el pavimento  | Reducción del nivel de servicio/<br>Accidentes de tránsito/Cierre parcial o total del tránsito | Incrementar la frecuencia del mantenimiento considerando el CC           |
|   |                                      |  | Aumento de la rigidez del pavimento  |  | Mejorar diseño del pavimento y considerar materiales con mejor desempeño |
|   |                                      | Aumento de la humedad en los materiales  | Desprendimientos de material en la carpeta<br>Erosión en las capas de base y subbase |  | Incrementar la frecuencia del mantenimiento considerando el CC           |
|   |                                      | Congelamiento de la superficie de rodamiento                                     | Agrietamiento prematuro en el pavimento  |  | Incrementar la frecuencia del mantenimiento considerando el CC           |
| Ondas, empujes o frentes frías  | Calzada                              | Acumulación de nieve, granizo o del congelamiento                                | Daño de la superficie de rodamiento por saturación                                   | Reducción del nivel de servicio/<br>Accidentes de tránsito/Cierre parcial o total del tránsito | Incrementar la frecuencia del mantenimiento considerando el CC           |
|   |                                      | Deshielo de nieve, granizo o del congelamiento                                   | Alta presencia de agua y su acumulación  |  | Actualizar los umbrales de humedad en los diseños de pavimentos          |
|   | Dispositivos de control del tránsito | Congelamiento de circuitos y tableros  | Daños a los dispositivos de control del tránsito                                     |  | Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios              |
|   |                                      |  |  |  | Implementar sistemas de alerta de emergencias para usuarios              |
| Implementar mantenimiento durante la temporada invernal   |                                      |  |  |  |  |
| Implementar sistemas de información meteorológica para usuarios   |                                      |  |  |  |  |
| Implementar sistemas de gestión del tránsito o actualizar el existente para mejorar el desempeño invernal del sistema |                                      |  |  |  |  |
| Reingeniería a los dispositivos que incluya materiales con mejor desempeño a las bajas temperaturas                   |                                      |  |  |  |  |



Fuente: Elaboración propia.

Nota: Los impactos son magnificados en un territorio deforestado y degradado por las actividades humanas.

Para apoyar a los tomadores de decisiones, en el anexo del presente documento se ha colocado una matriz sobre las acciones que emprender para la adaptación al cambio climático. La tabla de decisiones sensible al clima contempla las posibles decisiones que a menudo afrontan las organizaciones que administran y operan la infraestructura vial y que en la actualidad están afrontando la vulnerabilidad de las vías ante el cambio climático y el clima extremo.

La matriz fue elaborada por la Administración Federal de Carreteras de los Estados Unidos utilizando su conocimiento de las prácticas del Departamento de Transporte (DOT) estatal y local. Estas decisiones proporcionan la base para desarrollar estrategias de adaptación que mitiguen el riesgo asociado a la decisión debida al cambio climático (FHWA, 2015).

## VIII. Adaptación sostenible e incluyente al cambio climático

**E**l cambio climático en la región de Centroamérica presenta una situación actual y futura del clima extremo y adverso que compromete el estilo y la calidad de vida de las personas, con un alto impacto en la economía y la infraestructura de servicios.

Ante estos escenarios, es necesario adaptarse a los climas extremos observados y proyectados. La adaptación consiste en acciones deliberadas realizadas para reducir las consecuencias adversas, así como para aprovechar cualquier oportunidad que pueda adicionar beneficios.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) (2008), el proceso de adaptación al clima y al cambio climático es complejo y multifacético, por lo que resulta muy difícil hacer una adaptación analítica y justa. Para clasificar las medidas de adaptación, se ha establecido una serie de tipologías; por ejemplo, se han clasificado de acuerdo con el tiempo (anticipada comparada con reactiva), el alcance (local en comparación con regional, corto plazo comparado con largo plazo), el propósito (autónomo en comparación con planeado, adaptación activa o pasiva) y el agente de adaptación (sistemas naturales frente a humanos, individuos en comparación con colectivos, privados frente a públicos).

Con fundamento en los marcos existentes para la adaptación de la infraestructura al cambio climático, Cochran (2009) sugiere que las medidas de adaptación deberán adoptar dos formas generales: acciones relacionadas con la planificación y la construcción de nueva infraestructura, y, en segundo lugar, la adaptación y la “protección climática” de los sistemas existentes. En paralelo, Vega y Lennox (2023) indican que las medidas de adaptación pueden aplicarse en la formulación de proyectos de inversión pública para generar nuevas capacidades de producción de bienes y/o servicios públicos y/o realizar obras a partir de las existentes, para rehabilitarlas, reemplazarlas, recuperarlas o ampliar las capacidades de estas.

Según Mendoza y otros (2017), de acuerdo al IPCC (2007), puede haber varios tipos de adaptación: anticipada, autónoma y prevista, que se describen a continuación.

**Adaptación anticipada.** Adaptación que se produce antes de que se observen los impactos del cambio climático. También es referida como adaptación proactiva.

**Adaptación autónoma.** Adaptación que no constituye una respuesta consciente a los estímulos climáticos, sino que es provocada por cambios ecológicos en los sistemas naturales y por cambios en el mercado o bienestar de los sistemas humanos.

**Adaptación prevista.** Adaptación que es el resultado de una decisión política deliberada, basada en la conciencia de que las condiciones han cambiado o están a punto de cambiar y que la acción es necesaria para regresar, mantener o alcanzar un estado deseado.

En la actualidad se han implementado acciones de ingeniería o tecnológicas como opciones para la adaptación, que, en ocasiones, están integradas a la gestión de desastres o para la gestión del agua. Por otra parte, las acciones de adaptación adoptadas hacen hincapié en los beneficios incrementales, encaminados a aumentar la resiliencia de la infraestructura, particularmente la infraestructura para el transporte.

Scherag y Grambsch (1998) sugieren nueve principios que deben considerarse para diseñar políticas para la adaptación:

- i) Los efectos del cambio climático varían según la región.
- ii) Los efectos del cambio climático varían según el grupo demográfico.
- iii) El cambio climático plantea riesgos y oportunidades.
- iv) Los efectos del cambio climático deben considerar un contexto con múltiples factores de estrés, que pueden ser tan importantes para el diseño de respuestas adaptativas como la sensibilidad al cambio.
- v) La adaptación tiene un costo.
- vi) Las respuestas adaptativas varían en eficacia, como lo demuestran los esfuerzos actuales para hacer frente a la variabilidad climática.
- vii) La naturaleza sistémica del impacto climático complica el desarrollo de la política de adaptación.
- viii) La mala adaptación puede dar lugar a efectos negativos tan graves como los efectos inducidos por el clima que se evitan.
- ix) Muchas oportunidades de adaptación tienen sentido si se concretan o no los efectos del cambio climático.

La adaptación al cambio climático es esencial, pues implica tomar medidas para aumentar la resiliencia y minimizar los costos. Ya no es posible evitar el cambio climático que se producirá en los próximos dos o tres decenios, pero todavía es posible proteger a las sociedades y economías de sus impactos en cierta medida, por ejemplo, si se cuenta con infraestructura resiliente al clima (Stern, 2006).

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

- 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, según el Banco Asiático de Desarrollo (2011), pueden dividirse en opciones de ingeniería (estructurales) tales como condiciones del subsuelo, especificaciones de materiales, proyecto geométrico, drenaje y erosión, y estructuras de ingeniería para la protección; y en opciones que no son de ingeniería como planificación del mantenimiento y los sistemas de alerta temprana, planificación del uso de la tierra y la gestión ambiental.

Las opciones de adaptación deben, además, procurar el bienestar, la inclusión social y la sostenibilidad, como agentes diferenciadores que promuevan una adaptación al cambio climático incluyente y sostenible.

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) publicó en 2011 una serie de ejes para la Adaptación Sostenible e Incluyente al Cambio Climático (ASICC), los cuales se mencionan a continuación:

- Reducir la pobreza y la desigualdad, incluyendo la seguridad alimentaria, la gestión integral del agua y la reducción de impactos de eventos extremos con base en el ordenamiento y la prevención de desastres en el territorio.
- Transitar a economías sostenibles y eficientes en el uso de los recursos naturales, introduciendo cambios estructurales y tecnológicos en la producción, la eficiencia energética, el manejo sostenible de agua y bosques, y la reducción de la deforestación.

- Proteger los ecosistemas naturales para facilitar la adaptación y sostenibilidad de estos, y aprovechar racionalmente los servicios y bienes que nos proveen.
- Elaborar medidas de política fiscal y financiamiento que se traduzcan en acciones de adaptación al cambio climático e incentivos correctos para transitar hacia una economía sostenible.
- Aprovechar las oportunidades de integración centroamericana para la gestión del agua, la energía, la seguridad alimentaria, la competitividad, el comercio y las negociaciones internacionales.

Los cobeneficios de la adaptación son muy importantes para incrementar la sostenibilidad de las respuestas al cambio climático, tales como la reducción de gases de efecto invernadero, la reducción del impacto ambiental y el aumento de la conservación ambiental, la responsabilidad social, la consulta pública y el involucramiento de las partes interesadas.

El nivel de conocimiento de las amenazas climáticas y sus consecuencias es muy importante, ya que permite a la sociedad comprender los riesgos asociados al cambio climático y el efecto negativo de este en el desempeño de sus actividades, por lo que permitiría generar un adaptación preventiva y proactiva.

Por eso es importante considerar qué aspectos sociales y ambientales se deberían incluir para que una medida de adaptación al cambio climático sea sostenible e incluyente. En un análisis realizado por Mendoza, Marcos y Orantes (2019) se definen criterios para evaluar las medidas de adaptación, dentro de las cuales se propusieron cuatro criterios para aspectos sociales y dos criterios para la parte ambiental, que podrían ser de utilidad como base para evaluar los aspectos de “sostenibilidad” y de “inclusión” para la ASICC. La descripción de los criterios comentados se muestra en el cuadro 21.

**Cuadro 21**  
**Criterios para evaluar medidas de adaptación con un enfoque incluyente y sostenible**

| Sociales    |  |  |
|-------------|--|--|
| 1           | Población beneficiada                  | En caso de existir un beneficio para la población, se busca que la medida de adaptación sea capaz de tener un efecto positivo para la mayor cantidad de personas.                              |
| 2           | Participación social                   | Es importante la participación de las comunidades vulnerables y de la población en general con los agentes públicos en el diseño, planificación e implementación de la práctica de adaptación. |
| 3           | Aceptación social y política           | La medida de adaptación tiene o no aceptación social/política, forma parte de las preocupaciones públicas, etcétera.   |
| 4           | 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.   |
| Ambientales |  |  |
| 5           | Impacto ambiental                      | Evalúa el impacto ambiental de la respuesta de adaptación.   |
| 6           | Grado de protección del medio ambiente | Se refiere a que si la(s) medida(s), acción(es) y/o estrategia(s) de adaptación conserva(n), restaura(n) y/o hace(n) un uso sostenible de los recursos naturales.                              |
| 7           | Reducción de GEI                       | Evalúa la contribución en la reducción de gases de efecto invernadero.   |
| 8           | Soluciones basadas en la naturaleza    | Construye medidas de adaptación con un enfoque ecosistémico.   |

Fuente: Elaboración propia, sobre la base de J. F. Mendoza Sánchez, O.A. Marcos Palomares y H. Orantes Olvera, “Marco metodológico para la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático en México”, *Publicación Técnica*, N° 557, Sanfandila, Querétaro, México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Instituto Mexicano del Transporte (IMT), 2019.

Cada criterio descrito en el cuadro 21 debe ser evaluado y, si se desea, ponderado. Es decir, se asigna diferente peso a cada variable a fin de darle más valor a los criterios que a juicio del evaluador puedan tener un mayor o menor impacto en la inclusión o en la sostenibilidad de cada medida de adaptación.

Los criterios expresados en el cuadro 21 fueron desarrollados para medidas de adaptación en la infraestructura de transporte carretero.

Por otra parte, los riesgos sistémicos más importantes que las sociedades afrontan hoy en día están relacionados con la gestión de los recursos naturales y la generación de múltiples amenazas relacionadas con cambios en el clima y sus extremos, pérdida de biodiversidad, peligros naturales y desastres ambientales causados por el hombre. En gran medida, el aumento del riesgo es el resultado del deterioro de los ecosistemas y sus servicios, que ocurre en todo el mundo, a causa de la actividad humana y de los impactos del cambio climático.

La interacción entre los diferentes componentes de los sistemas socioecológicos requiere con urgencia abordar el riesgo sistémico adoptando un enfoque interconectado y pluralista para comprender el riesgo (UNDRR, 2019) y gestionarlo. El enfoque de Soluciones basadas en Naturaleza (SbN) constituye una forma de desarrollar medidas de adaptación que se refieren a una amplia gama de acciones de protección, manejo sostenible, restauración de ecosistemas naturales y modificados que respondan eficiente y adaptativamente a los retos de la sociedad generando bienestar y conservación de la naturaleza. El enfoque SbN intenta capturar el rol de la gestión del medio ambiente y su interacción con todo lo que hace la sociedad, por lo que mucho de este riesgo sistémico solo puede reducirse trabajando con la naturaleza, en lugar de contra ella, para adaptarse al cambio climático, reducir los impactos de este y generar bienestar (UNDRR, 2021).

Elementos del paisaje como bosques, manglares, corales, pastos marinos, humedales continentales, entre otros, pueden mitigar los riesgos naturales y climáticos dado su funcionamiento ecológico y los servicios de soporte, provisión, regulación y culturales derivados del mismo funcionamiento (MEA, 2005). El manejo y la protección de estos ecosistemas se pueden orientar para garantizar que su funcionamiento y la provisión de servicios amortigüen o reduzcan los peligros o amenazas (UNDRR, 2021).

Además, utilizar la estrategia de Reducción del Riesgo a Desastres (RRD) fundamentada en soluciones basadas en la naturaleza genera múltiples cobeneficios que contribuyen con los objetivos internacionales de desarrollo y protección ambiental, como los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas 11, 13, 14 y 15, y con los compromisos contraídos en virtud del Convenio sobre la Diversidad Biológica, la Convención de Ramsar sobre los Humedales y la Convención de las Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación, al tiempo que estos ayudan y concurren con las Contribuciones Nacionales Determinadas y sus metas de adaptación y mitigación al cambio climático (UNDRR, 2021).

La utilización de SbN para atender la reducción de riesgos de desastres y la adaptación al cambio climático debe partir de tres objetivos fundamentales:

- Hacer frente al cambio climático a través de la adaptación y mitigación del cambio climático.
- Cuidar el planeta a largo plazo a través de la mitigación del cambio climático y la gestión ambiental.
- La protección de las personas y los bienes vivos a través de la gestión del medio ambiente y la reducción del riesgo de desastres y la adaptación al cambio climático.

Para alcanzar estos objetivos se utilizan diversos enfoques de gestión de ecosistemas comprendidos dentro de las SbN. Estos enfoques tienen como propósito gestionar la tierra, el agua, el mar y los recursos vivos de una manera que promueva la conservación y el uso sostenible de un modo holístico y equitativo. Esos enfoques son herramientas globales que garantizan un enfoque integrado, y pueden combinarse con otras acciones como la restauración. Estos enfoques son (UNDRR, 2021):

- Gestión sostenible de tierras
- Gestión integrada de recursos hidrológicos
- Gestión integral de la zona costera
- Gestión de Áreas Protegidas
- Restauración de paisajes
- Restauración de humedales
- Agricultura y agroforestería climáticamente inteligente
- Entorno urbano azul y verde
- Infraestructura azul-verde
- Infraestructura híbrida



## IX. Conclusiones

El desarrollo y la implementación de acciones de adaptación son esenciales como respuesta para hacer frente a los impactos que el cambio climático representa para los países y su infraestructura vial.

La adaptación debe verse también como una oportunidad de mejora de las actividades económicas y de desarrollo de los grupos sociales actuales, ya que les permitirá ajustarse y adaptarse a los impactos del cambio climático y asegurar un futuro incluyente y sostenible.

El principal objetivo de la adaptación es reducir la vulnerabilidad de la infraestructura vial al cambio climático y a la variabilidad climática y, con ello, aumentar la resiliencia de los activos viales y la confiabilidad del servicio.

Los esfuerzos para la implementación de respuestas de adaptación tempranas y sólidas permitirán a los países reducir los costos de los impactos del clima. Esto implicará realizar gestiones para un aumento de las inversiones en la adaptación y la construcción de capacidades adaptativas.

Las metodologías y los casos de estudio para incorporar el cambio climático y evaluar el impacto en el medio plazo deben ser replicados para cada región en particular, ya que los resultados no pueden ser extrapolados. Se requiere de un análisis específico del clima y del cambio en el futuro de este, del lugar en donde se encuentra la vialidad, de la región o del país.

Los activos viales son muy importantes dentro de los sistemas de transportes para la movilidad de las personas y mercancías, por lo que deben diseñarse, construirse y mantenerse de acuerdo con los códigos de diseño incorporando de la mejor manera el comportamiento de las variables climáticas y los escenarios futuros del cambio climático, la magnitud y la frecuencia de los fenómenos meteorológicos extremos, con la finalidad de garantizar la operatividad de los activos viales y asegurarse de prestar el servicio según los estándares proyectados.

Por un lado, un diseño resiliente debe incorporar un fortalecimiento de la infraestructura para que el desempeño de los sistemas no sufra un deterioro significativo durante un evento extremo; y, por otro lado, el proceso de recuperación requiere el reconocimiento de la infraestructura crítica, lo que permite el funcionamiento básico del sistema. En este sentido, las redes de transporte son fundamentales para asegurar la recuperación y la conectividad en el contexto de desastres, y deben presentar un esfuerzo especial para mantenerse operativas (CEPAL, 2021).

Finalmente, es importante impulsar estrategias de adaptación de la infraestructura vial incluyentes y sostenibles, que integren acciones para la reducción de vulnerabilidad física de la infraestructura, pero también que reduzcan el impacto ambiental y promuevan la conservación ambiental, así como aspectos sociales tales como beneficios sociales que coadyuven a la reducción de la de pobreza, a través de la adaptación y la transición a economías más sostenibles y bajas en carbono.



## Bibliografía

- Banco Asiático de Desarrollo (2011), *Guidelines for Climate Proofing Investment in the Transport Sector: Road Infrastructure Projects*, Mandaluyong City, Filipinas.
- BID (Banco Interamericano de Desarrollo) (2014), *El cambio climático y el BID: creación de resiliencia y reducción de emisiones*, Oficina de Evaluación y Supervisión (OVE) [en línea] <https://publications.iadb.org/es/publicacion/16884/el-cambio-climatico-y-el-bid-creacion-de-resiliencia-y-reduccion-de-emisiones>.
- BID/CEPAL (Banco Interamericano de Desarrollo/Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2021), “Evaluación de los efectos e impactos causados por la tormenta tropical ETA y el huracán IOTA en Honduras”, *Nota Técnica*, N° IDB-TN-2168, Gobierno de la República de Honduras.
- Bello, O., L. Ortiz y J. Samaniego (2014), “La estimación de los efectos de los desastres en América Latina, 1972-2010,” *serie Medio Ambiente y Desarrollo*, N° 157, Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Bles, T. y otros (2010), *Risk Management for Roads in a Changing Climate: A Guidebook to the RIMAROCC Method*, Londres, ERA-NET ROAD Project.
- Bubeck, P. y H. Kreibich (2011), *Natural Hazards: Direct Costs and Losses due to the Disruption of Production Processes*, Potsdam, Alemania, CONHAZ Consortium, Germany Research Centre for Geosciences.
- CCCC/MFFSD (Caribbean Community Climate Change Centre/Ministry of Forestry, Fisheries and Sustainable Development) (2014), *A National Climate Change Policy, Strategy and Action Plan to Address Climate Change in Belize*, Belmopán [en línea] [https://cdn.climatepolicyradar.org/navigator/BLZ/2014/national-climate-change-policy-strategy-and-action-plan\\_ae5a3e27936278cc89018599c0b4a8f6.pdf](https://cdn.climatepolicyradar.org/navigator/BLZ/2014/national-climate-change-policy-strategy-and-action-plan_ae5a3e27936278cc89018599c0b4a8f6.pdf).
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe) (2021), “DALA huracanes Eta e Iota, Honduras”, *Evaluación de daños y pérdidas huracanes ETA e IOTA 2020, Honduras*.
- \_\_\_\_\_ (2011a), *La economía del cambio climático en Centroamérica: reporte técnico 2011* (LC/MEX/L.1016), Ciudad de México.
- \_\_\_\_\_ (2011b), *Resumen regional del impacto de la depresión tropical 12-E en Centroamérica: cuantificación de daños y pérdidas sufridos por los países de la región en el mes de octubre de 2011. Algunas reflexiones sobre la nueva “normalidad” de los desastres* (LC/MEX/L.1060), Ciudad de México.
- \_\_\_\_\_ (2010), *Evaluación de daños y pérdidas en El Salvador ocasionados por la tormenta tropical Ágata* (LC/MEX/L.982), Ciudad de México.
- \_\_\_\_\_ (2005), *Efectos en Guatemala de las lluvias torrenciales y la tormenta tropical Stan* (LC/MEX/R.985), Ciudad de México, octubre.
- CEPAL/CAC-SICA (Comisión Económica para América Latina y el Caribe/Consejo Agropecuario Centroamericano del Sistema de la Integración Centroamericana) (2020), *Análisis espacial de datos históricos y escenarios de cambio climático en México, Centroamérica, Cuba, Haití y la República Dominicana* (LC/MEX/TS.2020/43), Ciudad de México.
- \_\_\_\_\_ (2013), *Gestión integral de riesgos y seguros agropecuarios en Centroamérica y la República Dominicana: situación actual y líneas de acción potenciales* (LC/MEX/L.1122), Ciudad de México.
- CEPREDENAC/SICA (Centro de Coordinación para la Prevención de los Desastres Naturales en América Central/Sistema de la Integración Centroamericana) (2017), *Política Centroamericana para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (PCGIR)*, Centroamérica [en línea] <https://ceccsica.info/sites/default/files/docs/Politica%20Centroamericana%20de%20Gestion%20Integral%20de%20Riesgo.pdf>.
- Chinowsky, P. y A. Channing (2012), “Climate change and roads: a dynamic stressor –response model”, *Review of Development Economics*, vol. 16, N° 3 [en línea] <https://doi.org/10.1111/j.1467-9361.2012.00673.x>.
- CNCC/SEGEPLAN (Consejo Nacional de Cambio Climático/Secretaría de Planificación y Programación de la Presidencia de la República de Guatemala) (2016), *Plan de Acción Nacional de Cambio Climático*, República de Guatemala [en línea] <https://sgccc.org.gt/wp-content/uploads/2016/10/Plan-de-Accio%CC%81n-Nacional-de-Cambio-Clima%CC%81tico-ver-oct-2016-aprobado-1.pdf>.

- Cochran, I. (2009), "Climate change vulnerabilities and adaptation possibilities for transport infrastructures in France", *Climate Report*, N° 18, Arcueil, Francia, Mission Climat of the CDC Climat Department at Caisse des Dépôts.
- COMIRAN/SIECA (Consejo de Ministros de Transporte de Centroamérica/Secretaría de Integración Económica Centroamericana) (2017), *Política Marco Regional de Movilidad y Logística* [en línea] <https://www.sica.int/politicas/pmrrml>.
- COMITRAN/COMIECO/COSEFIN (Consejo de Ministros de Transporte de Centroamérica/Consejo de Ministros de Integración Económica Centroamericana/Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana) (2023), *Plan Maestro Regional de Movilidad y Logística 2035, Centroamérica* [en línea] [https://www.fundesa.org.gt/content/files/publicaciones/Plan\\_Maestro\\_Regional\\_2035\\_CARTA.pdf](https://www.fundesa.org.gt/content/files/publicaciones/Plan_Maestro_Regional_2035_CARTA.pdf).
- Eckstein, D., V. Künzel y L. Schäfer (2021), *Global Climate Risk Index 2021: Who Suffers Most From Extreme Weather Events? Weather-Related Loss Events in 2019 and 2000-2019*, Bonn, Alemania, Germanwatch.
- EM-DAT (s/f), The International Disaster Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disaster (CRED) [sitio web] [www.emdat.be](http://www.emdat.be) [fecha de consulta: febrero de 2022].
- FHWA (Federal Highway Administration) (2015), *Climate Change Adaptation Guide for Transportation Systems Management, Operations, and Maintenance*, Washington, D.C.
- \_\_\_\_\_(2012), *Climate Change & Extreme Weather Vulnerability Assessment Framework*, Washington, D. C.
- Flores Verdejo, R. y otros (2011), *Evaluación del impacto económico provocado por los fenómenos ciclónicos Nicole y Thomas en Costa Rica en el año 2010*, San José, Costa Rica, Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN)/Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG).
- Giorgi, F. (2006), "Climate change hot-spots", *Geophysical Research Letters*, vol. 33, N° 8 [en línea] <https://doi.org/10.1029/2006GL025734>.
- Gobierno de Costa Rica (2019), *Plan de Descarbonización*, Costa Rica [en línea] <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PLAN-NACIONAL-DESCARBONIZACION.pdf>.
- Gobierno de Guatemala (2013), *Ley marco para regular la reducción de la vulnerabilidad, la adaptación obligatoria ante los efectos del cambio climático y la mitigación de gases de efecto invernadero*, Decreto o 7-2013, Congreso de la República de Guatemala [en línea] [https://www.cac.int/sites/default/files/Ley\\_Marco\\_CC\\_para\\_regula\\_la\\_reducci%C3%B3n\\_de\\_la\\_vulnerabilidad%2C\\_la\\_adaptaci%C3%B3n\\_ante\\_los\\_efectos\\_del\\_CC..pdf](https://www.cac.int/sites/default/files/Ley_Marco_CC_para_regula_la_reducci%C3%B3n_de_la_vulnerabilidad%2C_la_adaptaci%C3%B3n_ante_los_efectos_del_CC..pdf).
- Government of Belize (2013), *National Climate Resilience Investment Plan*, Belmopán [en línea] [https://med.gov.bz/wp-content/uploads/2020/09/BelizeNCRIP\\_final2013.pdf](https://med.gov.bz/wp-content/uploads/2020/09/BelizeNCRIP_final2013.pdf).
- \_\_\_\_\_(2011), *National Energy Policy Framework: Towards Energy Efficiency, Sustainability and Resilience for BELIZE in the 21st Century*, Belmopán [en línea] [https://www.greenpolicyplatform.org/sites/default/files/downloads/policy-database/BELIZE\)%20National%20Energy%20Policy%20Framework\\_1.pdf](https://www.greenpolicyplatform.org/sites/default/files/downloads/policy-database/BELIZE)%20National%20Energy%20Policy%20Framework_1.pdf).
- Honduras (2014), *Ley de cambio climático, República de Honduras*, 10 de noviembre [en línea] <https://www.tsc.gob.hn/web/leyes/Ley%20de%20Cambio%20Climatico.pdf>.
- IFHV (Institute for International Law of Peace and Armed Conflict) (2020), *WorldRiskReport 2020*, Bündnis Entwicklung Hilft and Ruhr University Bochum, Alemania.
- (2018), *World Risk Report 2018* [en línea] [https://weltrisikobericht.de/wp-content/uploads/2019/03/190318\\_WRR\\_2018\\_EN\\_RZonline\\_1.pdf](https://weltrisikobericht.de/wp-content/uploads/2019/03/190318_WRR_2018_EN_RZonline_1.pdf).
- IPCC (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático) (2021), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge, Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_(2012), *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, C. B. Field y otros (eds.), Nueva York, N. Y., Cambridge University Press.
- \_\_\_\_\_(2007), *Cambio climático 2007: informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Ginebra, Suiza.
- Karmalkar, A., R. Bradley, y H. Diaz (2011), "Climate change in Central America and Mexico: regional climate model validation and climate change projections", *Climate Dynamics*, vol. 37.

- Knott, J. F. y otros (2019), "Seasonal and long-term changes to pavement life caused by rising temperatures from climate change", *Journal of Transportation Research Record*, vol. 2673, N° 6 [en línea] <https://doi.org/10.1177/0361198119844249>.
- Mallick, R. B. y otros (2014), "Development of a methodology and a tool for the assessment of vulnerability of roadways to flood-induced damage", *Journal of Flood Risk Management*, vol. 10, N° 3, septiembre.
- MARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2013), *Estrategia nacional de cambio climático, Gobierno de El Salvador* [en línea] <http://rcc.marn.gob.sv/xmlui/bitstream/handle/123456789/10/Estrategia-Nacional-de-Cambio-Climatico.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- MEA (Millennium Ecosystem Assessment) (2005), *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*, vol. 3, Washington, D.C. [en línea] <https://www.millenniumassessment.org/documents/document.356.aspx.pdf>.
- Meagher, W. y otros (2012), "Method for evaluating implications of climate change for design and performance of flexible pavements", *Transportation Research Record*, vol. 2305, N° 1 [en línea] <https://doi.org/10.3141/2305-12>.
- Mendoza Sánchez, J. F. y O. A. Marcos Palomares (2017), "Panorama internacional de la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático, Sanfandila, Querétaro", *Publicación Técnica*, N° 488, México, Instituto Mexicano del Transporte (IMT)/Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT) [en línea] <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt488.pdf>.
- Mendoza Sánchez, J. F., O. A. Marcos Palomares y H. Orantes Olvera (2019), "Marco metodológico para la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático en México", *Publicación Técnica*, N° 557, Sanfandila, Querétaro, México, Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)/Instituto Mexicano del Transporte (IMT) [en línea] <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt557.pdf>.
- Mendoza Sánchez, J. F. y otros (2017), *El clima y las carreteras en México*, Sanfandila, Querétaro, México, Instituto Mexicano del Transporte (IMT)/Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), *Publicación Técnica*, N° 498 [en línea] <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt498.pdf>.
- MEPyD (Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo) (2016), *Política Nacional de Cambio Climático. Presidencia de la República Dominicana, República Dominicana* [en línea] <https://cambioclimatico.gob.do/phocadownload/Documentos/cop25/Politica-de-cambio-climatico-RD.pdf>.
- Mesa-Arango, R. y otros (2013), *Estimating the Economic Impacts of Disruptions to Intermodal Freight Systems Traffic*, NEXTRANS Project N° 053PY03, Indiana, Estados Unidos, Purdue University.
- MiAmbiente (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente de Honduras) (2018), *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático, Gobierno de la República de Honduras: versión resumen* [en línea] <http://www.miambiente.gob.hn/media/adjuntos/pdf/DNCC/2018-05-10/16%3A35%3A53.282976%2B00%3A00/PNA.pdf>.
- MiAMBIENTE (Ministerio de Ambiente de Panamá) (s/f), *Ley marco sobre cambio climático y política nacional de cambio climático* [en línea] <https://dcc.miambiente.gob.pa/accion-climatica/> [fecha de consulta: 13 de julio de 2023].
- \_\_\_\_\_ (2020), *Guía técnica de cambio climático para proyectos de infraestructura de inversión pública, República de Panamá* [en línea] <https://dcc.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2021/05/Guia-Tecnica-de-Cambio-Climatico-2.pdf>.
- MIMARENA (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2016), *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático en la República Dominicana 2015-2030*, Presidencia de la República Dominicana.
- MINAE (Ministerio de Ambiente y Energía) (2022), *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica, 2022-2026*, San José, Costa Rica, Dirección de Cambio Climático [en línea] [https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/04/NAP\\_Documento-2022-2026\\_VC.pdf](https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/04/NAP_Documento-2022-2026_VC.pdf).
- Ministerio de Fomento de España (2013), *Necesidades de adaptación al cambio climático de la red troncal de infraestructuras de transporte en España*, Madrid, España, Agencia Europea de Medio Ambiente.
- MMARN (Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales) (2016), *Plan Nacional de Adaptación para el cambio climático en la República Dominicana 2015-2030 (PNACC RD)*, Santo Domingo, República Dominicana [en línea] <https://adaptacion.cambioclimatico.gob.do/wp-content/uploads/2022/07/Plan-Nacional-de-Adaptacion-para-el-Cambio-Climatico-en-RD-2015-2030-PNACC.pdf>.

- MOPTVDU (Ministerio de Obras Públicas, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano) (2017), *Política de Cambio Climático para el sector de la Obra Pública, Transporte, Vivienda y Desarrollo Urbano 2018-2036*, El Salvador [en línea] [https://dacger.mop.gob.sv/wp-content/uploads/download-manager-files/Politica\\_CC\\_MOPTVDU\\_100818.pdf](https://dacger.mop.gob.sv/wp-content/uploads/download-manager-files/Politica_CC_MOPTVDU_100818.pdf).
- Nicaragua (2019), “Decreto para Establecer la Política Nacional de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático y de Creación del Sistema Nacional de Respuesta al Cambio Climático”, Nicaragua, 11 de febrero [en línea] <https://faolex.fao.org/docs/pdf/nic190753.pdf>.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) (2008), *Economic Aspects of Adaptation to Climate Change: Costs, Benefits and Policy Instruments* [en línea] [https://read.oecd-ilibrary.org/environment/economic-aspects-of-adaptation-to-climate-change\\_9789264046214-en#page5](https://read.oecd-ilibrary.org/environment/economic-aspects-of-adaptation-to-climate-change_9789264046214-en#page5).
- Olivares, J. y otros (2023), “Proyecto RIDASICC: Información climática disponible para los países de COSEFIN/SICA y recomendación para su uso en la inversión pública”, Ciudad de México, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en preparación.
- Panamá (2007), *Política Nacional de Cambio Climático, República de Panamá* [en línea] <https://transparencia-climatica.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2021/10/09-Politica-Nacional-de-Cambio-Climatico-2007.pdf>.
- Pascale, S. y otros (2021), “Natural variability vs forced signal in the 2015-2019 Central American drought”, *Climatic Change*, vol. 168, N° 16 [en línea] <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03228-4>.
- PNUMA (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente) (2023), “NAP Panamá: El Plan Nacional de Adaptación de Panamá marcará la hoja de ruta ambiental del país”, comunicado de prensa [en línea] <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/comunicado-de-prensa/nap-panama-el-plan-nacional-de-adaptacion-de-panama#:~:text=El%20proyecto%20NAP%20tiene%20como,seguridad%20alimentaria%2C%20infraestructura%20y%20salud> [fecha de consulta: 13 de julio de 2023].
- Pyatkova, K. y otros (2015), “Flood impacts on road transportation using microscopic traffic modelling technique”, *Simulating Urban Traffic Scenarios, Lecture Notes in Mobility*, M. Behrisch y M. Weber (eds.), Cham, Suiza, Springer.
- Scheraga, J. y A. E. Grambsch (1998), “Risks, opportunities, and adaptation to climate change”, *Climate Research*, vol. 11, N° 1.
- SERNA (Secretaría de Recursos Naturales y Ambiente de Honduras) (2010), *Estrategia Nacional de Cambio Climático de Honduras*, Comité Técnico Interinstitucional del Cambio Climático [en línea] <https://icf.gob.hn/wp-content/uploads/2022/02/2010-Estrategia-Nacional-de-Cambio-Climatico.pdf>.
- Shamsabadi, S. y otros (2014), “Deterioration forecasting in flexible pavements due to floods and snow storms”, *EWSHM – 7th European Workshop on Structural Health Monitoring*, IFFSTTAR, Inria, Nantes, Francia, Université de Nantes [en línea] <https://hal.inria.fr/hal-01021211/document>.
- Stern, N. (2006), *Stern Review on the Economics of Climate Change*, Londres, Office of Climate Change, UK Government.
- UNDRR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres) (s/f), *Desinventar Sendai* [sitio web] <https://www.desinventar.net/index.html> [fecha de consulta: 9 de diciembre de 2021].
- \_\_\_\_ (2021), *Nature-Based Solutions for Disaster Risk Reduction*.
- \_\_\_\_ (2019), *Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction*, Ginebra, Suiza.
- Vega R. y J. Lennox (2023), “Modelo conceptual y metodología general”, Proyecto RIDASICC, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en prensa.
- Yang, Q. y J. Ning (2011), “The environmental influence of asphalt pavement and countermeasures”, *Energy Procedia*, vol. 5, diciembre [en línea] <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.03.418>.

## Anexo



| Áreas de decisión sensibles al clima   | Decisiones específicas  | Descripción   | Descripción acerca de ¿Cómo los estresantes climáticos afectan en las decisiones? (ej., sensibilidad climática de la decisión)   | Marco temporal de la decisión | Punto de decisión único | Sensibilidad a factores estresantes del cambio climático |                                   |                             |  |                             |                               |                              |   |                    |                      |                               |        |                    |
|--|---|---|--|-------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|--------------------|----------------------|-------------------------------|--------|--------------------|
|  |   |   |  |                               |                         | Incremento de temperatura promedio                       | Incremento en precipitación anual | Aumento en el nivel del mar | Cambio en ciclos de congelamiento/deshielo | Cambio en el manto de nieve | Temperaturas extremas (calor) | Temperaturas extremas (frío) | Precipitación extrema (cantidad/intensidad) | Marejada ciclónica | Incendios forestales | Tormentas de polvo/volcaneras | Viento | Efectos ecológicos |
| 3. Presupuesto para operaciones, mantenimiento y administración de emergencias | Determinar las necesidades y los niveles de financiamiento adecuados a partir de bases anuales y plurianuales | Las agencias operativas y de manejo de emergencias son usualmente financiadas en bases anuales. Los niveles de financiamiento son un factor decisivo en las capacidades y funcionamiento general del programa.                                  | Eventos extremos y cambios climáticos a largo plazo pueden afectar los requerimientos de recursos. Por ejemplo, incrementos en la temperatura del aire pueden incrementar los costos de mantenimiento de pavimentos anualmente, o cambios en los ciclos de congelamiento/deshielo pueden incrementar los baches. Cambios en el clima invernal y el aumento de incertidumbre climática también puede que afecten los presupuestos. El clima futuro puede requerir diferente disposición de recursos y fórmulas de planeación de presupuestos a las que se necesitan para el clima actual. | Anual                         | Sí                      | X  | X                                 |                             | X  | X                           | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             | X      | X                  |
| 4. Establecer objetivos realistas  | Establecer objetivos regionales operativos y de manejo de emergencias para el programa                        | La planeación efectiva de operaciones y manejo de emergencias requiere una clara articulación de los objetivos de operación regionales. Estos objetivos definen las estrategias de respuesta y la administración basada en desempeño requerida. | Los objetivos y las medidas de desempeño relacionadas a respuestas de emergencia o al regreso a niveles de servicio pueden ser afectadas por la frecuencia y severidad de los eventos extremos. Medidas adicionales en resiliencia pueden ser requeridas para monitorear y manejar el desempeño. Adicionalmente, puede que los cambios en los patrones climáticos provoquen que el seleccionar medidas de desempeño antiguas sea algo poco realista. El planteamiento de objetivos realistas deberá ser aterrizado en el entendimiento de condiciones climáticas futuras.                | Anual                         | Sí                      | X  | X                                 | X                           | X  | X                           | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             | X      | X                  |

| Áreas de decisión sensibles al clima                       | Decisiones específicas   | Descripción   | Descripción acerca de ¿Cómo los estresantes climáticos afectan en las decisiones? (ej., sensibilidad climática de la decisión)   | Marco temporal de la decisión                    | Punto de decisión único | Sensibilidad a factores estresantes del cambio climático |                                   |                             |  |                             |                               |                              |   |                    |                      |                               |        |                    |
|--|--|---|--|--|-------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|--------------------|----------------------|-------------------------------|--------|--------------------|
|  |  |   |  |  |                         | Incremento de temperatura promedio                       | Incremento en precipitación anual | Aumento en el nivel del mar | Cambio en ciclos de congelamiento/deshielo | Cambio en el manto de nieve | Temperaturas extremas (calor) | Temperaturas extremas (frío) | Precipitación extrema (cantidad/intensidad) | Marejada ciclónica | Incendios forestales | Tormentas de polvo/tolvaneras | Viento | Efectos ecológicos |
| 5. Evaluando tecnología futura y requerimientos de sistema | Determinar el tipo de equipos de monitoreo y fuentes, necesidades de comunicación, criterios de ubicación y conveniencia a las condiciones | Monitorear condiciones de campo es vital para realizar operaciones y manejo de emergencias de forma efectiva. El equipo de monitoreo y las fuentes de datos disponibles determinan de forma importante la capacidad de respuesta. Sensibles al costo, estas decisiones proveen a las agencias de la conciencia situacional necesaria.   | El equipo de monitoreo (ej., cámaras, detectores de bucle) es sensible ante condiciones climáticas extremas e inundaciones. Pueden sobrecalentarse, congelarse, o corroerse por infiltración de agua. El cambio climático puede requerir a las agencias el monitoreo adicional de estresantes/condiciones para entender la manera en la que este pueda afectar a la agencia en el futuro. El monitoreo temprano de estresantes del cambio climático puede mejorar la habilidad de la agencia a tomar decisiones a largo plazo.   | Corto plazo/<br>mediano<br>plazo/<br>largo plazo | Sí                      | X  | X                                 | X                           | X  | X                           | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             | X      | X                  |
|  |  | Fuertemente relacionada al tipo de equipo, se encuentra la correcta "ubicación" del mismo, para asegurar una cobertura correcta en el sistema. Mientras que parte de la presión derivada de la decisión es aliviada a través de nuevos recursos de datos disponibles, como lo son sondeos y datos del sector privado, otros sistemas de monitoreo como lo son las Estaciones de Monitoreo Ambiental (E.S.S en inglés) son afectadas en gran parte por el criterio de ubicación. | Ubicar equipos en áreas que serán impactadas por el aumento en el nivel del mar, daño ecológico, inundaciones, nevadas, u otros eventos climáticos que puedan dañar la infraestructura. El cambio climático también podría afectar la decisión del lugar en donde las agencias colocan sus nuevos equipos. Riesgos de inundación durante la vida del activo podrían ser un criterio usado para elegir la ubicación de los equipos a futuro. Adicionalmente, las agencias no pueden costear el monitoreo de todas las áreas u los activos que serán impactados por el cambio climático. Se necesitará desarrollar métodos de priorización y flexibilizar las fuentes de información de datos móviles (ej., reportes ciudadanos, reportes de patrullaje de nieve, sondas móviles). | Largo plazo                                      | Sí                      |  |                                   | X                           |  | X                           | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             | X      | X                  |

| Áreas de decisión sensibles al clima                       | Decisiones específicas   | Descripción  | Descripción acerca de ¿Cómo los estresantes climáticos afectan en las decisiones? (ej., sensibilidad climática de la decisión)   | Marco temporal de la decisión | Punto de decisión único | Sensibilidad a factores estresantes del cambio climático |                                   |                             |  |                             |                               |                              |   |                    |                      |                               |        |                    |   |   |
|--|--|--|--|-------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|--------------------|----------------------|-------------------------------|--------|--------------------|---|---|
|  |  |  |  |                               |                         | Incremento de temperatura promedio                       | Incremento en precipitación anual | Aumento en el nivel del mar | Cambio en ciclos de congelamiento/deshielo | Cambio en el manto de nieve | Temperaturas extremas (calor) | Temperaturas extremas (frío) | Precipitación extrema (cantidad/intensidad) | Marejada ciclónica | Incendios forestales | Tormentas de polvo/volváneras | Viento | Efectos ecológicos |   |   |
| 5. Evaluando tecnología futura y requerimientos de sistema | Determinar el tipo de equipos de monitoreo y fuentes, necesidades de comunicación, criterios de ubicación y conveniencia a las condiciones | Establecer energía y comunicación adecuadas, especialmente con redundancia en el sistema, es crítico para prevenir cortes en los sistemas de control y de campo. La susceptibilidad de la infraestructura eléctrica y de comunicaciones a condiciones puede limitar la capacidad de respuesta operativa.   | Las líneas eléctricas y de comunicación son sensibles a la formación de hielo, inundaciones, y temperaturas extremas (ej., apagones continuos durante ondas de calor). Los sistemas de generación de energía de respaldo también pueden ser dañados por inundaciones. Tormentas pueden derribar árboles que dañen las líneas eléctricas y de comunicación. Las agencias necesitan considerar si los requerimientos de comunicación y energía actuales son resilientes al cambio climático. La nieve puede cubrir o bloquear comunicaciones (ej., semáforos y cámaras). | Largo plazo                   | No                      |  |                                   |                             |  |                             | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             |        |                    | X |   |
| 6. Determinar necesidades de mantenimiento futuras         | Determinar el nivel requerido de precisión para los protocolos de inspección   | Los protocolos de inspección son una parte vital de la administración de activos. Para agencias de operación, estos incluyen el espectro completo de activos de transporte, desde estructuras hasta redes de comunicación. Debido a las restricciones de recursos, las agencias necesitan desarrollar un protocolo designado para priorizar los aspectos clave de los activos que serán manejados. | Los estresantes climáticos pueden llevar a un incremento en el deterioro de los activos, requiriendo inspecciones más frecuentes. Sin embargo, las inspecciones son muy costosas y consumen mucho tiempo. El conocimiento de tendencias climáticas puede permitir un enfoque del nivel de precisión y frecuencia de varios tipos de inspecciones.  | Largo plazo                   | No                      | X  | X                                 | X                           | X  | X                           | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             | X      | X                  | X | X |
|  | Determinar los métodos y las necesidades de rehabilitación de pavimentos   | Varias decisiones de rehabilitación de pavimentos se realizan de forma estacional, variando desde reemplazos de profundidad completa, hasta nivelación y revestimiento. Decisiones pertinentes al costo del ciclo de vida de dichos tratamientos, el tiempo de los mismos, y los materiales usados son temas que le conciernen a los tomadores de decisiones.                                      | Los pavimentos están diseñados para soportar un rango particular de temperaturas. Altas temperaturas pueden causar roderas, mientras que condiciones de frío (y congelamiento) incrementan los baches. Esto puede llevar a la necesidad de cambiar la mezcla del pavimento, o rehabilitar los caminos con mayor antelación.  | Largo plazo                   | Sí                      | X  | X                                 | X                           | X  | X                           | X                             | X                            | X   |                    | X                    |                               |        |                    |   | X |

| Áreas de decisión sensibles al clima                      | Decisiones específicas   | Descripción   | Descripción acerca de ¿Cómo los estresantes climáticos afectan en las decisiones? (ej., sensibilidad climática de la decisión)  | Marco temporal de la decisión | Punto de decisión único            | Sensibilidad a factores estresantes del cambio climático |                                   |                             |  |                             |                               |                              |   |                    |                      |                               |        |                    |
|---|--|---|---|-------------------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|--------------------|----------------------|-------------------------------|--------|--------------------|
|   |  |   |   |                               |                                    | Incremento de temperatura promedio                       | Incremento en precipitación anual | Aumento en el nivel del mar | Cambio en ciclos de congelamiento/deshielo | Cambio en el manto de nieve | Temperaturas extremas (calor) | Temperaturas extremas (frío) | Precipitación extrema (cantidad/intensidad) | Marejada ciclónica | Incendios forestales | Tormentas de polvo/tolvaneras | Viento | Efectos ecológicos |
| 6. Determinar necesidades de mantenimiento futuras        | Determinar los métodos y las necesidades de rehabilitación de puentes                | Los puentes son cuellos de botella naturales y puntos potenciales de falla. Las agencias, justificadamente, invierten en programas de manejo de puentes que abarcan mantenimiento preventivo y rehabilitación.  | Los puentes con juntas y partes móviles son más susceptibles a presentar daños debido su sensibilidad a temperatura e infiltración. Los aumentos en precipitación e inundaciones también pueden incrementar la socavación del puente, o conducir a un lavado y depósito de escombros. Los cambios en el clima pueden requerir enfoques diversos o más próximos.   | Largo plazo                   | Sí: mantenimiento<br>No: monitoreo |  |                                   | X                           | X  | X                           | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             | X      | X                  |
| 7. Modificar prácticas de mantenimiento y su acercamiento | Determinar marcos temporales y líneas de tiempo para la construcción y mantenimiento | Los trabajos de construcción y mantenimiento usualmente se llevan a cabo bajo condiciones climáticas muy específicas. La cantidad y duración de estas ventanas de oportunidad para realizar los trabajos pueden acortarse o alargarse dependiendo de las tendencias climáticas regionales. Esto también podría impactar en contratos de construcción y de personal. | El incremento en la frecuencia de precipitación (especialmente en precipitación extrema), y el aumento en días calurosos puede que reducir la seguridad de los trabajadores y resulte en retrasos en la construcción. La baja de estos eventos podría acelerar los periodos de construcción. Ciertos elementos de la construcción (ej., colocación de concreto, pintar los caminos) solo pueden ser realizados durante un período de un rango estrecho de condiciones climáticas. Los cambios en el clima impactarán la duración de la temporada de construcción y los contratos con las compañías constructoras. | Mediano plazo                 | No                                 | X  |                                   |                             | X  |                             | X                             | X                            | X   |                    | X                    | X                             | X      |                    |

| Áreas de decisión sensibles al clima                      | Decisiones específicas  | Descripción   | Descripción acerca de ¿Cómo los estresantes climáticos afectan en las decisiones? (ej., sensibilidad climática de la decisión)   | Marco temporal de la decisión | Punto de decisión único | Sensibilidad a factores estresantes del cambio climático |                                   |                             |  |                             |                               |                              |   |                    |                      |                               |        |                    |
|---|---|---|--|-------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|--------------------|----------------------|-------------------------------|--------|--------------------|
|   |   |   |  |                               |                         | Incremento de temperatura promedio                       | Incremento en precipitación anual | Aumento en el nivel del mar | Cambio en ciclos de congelamiento/deshielo | Cambio en el manto de nieve | Temperaturas extremas (calor) | Temperaturas extremas (frío) | Precipitación extrema (cantidad/intensidad) | Marejada ciclónica | Incendios forestales | Tormentas de polvo/volcaneras | Viento | Efectos ecológicos |
| 7. Modificar prácticas de mantenimiento y su acercamiento | Desarrollar un enfoque para el mantenimiento general en derecho de vía, incluyendo control de la vegetación | Las decisiones que involucren el mantenimiento general del derecho de vía, como lo son el control de vegetación, drenajes y alcantarillas se incluyen en esta área. Aunque suelen postergarse por limitaciones de recursos, la toma de decisiones efectiva en esa área puede ser más crítica a la capacidad operativa de lo anticipado. | Control de vegetación:<br>Incremento en la lluvia (en algunas partes del país) aunado al incremento en temperaturas puede ocasionar una escalada en el crecimiento y muerte de vegetación. Este combustible seco se presenta como un riesgo de incendio salvaje. Algunas áreas puede que comiencen a experimentar sequías y necesiten plantar vegetación más tolerante a las mismas.<br>Drenaje y alcantarillado:<br>Prosiguiendo a los incendios salvajes, las tormentas podrán incrementar el flujo de escombros, lo que causaría bloqueos o inundaciones en alcantarillas y sistemas de drenaje. Fuertes tormentas podrían rebasar drenajes pequeños. En entornos costeros, el incremento en el nivel del mar podría sobrecargar los sistemas de drenaje. | Anual                         | No                      | X  | X                                 |                             | X  | X                           | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             | X      | X                  |
|   | Determinar la cantidad, costo y tiempo para la obtención de materiales                                      | Las agencias gastan una porción significativa de sus presupuestos en materiales. Decisiones de obtención que van desde cuestiones de tiempo, tipo de material, y duración del contrato afectan en gran medida el costo total y el tiempo real.  | Si los suministros son escasos durante temporadas particularmente malas, será difícil obtener los materiales necesarios para una respuesta. Frecuentemente, después de un evento climático extremo (ej., tormenta de nieve o huracán), los suministros pueden agotarse y las líneas de distribución pueden ser interrumpidas. De igual forma, si los contratos de respuesta están muy limitados, las agencias puede que no estén preparadas para responder a eventos climáticos extremos, tardíos en la estación (ej., inundaciones, calor extremo, nieve).  | Estacional                    | Sí                      |  |                                   |                             |  |                             |                               | X                            | X   | X                  | X                    | X                             |        |                    |

| Áreas de decisión sensibles al clima      | Decisiones específicas   | Descripción  | Descripción acerca de ¿Cómo los estresantes climáticos afectan en las decisiones? (ej., sensibilidad climática de la decisión)   | Marco temporal de la decisión | Punto de decisión único | Sensibilidad a factores estresantes del cambio climático |                                   |                             |  |                             |                               |                              |   |                    |                      |                               |        |                    |
|---|--|--|--|-------------------------------|-------------------------|--|-----------------------------------|-----------------------------|--|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|---|--------------------|----------------------|-------------------------------|--------|--------------------|
|   |  |  |  |                               |                         | Incremento de temperatura promedio                       | Incremento en precipitación anual | Aumento en el nivel del mar | Cambio en ciclos de congelamiento/deshielo | Cambio en el manto de nieve | Temperaturas extremas (calor) | Temperaturas extremas (frío) | Precipitación extrema (cantidad/intensidad) | Marejada ciclónica | Incendios forestales | Tormentas de polvo/tolvaneras | Viento | Efectos ecológicos |
| 8. Protección de activos e instalaciones  | Desarrollar criterios para determinar la ubicación de instalaciones y estrategias de protección de activos | Decisiones y técnicas para reducir el daño por inundaciones a sistemas de servicios esenciales y equipo.   | Cuando se ubiquen nuevas instalaciones, las agencias debieran considerar los impactos del cambio climático en la localización (ej., aumento en el nivel del mar, inundaciones).  | Largo plazo                   | Sí                      |  | X                                 | X                           | X  | X                           |                               |                              | X   | X                  | X                    |                               | X      | X                  |
| 9. Mantenimiento de movilidad y seguridad | Planeación para mantenimiento del tráfico  | El mantenimiento del tráfico toma en cuenta el desarrollar un método para mantener y restaurar movilidad y accesibilidad en la región. Esto puede involucrar desvíos señalizados, comunicados, manejo de carriles, etc.  | Las inundaciones y otros eventos climáticos extremos pueden causar interrupciones en el tráfico a largo plazo. Un plan de mantenimiento del tráfico necesita ser desarrollado. En algunos casos, esto puede requerir una cantidad significativa de desviaciones y comunicación de gran alcance para apoyar a una adecuada información de tránsito. | Estacional                    | No                      |  |                                   | X                           |  | X                           |                               |                              | X   | X                  | X                    | X                             | X      | X                  |
|   | Determinar la mezcla de estrategias operativas para tratar con el incremento en la demanda                 | Las agencias operativas están orientadas a tratar problemas de confiabilidad y, generalmente, tienen una buena idea de las relaciones de oferta-demanda en sus sistemas. En casos de emergencia y condiciones de clima adversas, el cambio de confiabilidad a resiliencia es requerido para controlar el aumento en la demanda. Esto requiere volver a tratar el enfoque, para implementar estrategias operativas. | Los cambios en la frecuencia de eventos climáticos a corto alcance pueden influir en la demanda de tráfico (ej., eventos de precipitación, conducción adicional en días de calor intenso) y, a su vez, requieren respuestas operacionales variadas.  | Inmediato                     | No                      |  |                                   |                             |  | X                           | X                             | X                            | X   | X                  | X                    | X                             | X      |                    |

Fuente: Elaboración propia.

El proyecto RIDASICC tiene como objetivo contribuir a la integración de la reducción de riesgos de desastres (RRD) y la adaptación sostenible e incluyente al cambio climático (ASICC) en los proyectos de inversión pública, conservando y mejorando los servicios que brindan a la población de los países miembros del COSEFIN/SICA. La iniciativa es coordinada por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) y la Secretaría Ejecutiva del Consejo de Ministros de Hacienda o Finanzas de Centroamérica, Panamá y República Dominicana (COSEFIN), con la estrecha participación de los siete ministerios de hacienda o finanzas y tres ministerios o secretarías de planificación responsables de los sistemas nacionales de inversión pública (SNIP) de dichos países y otras instituciones socias nacionales y regionales como el Consejo de Ministros de Transporte (COMITRAN) del Sistema de la Integración Centroamericana (SICA), contando con el apoyo financiero de la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE).

<https://www.cepal.org/es/ridasicc>



**RIDASICC**

Reducción de riesgos de desastres y adaptación sostenible e incluyente al cambio climático en la inversión pública.

**C E P A L**

Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL)  
Economic Commission for Latin America and the Caribbean (ECLAC)  
[www.cepal.org](http://www.cepal.org)