



---

---

# **Aproximación Geoespacial para la Adaptación al Cambio Climático de la Infraestructura Carretera en México**

Luz Angélica Gradilla Hernández  
Juan Fernando Mendoza Sánchez  
Héctor Orantes Olvera  
Omar Alejandro Marcos Palomares

**Publicación Técnica No. 523  
Sanfandila, Qro, 2018**



---

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

**Aproximación Geoespacial para la Adaptación al  
Cambio Climático de la Infraestructura Carretera  
en México**

**Publicación Técnica No. 523**  
**Sanfandila, Qro, 2018**

---



Esta investigación fue realizada por la Dra. Luz Angélica Gradilla Hernández, de la Unidad de Sistemas de Información Geoespacial (USIG); el M. en C. Juan Fernando Mendoza Sánchez, los Ingenieros Omar Alejandro Marcos Palomares y Héctor Orantes Olvera, investigadores de la Coordinación de Infraestructura del Instituto Mexicano del Transporte (IMT).

Este trabajo es el producto final del proyecto de investigación interna MI 03/17 “Análisis geoespacial de la infraestructura carretera ante el cambio climático”.

Se agradece al Ing. Roberto Aguerrebere Salido, Director General del IMT, por su apoyo y valiosos comentarios a la investigación.

# Contenido

---

Índice de tablas	iii
Índice de figuras	iv
Sinopsis	viii
Abstract	ix
Resumen Ejecutivo	x
Introducción	1
Capítulo 1. Antecedentes	5
Capítulo 2. Introducción al análisis geoespacial de la infraestructura carretera ante el cambio climático	17
Capítulo 3. Análisis geoespacial de la infraestructura carretera ante el cambio climático	27
Conclusiones	81
Bibliografía	83
Anexos	87

## Índice de tablas

---

Tabla 3.1 Niveles de prioridad de fenómenos asociados al cambio climático para la adaptación de la infraestructura carretera en México.....	27
Tabla 3.2 Longitud expuesta de carreteras al peligro de inundación con nivel muy alto, por entidad federativa .....	52
Tabla 3.3. Número de puentes expuestos al peligro de inundación con nivel muy alto, por entidad federativa .....	53
Tabla 3.4 Longitud expuesta de carreteras a ondas de calor con nivel muy alto, por entidad federativa .....	55
Tabla 3.5 Longitud expuesta de carreteras al pronóstico de aumento del nivel del mar de dos metros, por entidad federativa .....	59
Tabla 3.6. Número de puentes expuesto al pronóstico de aumento del nivel del mar de dos metros. por entidad federativa .....	60
Tabla 3.7 Longitud expuesta de carreteras al pronóstico de aumento del nivel del mar de cinco metros, por entidad federativa .....	62
Tabla 3.8. Número de puentes expuesto al pronóstico de aumento del nivel del mar de cinco metros, por entidad federativa .....	63

## Índice de figuras

---

Figura 1.1. Adaptación al cambio climático como un proceso de gestión integral iterativa.....	7
Figura 1.2. Enfoque de la gestión adaptativa .....	8
Figura 1.3. Enfoque para la adaptación de arriba hacia abajo .....	9
Figura 1.4. Enfoque para la adaptación de abajo hacia arriba .....	10
Figura 1.5. Proceso para la selección de sitios de riesgo .....	12
Figura 1.6. Formato para el registro y ejemplo de sitio de riesgo.....	13
Figura 1.7. Registro de riesgos y su representación geoespacial en Noruega .....	14
Figura 1.8. Superposición de capas de información referenciada geográficamente para identificación de sitios para la adaptación .....	15
Figura 2.1. Marco para la toma de decisiones UKCIP.....	19
Figura 2.2. Diagrama esquemático de la representación de los aspectos de la vulnerabilidad .....	22
Figura 2.3. Mapa de exposición .....	23
Figura 2.4. Mapas de exposición (arriba) y sensibilidad (abajo).....	23
Figura 2.5. Mapa de capacidad adaptativa .....	24
Figura 2.6. Mapa de vulnerabilidad .....	24
Figura 2.7. Proceso para la determinación de mapas así como el análisis geoespacial del cambio climático y la infraestructura carretera .....	25
Figura 3.1 Mapa de exposición a lluvias intensas en México .....	29
Figura 3.2 Mapa de exposición a inundaciones en México .....	30
Figura 3.3 Mapa de exposición a marejadas en México .....	31



---

Figura 3.4 Mapa de exposición a deslizamientos en México .....	32
Figura 3.5 Mapa de exposición por aluviones en México .....	33
Figura 3.6 Mapa de exposición por avenidas torrenciales en México .....	34
Figura 3.7 Mapa de exposición a vendavales en México .....	35
Figura 3.8 Mapa de exposición a granizadas en México.....	36
Figura 3.9 Mapa de exposición debido a las ondas frías en México .....	37
Figura 3.10 Mapa de exposición debido a las heladas en México .....	38
Figura 3.11 Mapa de exposición debido a las nevadas en México .....	39
Figura 3.12 Mapa de exposición debido a las neblinas en México.....	40
Figura 3.13 Mapa de exposición debido a las tempestades en México .....	41
Figura 3.14 Mapa de exposición debido a sequías en México .....	42
Figura 3.15 Mapa de exposición debido a incendios en México .....	43
Figura 3.16 Mapa de exposición de México al Cambio Climático .....	44
Figura 3.17 Mapa del impacto económico por aluviones .....	46
Figura 3.18 Mapa del impacto económico por ciclones tropicales .....	46
Figura 3.19 Mapa del impacto económico por deslizamientos.....	47
Figura 3.20 Mapa del impacto económico por granizadas .....	47
Figura 3.21 Mapa del impacto económico por huracanes.....	48
Figura 3.22 Mapa del impacto económico por inundaciones .....	48
Figura 3.23 Mapa del impacto económico por lluvias.....	49
Figura 3.24 Mapa del impacto económico por marejadas.....	49
Figura 3.25 Mapa del impacto económico por sequía.....	50
Figura 3.26 Mapa del impacto económico por fenómenos hidrometeorológicos...	50
Figura 3.27 Mapa de peligro de inundación en la red de carreteras en México ....	52

---

Figura 3.28 Mapa de peligro por ondas de calor en la red de carreteras en México .....	54
Figura 3.29 Escenario de aumento del nivel de mar de dos metros en el Golfo de México.....	58
Figura 3.30 Escenario de aumento del nivel de mar de dos metros en el Sureste de México.....	58
Figura 3.31 Escenario de aumento del nivel de mar de dos metros en el Noroeste de México.....	59
Figura 3.32 Escenario de aumento del nivel de mar de cinco metros en el Golfo de México.....	61
Figura 3.33 Escenario de aumento del nivel de mar de cinco metros en el Sureste de México.....	61
Figura 3.34 Escenario de aumento del nivel de mar de cinco metros en el Noroeste de México.....	62
Figura 3.35 Escenario RCP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio.....	64
Figura 3.36 Escenario CP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura promedio.....	65
Figura 3.37 Escenario CP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura mínima promedio.....	65
Figura 3.38 Escenario CP 4.5, futuro cercano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio.....	66
Figura 3.39 Escenario RCP 4.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura máxima promedio.....	67
Figura 3.40 Escenario RCP 4.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura promedio.....	67
Figura 3.41 Escenario RCP 4.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura mínima promedio.....	68
Figura 3.42 Escenario CP 4.5, futuro lejano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio.....	69
Figura 3.43 Escenario RCP 6.0, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio.....	70

---

Figura 3.44 Escenario CP 6.0, futuro cercano, cambio anual, temperatura promedio. ....	70
Figura 3.45 Escenario CP 6.0, futuro cercano, cambio anual, temperatura mínima promedio. ....	71
Figura 3.46 Escenario CP 6.0, futuro cercano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio. ....	72
Figura 3.47 Escenario RCP 6.0, futuro lejano, cambio anual, temperatura máxima promedio. ....	73
Figura 3.48 Escenario RCP 6.0, futuro lejano, cambio anual, temperatura promedio. ....	73
Figura 3.49 Escenario RCP 6.0, futuro lejano, cambio anual, temperatura mínima promedio. ....	74
Figura 3.50 Escenario CP 6.0, futuro lejano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio. ....	75
Figura 3.51 Escenario RCP 8.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio. ....	76
Figura 3.52 Escenario CP 8.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura promedio. ....	76
Figura 3.53 Escenario CP 8.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura mínima promedio. ....	77
Figura 3.54 Escenario RCP 8.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura máxima promedio. ....	78
Figura 3.55 Escenario RCP 8.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura promedio. ....	78
Figura 3.56 Escenario RCP 8.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura mínima promedio. ....	79

## **Sinopsis**

---

En los últimos años, la infraestructura carretera en México ha sido severamente impactada por diversos fenómenos asociados al cambio climático; los cuales han representado grandes inversiones para restaurar y reparar los daños, y restablecer los servicios.

Los esfuerzos para adaptar la infraestructura carretera al cambio climático han comenzado; pero al ser un país grande y diverso en climas, es necesario dirigir las acciones adecuadamente; por lo que se decidió realizar un análisis geoespacial del cambio climático y la red de carreteras.

El análisis geoespacial permitió modelar -a través de capas de información geográfica- los impactos del clima en la red carretera, construir diversos mapas de exposición y lograr identificar los sitios de riesgo, donde la integridad y la operación de la red pudiera estar comprometida.

Los mapas permitieron identificar las zonas más vulnerables al cambio climático, y cuantificar los kilómetros de carreteras y el número de puentes expuestos a los peligros y amenazas actuales, así como a las proyecciones climáticas futuras.

La identificación de riesgos permitirá a los tomadores de decisiones establecer las estrategias más adecuadas para atender las zonas y activos más vulnerables al cambio climático.

# Abstract

---

In recent years, the road infrastructure in Mexico has been severely impacted by various phenomena associated with climate change, which have represented large investments to restore and repair the damage and re-establish services.

Efforts to adapt road infrastructure to climate change have begun, but as it is a large and diverse country in climates, it is necessary to direct actions properly which is why, it was decided to conduct a geospatial analysis of climate change and the road network.

The geospatial analysis allowed us to model, through layers of geographic information, the impacts of climate on the road network, building various exposure maps, allowing the identification of risk sites, where the integrity and operation of the network may be in danger.

The maps made it possible to identify the most vulnerable areas to climate change, and quantify the kilometers of roads and the number of exposed bridges, to current hazards and threats, as well as to future climate projections.

The identification of risks will allow decision makers to establish the most appropriate strategies to address the areas and assets most vulnerable to climate change.

## Resumen ejecutivo

---

Esta investigación se centró en establecer una aproximación geoespacial en el proceso continuo de adaptación al cambio climático, en este caso de la infraestructura carretera en México. La adaptación al cambio climático significa tomar medidas para aumentar la resiliencia y minimizar los costos generados por los impactos de fenómenos meteorológicos extremos.

En primera instancia se destacan algunos de los enfoques, metodologías y marcos para la adaptación al cambio climático y la gestión de riesgos; dentro de las cuales, algunas investigaciones y metodologías resaltan el papel de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para los análisis geoespaciales requeridos para generar mapas de vulnerabilidad, que permitan identificar puntos críticos de la red carretera, para dónde dirigir los recursos para la adaptación. El proceso de adaptación al cambio climático es iterativo, por lo que dichos análisis geoespaciales también deben realizarse de manera continua.

Comprender los patrones espaciales de los impactos del cambio climático en la infraestructura carretera es necesario no solo para identificar activos críticos asociados al cambio climático, sino también para ayudar a desarrollar medidas de adaptación en todos los niveles geográficos.

En esta investigación se realizaron también algunos ejemplos sobre el análisis geoespacial con información disponible para el sector transporte, los que permiten sentar las bases para el análisis geoespacial de la red de carreteras del país ante el cambio climático; de tal manera que sea identificada la infraestructura carretera que podría estar expuesta a los diferentes fenómenos asociados al cambio climático y genera riesgos para la integridad y operación de la red de carreteras.

El mapeo de impactos es usado comúnmente para la evaluación del riesgo climático. El enfoque implica el uso directo de datos climáticos o la integración de datos de escenarios climáticos en modelos basados en procesos (hidrológicos, por ejemplo) para generar mapas de áreas con probabilidad de recibir impactos climáticos extremos, o el uso de información histórica para construir mapas de exposición a los diferentes fenómenos asociados al cambio climático.

Entre los mapas generados están aquellos basados en registros pasados para determinar zonas de peligro ante las diferentes amenazas; tanto por el número de eventos, como por las implicaciones económicas. Se elaboraron mapas de exposición -del país- por lluvias, inundaciones, deslizamientos -entre otros-

mediante los registros de DesInventar (Sistema de Inventario de Desastres<sup>1</sup>). También se generaron mapas de exposición con los registros de desastres naturales y las aportaciones económicas del FONDEN (Fondo de Desastres Naturales).

Las modelaciones espaciales permiten evaluar impactos del cambio climático; por ejemplo, el riesgo de inundación. De esta manera, el uso de SIG permite identificar las zonas potenciales que podrían sufrir de algún evento relacionado con inundaciones o algún otro efecto del cambio climático que pudiera ser representado en un SIG.

Estas modelaciones, al superponerse con información georreferenciada de la infraestructura carretera, permitirían identificar la cantidad de kilómetros que se encuentran en riesgo a las inundaciones u otro fenómeno climático.

De esta forma, se utilizaron algunos de los índices de peligro del CENAPRED (Centro Nacional de Prevención de Desastres) para identificar aquellas zonas donde la infraestructura carretera está expuesta; para ello se utilizó la red pavimentada de carreteras de la Red Nacional de Caminos 2016 (RNC)<sup>2</sup> con el objetivo de identificar aquellas zonas donde la infraestructura carretera está expuesta a los diferentes peligros. El análisis incluyó la estimación de la longitud de tramos carreteros, tanto estatales como federales, que se encontraban en las zonas con mayor índice de peligro por inundaciones y ondas de calor.

La evaluación de la vulnerabilidad espacial implica la integración de datos, en la que los datos de la red de caminos georreferenciados se combinan con los datos climáticos, para comprender los patrones de vulnerabilidad; cuyo resultado permite informar dónde se puede requerir acciones de adaptación.

La integración de datos espaciales sobre el cambio climático y su análisis espacial se han convertido en herramientas básicas para las evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático para casi todos los sectores, incluyendo el transporte; tanto los impactos pasados, como los impactos futuros, con base en escenarios climáticos.

Por lo que finalmente en el presente trabajo se generaron mapas que incluyen modelaciones futuras de eventos climáticos; tales como el aumento del nivel del mar, y de escenarios climáticos futuros de temperatura y precipitación. Las primeras aproximaciones de este análisis permiten conocer las amenazas futuras en la red de carretera, federal y estatal, al cambio climático en un horizonte de

---

<sup>1</sup> [www.desinventar.org/es/](http://www.desinventar.org/es/)

<sup>2</sup> Realizada por el INEGI en colaboración con el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). También se incluyó la estimación de la cantidad de kilómetros carreteros que podrían estar expuestos en el futuro, así como los puentes que se encuentran localizados en esos tramos carreteros.

La principal ventaja de utilizar la evaluación espacial es que muestra una gran cantidad de información de una manera simplificada y puede ser visualmente más atractiva para los usuarios.

Se concluye recomendando el uso de los SIG, tanto para el análisis geoespacial de la información requerida para tomar decisiones en el proceso continuo de la adaptación, como para generar mapas que permiten comunicar la información en una forma amigable a los diferentes actores involucrados; ya que, es menester evaluar las incertidumbres actuales del clima y tomar las mejores decisiones posibles con la información disponible. También se recomienda continuar los esfuerzos para concentrar y acrecentar la información geoespacial que esté relacionada al cambio climático del sector transporte; así como hacer estudios más detallados en campo para los que sean considerados puntos críticos de la infraestructura al cambio climático.



# Introducción

---

La demanda de servicios de transporte aumenta conforme crecen las economías de los países, el comercio y la población. Esta demanda tiene una presión directa en la operación y funcionalidad de los sistemas de transporte, pues forma parte las cadenas productivas y su distribución, del comercio y de los puntos de consumo, del turismo y su distribución, etc.; por lo que los desafíos para que las redes de transporte sean resilientes al clima son y serán muchísimos.

El cambio climático actual y proyectado tendrá un impacto en la infraestructura, las operaciones, la seguridad y el mantenimiento de los sistemas carreteros; ya que afectará a los administradores y a los usuarios de las redes viales.

Los impactos asociados al cambio climático pueden ser directos e indirectos, y se pueden materializar en diferentes regiones de la red de carreteras del país; por lo que la representación geoespacial ayuda a identificar las zonas de riesgo, donde la infraestructura carretera ha estado expuesta y que continuará peligrando su integridad en el futuro.

La gestión de riesgos asociados al cambio climático tiene una implicación geográfica, por lo que requiere un análisis territorial para comprender la magnitud del problema y dirigir los esfuerzos para su atención.

Esta gestión de riesgos forma parte de todo proceso de adaptación al cambio climático, mediante el cual se pueda proveer a la infraestructura de transporte cierto grado de resiliencia ante los impactos de dicho cambio y el clima extremo.

En el año 2013, el Gobierno Federal de México estableció tres ejes estratégicos para la adaptación ante el cambio climático, en donde la red federal de carreteras se considera parte de la infraestructura estratégica y, por tanto, su segundo eje estratégico consiste en reducir la vulnerabilidad y aumentar la resiliencia de la infraestructura estratégica y sistemas productivos, ante los efectos del cambio climático. Dicho eje estratégico tiene dos acciones relacionadas a la infraestructura estratégica, que son: (a) Fortalecer la infraestructura estratégica existente (comunicaciones, transportes, energía, entre otras) considerando escenarios climáticos; (b) Incorporar criterios de cambio climático en la planeación y construcción de nueva infraestructura estratégica y productiva (ENCC, 2013).

La necesidad de incrementar la resiliencia de las carreteras llevó a que investigadores del Instituto Mexicano del Transporte desarrollaran una serie de estudios mediante los cuales se generen insumos para concientizar, conocer,

identificar y evaluar los impactos que el cambio climático ha tenido sobre la infraestructura carretera en el país (Mendoza et al, 2017a y Mendoza et al, 2017b).

Esta investigación permitirá contribuir al cumplimiento del objetivo 6, “Desarrollar integralmente y a largo plazo al sector con la creación y adaptación de tecnología y la generación de capacidades nacionales” del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2013-2018; mismo que se encuentra alineado a los objetivos 3.5 “Hacer del desarrollo científico y tecnológico y la innovación pilares en el progreso económico y social sostenible” y el 4.9 “Contar con una infraestructura de transporte que se refleje en menores costos para realizar la actividad económica” del Plan Nacional de Desarrollo 2013-2018.

De esta manera, el objetivo de este trabajo se centró en sentar las bases para el análisis geoespacial del cambio climático y la red de carreteras del país, de tal manera que se identifique la infraestructura carretera que podría estar expuesta a los diferentes fenómenos asociados al cambio climático, lo que genera riesgos para la integridad y la operación de la red de carreteras.

El capítulo 1 contiene los antecedentes del tema abordado en la investigación, por lo que el análisis geoespacial de los riesgos de la red de carreteras al cambio climático se enmarca dentro del proceso de adaptación al cambio climático. Esta adaptación significa tomar medidas para aumentar la resiliencia y minimizar los costos de los impactos negativos.

La adaptación al cambio climático y la gestión de riesgos se ha abordado a través de diferentes enfoques y se han desarrollado diversas metodologías y marcos, donde se incluyen mejores prácticas para la adaptación, mismos que se abordan en el capítulo 1. Dentro de estas metodologías, la identificación de riesgos es uno de los pasos que incluyen, lo cual permite encaminar el proceso de adaptación asignando prioridades a los esfuerzos. Aunque la identificación de riesgos no exime de que se tengan que hacer inspecciones detalladas en los sitios, para asegurar una propuesta óptima y adaptar la infraestructura carretera, sí se requiere en países grandes para reducir el universo de análisis; por lo que el uso de mapas con información del cambio climático permite superponer capas sobre la red de carreteras para identificar activos que podrían estar vulnerables ante los diferentes fenómenos asociados al cambio climático.

Los análisis geoespaciales para comprender el impacto y los riesgos del cambio climático son cada vez más útiles para evaluar a diferentes escalas la vulnerabilidad de la red de carreteras o de los sistemas de transporte, los cuales se describen en el capítulo 2.

En dicho capítulo se resumen las metodologías y las investigaciones realizadas para abordar el análisis geoespacial del cambio climático. Dentro de la investigación bibliográfica realizada, se asume que el mapeo a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) es útil porque la variabilidad climática, y el clima

extremo pueden ser representados espacialmente. Los mapas de vulnerabilidad pueden identificar a dónde dirigir los recursos para la adaptación.

En México se han realizado análisis espaciales para identificar la vulnerabilidad, la sensibilidad o la exposición de los sistemas al cambio climático; pero existen pocos mapas específicos para el sector transporte, objeto de la presente investigación.

El capítulo 3 muestra los resultados de la construcción de mapas con base en registros pasados para determinar sitios de peligro ante las diferentes amenazas; tanto por el número de eventos, como las implicaciones económicas. Los mapas de amenazas climáticas se construyeron mediante los registros de DesInventar, los cuales de acuerdo a la información recopilada de fuentes hemerográficas permitió construir mapas de exposición del país, por lluvias, inundaciones, deslizamientos, etc.

En este capítulo también se construyeron mapas de exposición, pero con los registros de desastres naturales y las aportaciones totales (es la suma de las aportaciones del FONDEN, aportaciones del estado y/o de alguna dependencia federal). La mayoría de los eventos son del tipo hidrometeorológico, de tal manera que se elaboraron diversos mapas que reflejan el impacto económico de los ciclones tropicales, los huracanes, las lluvias, etc.

Adicionalmente, se realizó el análisis geoespacial de los mapas de peligro de CENAPRED, los cuales fueron superpuestos a la red pavimentada de carreteras<sup>3</sup> con el objetivo de identificar aquellas zonas donde la infraestructura carretera está expuesta a los diferentes peligros hidrometeorológicos y que, en el futuro, podrían comprometer su integridad. Estos análisis incluyeron la estimación de la longitud de tramos carreteros, tanto estatales como federales, que se encontraban en las zonas con mayor índice de peligro por inundaciones y ondas de calor.

Finalmente, el capítulo 3 contiene los mapas que incluyen modelaciones futuras de eventos climáticos; tales como el aumento del nivel del mar, y de escenarios climáticos futuros de temperatura y precipitación. Las primeras aproximaciones de este análisis permiten conocer las amenazas futuras en la red de carreteras, federal y estatal, al cambio climático en un horizonte de futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). De esta manera fue posible estimar la cantidad de kilómetros carreteros que podrían estar expuestos en el futuro, así como los puentes que se encuentran localizados en esos tramos carreteros.

Se concluye recomendando el uso de los SIG para el análisis geoespacial de la información requerida para tomar decisiones en el proceso continuo de la

---

<sup>3</sup> Tomada de la Red Nacional de Caminos (RNC), realizada por el INEGI en colaboración con el Instituto Mexicano del Transporte (IMT)-Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT).

adaptación, dentro de un esquema más amplio de resiliencia; en donde cada vez que se tomen medidas de adaptación sean evaluadas para seguir con el proceso continuo y tomar decisiones que ayuden a aumentar la resiliencia de la infraestructura carretera. También se remarca la potencialidad de los SIG para generar mapas que permitan comunicar gran cantidad de información en una forma accesible a los diferentes actores involucrados. Este trabajo sentó las bases para que una vez que se cuente con información geoespacial más detallada, se puedan hacer otros análisis geoespaciales; sin duda se debe continuar trabajando para incluir los umbrales límites de diseño de la infraestructura para evaluar las vulnerabilidades de la misma en zonas clave que están expuestas.

# 1 Antecedentes

---

El estudio sobre el cambio climático ha arrojado que este es una amenaza para el desarrollo de las sociedades y plantea un posible daño para los sistemas críticos y los activos, tales como la infraestructura carretera.

El cambio climático está alterando las condiciones climáticas a las que están expuestas las carreteras, los túneles y los puentes.

El cambio climático puede tener impactos directos e indirectos en la infraestructura carretera. Los impactos directos resultan de los efectos que los fenómenos climáticos tienen en las carreteras, los cuales aceleran su deterioro por la variabilidad climática actual. Los impactos indirectos del cambio climático en las carreteras se deben a los efectos en la localización de la población y la actividad humana que alteran la demanda para las carreteras.

Debido a su exposición a los diferentes fenómenos asociados al cambio climático, los sistemas de infraestructura de transporte -incluidas las carreteras- son particularmente vulnerables. Por lo tanto, los riesgos del cambio climático en las carreteras amenazan el crecimiento económico asociado, el desarrollo y los beneficios de bienestar social de la expansión de la infraestructura (Chinowsky et al, 2015).

Schweikert et al (2014) exponen que, en las áreas rurales -particularmente en los países de bajos ingresos- las carreteras representan un salvavidas para el sustento económico y agrícola; así como una serie de beneficios indirectos que incluyen acceso a la atención médica, educación, crédito, participación política y más. Los caminos son escasos en ciertas ubicaciones geográficas, lo que hace que cada camino sea crítico. El cambio climático y los eventos extremos representan un riesgo con alto costo para las carreteras, en términos de su deterioro, requieren un mayor mantenimiento; y, por lo tanto, se ve reducida su vida útil debido a los impactos climáticos.

El consenso general es que el impacto del cambio climático sobre los sistemas de transporte es costoso; por lo que requieren cambios significativos en la planificación, diseño, construcción, operación y mantenimiento (NAS, 2008). Las medidas de respuesta van desde rehabilitar y modernizar la infraestructura hasta hacer adiciones importantes para construir una infraestructura completamente nueva y adaptada al cambio climático. Por lo que, prepararse para los cambios climáticos proyectados tiene un alto impacto en las inversiones para todos los países.

Los responsables de la toma de decisiones sobre el transporte, continuamente toman decisiones de inversión a corto o largo plazo que afectan la forma en que la infraestructura responderá al cambio climático.

Esta visión sobre el impacto del cambio climático implica más inversiones en mantenimiento, reparaciones y restablecimiento de la conectividad; sin embargo, muchos de estos efectos pueden mitigarse y evitarse mediante medidas de adaptación proactiva.

La adaptación es una consideración vital para proteger y preservar las inversiones en infraestructura, tanto actuales como futuras, sin detrimento de las funciones económicas y sociales que prestan.

Por lo tanto, adaptarse al cambio climático significa enfrentar sus consecuencias y prepararse para los impactos futuros.

## **1.1 La adaptación al cambio climático**

Adaptación es un concepto que se entiende como la acción y el efecto de adaptar o adaptarse, un verbo que hace referencia a la acomodación o ajuste de algo respecto a otra situación.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico<sup>4</sup> (2008), el proceso de adaptación al clima y al cambio climático es complejo y multifacético. Como tal, es muy difícil hacer una adaptación analítica y justa. Una serie de tipologías se han desarrollado para clasificar las acciones de adaptación. Por ejemplo, estas medidas han sido clasificadas de acuerdo con: tiempo (anticipada vs. reactiva); alcance (local vs. regional; corto plazo vs. largo plazo); propósito (autónomo vs. planeado; adaptación activa o pasiva); y agente de adaptación (sistemas naturales vs. humanos; individuos vs. colectivos; privados vs. públicos).

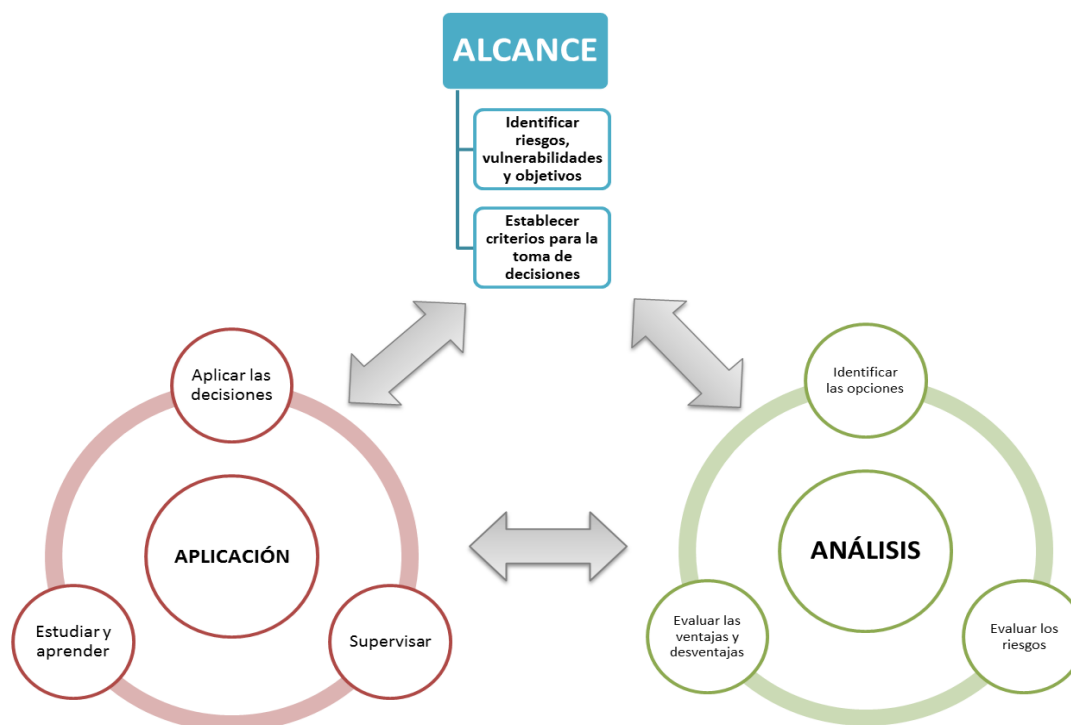
Dentro de todos estos marcos, las medidas de adaptación deberán adoptar dos formas generales: acciones relacionadas con la planificación y la construcción de nueva infraestructura y, en segundo lugar, la adaptación y la "protección climática" de los sistemas existentes (Cochran, 2009).

El proceso de adaptación no puede ser estático, sino un proceso iterativo que permita evaluar las incertidumbres actuales del clima y que, a medida que se adquiera más conocimiento, se podrá ser más asertivo en el diseño de las medidas de adaptación. El IPCC (2014) diseñó un proceso de adaptación iterativa,

---

<sup>4</sup> OECD, por sus siglas en inglés.

con múltiples retroalimentaciones, para que se puedan evaluar los resultados, acumular conocimientos y apoyen a la toma de decisiones (ver figura 1.1).



**Figura 1.1. Adaptación al cambio climático como un proceso de gestión integral iterativa**

Fuente: Elaboración propia, basados en: IPCC, 2014

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

### 1.1.1 La resiliencia

La resiliencia es la capacidad de un sistema o de una comunidad para sobrevivir ante la interrupción, y anticiparse, adaptarse y prosperar frente al cambio climático.

La resiliencia permite, en el corto o largo plazo, anticipar los riesgos y oportunidades que se pueden presentar en los sistemas de transporte; para asegurar la continuidad del servicio a pesar de la presencia de fenómenos climáticos, antes, durante o después de que estos se presenten.

Es común utilizar la resiliencia y la adaptación de forma intercambiable; sin embargo, la resiliencia es un concepto mucho más amplio, mientras que la adaptación son respuestas específicas a una amenaza del tipo climático para que la infraestructura trabaje de forma aceptable.

La resiliencia dobla el alcance de la adaptación, considera a ésta como primera fase y continúa con un aumento de la capacidad del sistema adaptado. La resiliencia ofrece un enfoque más amplio y a largo plazo en el fortalecimiento de la capacidad, al mismo tiempo que se reducen los impactos específicos.

La resiliencia sería un marco de planificación útil, pero resulta especialmente práctica cuando puede incorporar actividades específicas de adaptación al clima en las metas a largo plazo, a medida que se reconocen las amenazas.

Un proceso integrado de la adaptación involucra tres aspectos: la evaluación del riesgo, las respuestas de adaptación y un enfoque resiliente. La interacción de estos componentes conforma la gestión adaptativa, como ilustra la figura 1.2.



**Figura 1.2. Enfoque de la gestión adaptativa**

Fuente: Elaboración propia.

La capacidad de resiliencia es aquella que posibilita operar en el contexto del cambio y la disrupción, la superación de los problemas a corto plazo; y la preparación para un futuro diferente y continuamente cambiante.



## 1.1.2 Gestión de riesgos del cambio climático

La atención de los riesgos del cambio climático es esencial dentro del proceso de adaptación a este cambio.

El riesgo ante desastres naturales se podría presentar cuando una infraestructura carretera tiene deficiencias o podría responder inadecuadamente ante la presencia de fenómenos climáticos; es por eso que se debe realizar un análisis del riesgo dentro de su proceso de gestión y, con los resultados, poder implementar acciones para la adaptación al cambio climático.

La integración de la gestión del riesgo y la adaptación es de gran importancia para los programas de inversión pública, para que los proyectos de infraestructura carretera a financiar incorporen en su diseño y ejecución una clara orientación para asegurar la resiliencia de la infraestructura.

Para lograr una aplicación conjunta se requiere de la existencia previa de legislación; como normas o reglamentos, auxiliados de procedimientos y marcos metodológicos para la complementariedad de ambas herramientas.

## 1.2 Metodologías para la adaptación al cambio climático

La adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera se ha abordado de múltiples formas, en diversos países; de tal manera que adoptar y extraer las mejores prácticas sobre las metodologías, herramientas o métodos utilizados para la adaptación puede resultar complejo.

Existen principalmente dos enfoques metodológicos; el primero de ellos “de arriba hacia abajo” parte del uso de mapas/escenarios climáticos que al superponerse a la red de carreteras ayudan a identificar los sitios vulnerables de la red (figura 1.3), y con base en dichos impactos, se establezcan respuestas para la adaptación.



**Figura 1.3. Enfoque para la adaptación de arriba hacia abajo**

Fuente: Elaboración propia.

El segundo enfoque “de abajo hacia arriba” evalúa directamente a la infraestructura carretera y a través de datos históricos registrados (eventos climáticos o impactos climáticos) se pueden establecer las vulnerabilidades de los sitios y los activos y, con base en los resultados, proponer acciones de adaptación (figura 1.4).



**Figura 1.4. Enfoque para la adaptación de abajo hacia arriba**

Fuente: Elaboración propia.

Sin embargo, la gama de metodologías es muy diversa, aunque no muy amplia; por lo que se realizó una revisión de diferentes procesos, marcos, metodologías, etc., para la adaptación (Mendoza et al, 2017), mediante la cual se identificaron aspectos clave que todo proceso de adaptación debería considerar. A continuación, se describen los elementos que ya la mayoría de estas herramientas consideran básicas para la adaptación:

- a) Establecer el alcance y los objetivos para la adaptación. Cada proyecto de adaptación debe tener claro los límites del trabajo y la dirección por seguir para alcanzar los objetivos.
- b) Identificar los riesgos asociados al cambio climático. En la red de carreteras es necesario identificar los sitios de riesgos que se consideran peligros potenciales; los que pueden verse afectados por alguna amenaza climática o que ya han sido afectados por algún impacto asociado al cambio climático.
- c) Evaluar la vulnerabilidad al cambio climático. Para cada sitio de análisis, se debe evaluar su vulnerabilidad, la cual suele estar en función de su exposición (¿a qué amenazas climáticas se encuentra sometido el activo carretero?) y su sensibilidad (¿en qué estado se encuentra el activo carretero y qué aspectos circundantes a la carretera lo ponen en riesgo?).
- d) Evaluar los riesgos. Es común identificar un gran número de sitios en riesgo y que son vulnerables al cambio climático; por lo que requieren ser

evaluados y priorizados, con la finalidad de atender a aquellos que sea más probable de enfrentar la amenaza climática y que en caso de materializarse el riesgo, la magnitud del daño directo o indirecto sea severo para la infraestructura y para la operación de la red carretera.

- e) Identificar y seleccionar las respuestas de adaptación. El objetivo de esta acción es desarrollar medidas o estrategias que permitan hacer frente a las amenazas climáticas, con las cuales se pueda garantizar la resiliencia de la infraestructura carretera.
- f) Implementar las respuestas de adaptación. Estas acciones deberán ejecutarse dentro de un plan específico de adaptación al cambio climático para las carreteras, o de manera más general, deben incluirse dentro de los planes y programas de conservación y mantenimiento de carreteras.
- g) Monitoreo. Las acciones de adaptación deberán tener un seguimiento futuro para que se pueda medir su efectividad, retroalimentar a los diseñadores de estrategias de adaptación, compartir experiencias y buenas prácticas.

Con estas ideas es posible iniciar el proceso de adaptación; por lo que se requiere como primer paso identificar los riesgos asociados al cambio climático.

### **1.3 Identificación de los riesgos asociados al cambio climático**

Para encaminar el proceso de adaptación, las organizaciones de carreteras deben identificar qué activos, qué sitios o qué elementos se encuentran en riesgo; o los que ya han sido afectados por fenómenos asociados al cambio climático.

La Agencia de Carreteras Públicas de Noruega lleva a cabo un inventario de los activos vulnerables para proporcionar la base para asignar prioridades. Para estos activos se requiere un análisis más detallado, el que incluye la recolección de datos meteorológicos e hidrológicos mejorados y cálculos más detallados de su capacidad (obras de drenaje).

El análisis se realiza en tres niveles:

- El nivel 1 puede basarse en mapas, información disponible en el banco de datos de carreteras o en el registro de puentes (BRUTUS)
- El nivel 2 requiere la evaluación de la sección/estructura de la carretera; incluidas las condiciones de los escurrimientos de agua, el área circundante a la carretera, etc.

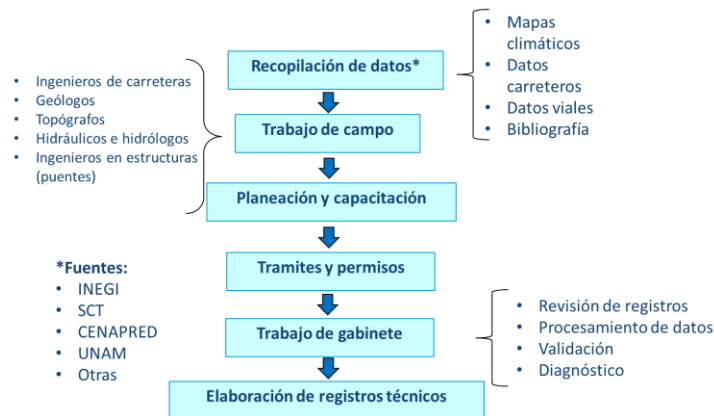
- El nivel 3 demanda una evaluación detallada, mediciones de: niveles de agua, flujos de agua, cálculo de capacidad hidráulica, análisis de frecuencia de inundación, etc.

El objetivo de este paso, dentro del proceso de adaptación, es describir y enumerar cómo los cambios climáticos impactan o ponen en riesgo a cada elemento clave de la infraestructura carretera.

En el año 2015, la Asociación Mundial de Carreteras (AMC-AIPCR) desarrolló, con un enfoque integral para la infraestructura carretera, el Marco Internacional para la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático; el cual pretende ser una guía para las autoridades de carreteras, mediante la cual puedan identificar los riesgos asociados al cambio climático, evaluar la vulnerabilidad de los elementos, establecer acciones de adaptación y priorizar los trabajos; para que los organismos operadores de carreteras puedan integrar las acciones de adaptación dentro de sus programas de trabajo [AMC, 2015].

La Dirección General de Servicios Técnicos (DGST) de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), entre 2015 y 2016, realizó acciones para implementar el Marco en la red de carreteras federales de dos estados de la república mexicana; generando el primer caso de estudio.

Para la implementación del Marco se siguieron las etapas y pasos que están establecidos en él. Particularmente, el paso de la selección de activos y su ubicación fue realizado a través de trabajos de campo y gabinete; en los cuales, mediante recorridos en toda la red de carreteras de cada estado, se identificaron los puntos de riesgo en diversos elementos que conforman la infraestructura carretera; tales como puentes, alcantarillas, taludes de corte o terraplén, pavimentos, etc. Cada sitio identificado fue georreferenciado y mapeado sobre la red de carreteras, para su localización y evaluación. La figura 1.5 muestra un diagrama del proceso realizado para identificar, evaluar y compilar todos los sitios de riesgo de cada red de carreteras analizada.



**Figura 1.5. Proceso para la selección de sitios de riesgo**

Fuente: Elaboración propia con información de la DGST, 2016.

Los datos de cada sitio identificado fueron capturados en el registro mencionado anteriormente (ver figura 1.6); incluyendo la ubicación geográfica, una descripción del riesgo y su posible medida de adaptación, el tipo de evento climático que podría dañarlo y el alcance del impacto en caso de materializarse el riesgo (local, regional o nacional), entre otros. El registro incluye fotografías del sitio, anexas a cada archivo capturado.

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

NO. DE REGISTRO: COL-01      NO. DE CARRETERA: 110 Colima - Ent. Tecomán  
 ENTIDAD FEDERATIVA: Colima      CADENAMIENTO (KM): 13+115 (Los Asmoles- La Turia)  
 TIPO DE ACTIVO: Puente Los Asmoles      COORDENADAS DEL SITIO:  
 FECHA: 13/Octubre/2015      INICIO N: 19° 7'10.21", W: 103°46'32.44", Z: 331 m  
 FINAL N: 19° 7'8.09", W: 103°46'32.52", Z: 331 m

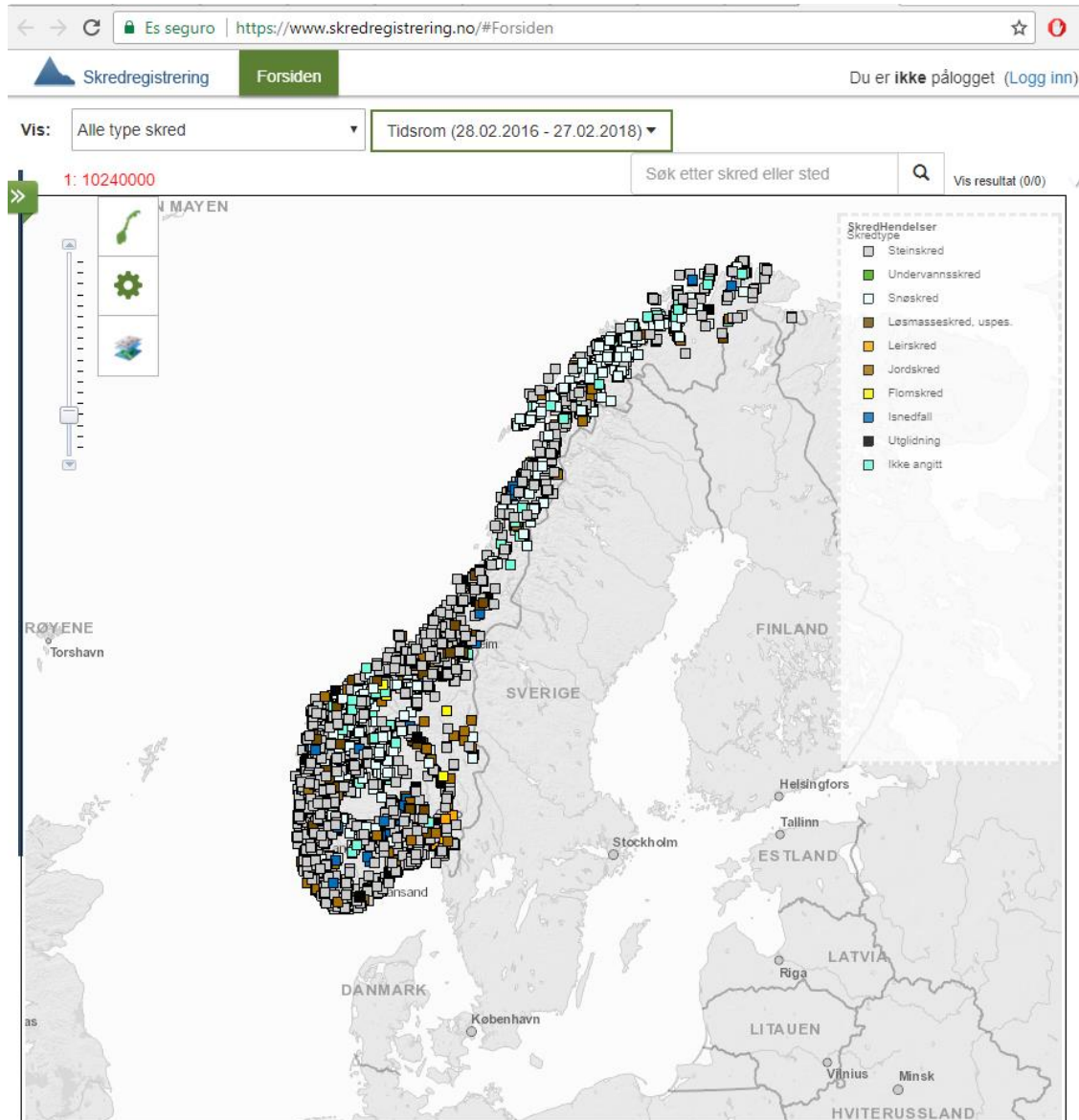
ELABORÓ: \_\_\_\_\_ REVISÓ: \_\_\_\_\_ SITIO IDENTIFICADO: \_\_\_\_\_ 01

**Figura 1.6. Formato para el registro y ejemplo de sitio de riesgo**

Fuente: DGST, 2016.

Este proceso de identificación de sitios de riesgos es apropiado e incluso puede ser sistematizado a través de registros mediante dispositivos móviles, tales como los celulares o las tabletas.

La representación de los riesgos puede darse de forma geográfica, como lo han implementado en Noruega; donde los diferentes tipos de riesgos que se han presentado en el país asociados a las carreteras han sido representados, y cuyo resultado se puede ver en la figura 1.7.



**Figura 1.7. Registro de riesgos y su representación geoespacial en Noruega**

Fuente: [www.skredregistrering.no](http://www.skredregistrering.no) (consultada el 27 Febrero de 2018).

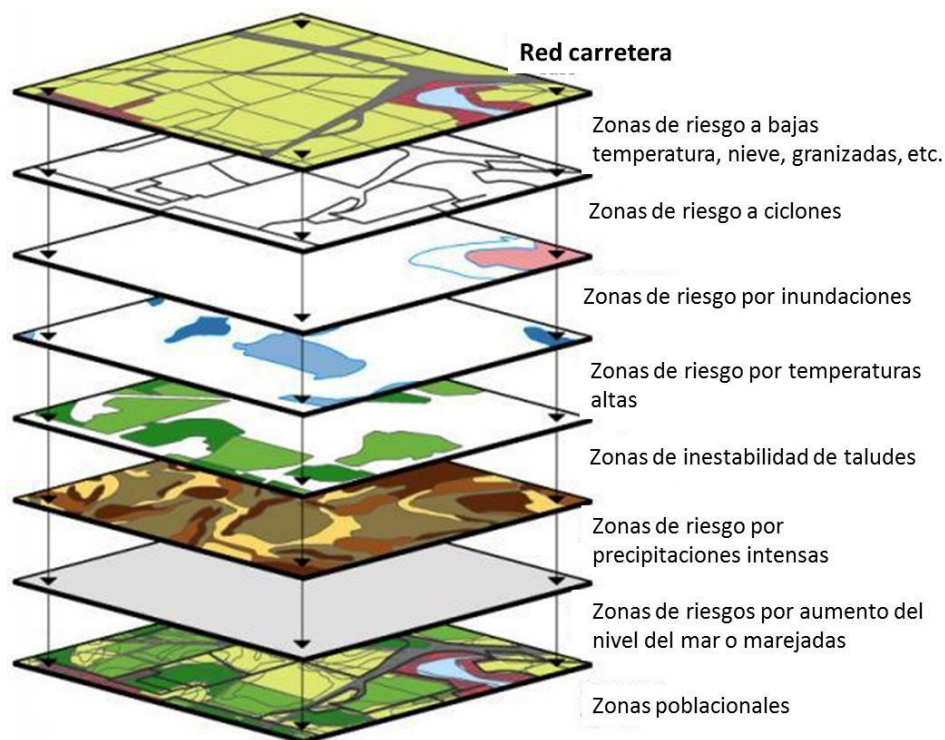
Iniciar un proceso de identificación de riesgos que implique inspecciones en el sitio -como lo ha realizado la SCT en los estados de Nayarit, Colima, Baja California Sur, Hidalgo y Tabasco- es costoso; la red nacional de carreteras es muy grande, por lo que los esfuerzos deben ser focalizados a los sitios donde a través de un análisis geoespacial se seleccionen las áreas con mayor exposición a fenómenos asociados al cambio climático y con base en dichas zonas focalizadas, re-dirigir los esfuerzos para revisar los activos carreteros en esos sitios y evaluar la vulnerabilidad.

### 1.3.1 Superposición de capas de información georreferenciada

Bhamidipati (2014) establece que para identificar las partes vulnerables de un sistema de transporte se requiere establecer el modelo básico de la red de transporte e incorporar el modelo del clima; al vincularlos, se podrían identificar las afectaciones de la red, aunque no es fácil predecir la ocurrencia de los eventos climáticos, el tamaño, ni la ubicación exacta y la duración; sin embargo, es un modelo interesante y proactivo para la adaptación.

Los modelos de superposición de capas de información georreferenciada pueden simular diferentes eventos climáticos que, de acuerdo con los umbrales establecidos, pueden afectar la operación de la red e impactar los tiempos de viaje debido; por ejemplo, a un cambio de ruta, esto cuando la ruta más corta se encuentra inundada.

La superposición de capas de información georreferenciada (ver figura 1.8), implica colocar capas sobre la red de carreteras para identificar los activos que podrían ser vulnerables ante los diferentes fenómenos asociados al cambio climático.



**Figura 1.8. Superposición de capas de información georreferenciada para identificación de sitios para la adaptación**

Fuente: Adaptado de CASA, 2013 y ESRI.

Algunas de las capas pueden ser de sitios de riesgos de fenómenos climáticos basados en registros históricos, o también en mapas que incluyan pronósticos climáticos de temperatura o precipitación; que de igual manera podrían identificar los activos de la red carretera expuesta.

Al incluir el evento climático, el tamaño y su ubicación en la red, éste es capturado en el análisis geoespacial. El tamaño del evento es evidentemente importante para la evaluación de daños por parte del administrador de la red de carreteras, y la ubicación del evento es igualmente importante para entender la magnitud del daño. De esta manera se obtendría una cuantificación de los impactos potenciales en la red de carreteras.

Esta metodología es útil para asegurar la resiliencia de la infraestructura si se aplicaran acciones de adaptación en un corto plazo, con base en registros históricos y -en un largo plazo- si se utilizan proyecciones de clima bajo los diferentes escenarios del IPCC, a pesar de las incertidumbres existentes.

La infraestructura de transporte por carretera se enfrenta a muchos desafíos, y la adaptación de la infraestructura al cambio climático es de gran preocupación; por lo que ha tomado un nivel prioritario en las agendas de casi todos los países.

La utilización de estas herramientas de análisis, cuya base es la representación geoespacial, ayudaría a estimar los impactos del cambio climático a escala nacional y regional; para dirigir los estudios para la adaptación al cambio climático de una forma más estratégica.

Los análisis geoespaciales para comprender el impacto y los riesgos del cambio climático son cada vez más útiles para evaluar, a diferentes escalas, la vulnerabilidad de la red de carreteras o de los sistemas de transporte.



## **2 Introducción al análisis geoespacial de la infraestructura carretera ante el cambio climático**

---

La atención de riesgos asociados al cambio climático ha incentivado que los actores involucrados hagan uso de los sistemas de información geográfica (SIG), como una herramienta tecnológica para comprender el problema del cambio climático y, con base en ella, poder auxiliar en la obtención de respuestas para la adaptación al cambio climático.

El cambio climático es un problema geográfico, y se cree que resolverlo requiere una solución geográfica (Dangermond & Baker, 2010).

Con el creciente interés científico y político en priorizar las necesidades de inversión para la adaptación al cambio climático, existe un fuerte impulso para identificar puntos críticos o vulnerables al impacto climático a escala global, pero con una alta resolución espacial (Liu et al, 2013).

Comprender los patrones espaciales de los impactos del cambio climático en la infraestructura carretera es necesario; no sólo para identificar activos críticos asociados al cambio climático, sino también para ayudar a desarrollar medidas de adaptación en todos los niveles geográficos.

Tales evaluaciones espaciales han sido posibles con los avances recientes en la tecnología de la información y las técnicas de modelado; en particular, con el desarrollo de modelos biofísicos y ecológicos soportados por SIG.

El estudio realizado por Liu et al (2013) enuncia que la proyección de los impactos del cambio climático muestran incertidumbres más bajas a escalas espaciales más pequeñas (celda de cuadrícula y país) que a escalas espaciales más altas (continente y globo). Los análisis por realizar en el presente trabajo, en algunos casos, carecen de resolución a baja escala.

Las evaluaciones de vulnerabilidad espacial y los métodos afines, como la evaluación del impacto espacial, son herramientas útiles para comprender los patrones de vulnerabilidad y riesgo del cambio climático en múltiples escalas; desde locales hasta globales (USAID, 2014).

La misma USAID sugiere que la demanda de mapas de vulnerabilidad entre las agencias de desarrollo y los gobiernos está aumentando a medida que se pone

mayor énfasis en los métodos científicamente sólidos para focalizar la asistencia para la adaptación.

## **2.1 Metodologías para el análisis geoespacial del cambio climático**

El estudio realizado por la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional (USAID, 2014) proporciona ejemplos de tres diferentes formas metodológicas para analizar la vulnerabilidad espacialmente.

La primera es mediante índices de vulnerabilidad espacial, donde los componentes de la vulnerabilidad se construyen como indicadores y se agregan para crear un índice espacial. La arquitectura, a menudo, está guiada por un marco de vulnerabilidad; como la exposición, la sensibilidad y la capacidad de adaptación del IPCC, utilizando indicadores que están más o menos estrechamente relacionados con estos tres componentes. Dichos índices pueden ser asociados a sectores específicos como la infraestructura para el transporte.

El segundo enfoque es el mapeo de vulnerabilidad basado en la comunidad y las partes interesadas; el cual normalmente se lleva a cabo en jurisdicciones locales, en áreas bastante pequeñas. El mapeo basado en la comunidad está en la tradición de la evaluación rural participativa y sus variantes; mientras que el análisis de vulnerabilidad está dirigida a las partes interesadas generalmente involucra a las autoridades locales, aunque puede incluir miembros de la comunidad.

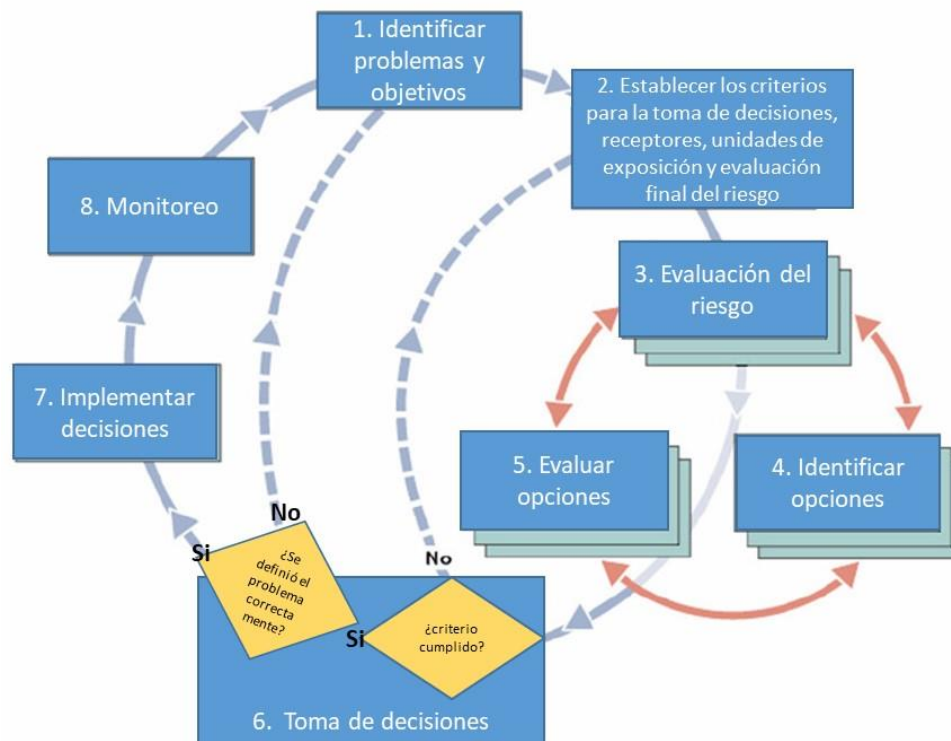
El tercer enfoque es el mapeo de impactos, el cual se usa comúnmente para la evaluación del riesgo climático; aunque para evaluar la vulnerabilidad se requiere un conjunto de herramientas más amplio sobre los impactos climáticos. El enfoque implica el uso directo de datos climáticos o la integración de datos de escenarios climáticos en modelos basados en procesos (hidrológicos, por ejemplo) para generar mapas de áreas con probabilidad de recibir impactos climáticos extremos.

En la evaluación y mapeo del impacto climático -en lugar de examinar las interacciones entre los factores climáticos, sociales y económicos que influyen en el riesgo- la evaluación se centra principalmente en las implicaciones biofísicas del cambio climático para la infraestructura u otros activos valiosos, y las estimaciones de pérdidas económicas se derivan de magnitudes particulares (Preston et al., 2007).

La evaluación de impacto, por otro lado, a menudo se basa en escenarios (por ejemplo, cambios proyectados en la temperatura y en la lluvia o en escenarios de precipitación extrema o eventos de marejadas) y puede centrarse en los períodos de retorno.

### 2.1.1 Marco de evaluación del riesgo de cambio climático para la planificación espacial

El Marco para la toma de decisiones UKCIP<sup>5</sup> provee un enfoque genérico y flexible para enfrentar el cambio climático. El Marco es circular, enfatiza el enfoque adaptativo que debe tener la gestión de riesgos asociados al cambio climático, el cual aparece en la figura 2.1.



**Figura 2.1. Marco para la toma de decisiones UKCIP**

Fuente: Adaptado de ESPACE, 2008.

El proyecto ESPACE (European Spatial Planning: Adapting to Climate Events) promueve la conciencia de la importancia de adaptarse al cambio climático y recomienda formas de incorporar la adaptación dentro de los mecanismos de planificación espacial en los niveles local, regional, nacional y europeo.

De esta manera, en la etapa de evaluación del riesgo, se introdujo el concepto de la planeación espacial para evaluar los riesgos del cambio climático, a través de

<sup>5</sup> Por las siglas en inglés de “UK Climate Impacts Programme”.

diversas herramientas. Algunas de estas herramientas probablemente sean más adecuadas para su uso en una evaluación detallada de riesgos climáticos de segundo o tercer nivel; pero la herramienta de detección de riesgos de alto nivel ha sido diseñada para permitir a los planificadores llevar a cabo su propia evaluación de riesgos.

- El mapeo es una técnica usada ampliamente en la planificación espacial y resulta familiar para la mayoría de los profesionales. Es una técnica que puede ser utilizada para identificar los receptores de un riesgo potencial asociado al cambio climático; especialmente donde hay capas de información adicionales, que están disponibles para mapear espacialmente los riesgos actuales y futuros del cambio climático (por ejemplo, mapas de inundaciones, aumento de temperatura o precipitación, etc.).
- Los puntos de inflexión (también denominados umbrales o valores finales para la evaluación de riesgos) pueden ser definidos de muchas maneras diferentes; particularmente, como el nivel tolerable para los receptores, para el caso de las carreteras serían aquellos umbrales que en términos de precipitación o temperatura rebasan los parámetros de diseño.
- La herramienta de detección de riesgos de alto nivel proporciona un conjunto de diagramas de flujo que guían a los planificadores, a través de un conjunto inicial de preguntas de alto nivel sobre los impactos potenciales del cambio climático en tres áreas clave: riesgo de inundación, recursos hídricos y medio ambiente.

La primera herramienta es la que permite hacer el ensamblaje, al superponer diferentes capas de información de un SIG. Al utilizar el mapeo para ayudar a determinar las asignaciones del uso del suelo, los planificadores espaciales pueden demostrar fácilmente cómo tomaron una decisión contra un conjunto equilibrado de criterios, incluyendo los riesgos del cambio climático.

Las modelaciones espaciales permiten evaluar impactos del cambio climático; por ejemplo, el riesgo de inundación. En el futuro, se espera que el riesgo de inundación aumente significativamente, en algunos lugares, durante el próximo siglo. Esto se debe a las predicciones de que las intensidades de las lluvias aumentarán, lo que generaría mayores tasas de escorrentía e inundaciones repentinas más frecuentes, y de una aceleración esperada en las tasas de aumento del nivel del mar.

De esta manera, el uso de SIG permite identificar las zonas potenciales que podrían sufrir de algún evento relacionado con inundaciones o algún otro efecto del cambio climático que pudiese ser representado en un SIG.

Estas modelaciones, al superponerse con información georreferenciada de la infraestructura carretera, permitirían identificar la cantidad de kilómetros que se encuentran en riesgo a las inundaciones u otro fenómeno climático.

## **2.1.2 Mapeo a través de SIG**

A través de los Sistemas de Información Geográfica es posible construir diversos mapas, incluyendo los mapas de vulnerabilidad.

El mapeo es útil porque la variabilidad climática y el clima extremo pueden ser representados espacialmente, incluyendo la sensibilidad de las poblaciones/servicios/infraestructura y sus sistemas; debido a los diversos factores estresantes climáticos, así como también pueden ser representadas las capacidades de adaptación o las formas de enfrentar el cambio climático.

La interacción entre los distintos factores que producen diferentes patrones de vulnerabilidad, que son diferenciados espacialmente, podría ser un auxiliar para identificar los riesgos de la infraestructura carretera asociados al cambio climático.

La evaluación de la vulnerabilidad espacial implica la integración de datos, en la que los socioeconómicos y biofísicos georreferenciados se combinan con los climáticos, para comprender los patrones de vulnerabilidad y, a su vez, informar dónde se puede requerir la adaptación.

De acuerdo con la USAID (2014), los mapas han demostrado ser objetos útiles en las discusiones de múltiples actores involucrados en la adaptación al cambio climático, debido a que proporcionan una base común para el debate y para las deliberaciones sobre la planificación de las posibles respuestas para la adaptación.

Los mapas de vulnerabilidad pueden identificar a dónde dirigir los recursos para la adaptación; pero aún se requerirá un trabajo adicional más específico, que incluya una investigación de campo más detallada y consultas con las partes interesadas para determinar qué se necesita para el diseño, la programación e implementación de las acciones de adaptación y cómo desarrollar la resiliencia de la infraestructura carretera.

Por lo anterior, la evaluación de vulnerabilidad espacial puede ser un punto de entrada útil para establecer prioridades de adaptación; pero no reemplaza las evaluaciones rigurosas de vulnerabilidad basadas en estudios de campo que profundizan el conocimiento de los impactos, actuales y futuros, del cambio climático en la infraestructura carretera.

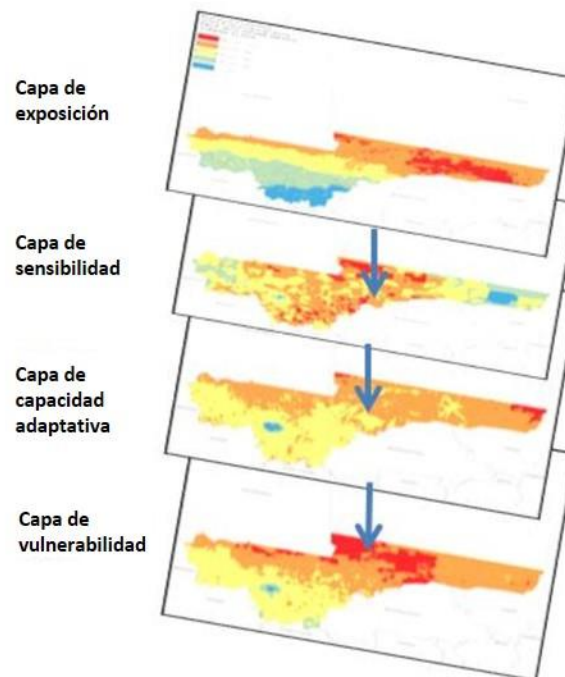
La principal ventaja de utilizar la evaluación espacial es que muestra una gran cantidad de información de una manera simplificada y puede ser visualmente más atractiva para los usuarios.

## 2.2 Datos espaciales del cambio climático y la infraestructura carretera

La integración de datos espaciales sobre el cambio climático y su análisis espacial, se han convertido en herramientas básicas para las evaluaciones de vulnerabilidad al cambio climático para casi todos los sectores, incluyendo el transporte.

Los análisis espaciales de datos generalmente tienen como objetivo identificar áreas con un riesgo potencialmente alto, asociado a impactos climáticos; que son denominados "puntos críticos" del cambio climático (De Sherbinin, 2014).

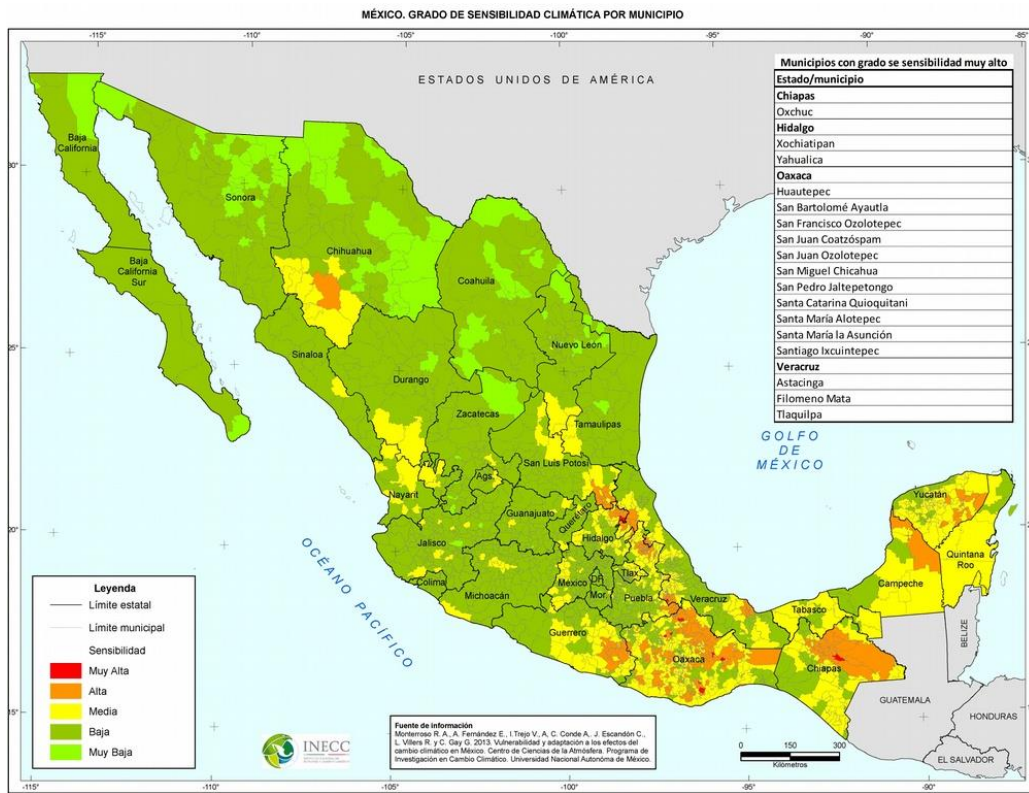
Los datos espaciales de la vulnerabilidad del cambio climático pueden ser representados espacialmente, de acuerdo con lo sugerido por De Sherbinin (2014) y se muestra en la figura 2.2.



**Figura 2.2. Diagrama esquemático de la representación de los aspectos de la vulnerabilidad**

Fuente: De Sherbinin, 2014.

Estos mapas son de utilidad para representar dichos aspectos del cambio climático, los cuales ya han sido elaborados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), y pueden ser observados en las figuras 2.3 a la 2.6.



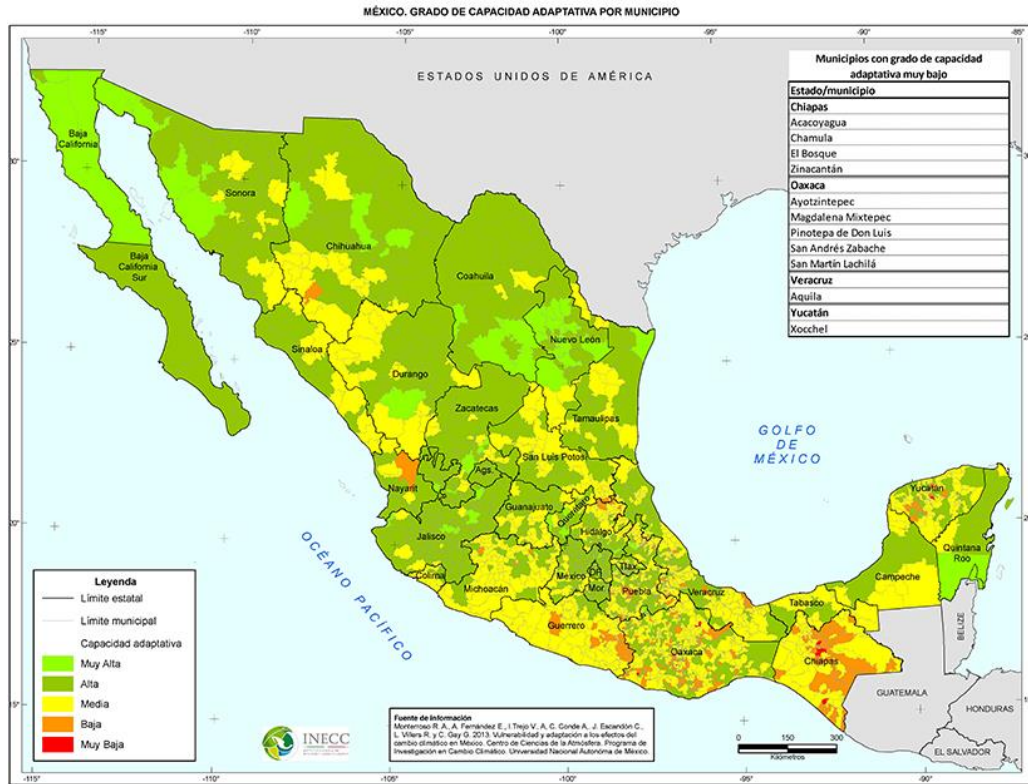


Figura 2.5. Mapa de capacidad adaptativa

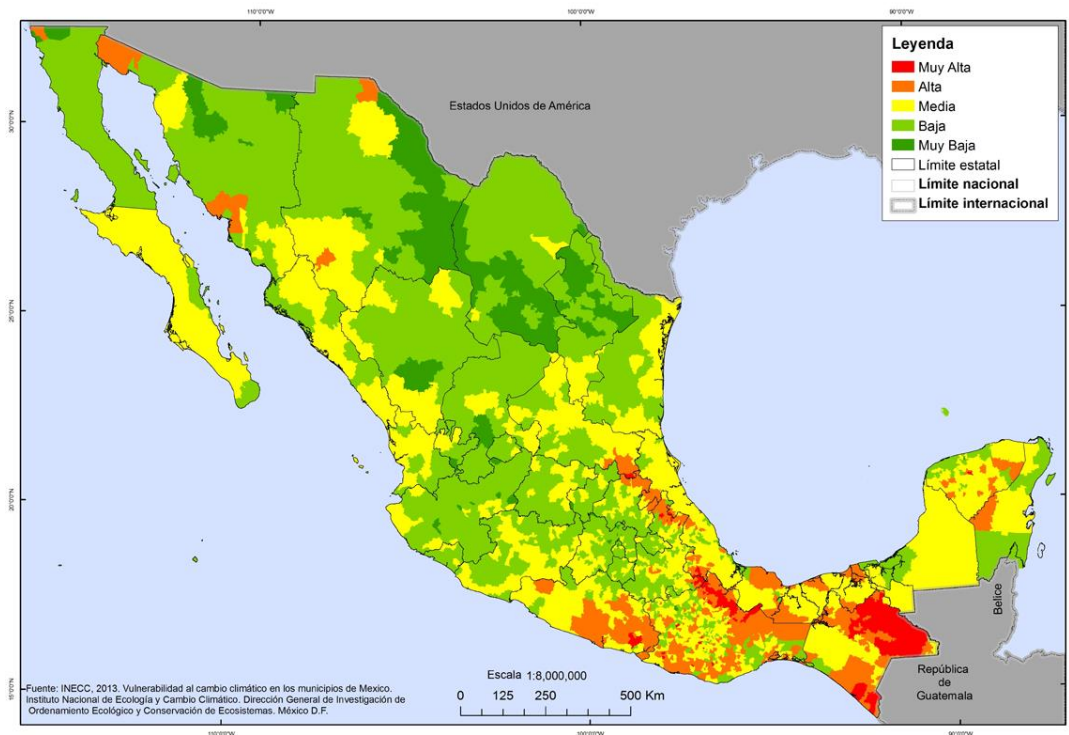


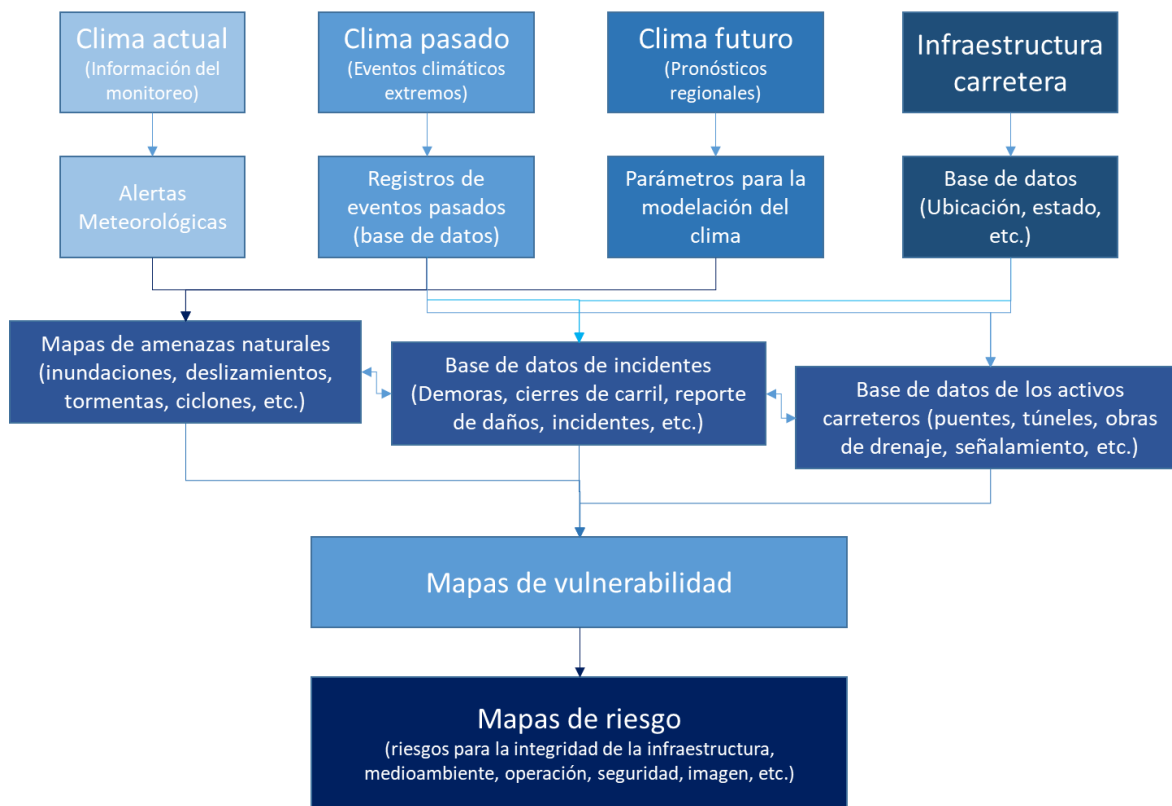
Figura 2.6. Mapa de vulnerabilidad



Cada uno de los mapas realizados para México se basa en el análisis geoespacial de información asociada al cambio climático, basados en diferentes indicadores, de acuerdo con las metodologías descritas en el punto 2.1.

En ellos aún resulta ausente la capa de infraestructura carretera para determinar los riesgos potenciales que pudieran materializarse asociados al cambio climático.

Por lo que, para el proceso de mapeo -que sería a su vez útil para el análisis geoespacial del cambio climático, que se realizará en el presente trabajo- se propuso el esquema ilustrado en la figura 2.7



**Figura 2.7. Proceso para la determinación de mapas así como el análisis geoespacial del cambio climático y la infraestructura carretera**

Fuente: Elaboración propia, basado en UNECE, 2013.

De esta manera se analizará el cambio climático y se elaborarán los mapas con base en registros pasados para determinar zonas de peligro ante las diferentes amenazas; tanto por el número de eventos, como las implicaciones económicas. En este orden de ideas, serán elaborados mapas temáticos que incluirán estimaciones de futuros eventos climáticos; tales como el aumento del nivel del

mar, ondas cálidas y de escenarios climáticos relativos a las variaciones de temperaturas y precipitaciones.

### 3 Análisis geoespacial de la infraestructura carretera ante el cambio climático

El análisis será realizado conforme a la figura 2.7. Primeramente, construiremos mapas de amenazas climáticas derivados de registros climáticos pasados que tuvieron impactos en la infraestructura carretera; el nivel de análisis se realizó conforme el nivel de prioridad realizado por Mendoza et al (2017b), el cual aparece en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Niveles de prioridad de fenómenos asociados al cambio climático para la adaptación de la infraestructura carretera en México**

<b>Nivel Prioritario</b>	
<b>Eventos con precipitación intensa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ciclones tropicales</li> <li>• Huracanes</li> <li>• Lluvias y tormentas intensas</li> </ul>
<b>Efectos de precipitación excesiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inundaciones</li> <li>• Marejadas e inundaciones costeras</li> <li>• Deslizamientos / Aluviones</li> <li>• Avenidas torrenciales</li> <li>• Vendavales</li> <li>• Granizadas</li> </ul>
<b>Nivel Medio</b>	
<b>Eventos con precipitación intensa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ondas frías</li> </ul>
<b>Efectos de precipitación excesiva</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Heladas</li> <li>• Nevadas</li> <li>• Vendavales</li> <li>• Neblina</li> <li>• Marejadas</li> </ul>
<b>Nivel Bajo</b>	
<b>Eventos con aumento de la temperatura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Olas de calor</li> <li>• Aumento de la temperatura</li> </ul>
<b>Efectos del aumento de la temperatura</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sequía</li> <li>• Deslizamientos</li> <li>• Incendios</li> <li>• Calor extremo</li> </ul>

Fuente: Mendoza et al (2017b)

Con este orden, en los siguientes puntos se realizará la representación geoespacial de eventos climáticos pasados y de escenarios futuros del cambio climático.

## **3.1 Análisis climático – eventos pasados**

En un análisis previo realizado por Mendoza et al (2017b), se construyeron dos bases de datos con información de impactos pasados asociados al clima en la infraestructura del transporte, y específicamente para carreteras; el primero de ellos fue a través del sistema DesInventar, y el segundo con los reportes de aportaciones económicas del FONDEN.

Con esta información se construyeron los primeros mapas, que se presentan a continuación.

### **3.1.1 Mapas de amenazas naturales - DesInventar**

DesInventar es un sistema de adquisición, consulta y despliegue de información sobre desastres de pequeños, medianos y grandes impactos; con base en datos preexistentes, fuentes hemerográficas y reportes de instituciones en nueve países de América Latina, construido por un grupo de expertos congregados en la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED).

Esta concepción, metodología y herramienta de software desarrolladas se denominan Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar).

El desarrollo de DesInventar, desde su concepción, permite ver los desastres desde una escala espacial local (municipio o equivalente); además facilita diálogos para gestión de riesgos entre actores e instituciones y sectores, y con gobiernos provinciales y nacionales.

DesInventar es una herramienta conceptual y metodológica para la construcción de bases de datos de pérdidas, daños o efectos ocasionados por emergencias o desastres (OSSO, 1994-2016).

De la base de datos, se realizó un análisis para extraer únicamente aquellos registros de desastres en los cuales se tuvieron efectos negativos en la infraestructura para el transporte.

En el anexo 1, se puede observar el resumen de los impactos en México asociados a diferentes fenómenos relacionados con el clima.

Cada registro puede tener uno o más municipios en su área de impacto, por lo que al realizar la representación geoespacial el número de datos se incrementa; ya que un solo evento climático pudo afectar varios municipios.

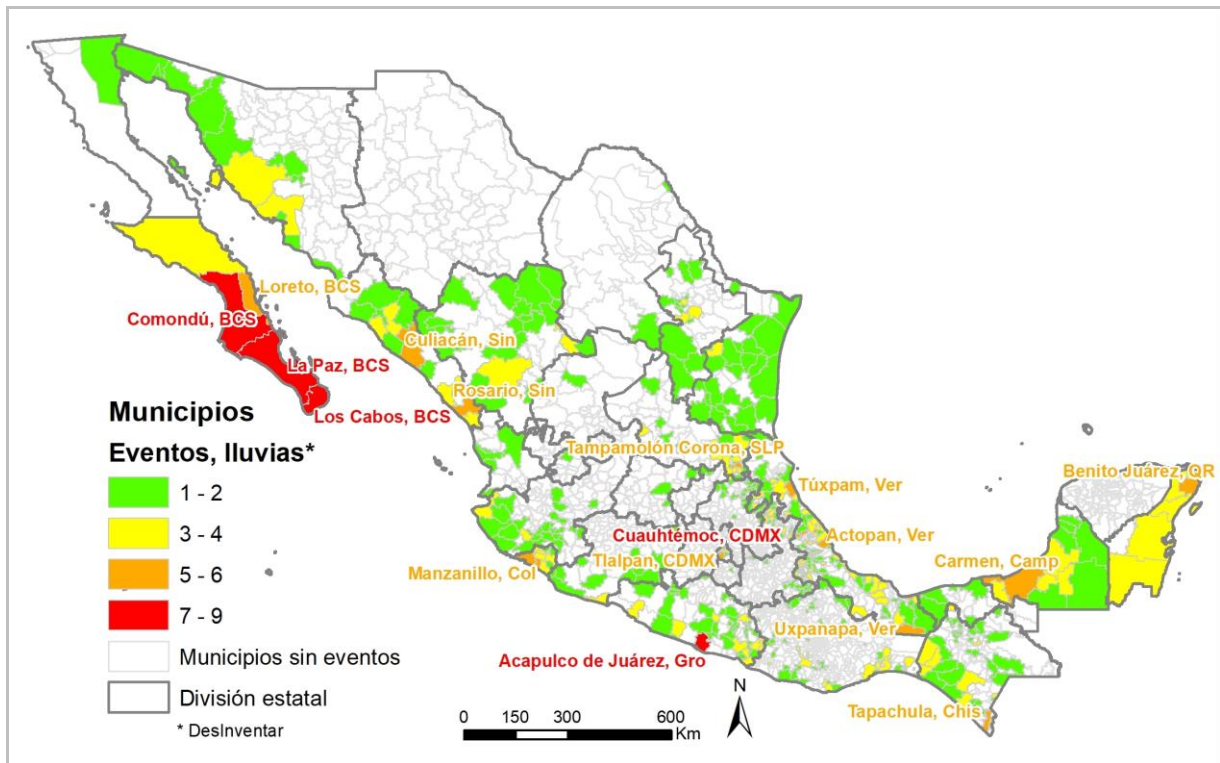
### 3.1.1.1 Lluvias

De acuerdo con el registro de eventos con lluvias de DesInventar, se generó el mapa 3.1.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 277 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras y los elementos asociados a ellas, tales como los puentes.

En el mapa se identificaron cinco municipios donde la red carretera se encuentra expuesta a un nivel muy alto debido a lluvias intensas.

Por lo que en estos sitios se deberán revisar los modelos hidrológicos con los que se han diseñado las infraestructuras de drenaje que conforman la carretera; para identificar riesgos asociados a este evento meteorológico extremo, que podría estar asociado al cambio climático.



**Figura 3.1 Mapa de exposición a lluvias intensas en México**

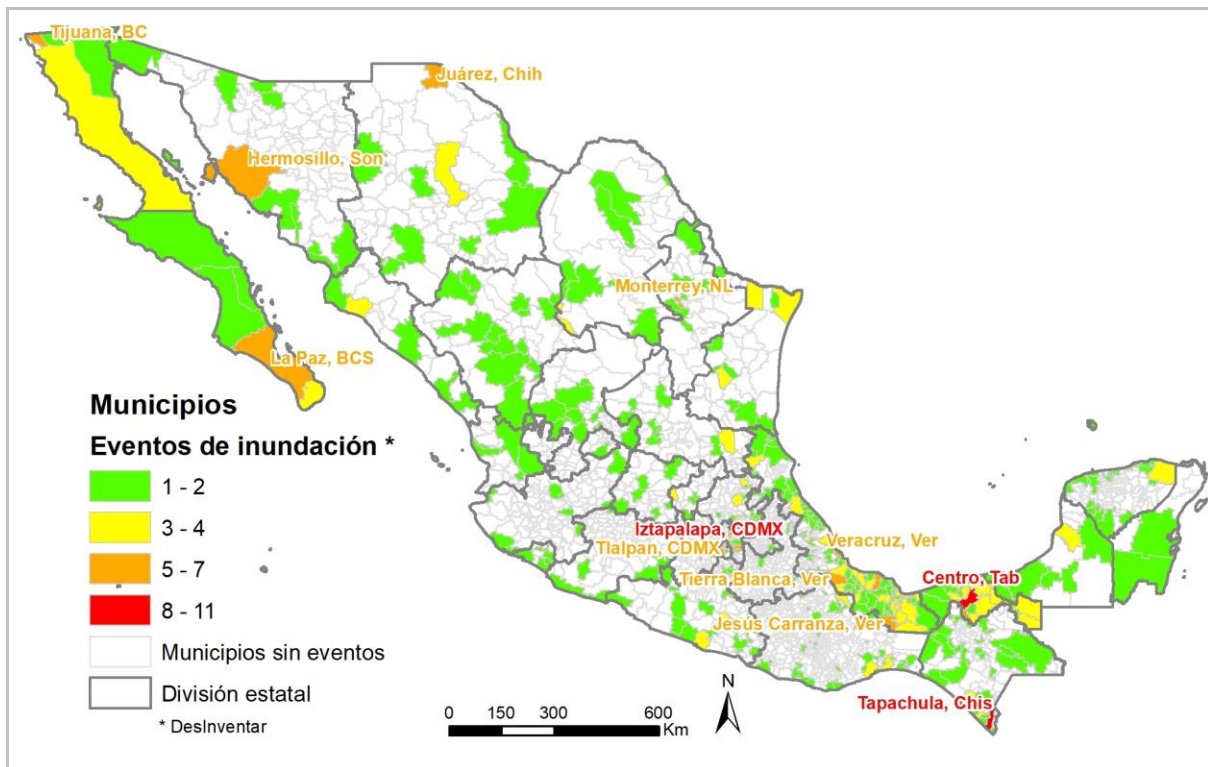
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.2 Inundaciones

De acuerdo con el registro de eventos con inundaciones de DesInventar, se elaboró el mapa 3.2. Las inundaciones son un efecto derivado de las lluvias intensas.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 518 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras y los elementos asociados a ellas, tales como los puentes.

En el mapa se identificaron tres municipios donde la red carretera se encuentra expuesta a un nivel muy alto debido a inundaciones.



**Figura 3.2 Mapa de exposición a inundaciones en México**

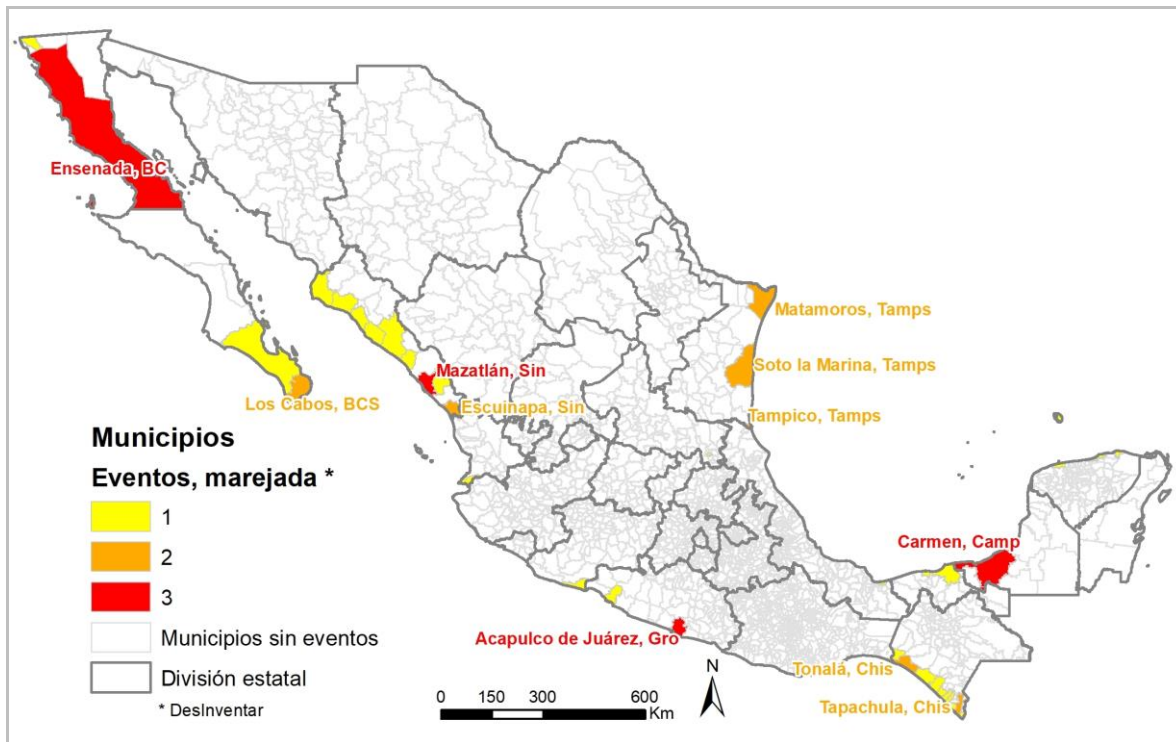
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.3 Marejadas

De acuerdo con el registro de eventos con marejadas de DesInventar se construyó el mapa 3.3. Las marejadas son un efecto derivado de tormentas intensas en zonas costeras o de ciclones tropicales/huracanes.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 53 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte, incluyendo las carreteras donde el fuerte oleaje provocó cierres parciales o cortes en dicha infraestructura; aunque el total de registros fue de 107, se excluyeron aquellos relacionados con la operación de los puertos.

En el mapa se identificaron cuatro municipios donde la red carretera se encuentra expuesta a un nivel alto debido a las marejadas de tormenta o ciclones tropicales.



**Figura 3.3 Mapa de exposición a marejadas en México**

Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.4 Deslizamientos

De acuerdo con el registro de eventos de deslizamientos de DesInventar se realizó el mapa 3.4. Los deslizamientos suelen estar asociados a eventos hidrometeorológicos que saturan el suelo, modificando el grado de cohesión, que se refleja en desprendimientos de material.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 380 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras, donde los deslizamientos provocaron cierres parciales o cortes en dicha infraestructura, derrumbes de terraplenes, etc.

En el mapa se identificaron varios municipios donde la red carretera se encuentra expuesta a un nivel alto y muy alto debido a deslizamientos de cortes o laderas.

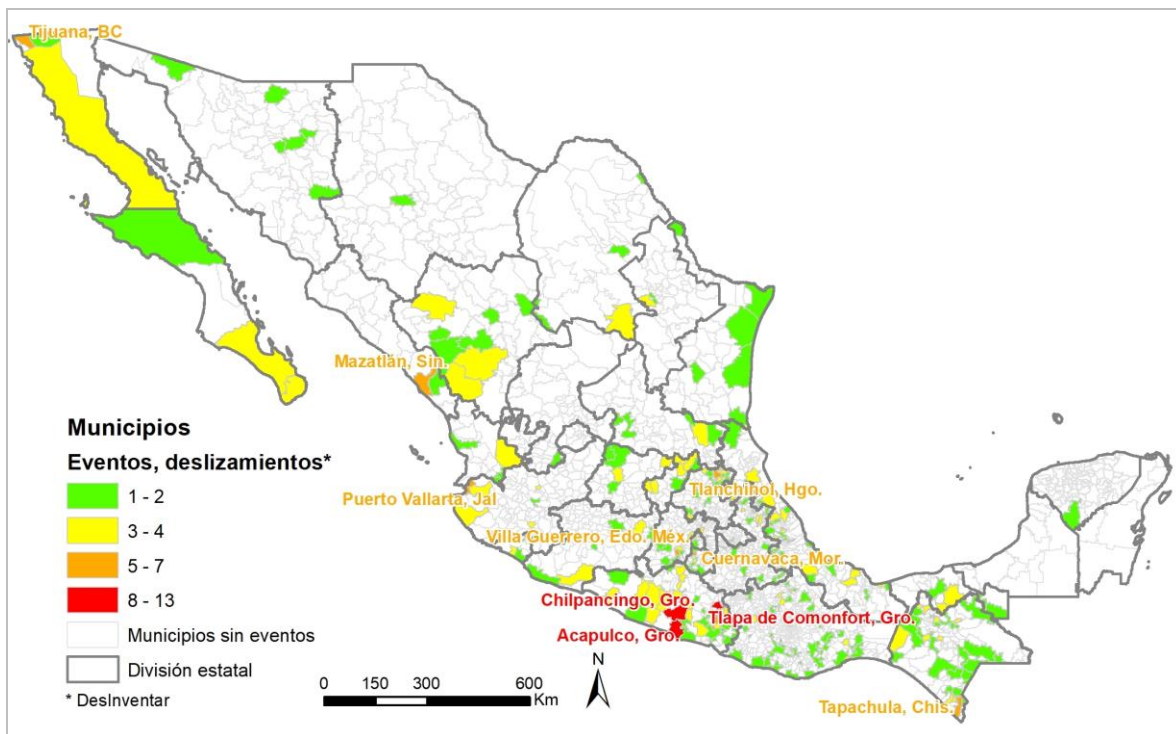


Figura 3.4 Mapa de exposición a deslizamientos en México

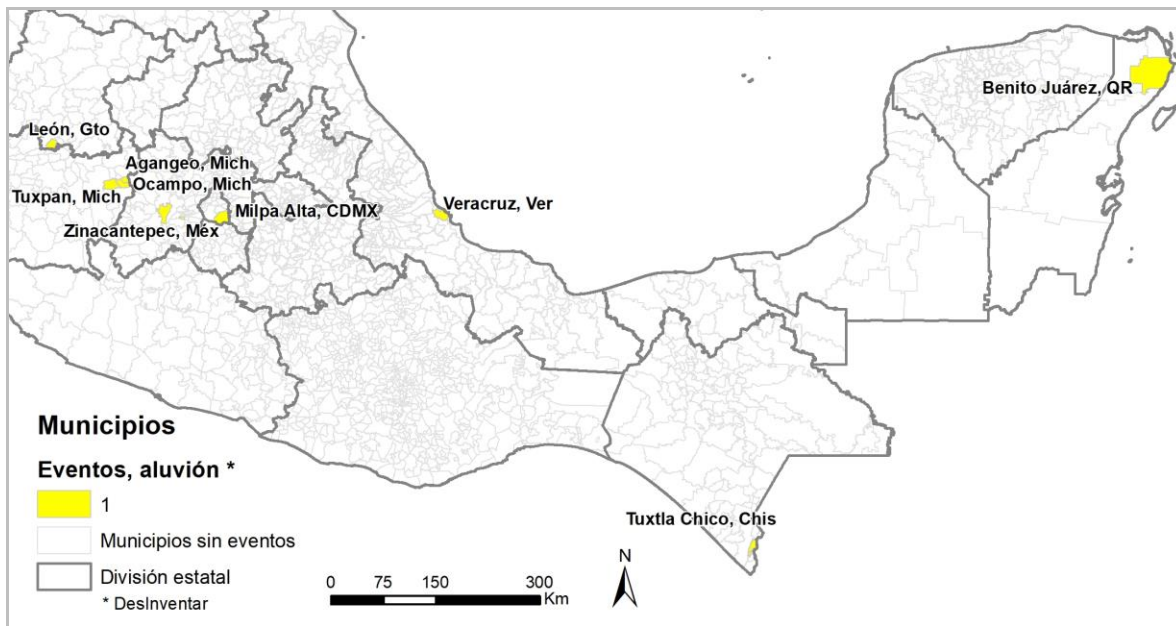
Fuente: Elaboración propia



### 3.1.1.5 Aluvión

De acuerdo con el registro de eventos de aluvión de DesInventar se realizó el mapa 3.5. Los aluviones son derivados de tormentas intensas o de impactos de huracanes tierra adentro, donde se transporta material mediante escurrimientos de agua.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 10 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras, donde los aluviones colapsaron puentes o cerraron carreteras.



**Figura 3.5 Mapa de exposición por aluviones en México**

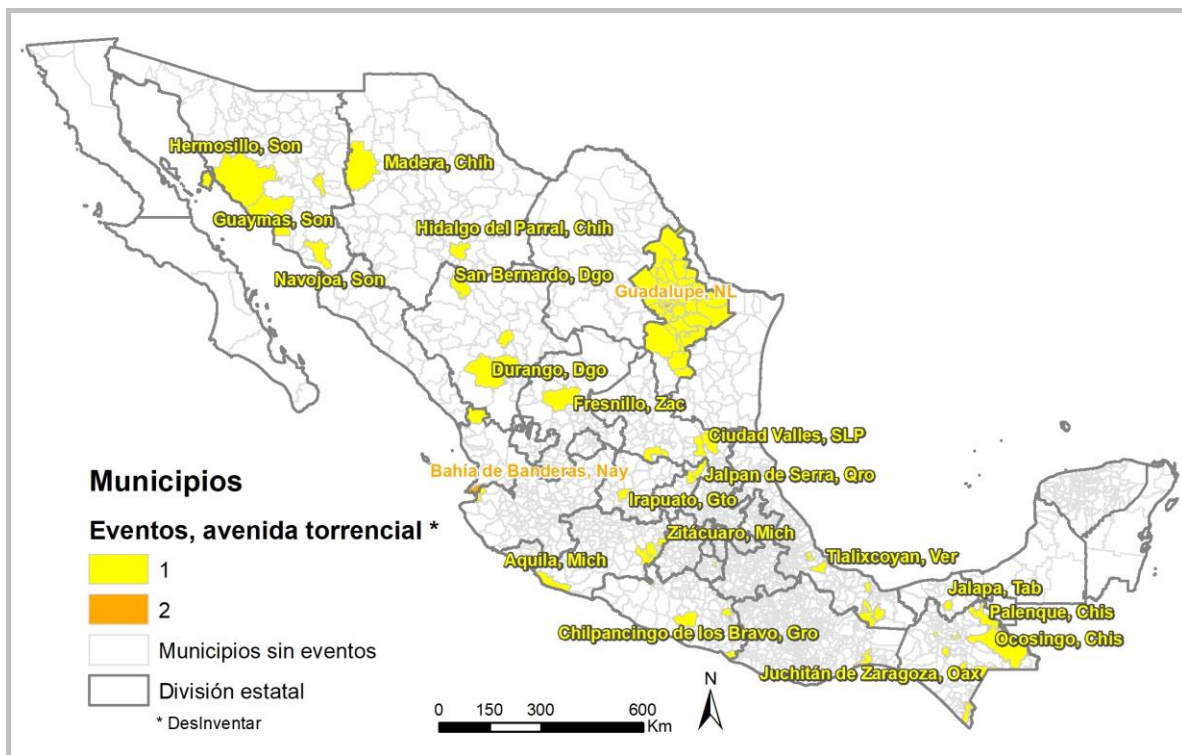
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.6 Avenida torrencial

De acuerdo al registro de eventos de avenidas torrenciales de DesInventar se generó el mapa 3.6. Las avenidas torrenciales se derivan de precipitaciones intensas en periodos cortos, provocando crecidas repentinas de los cuerpos de agua y que ponen en riesgo la infraestructura al rebasar sus umbrales de diseño.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 54 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras, los puentes y las obras de drenaje.

En dicho mapa se identificaron pocos municipios donde la red carretera estuviese expuesta a un nivel medio debido a deslizamientos de cortes o laderas.



**Figura 3.6 Mapa de exposición por avenidas torrenciales en México**

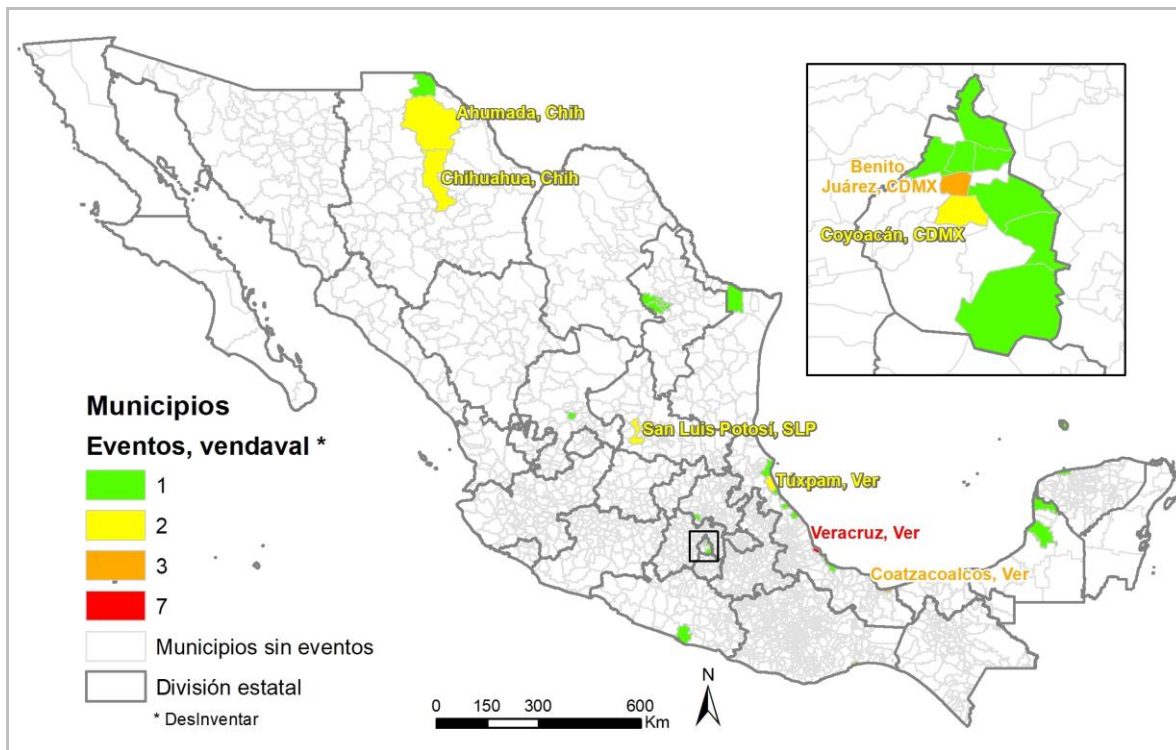
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.7 Vendaval

De acuerdo con el registro de eventos de vendavales de DesInventar se construyó el mapa 3.7. Los vendavales son un efecto derivado de tormentas intensas o de ciclones tropicales/huracanes.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 54 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras, donde los fuertes vientos provocaron cierres parciales por elementos caídos en las carreteras; aunque el total de registros fue de 237, se excluyeron aquellos relacionados con afectaciones en zonas urbanas.

En dicho mapa se identificó el municipio de Veracruz donde la red carretera se encuentra expuesta a un nivel muy alto, debido a vendavales de tormenta o ciclones tropicales.



**Figura 3.7 Mapa de exposición a vendavales en México**

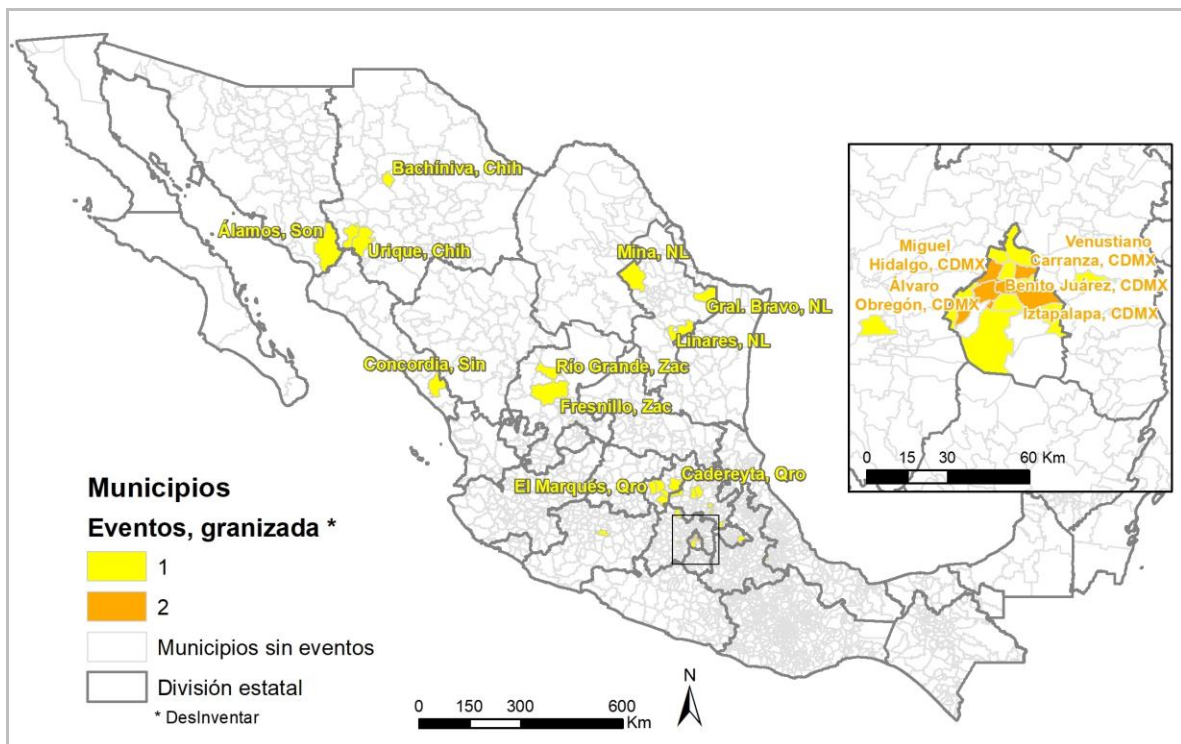
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.8 Granizada

De acuerdo con el registro de eventos de granizadas de DesInventar se realizó el mapa 3.8. Las granizadas tienen impactos directos en la infraestructura de transporte.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 24 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras, principalmente cierres carreteros por acumulación de granizo o falta de visibilidad.

En el mapa se identificaron pocos municipios donde la red carretera estuviera expuesta a un nivel bajo y medio debido a los efectos de las granizadas.



**Figura 3.8 Mapa de exposición a granizadas en México**

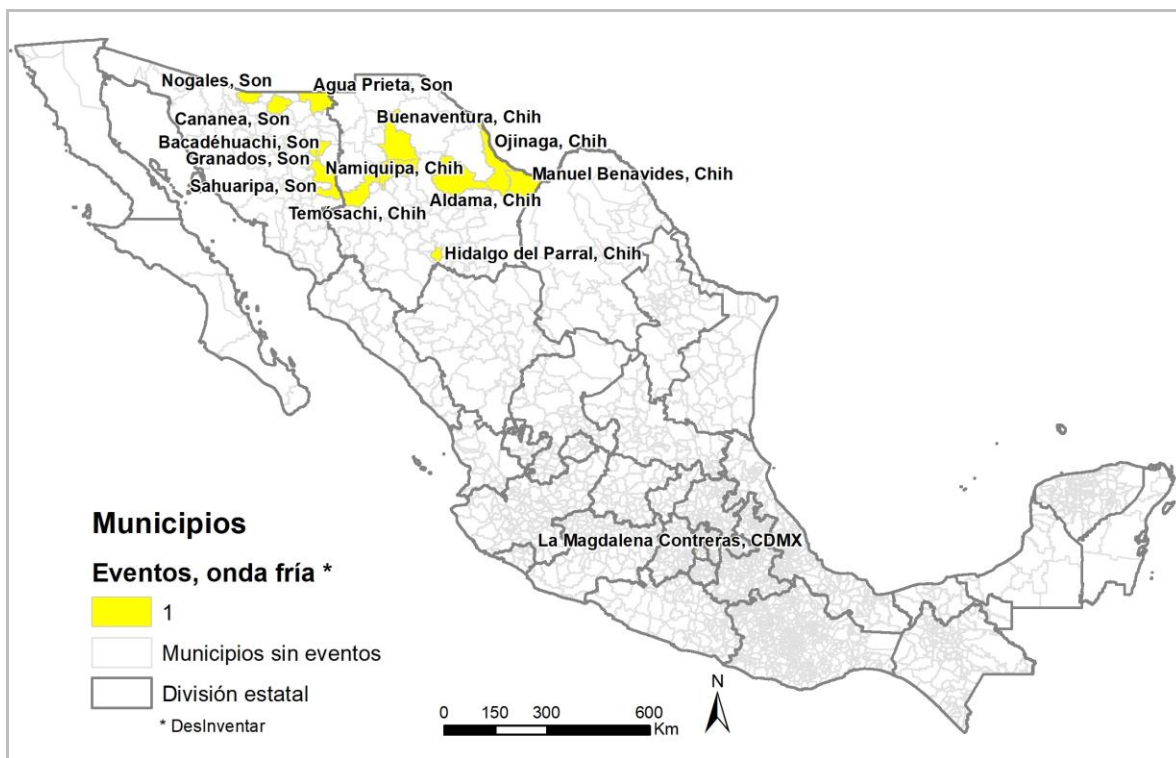
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.9 Onda fría

De acuerdo con el registro de eventos de ondas frías de DesInventar se construyó el mapa 3.9. Las ondas frías conllevan múltiples impactos a los diversos fenómenos que los acompañan.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal cinco registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras, principalmente cierres carreteros que incomunican poblaciones.

En dicho mapa se identificaron pocos municipios donde la red carretera estuviese expuesta a un nivel bajo debido a los efectos de las ondas frías.



**Figura 3.9 Mapa de exposición debido a las ondas frías en México**

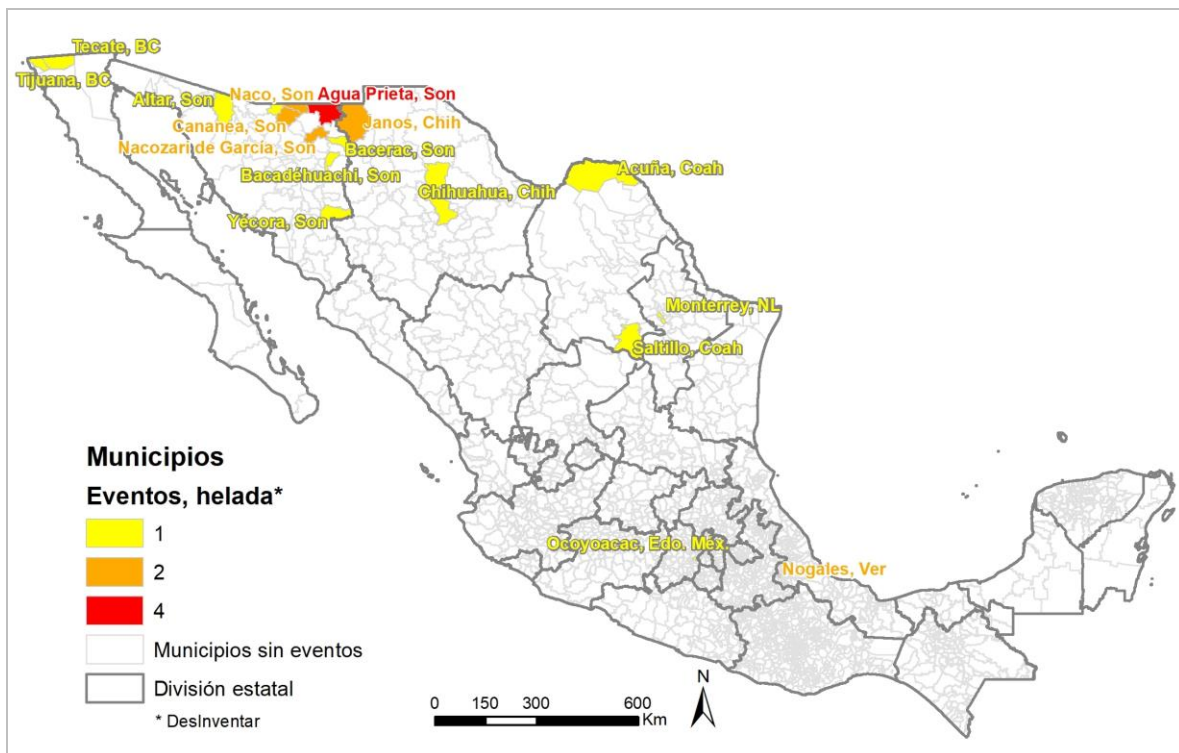
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.10 Helada

De acuerdo con el registro de eventos de heladas de DesInventar se hizo el mapa 3.10. Las heladas conllevan múltiples impactos debido a los diversos fenómenos que los acompañan.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 19 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras, principalmente cierres carreteros que incomunican poblaciones.

En el mapa se identificaron pocos municipios donde la red carretera se encontraba expuesta a niveles medios y altos debido a los efectos de las heladas, que suelen presentarse en el norte del país.



**Figura 3.10 Mapa de exposición debido a las heladas en México**

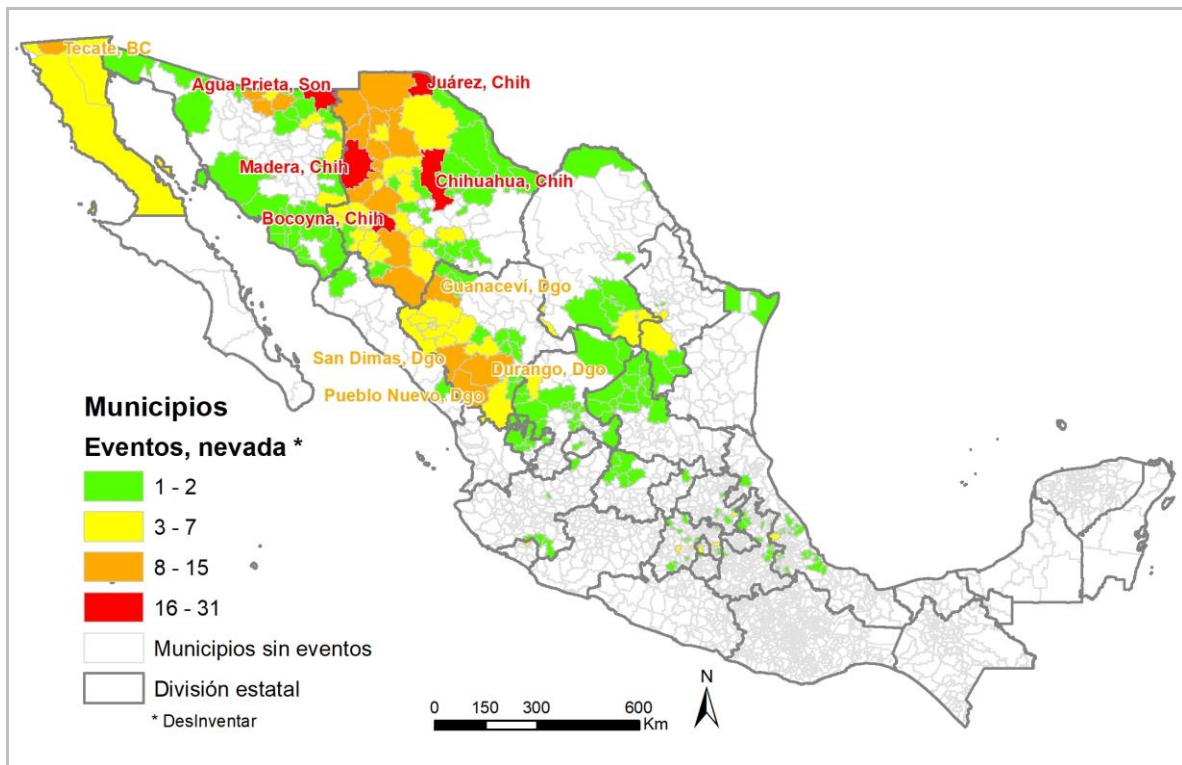
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.11 Nevada

De acuerdo con el registro de eventos de nevadas de DesInventar se elaboró el mapa 3.11. Las nevadas en México se producen asociadas a frentes fríos y son más comunes en el norte del país o puntos altos.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 228 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte, incluyendo las carreteras; principalmente cierres carreteros que incomunican poblaciones por acumulación de nieve, congelamiento del pavimento, entre otros efectos.

En el mapa se identificaron pocos municipios donde la red carretera había estado expuesta a un nivel muy alto debido a los efectos de las nevadas.



**Figura 3.11 Mapa de exposición debido a las nevadas en México**

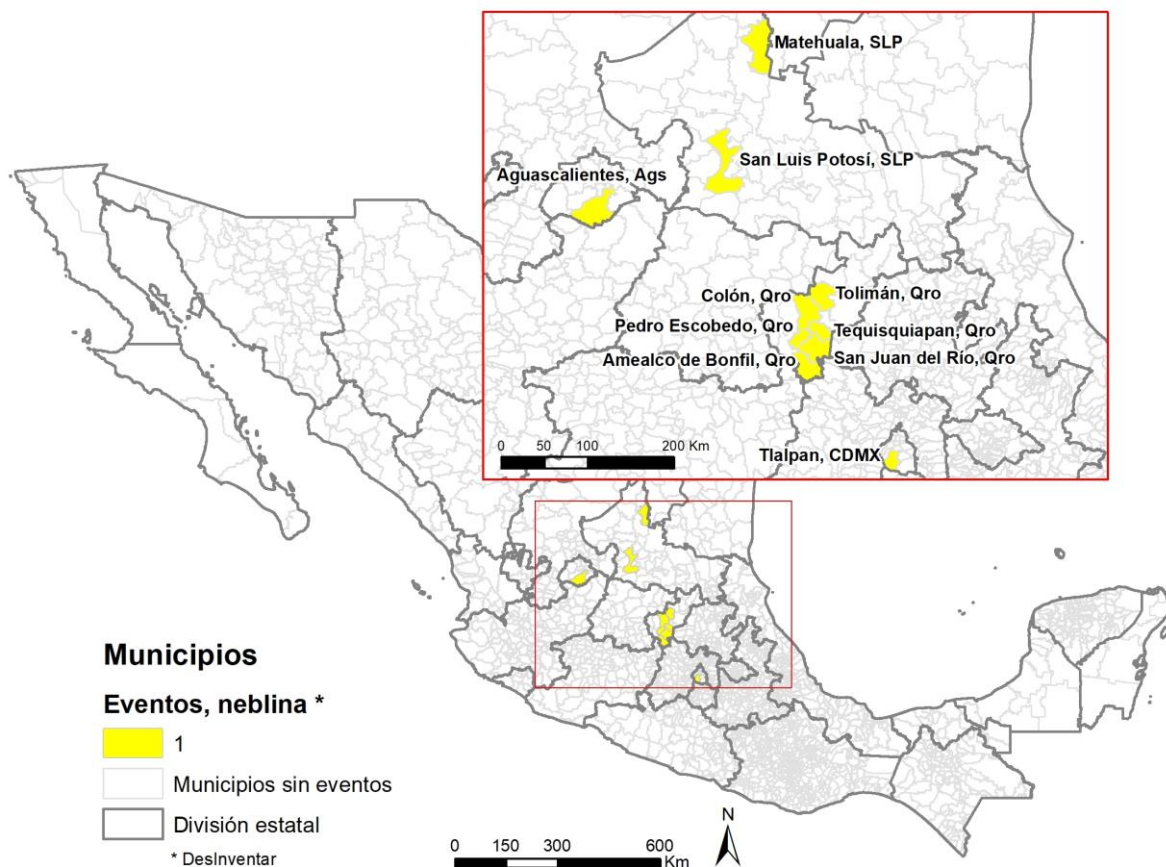
Fuente: Elaboración propia

### 3.1.1.12 Neblina

De acuerdo con el registro de eventos de neblina de DesInventar se realizó el mapa 3.12. La neblina es un efecto asociado a las ondas frías.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 10 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte; incluyendo las carreteras donde la neblina provocó cierres parciales en las carreteras por falta de visibilidad, aunque el total de registros fue de 21 se excluyeron aquellos relacionados con afectaciones a las operaciones aeroportuarias.

En el mapa se identificaron varios municipios donde la red carretera se encuentra expuesta a niveles bajos por la afectación de neblina.



**Figura 3.12 Mapa de exposición debido a las neblinas en México**

Fuente: Elaboración propia

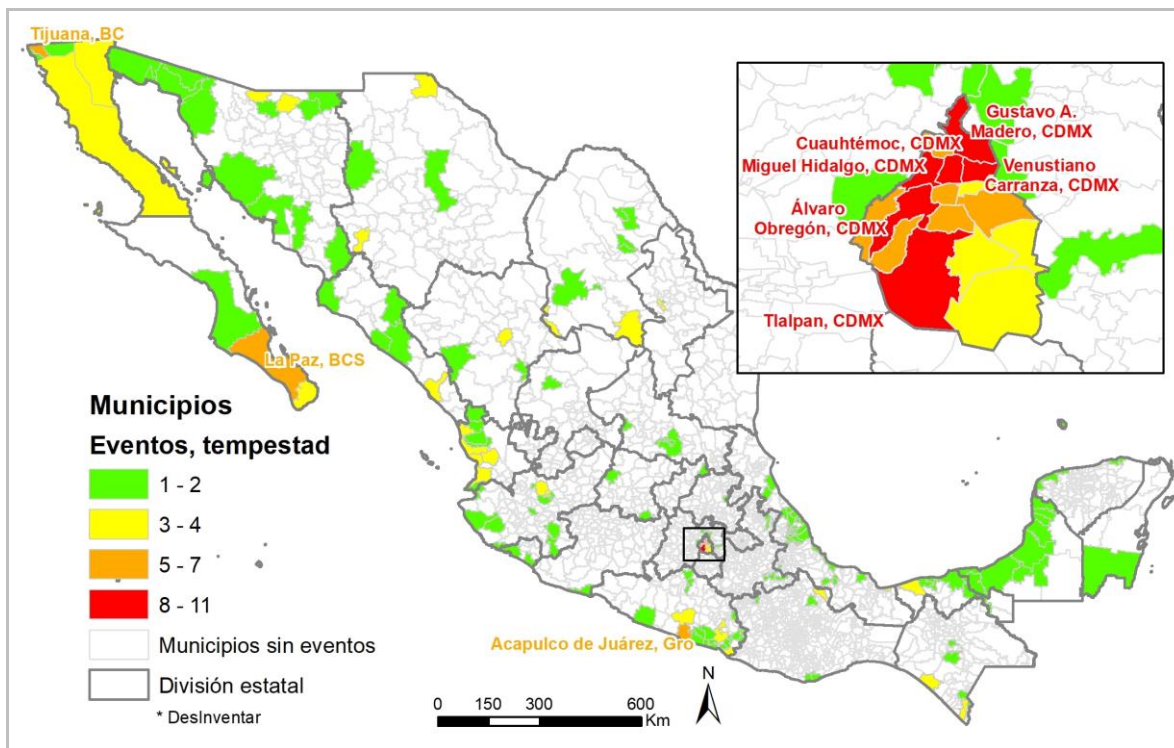


### 3.1.1.13 Tempestad

De acuerdo con el registro de tempestad de DesInventar se construyó el mapa 3.13. Las tempestades se manifiestan con viento, grandes nubes y termina en precipitaciones severas, acompañadas de rayos, truenos y relámpagos.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal 234 registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte, incluyendo las carreteras; principalmente cierres carreteros por acumulación del agua, visibilidad reducida y derrumbe de puentes.

En el mapa se identificaron varios municipios (delegaciones de la Ciudad de México) donde la red carretera estaba expuesta a un nivel muy alto debido a los efectos de las tempestades.



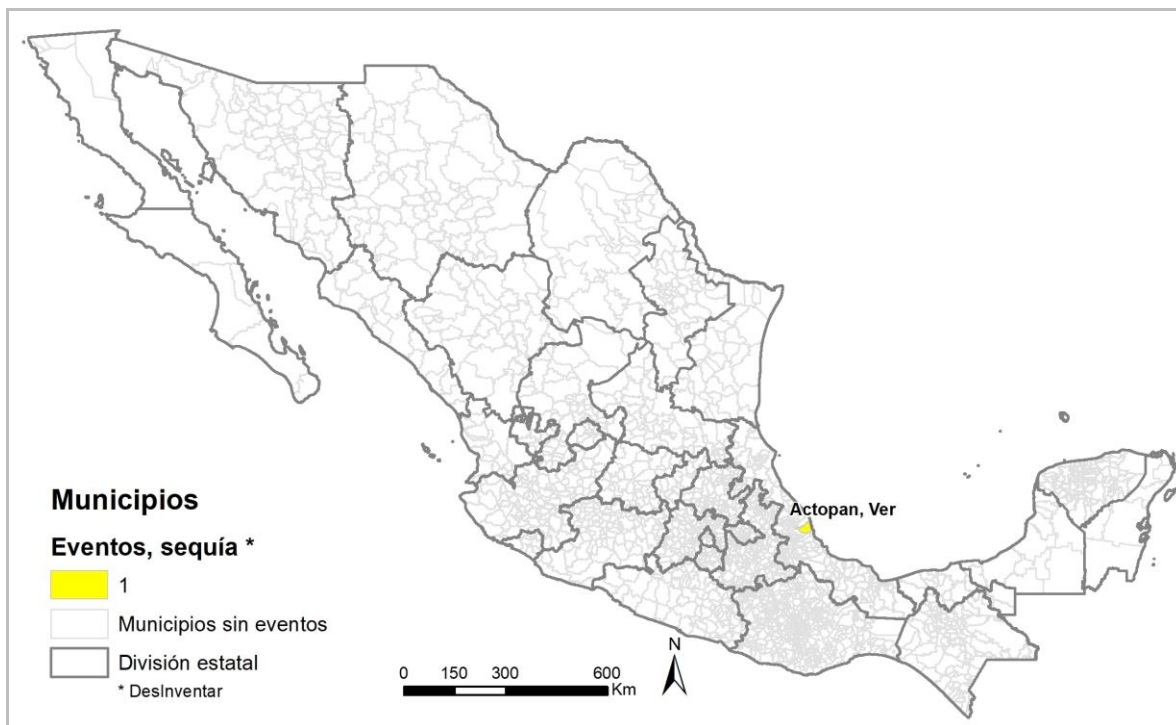
**Figura 3.13 Mapa de exposición debido a las tempestades en México**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1.14 Sequía

De acuerdo con el registro de eventos de sequías de DesInventar se elaboró el mapa 3.14. Las sequías tienen efectos diversos en la infraestructura y conlleva a los incendios.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal el único registro histórico que ha afectado la infraestructura del transporte, particularmente daños a la carpeta asfáltica de las carreteras.



**Figura 3.14 Mapa de exposición debido a sequías en México**

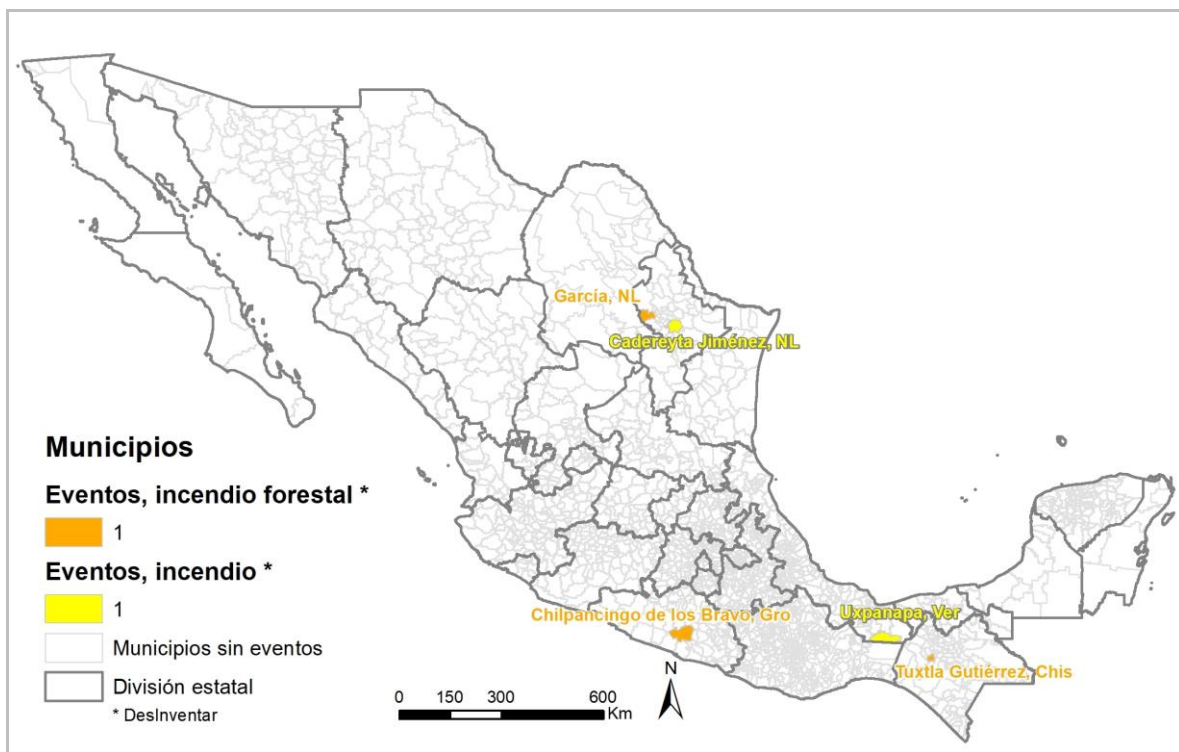
Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1.15 Incendios e incendios forestales

De acuerdo con el registro de eventos de incendios de DesInventar se elaboró el mapa 3.15. Los incendios son efectos de la sequía que se produce por las ondas frías o las ondas de calor.

En el mapa se representaron geoespacialmente a escala municipal cinco registros históricos que han afectado la infraestructura del transporte, incluyendo las carreteras; principalmente cierres carreteros.

En el mapa se identificaron pocos municipios donde la red carretera estuviera expuesta a un nivel bajo debido a los efectos de los incendios.

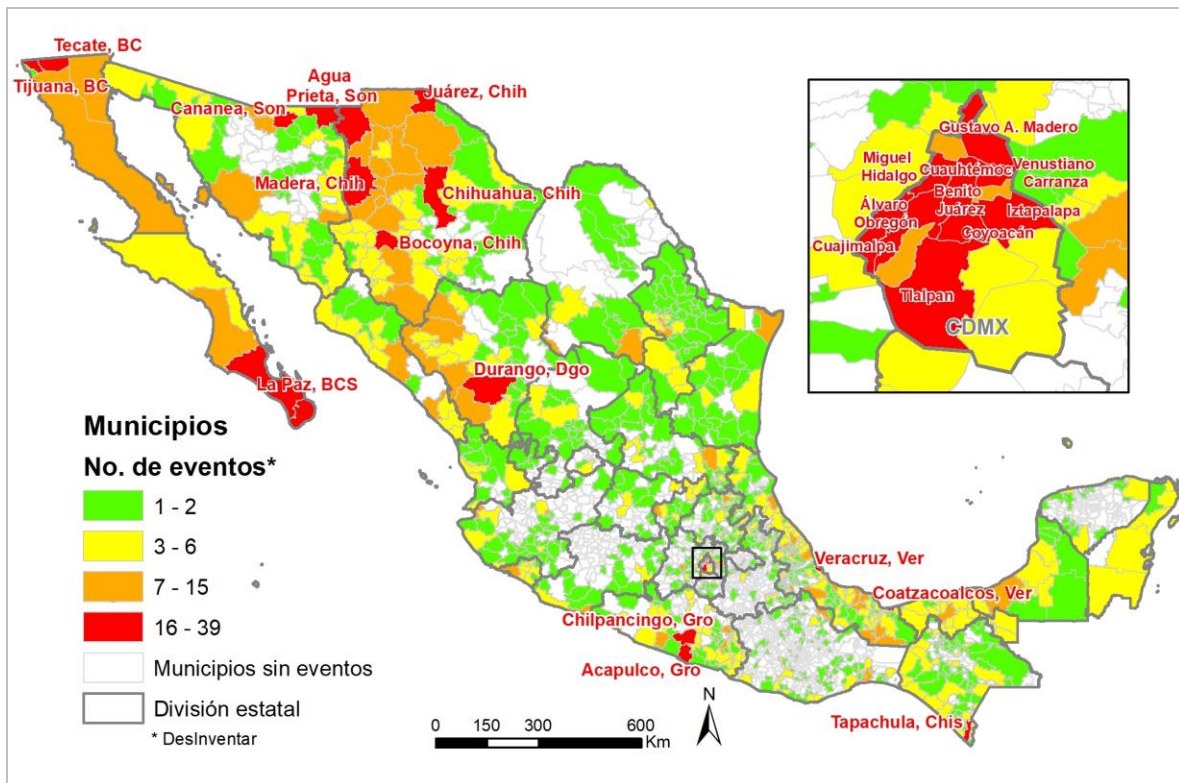


**Figura 3.15 Mapa de exposición debido a incendios en México**

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.1.16 Todos

En un análisis integral de todos los eventos registrados en DesInventar se pudo construir el mapa de la figura 3.16, en la cual se pueden observar los municipios que mayor número de eventos han registrado debido a los efectos de los impactos de fenómenos que podrían estar asociados al cambio climático.



**Figura 3.16 Mapa de exposición de México al Cambio Climático**

Fuente: Elaboración propia.

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

### 3.1.2 Mapas de amenazas naturales - FONDEN

El Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) es un instrumento financiero que busca responder de manera inmediata para proporcionar suministros que auxilien y den asistencia a la población que se encuentra ante la inminencia o alta probabilidad de que ocurra un fenómeno natural perturbador; ya sea del tipo geológico, meteorológico o hidrometeorológico.

Cuando un fenómeno natural perturbador impacte la infraestructura de transporte, es posible acceder a los recursos del FONDEN, con el objetivo de mitigar los efectos que produzca el fenómeno.

La Dirección General para la Gestión de Riesgos de la Secretaría de Gobernación publica anualmente los recursos autorizados por declaratoria de desastre; donde con mayor detalle se pueden ver los registros de los desastres naturales que han impactado la infraestructura carretera; ya sea federal, estatal o municipal.

Debido a que la declaratoria de desastres naturales se realiza por estado, entonces un mismo fenómeno climático puede contarse dos veces o más.

De los resultados publicados por la Dirección General para la Gestión de Riesgos sobre las aportaciones FONDEN, se realizó una clasificación de los fenómenos climáticos que han impactado las carreteras. Para ver el detalle, se sugiere consultar el anexo 3 “Aportaciones FONDEN 1999-2015” de la Publicación Técnica No. 498 “El clima y las carreteras en México” del IMT. (Disponible para descarga en [www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt498.pdf](http://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt498.pdf)).

Con base en el registro de eventos y las aportaciones totales (es la suma de las aportaciones del FONDEN, aportaciones del estado y/o de alguna dependencia federal), se elaborarán los mapas que reflejan por tipo de evento climático las inversiones utilizadas para restablecer los servicios que las carreteras prestan, acumulados por entidad federativa.

En el análisis realizado a los reportes emitidos sobre las aportaciones del Fondo de Desastres Naturales en el país, de 1999 al 2015, se identificaron aquellos eventos climáticos que han demandado más recursos y que se muestran en los siguientes puntos, donde son representados por estado.

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

### 3.1.2.1 Mapas del impacto económico en la infraestructura carretera debido a fenómenos posiblemente asociados al cambio climático

Con la información del FONDEN, se realizaron los mapas (figuras 3.17 a la 3.25) que representan la inversión de recursos, por entidad federativa, para atender los impactos producidos en las carreteras debido a fenómenos posiblemente asociados al cambio climático.

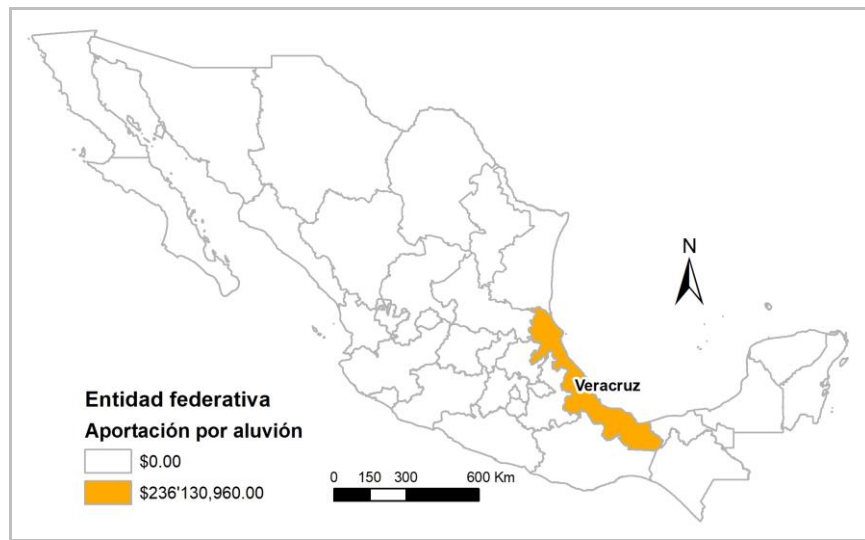


Figura 3.17 Mapa del impacto económico por aluviones

Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.

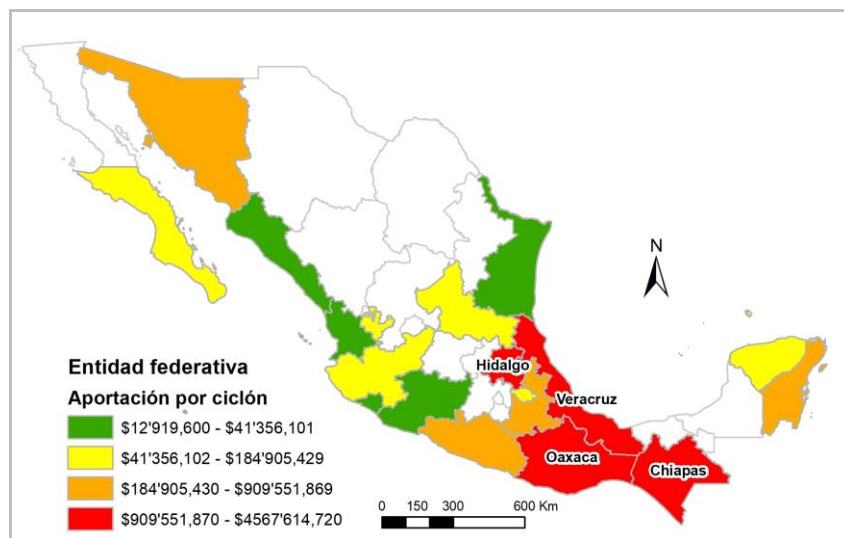
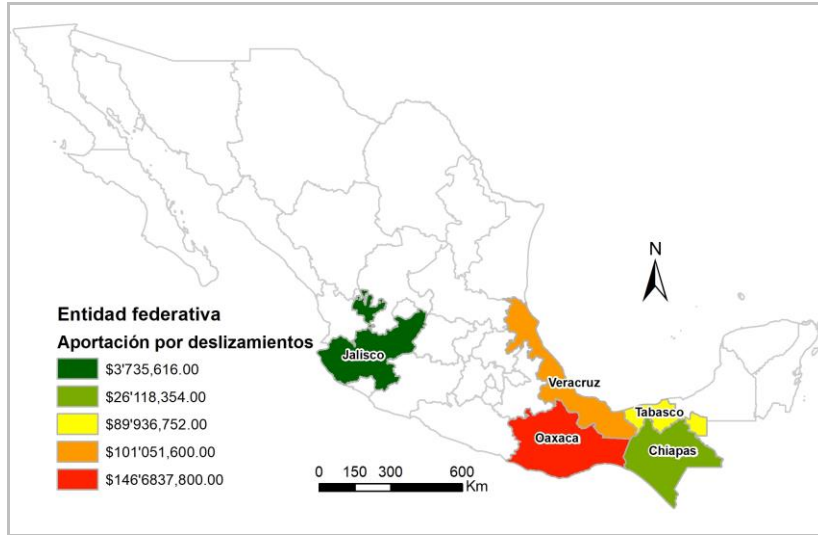


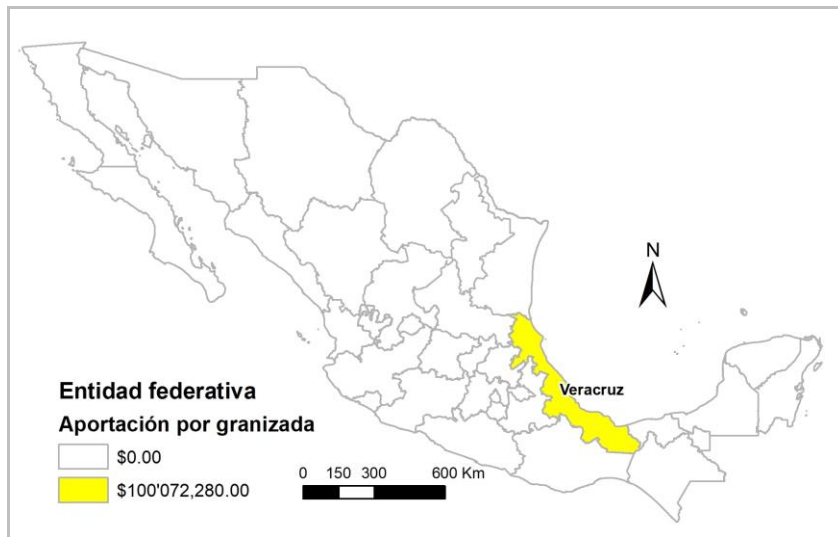
Figura 3.18 Mapa del impacto económico por ciclones tropicales

Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.



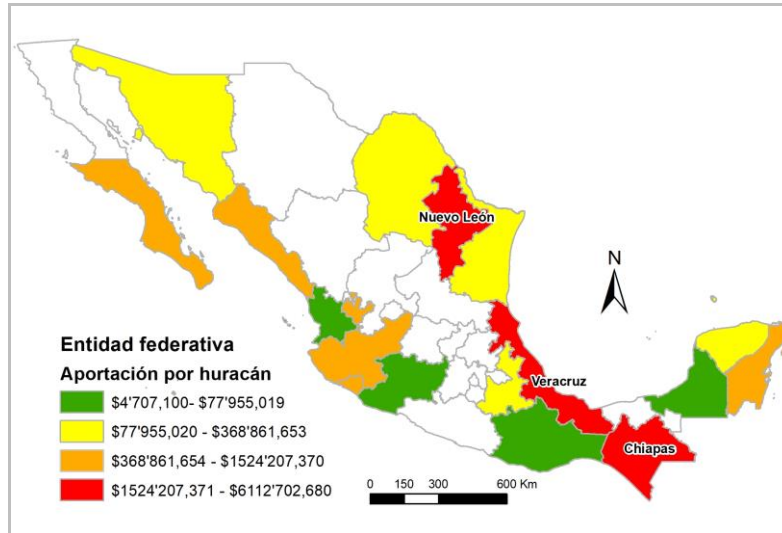
**Figura 3.19 Mapa del impacto económico por deslizamientos**

Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.



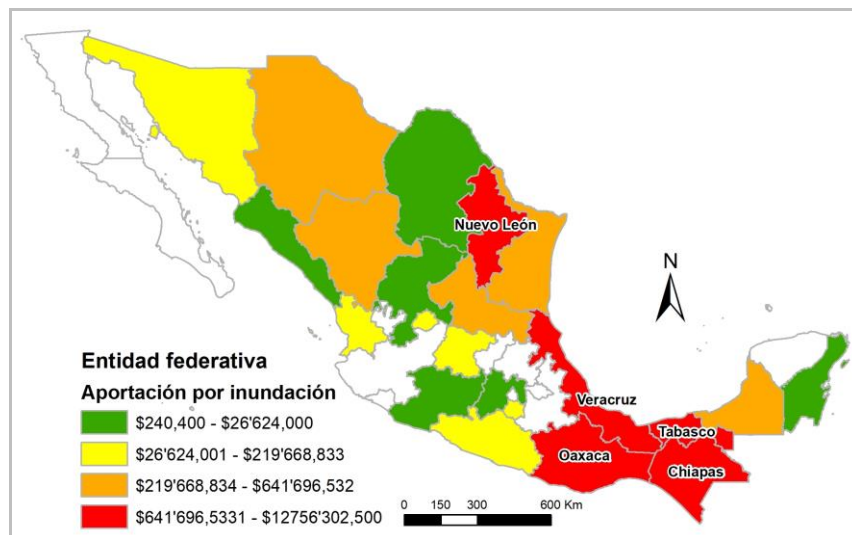
**Figura 3.20 Mapa del impacto económico por granizadas**

Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.



**Figura 3.21 Mapa del impacto económico por huracanes**

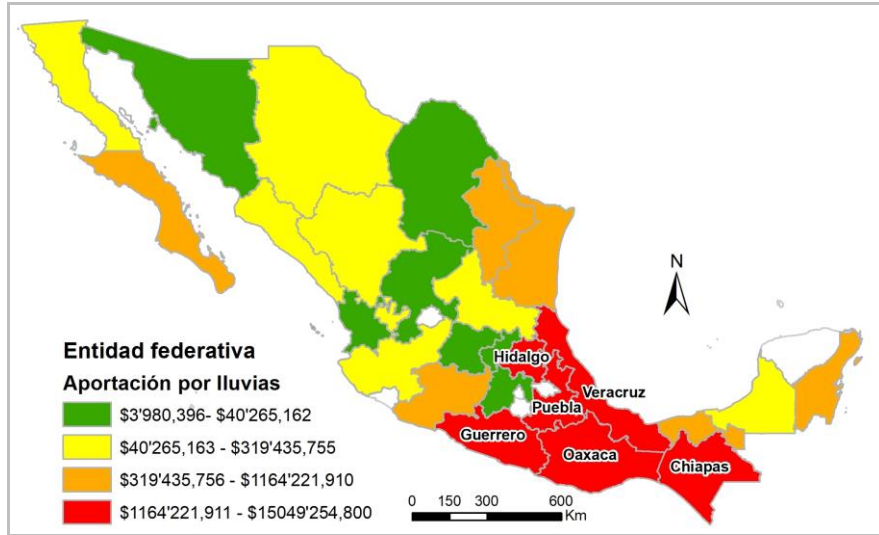
Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.



**Figura 3.22 Mapa del impacto económico por inundaciones**

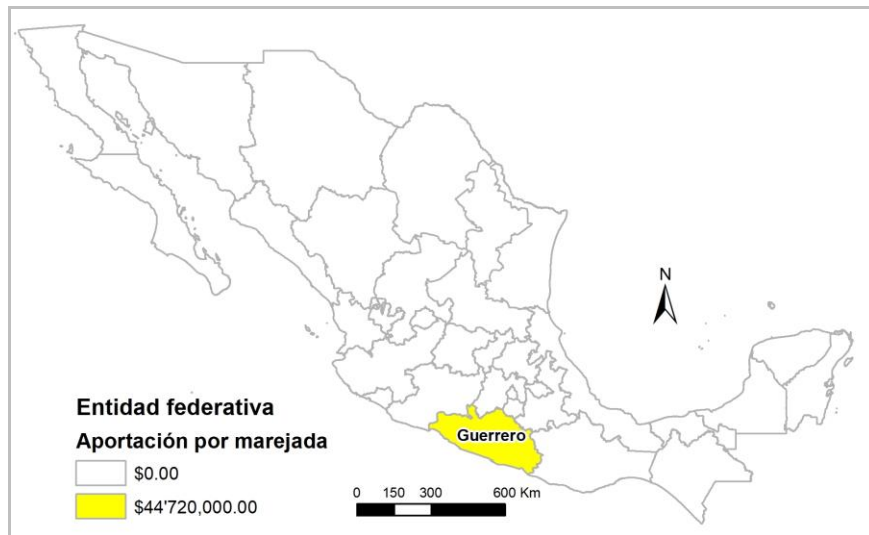
Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.





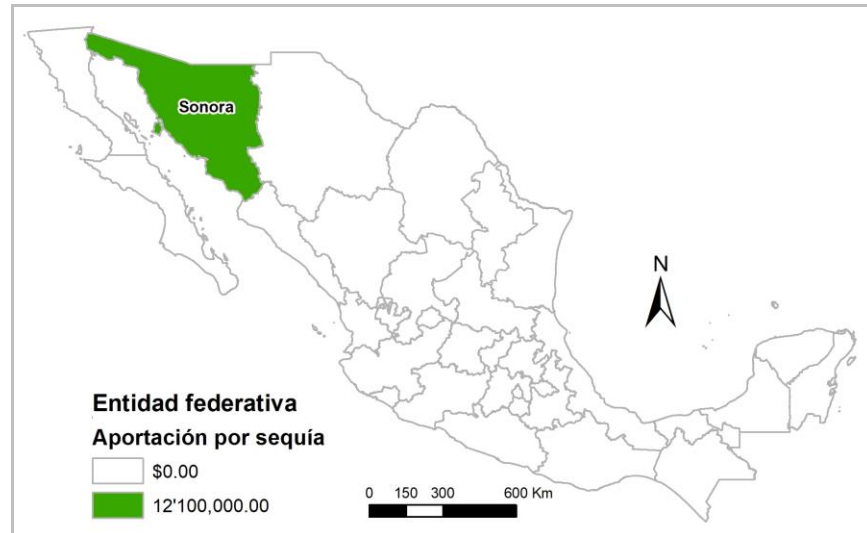
**Figura 3.23 Mapa del impacto económico por lluvias**

Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.



**Figura 3.24 Mapa del impacto económico por marejadas**

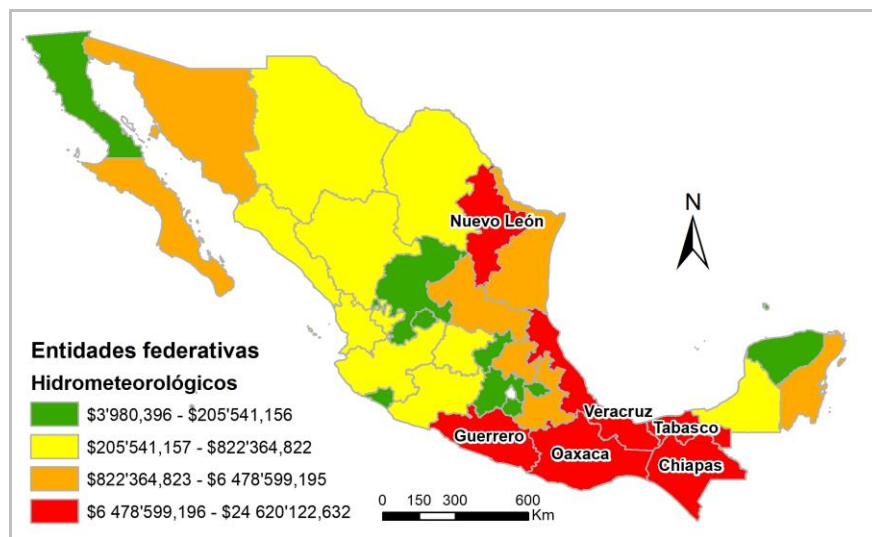
Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.



**Figura 3.25 Mapa del impacto económico por sequía**

Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.

La mayoría de las inversiones se debe a impactos de fenómenos hidrometeorológicos y sus efectos; por lo que se realizó un mapa con el total de las inversiones económicas e incluyen: aluvión, ciclón, deslizamientos, granizada, huracanes, inundación, lluvias; los cuales se muestran en la figura 3.26.



**Figura 3.26 Mapa del impacto económico por fenómenos hidrometeorológicos**

Fuente: Elaboración propia con datos del FONDEN.

La cantidad de infraestructura afectada y reparada también puede ser revisada en la Publicación Técnica No. 498 "El clima y las carreteras en México" del IMT.

## **3.2 Análisis climático – Modelaciones de peligro**

El Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) elaboró, en el 2012, una serie de mapas a escala municipal a través de la construcción de índices de riesgo, basados en la frecuencia que los diferentes fenómenos hidrometeorológicos han impactado al país, en sus diferentes sectores.

Los mapas de peligro fueron elaborados con información de diferentes fuentes, principalmente de estudios realizados por la Universidad Nacional Autónoma de México. Los detalles de la construcción de los mapas de peligro se pueden consultar en CENAPRED, 2012.

La escala de los mapas tiene una resolución municipal, por lo que la cuantificación de las carreteras será el total para cada uno de los municipios que se encuentren en niveles de peligro alto o muy alto; dependiendo de los niveles de intensidad que se utilice en cada mapa en particular.

### **3.2.1 Mapas de peligro del CENAPRED**

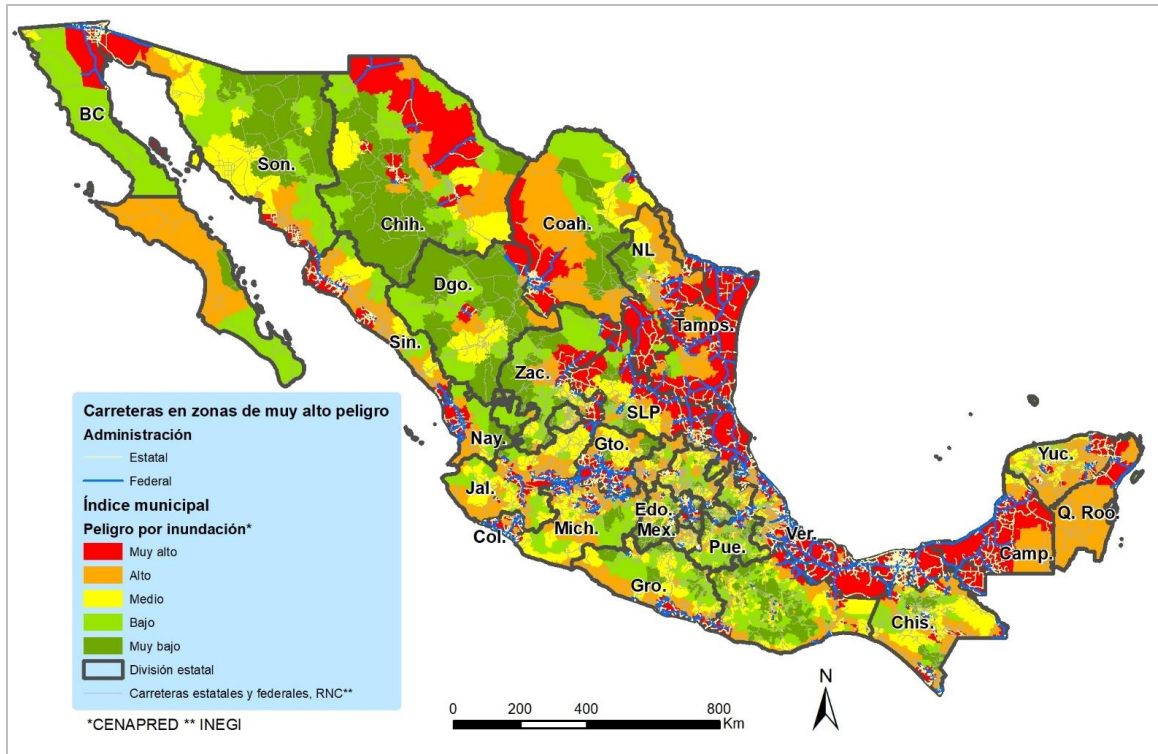
Las capas de información de los índices de peligro de CENAPRED fueron superpuestas a la red de carreteras con el objetivo de identificar aquellas zonas donde la infraestructura carretera está expuesta a los diferentes peligros hidrometeorológicos y que en el futuro pudieren comprometer su integridad.

#### **3.2.1.1 Índice de peligro por inundaciones en la infraestructura carretera**

El índice de peligro por inundación a escala municipal fue calculado por el CENAPRED, en el año 2016. Las inundaciones están asociadas con diversos factores como: 1) desbordamiento de ríos; 2) inundaciones súbitas, 3) mareas altas asociadas con huracanes y 4) rompimiento de estructuras de control.

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

La figura 3.27 muestra a escala municipal el índice de peligro de inundación, determinado por el CENAPRED.



**Figura 3.27 Mapa de peligro de inundación en la red de carreteras en México**

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED e INEGI.

La tabla 3.2 presenta la longitud total de las carreteras (km-carril) que se encuentran en las zonas de muy alto peligro; y en la tabla 3.3, el número de puentes que están localizados en las carreteras con dicho nivel de peligro.

**Tabla 3.2 Longitud expuesta de carreteras al peligro de inundación con nivel muy alto por entidad federativa**

Entidad federativa	Estatal (km-carril)	Federal (km-carril)	Total (km-carril)
Veracruz	7,963	6,291	14,254
Tamaulipas	4,464	3,665	8,129
Campeche	3,949	2,330	6,279
San Luis Potosí	3,687	2,245	5,933
Guanajuato	2,865	2,412	5,277
Nuevo León	3,109	1,615	4,724
Michoacán	1,748	1,735	3,483
Sinaloa	2,539	941	3,480
Chihuahua	1,989	1,239	3,228
Chiapas	2,268	874	3,143
Jalisco	1,661	1,419	3,081
Coahuila	1,834	919	2,754
Zacatecas	1,510	966	2,476
Baja California	1,228	1,042	2,270
Estado de México	1,351	888	2,240

Entidad federativa	Estatal (km-carril)	Federal (km-carril)	Total (km-carril)
Colima	992	1,087	2,079
Sonora	1,636	435	2,071
Yucatán	1,440	488	1,927
Oaxaca	776	995	1,771
Guerrero	1,006	751	1,757
Nayarit	747	661	1,408
Quintana Roo	625	677	1,302
Puebla	633	502	1,135
Durango	274	520	793
Hidalgo	453	70	523
Morelos	282	86	368
Querétaro	106	70	175
Tlaxcala	28	60	88
<b>Total (km-carril)</b>	<b>51,163</b>	<b>34,984</b>	<b>86,146</b>

Fuente: Elaboración propia.

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

Entidad federativa	No. de puentes
Veracruz	569
Tamaulipas	396
Michoacán	219
Chiapas	205
Guanajuato	179
San Luis Potosí	177
Sinaloa	173
Campeche	156
Chihuahua	131
Baja California	93
Oaxaca	92
Sonora	88
Nayarit	85
Guerrero	75
Nuevo León	64
Colima	59
Estado de México	56
Jalisco	53
Coahuila	50
Zacatecas	29
Puebla	24
Durango	23
Quintana Roo	11
Hidalgo	9
Querétaro	6
Morelos	5
Tlaxcala	5
Yucatán	1
<b>Total</b>	<b>3,033</b>

Fuente: Elaboración propia.

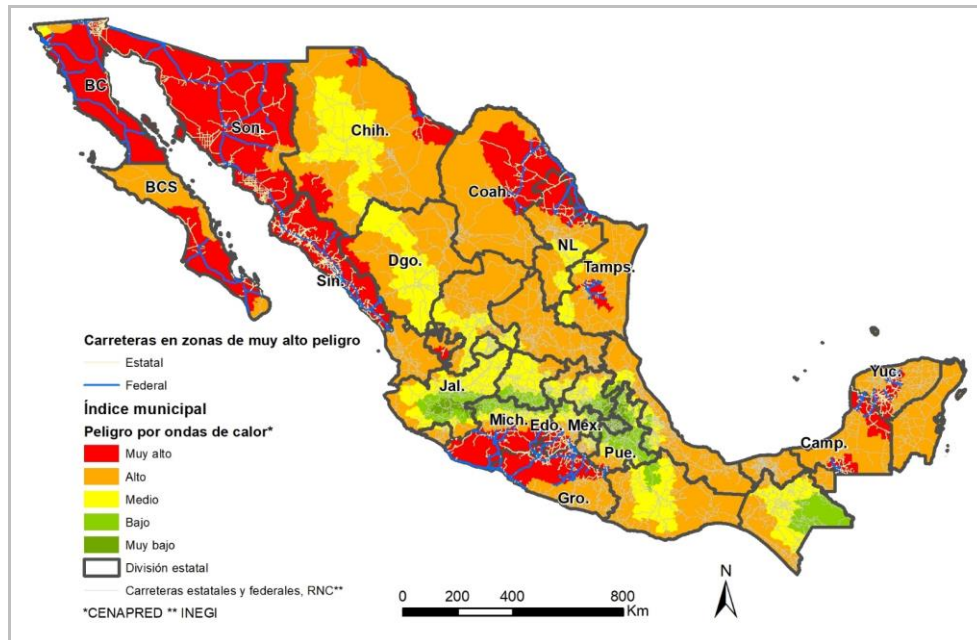
### 3.2.1.2 Índice de peligro por ondas de calor en la infraestructura carretera

El índice de peligro por ondas de calor a escala municipal fue calculado por el CENAPRED (2016) con base en diversos documentos técnicos, donde definen una onda de calor de acuerdo con dos criterios: umbrales de temperatura absolutos y relativos.

Se utilizan dos criterios:

- a) cuando las temperaturas máximas y mínimas sobrepasan el percentil 90 en al menos dos días consecutivos. Se pueden unir dos eventos, si el lapso entre ellos no supera las 24 horas (un día) y la temperatura máxima y mínima superan el valor de la temperatura mediana de su serie correspondiente, y
- b) cuando la temperatura máxima sobrepasa el percentil 90 de la serie de temperaturas máximas y la temperatura mínima es mayor a la temperatura esperada de ese mismo día. Lo anterior debe de sobrepasar en al menos dos días consecutivos.

Con base en la serie de ondas de calor, específicamente de su duración (Herrera Alanís, 2012), el CENAPRED propuso un mapa de peligro para todo el país, el cual aparece en la figura 3.28.



**Figura 3.28 Mapa de peligro por ondas de calor en la red de carreteras en México**

Fuente: Elaboración propia con información de CENAPRED e INEGI.

En el análisis realizado en la figura 3.28, la cual incluye la superposición de la Red Nacional de Caminos del país, se obtuvieron los tramos carreteros que se encuentran expuestos a ondas de calor en un nivel muy alto; tomando en cuenta solamente los tramos carreteros pavimentados con asfalto y que son de administración estatal o federal.

La tabla 3.4 presenta la longitud total de carretera (km-carril) que se encuentra en las zonas de muy alto peligro debido a las ondas de calor.

**Tabla 3.4 Longitud expuesta de carreteras a ondas de calor con nivel muy alto por entidad federativa**

Entidad federativa	Estatal	Federal	Total (km-carril)
Sonora	9,559.01	5,217.92	14776.93
Sinaloa	7,862.51	3109.66	10972.17
Guerrero	3,626.66	2807.16	6433.82
Baja California	1,759.57	2861.64	4621.21
Michoacán	2,499.86	2054.41	4554.27
Coahuila	2,317.91	1463.23	3781.14
Campeche	2,118.06	683.94	2802.00
Estado de México	2,367.33	348.60	2715.93
Yucatán	1,911.4	731.67	2643.07
Baja California Sur	1,071.02	1326.07	2397.09
Tamaulipas	726.11	1221.81	1947.92
Nuevo León	1,410.51	466.61	1877.12
Chihuahua	780.54	468.91	1249.45
Puebla	124.57	31.55	156.12
Jalisco	123.23	0.00	123.23
Durango	46.56	26.01	72.57
<b>Total (km-carril)</b>	<b>38304.85</b>	<b>22819.19</b>	<b>61124.04</b>

Fuente: Elaboración propia.

### **3.3 Análisis climático – escenarios futuros**

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de complejos sistemas dinámicos, determinado por fuerzas tales como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico o el cambio tecnológico. Su evolución futura es muy incierta. Los escenarios son imágenes alternativas de lo que podría acontecer en el futuro y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán las fuerzas determinantes en las emisiones futuras, y para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis. Los escenarios son de utilidad para el análisis del cambio climático y, en particular, para la creación de modelos del clima, para la evaluación de los impactos y para las iniciativas de adaptación y de mitigación. La posibilidad de que en la realidad las emisiones evolucionen tal como se describe en alguno de estos escenarios es muy remota [IPCC, 2000].

Proyectar cambios en el clima (es decir, el tiempo promedio a largo plazo) debido a cambios en la composición atmosférica u otros factores es una cuestión muy diferente y mucho más manejable.

Los modelos climáticos regionales (RCM, por sus siglas en inglés) son modelos de área limitada con representaciones de procesos climáticos comparables a los de los componentes atmosféricos y terrestres de los AOGCM; aunque normalmente se ejecutan sin interacción con el océano y el hielo marino (IPCC, 2013).

Para el Reporte 5 del IPCC (2013), se han definido cuatro nuevos escenarios de emisiones, basados en las denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), las cuales se caracterizan por su Forzamiento Radiactivo (FR) total para el año 2100, que oscila entre 2.6 y 8.5 W/m<sup>2</sup>.

Las cuatro trayectorias RCP comprenden diferentes escenarios futuros:

- RCP 8.5 es un escenario con alta concentración de emisiones (posible desarrollo para poblaciones numerosas, alto uso de energía fósil / carbón).
- RCP 6.0 es un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario base de bajo a mediano o escenario de alta mitigación).
- RCP 4.5 es un escenario de mediana concentración de emisiones (escenario con una alta mitigación).
- RCP 2.6 es un escenario de baja concentración de emisiones.

Se estima que el RCP 2.6 representa un escenario de mitigación, el RCP4.5 y RCP6.0 son escenarios de estabilización y el RCP8.5 corresponde a un escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero.

Los RCP representan el forzamiento radiactivo (FR) total calculado para el año 2100, respecto al año 1750 (por ejemplo, el RCP2.6 significa 2.6 W/m<sup>2</sup>).



Con base en estos escenarios de emisiones de referencia, se realizan las proyecciones tomando en cuenta las estimaciones de aumento de temperatura realizadas por el IPCC.

Las proyecciones climáticas que se utilizan para esta investigación fueron desarrolladas por diferentes especialistas para el INECC; están basadas en las proyecciones del aumento del nivel del mar, los cambios en la temperatura y la precipitación.

### **3.3.1 Aumento del nivel del mar**

El escenario de aumento del nivel del mar fue evaluado con dos contextos, uno con un aumento de dos metros y el segundo con un aumento de cinco metros.

#### **3.3.1.1 Escenario de aumento del nivel del mar de dos metros.**

La estimación de las áreas afectadas se obtuvo a partir de la información ráster que ofrece el CReSIS (Center of Remote Sensing of Ice Sheets), en este caso para una elevación del nivel del mar de dos metros.

Las figuras 3.29 a la 3.31 muestran las zonas que se estima que serían afectadas por la elevación del nivel del mar.

Una vez que se establecieron las áreas afectadas en el país, se procedió a identificar las carreteras estatales y federales de la Red Nacional de Caminos (RNC) del INEGI-SCT-IMT. De esa forma se obtuvieron aquellos tramos carreteros pavimentados tanto estatales como federales que caían en las zonas afectadas por la elevación del nivel del mar de dos metros; posteriormente, se calculó la longitud en kilómetros de los tramos afectados y se multiplicó por el número de carriles que tiene cada tramo; obteniendo así los kilómetros-carril afectados por estado (ver tabla 3.5).

También se contabilizaron los puentes tanto estatales como federales que están ubicados en las zonas afectadas, para así obtener los puentes totales afectados en cada entidad federativa (ver tabla 3.6).

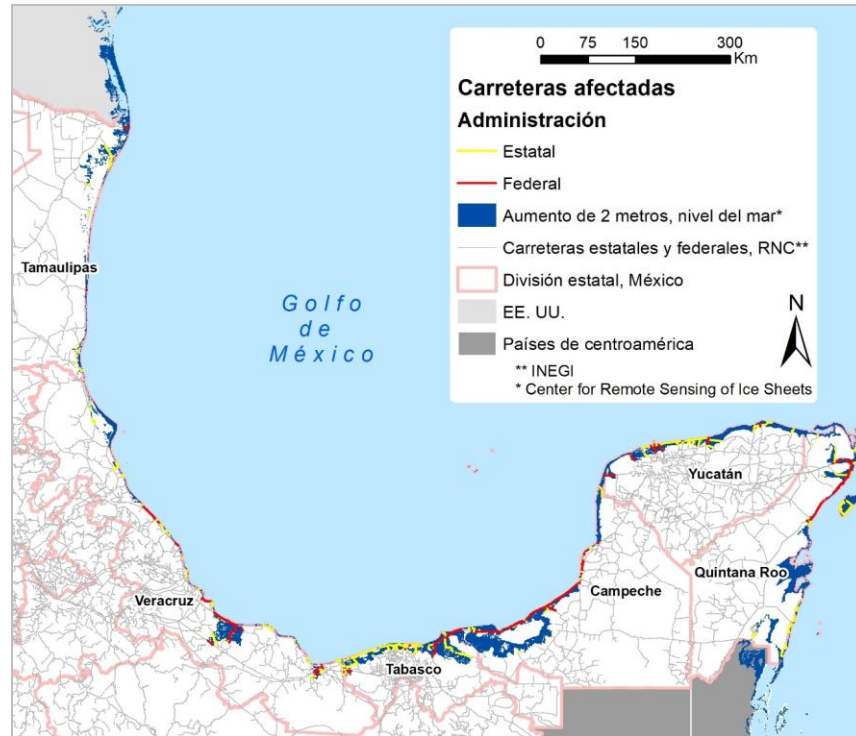


Figura 3.29 Escenario de aumento del nivel de mar de dos metros en el Golfo de México.

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.

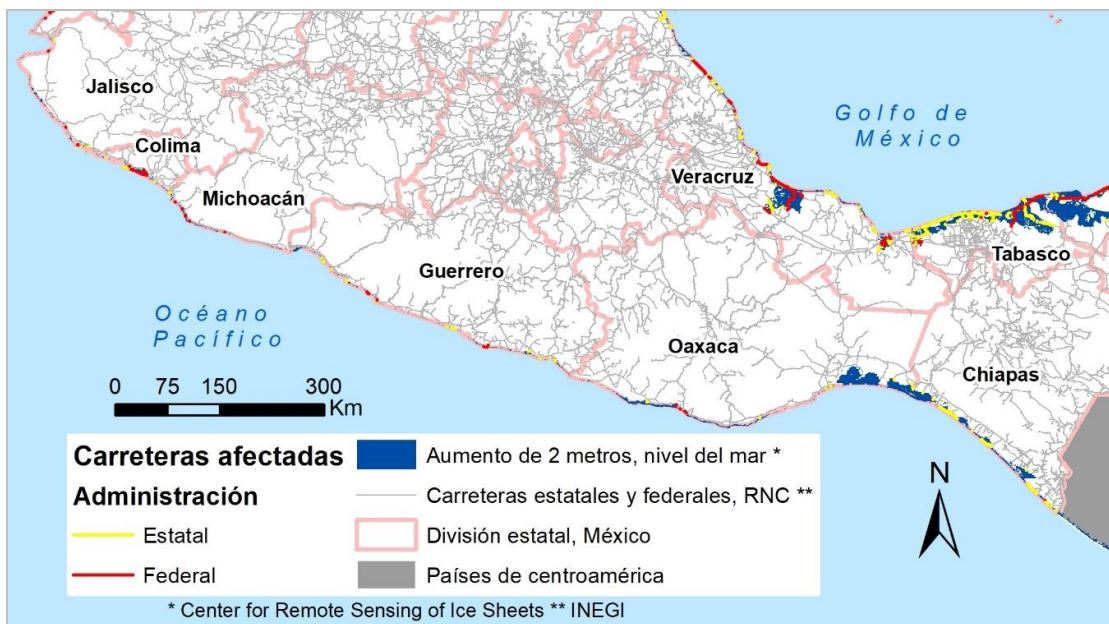


Figura 3.30 Escenario de aumento del nivel de mar de dos metros en el Sureste de México.

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.



**Figura 3.31 Escenario de aumento del nivel de mar de dos metros en el Noroeste de México.**

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.

**Tabla 3.5 Longitud expuesta de carreteras al pronóstico de aumento del nivel del mar de dos metros por entidad federativa**

Entidad federativa	Estatal	Federal	Total (km-carril)
Quintana Roo	470.97	509.89	980.87
Tabasco	521.19	201.39	722.57
Veracruz	245.57	339.56	585.13
Campeche	102.68	414.02	516.70
Yucatán	306.74	184.24	490.99
Chiapas	158.32	1.26	159.57
Tamaulipas	128.74	15.63	144.38
Sinaloa	127.32	10.51	137.83
Nayarit	86.26	21.16	107.41
Baja California	11.96	77.43	89.39
Colima	10.55	63.01	73.56

Baja California Sur	14.99	41.15	56.15
Sonora	43.36	5.68	49.03
Guerrero	26.58	14.17	40.75
Oaxaca	23.14	8.08	31.23
Jalisco	2.21	9.20	11.41
Michoacán	3.85	5.13	8.98
<b>Total (km-carril)</b>	<b>2,284.44</b>	<b>1,921.51</b>	<b>4205.95</b>

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.

**Tabla 3.6. Número de puentes expuesto al pronóstico de aumento del nivel del mar de dos metros por entidad federativa**

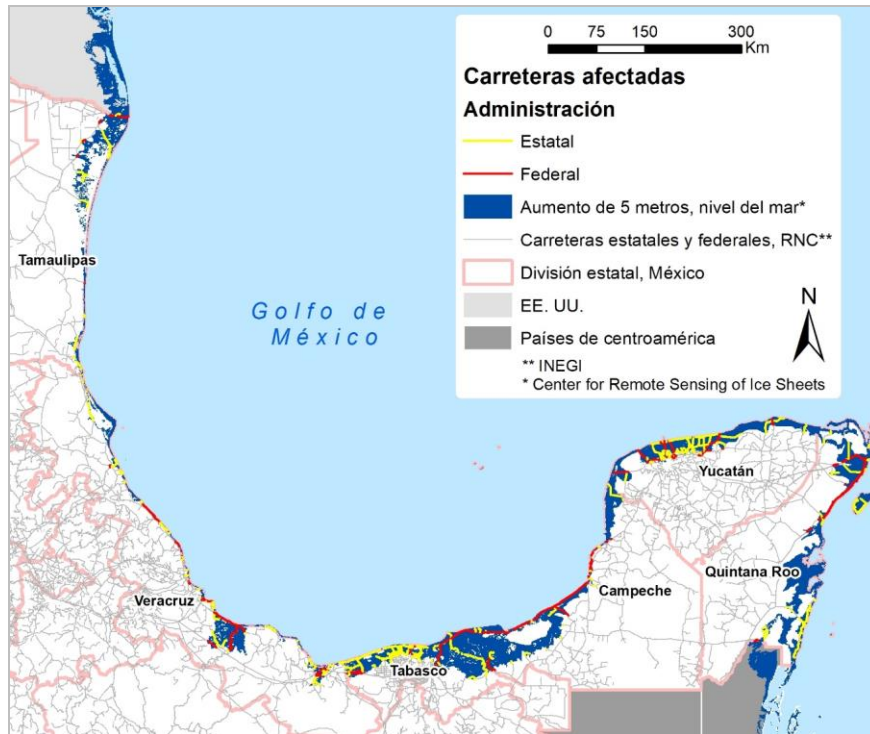
Entidad federativa	Número de puentes afectados
Tabasco	39
Veracruz	27
Campeche	16
Quintana Roo	11
Tamaulipas	6
Baja California	5
Guerrero	4
Sonora	3
Yucatán	3
Baja California Sur	2
Chiapas	2
Colima	2
Michoacán	1
Oaxaca	1
Jalisco	0
Nayarit	0
Sinaloa	0
<b>Total de puentes</b>	<b>122</b>

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.

### 3.3.1.2 Escenario de aumento del nivel del mar de cinco metros.

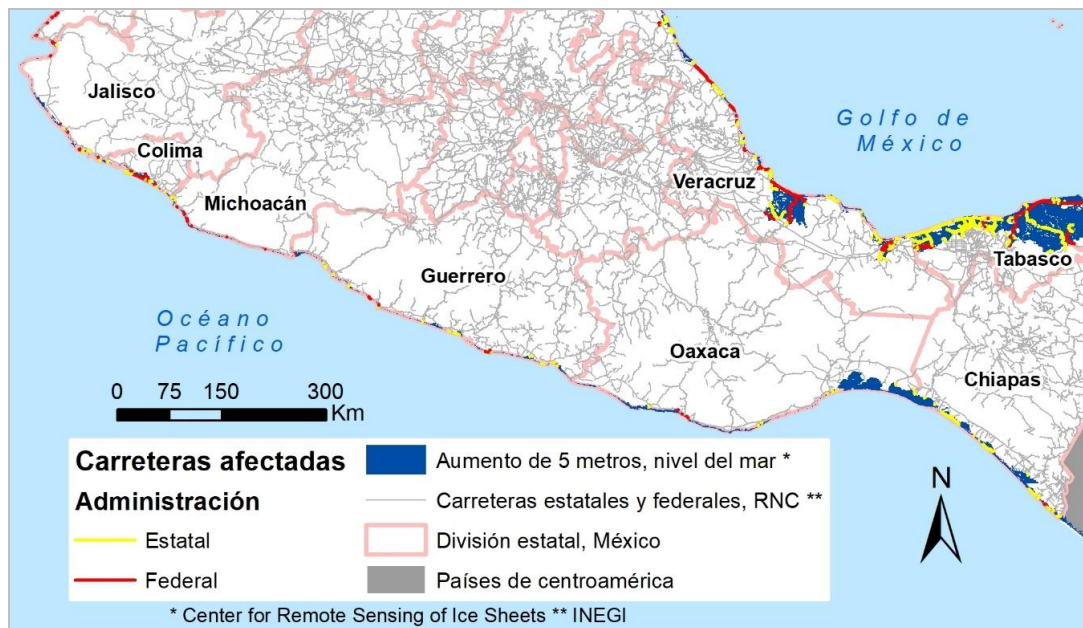
Para el caso de aumento del nivel del mar de cinco metros, se determinaron las figuras 3.32 a la 3.34, en las cuales se muestran las zonas que se estima que se verían afectadas, y la superposición con la red carretera.

Una vez que se establecieron las áreas afectadas en el país se procedió a identificar las carreteras estatales y federales de la Red Nacional de Caminos (RNC) del INEGI. De esa forma se obtuvieron aquellos tramos carreteros pavimentados tanto estatales como federales que caían en las zonas afectadas por la elevación del nivel del mar de cinco metros; posteriormente, se calculó la longitud en kilómetros de los tramos afectados y se multiplicó por el número de carriles que tiene cada tramo; obteniendo así los kilómetros-carril afectados por estado (ver tabla 3.7).



**Figura 3.32 Escenario de aumento del nivel de mar de cinco metros en el Golfo de México.**

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.



**Figura 3.33 Escenario de aumento del nivel de mar de cinco metros en el Sureste de México.**

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.

También se contabilizaron los puentes tanto estatales como federales que están ubicados en las zonas afectadas, para así obtener los puentes totales afectados en cada entidad federativa (ver tabla 3.8).



**Figura 3.34 Escenario de aumento del nivel de mar de cinco metros en el Noroeste de México.**

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.

**Tabla 3.7 Longitud expuesta de carreteras al pronóstico de aumento del nivel del mar de cinco metros por entidad federativa**

Entidad federativa	Estatal	Federal	Total (km)
Quintana Roo	732.78	772.54	1,505.32
Tabasco	1,117.06	374.62	1,491.68
Yucatán	749.02	466.83	1,215.85
Veracruz	526.36	545.14	1,071.50
Campeche	237.84	549.05	786.88
Sinaloa	481.45	84.87	566.31

Entidad federativa	Estatal	Federal	Total (km)
Tamaulipas	319.51	110.60	430.12
Nayarit	191.34	78.80	270.14
Chiapas	203.48	11.64	215.12
Baja California Sur	96.05	91.72	187.77
Baja California	16.75	170.99	187.74
Sonora	136.73	24.51	161.23
Colima	33.51	125.39	158.90
Guerrero	54.63	15.49	70.13
Oaxaca	28.38	8.27	36.65
Jalisco	12.06	17.63	29.69
Michoacán	7.83	10.71	18.54
<b>Total (km)</b>	<b>4,944.77</b>	<b>3,458.80</b>	<b>8,403.57</b>

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.

**Tabla 3.8. Número de puentes expuesto al pronóstico de aumento del nivel del mar de cinco metros por entidad federativa**

Entidad federativa	Total de puentes
Tabasco	80
Veracruz	35
Campeche	21
Sinaloa	19
Quintana Roo	17
Tamaulipas	15
Baja California	14
Nayarit	8
Yucatán	7
Chiapas	6
Sonora	5
Colima	4
Guerrero	4
Michoacán	3
Baja California Sur	2
Oaxaca	1
Jalisco	0
<b>Total</b>	<b>241</b>

Fuente: Elaboración propia con información de CReSIS e INEGI-SCT-IMT.

### 3.3.2 Análisis de escenarios climáticos para México

Los modelos climáticos se pueden utilizar para estudiar los impactos locales a través de técnicas de *downscaling* (estadísticos y dinámicos).

Los escenarios utilizados fueron desarrollados por el INECC, quien es responsable de las políticas de cambio climático. Los escenarios tuvieron como base las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés), en tres escenarios futuros: el RCP4.5 y RCP6.0 (escenarios de estabilización) y el RCP8.5 (escenario con un nivel muy alto de emisiones de gases de efecto invernadero).

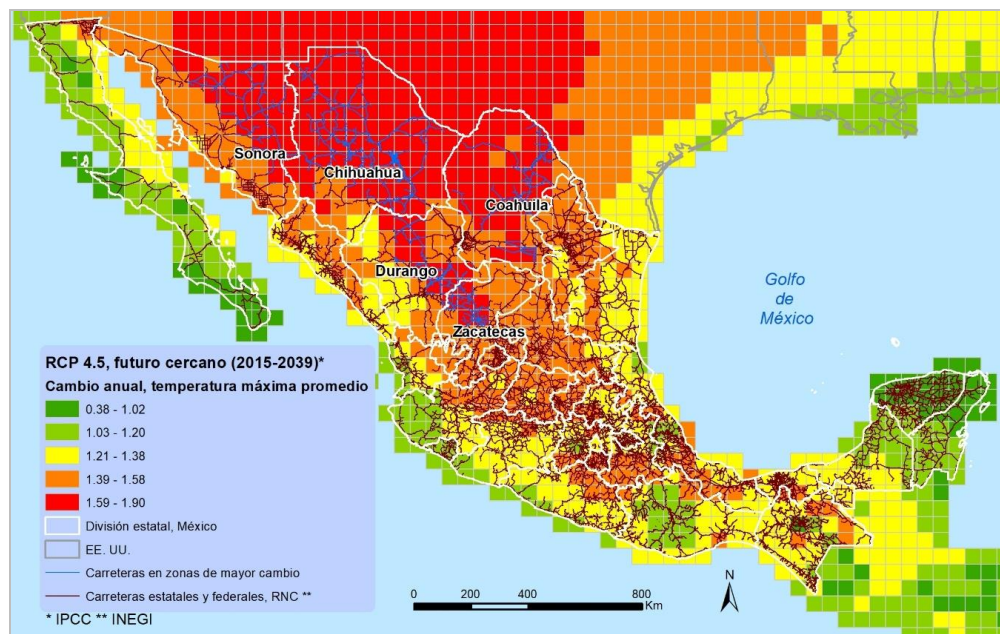
Las variables de análisis para las proyecciones fueron, temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio, precipitación, humedad relativa, humedad específica, presión superficial y viento. Los cuatro últimos escenarios forman parte de esta investigación.

Los periodos de análisis son: futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). Estos corresponden a lapsos de 25 años para cada uno.

A continuación se mostrarán algunos de los resultados obtenidos para las proyecciones climáticas de México, de ciertas variables climáticas, para algunos periodos de análisis y de escenarios RCP.

### 3.3.2.1 Escenario RCP 4.5 – Futuro cercano

Para el escenario RCP 4.5 y el periodo de análisis futuro cercano se obtuvieron los mapas proyectados por el INECC basados en el IPCC. Los primeros análisis fueron los cambios en la temperatura máxima, mínima y promedio registradas en el país; los cuales aparecen en las figuras 3.35 a la 3.37.

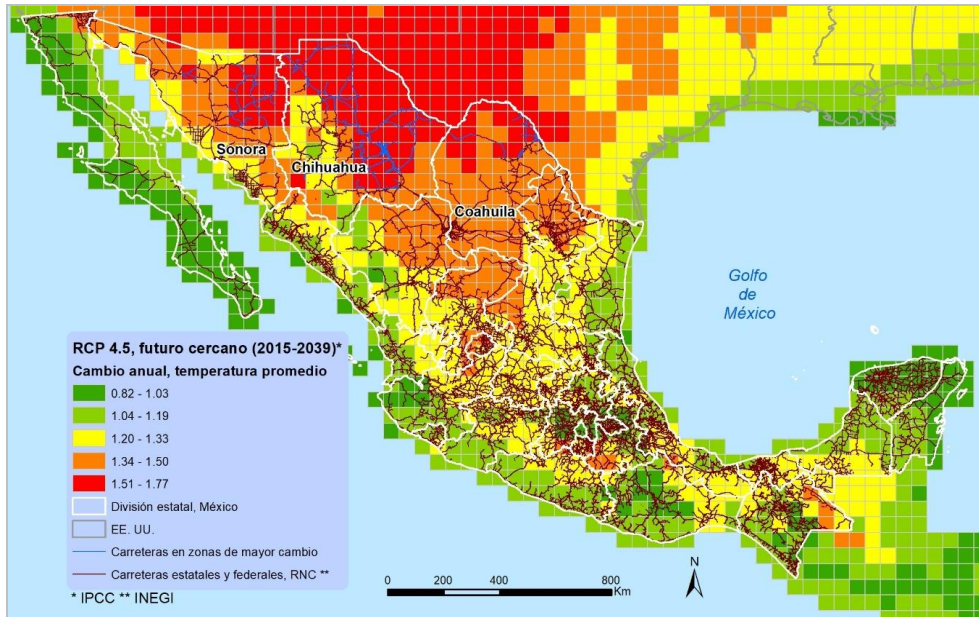


**Figura 3.35 Escenario RCP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 4.5 futuro cercano de la figura 3.35 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 34,342 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura máxima; de los cuales 21,025 son estatales y 13,317 son federales.

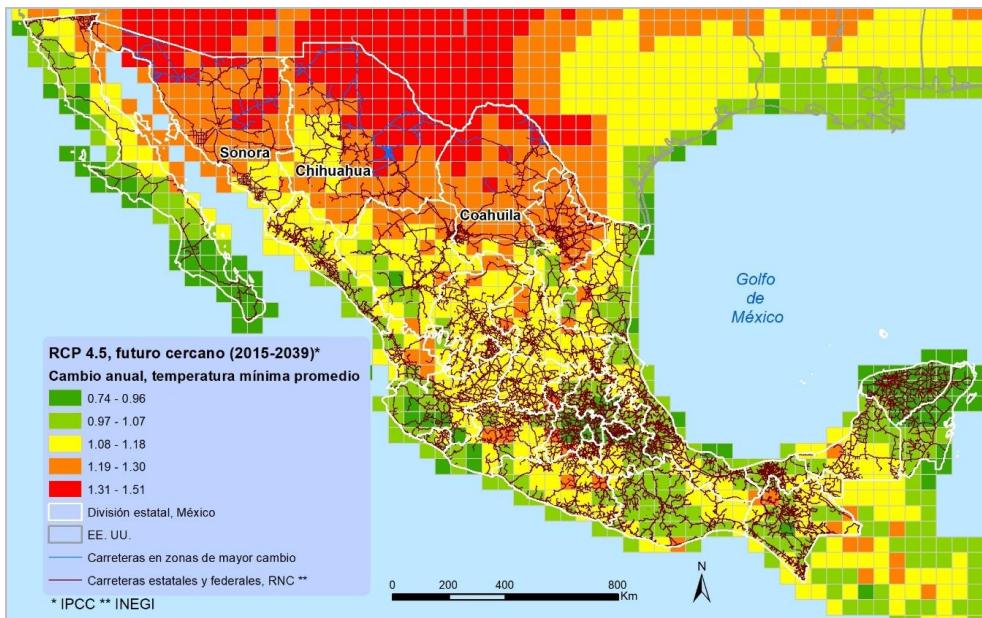




**Figura 3.36 Escenario CP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 4.5 futuro cercano de la figura 3.36 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 13,920 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura promedio; de los cuales 8,475 son estatales y 5,445 son federales.

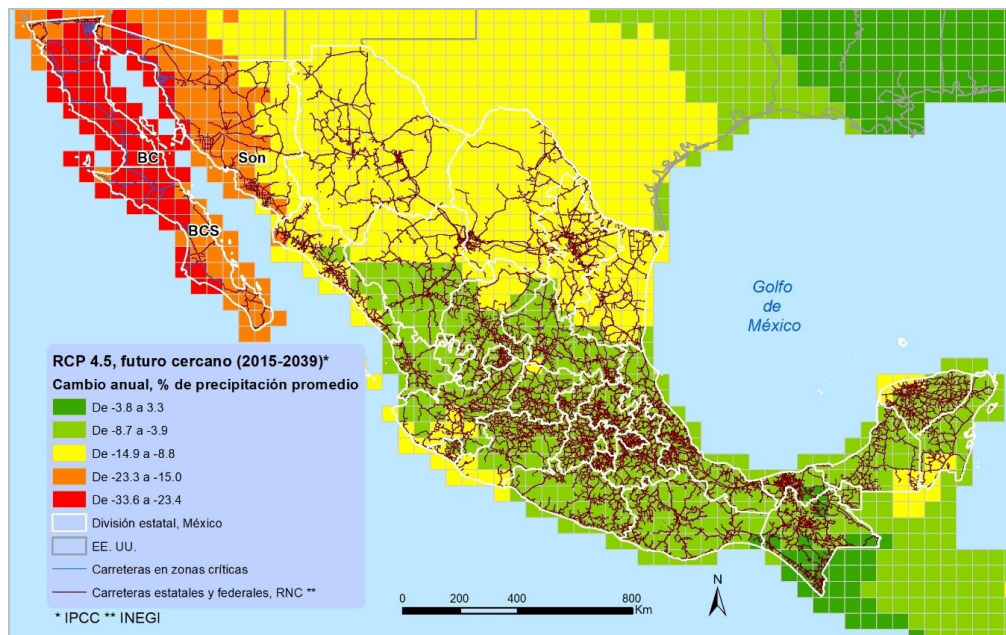


**Figura 3.37 Escenario CP 4.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura mínima promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 4.5 futuro cercano de la figura 3.37 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 11,107 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura mínima promedio; de los cuales 6,323 son estatales y 4,784 son federales.

Finalmente se realizó un análisis con el escenario RCP 4.5 futuro cercano para los cambios en la precipitación, el cual se muestra en la figura 3.38.



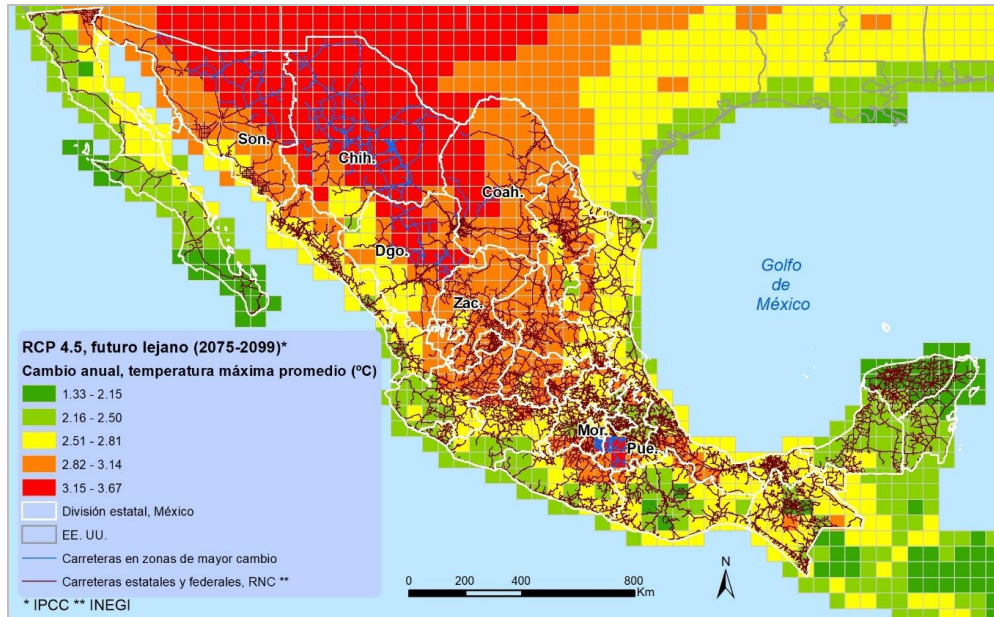
**Figura 3.38 Escenario CP 4.5, futuro cercano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 4.5 futuro cercano de la figura 3.38 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 6,528 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la precipitación promedio; de los cuales 3,107 son estatales y 3,421 son federales. En dichas carreteras se localizan 89 puentes.

### 3.3.2.2 Escenario RCP 4.5 – Futuro lejano

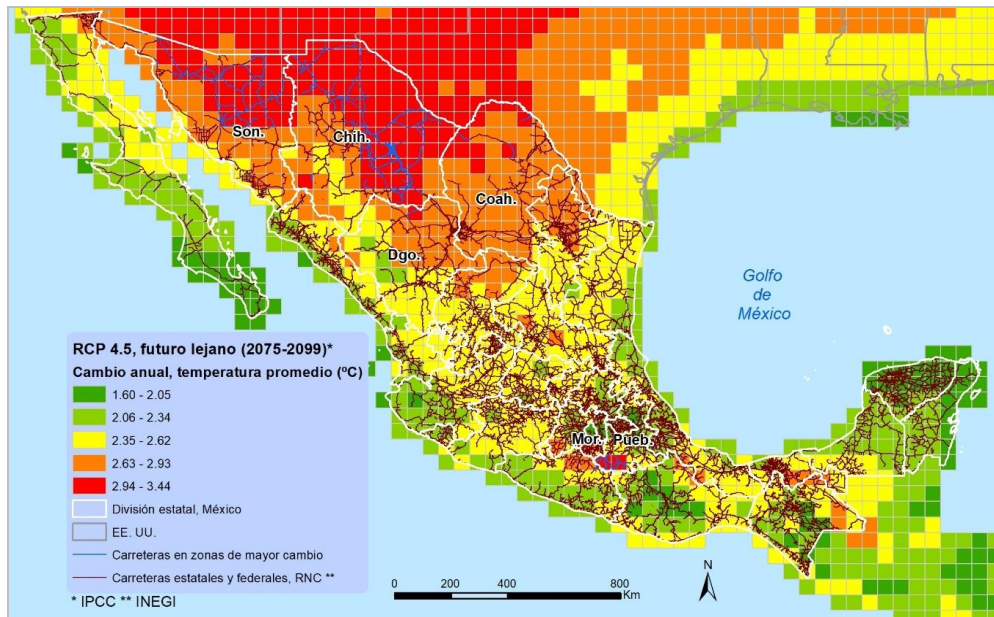
Para el escenario RCP 4.5 y el periodo de análisis lejano, se obtuvieron los mapas proyectados por el INECC basados en el IPCC. Los primeros análisis fueron los cambios en las temperaturas máxima, mínima y promedio registradas en el país; los cuales se muestran en las figuras 3.39 a la 3.41.



**Figura 3.39 Escenario RCP 4.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura máxima promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

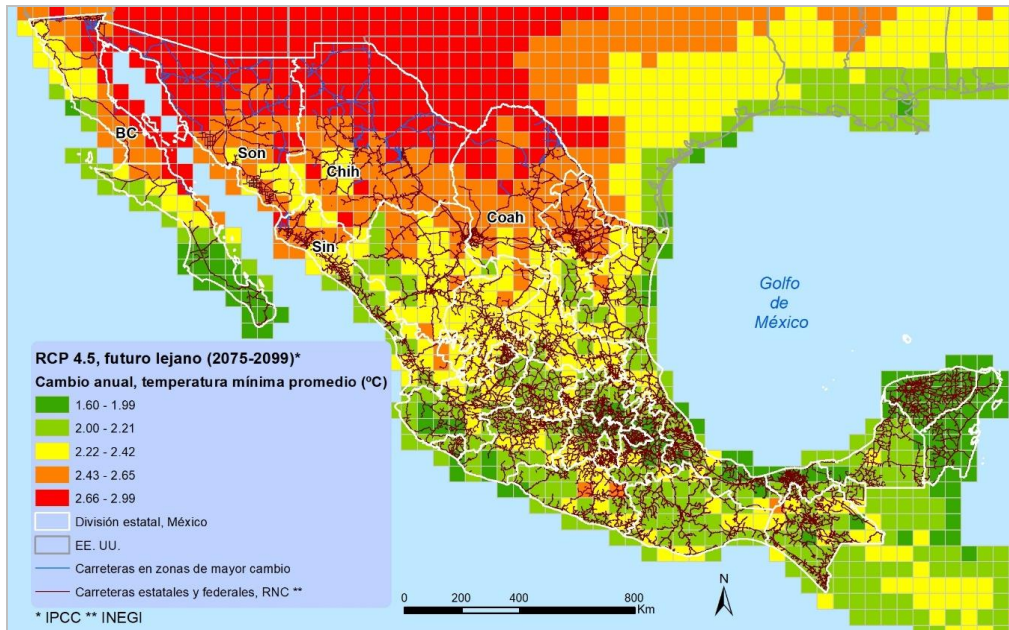
Al superponer el escenario RCP 4.5 futuro lejano de la figura 3.39 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 27,616 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura máxima; de los cuales 17,516 son estatales y 10,100 son federales.



**Figura 3.40 Escenario RCP 4.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 4.5 futuro lejano de la figura 3.40 con la red nacional de carreteras, se calcula que 18,055 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura promedio; de los cuales 10,766 son estatales y 7,289 son federales.

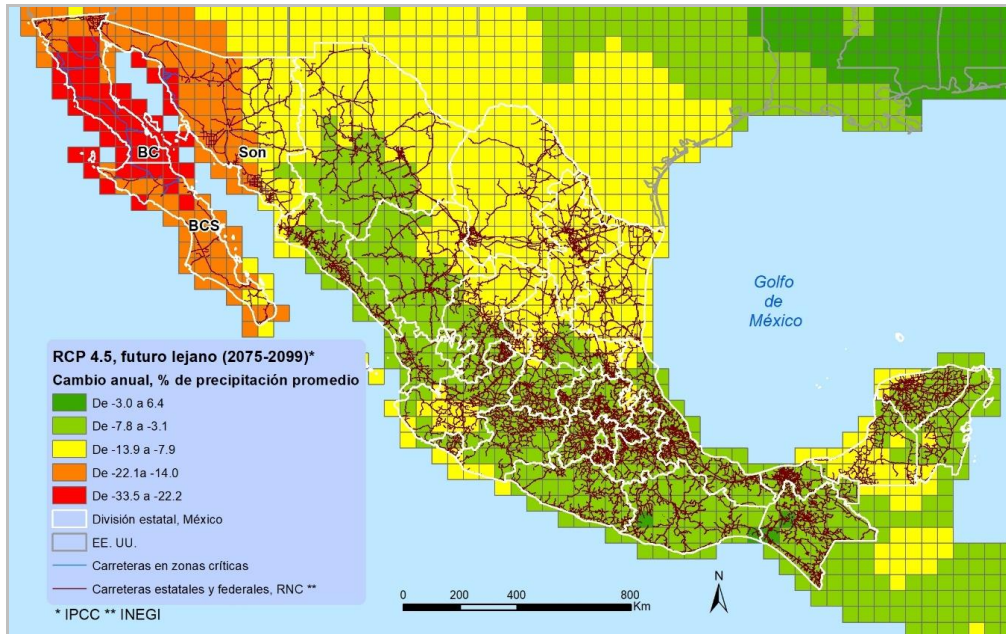


**Figura 3.41 Escenario RCP 4.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura mínima promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 4.5 futuro lejano de la figura 3.41 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 17,718 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura mínima promedio; de los cuales 9,966 son estatales y 7,752 son federales.

Finalmente se realizó un análisis con el escenario RCP 4.5 futuro lejano para los cambios en la precipitación, el cual se muestra en la figura 3.42.



**Figura 3.42 Escenario CP 4.5, futuro lejano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio.**

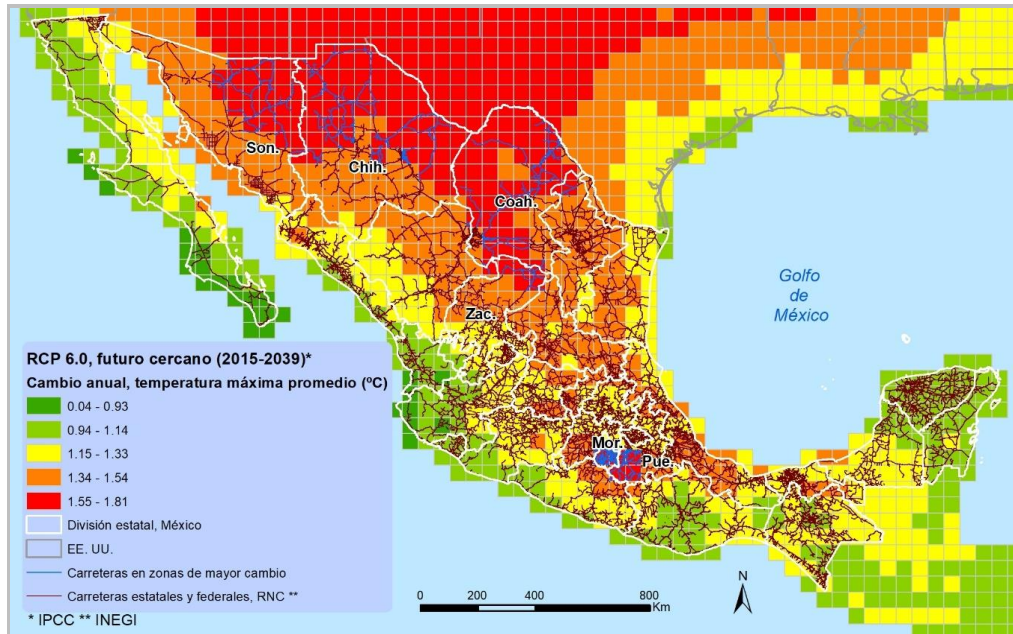
Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 4.5 futuro lejano de la figura 3.42 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 3,372 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la precipitación promedio; de los cuales 1,225 son estatales y 2,147 son federales. En dichas carreteras se ubican 29 puentes.

### 3.3.2.3 Escenario RCP 6.0 – Futuro cercano

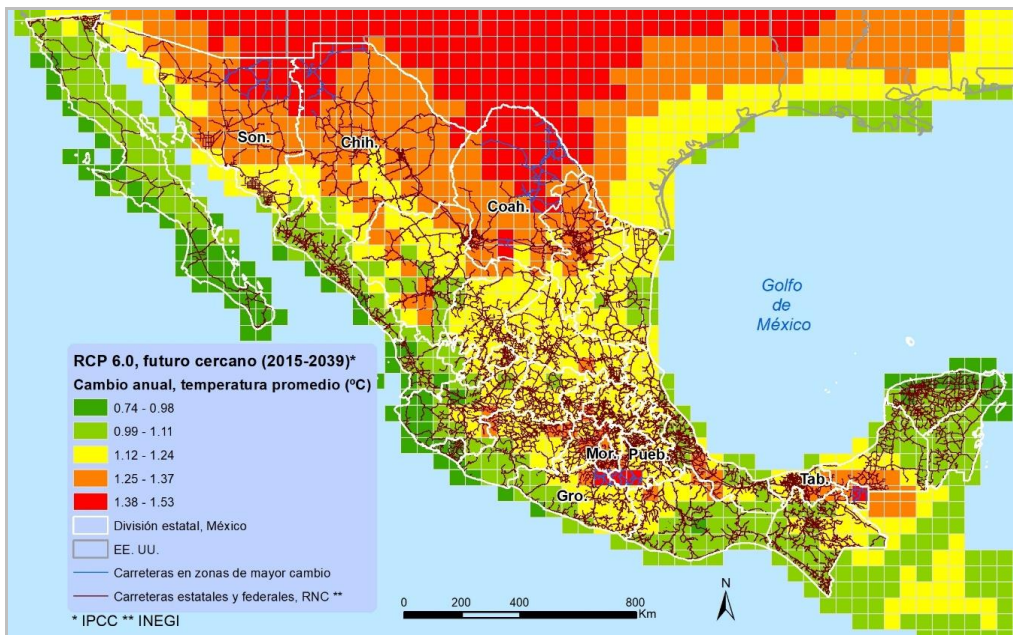
Para el escenario RCP 6.0 y el periodo de análisis futuro cercano se obtuvieron los mapas proyectados por el INECC basados en el IPCC. Los primeros análisis fueron los cambios en las temperaturas máxima, mínima y promedio registradas en el país, los cuales se muestran en las figuras 3.43 a la 3.45.

Al superponer el escenario RCP 6.0 futuro cercano de la figura 3.43 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 27,757 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura máxima; de los cuales 17,327 son estatales y 10,430 son federales.



**Figura 3.43 Escenario RCP 6.0, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio.**

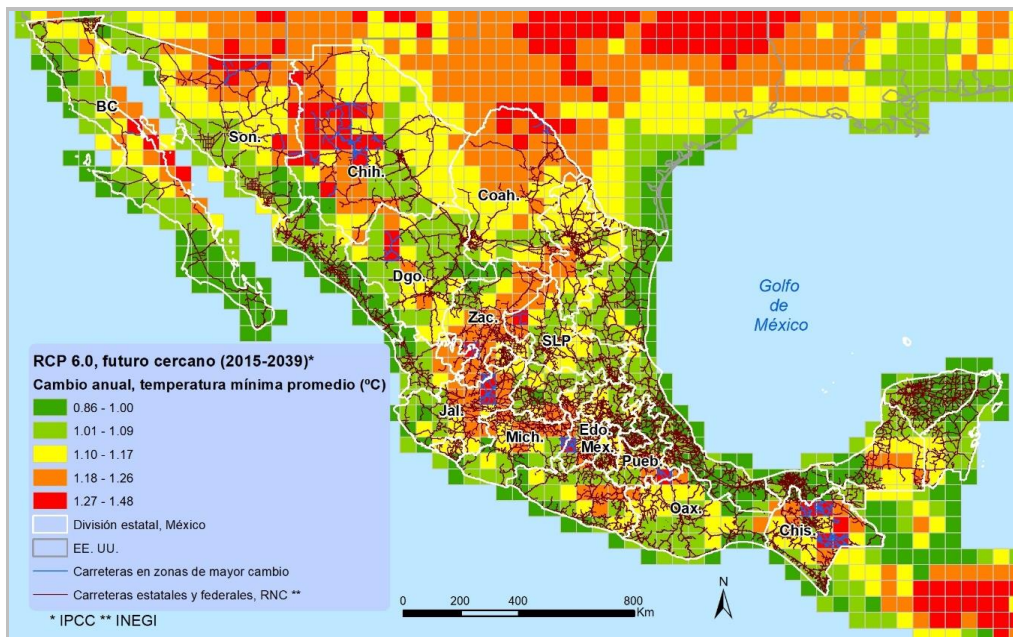
Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.



**Figura 3.44 Escenario CP 6.0, futuro cercano, cambio anual, temperatura promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 6.0 futuro cercano de la figura 3.44 con la red nacional de carreteras, se estima que 10,438 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura promedio; de los cuales 5,923 son estatales y 4,515 son federales.



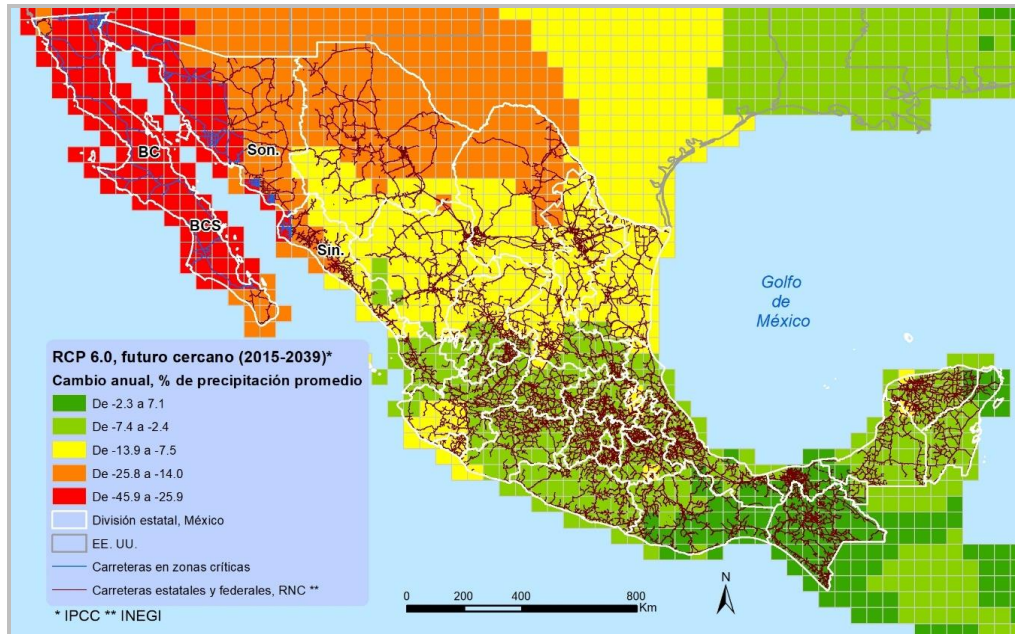
**Figura 3.45 Escenario CP 6.0, futuro cercano, cambio anual, temperatura mínima promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 6.0 futuro cercano de la figura 3.45 con la red nacional de carreteras, se deduce que 15,204 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura mínima promedio; de los cuales 10,673 son estatales y 4,531 son federales.

Finalmente se realizó un análisis con el escenario RCP 6.0 futuro cercano para los cambios en la precipitación, el cual se muestra en la figura 3.46.

Al superponer el escenario RCP 6.0 futuro cercano de la figura 3.46 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 16,515 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la precipitación promedio; de los cuales 8,884 son estatales y 7,631 son federales. En dichas carreteras se ubican 455 puentes.



**Figura 3.46 Escenario CP 6.0, futuro cercano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio.**

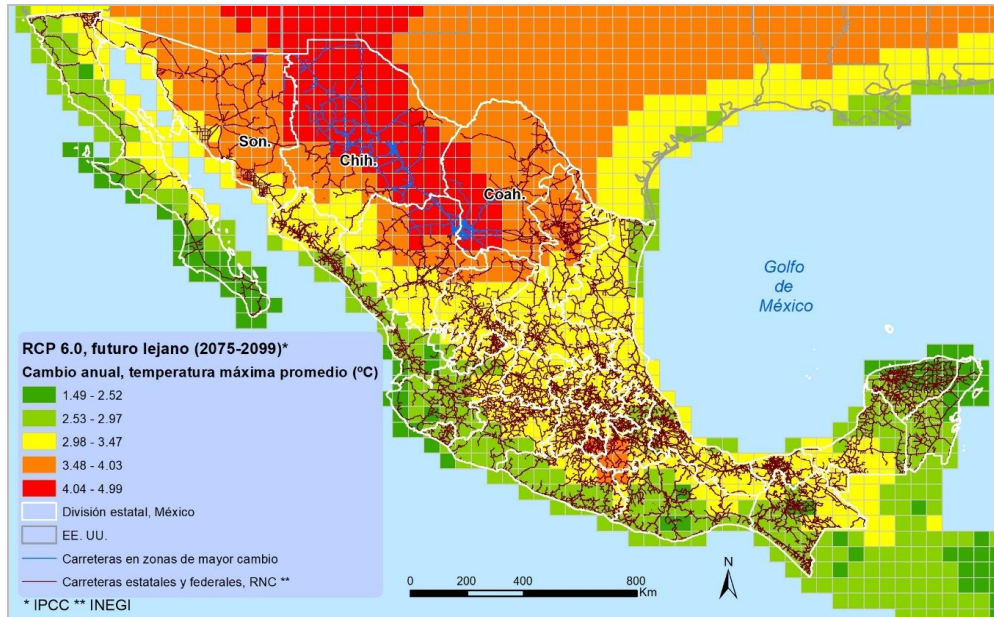
Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

### 3.3.2.4 Escenario RCP 6.0 – Futuro lejano

Para el escenario RCP 6.0 y el periodo de análisis lejano cercano se elaboraron los mapas proyectados por el INECC basados en el IPCC. Los primeros análisis fueron los cambios en las temperaturas máxima, mínima y promedio registradas en el país; los cuales se muestran en las figuras 3.47 a la 3.49.

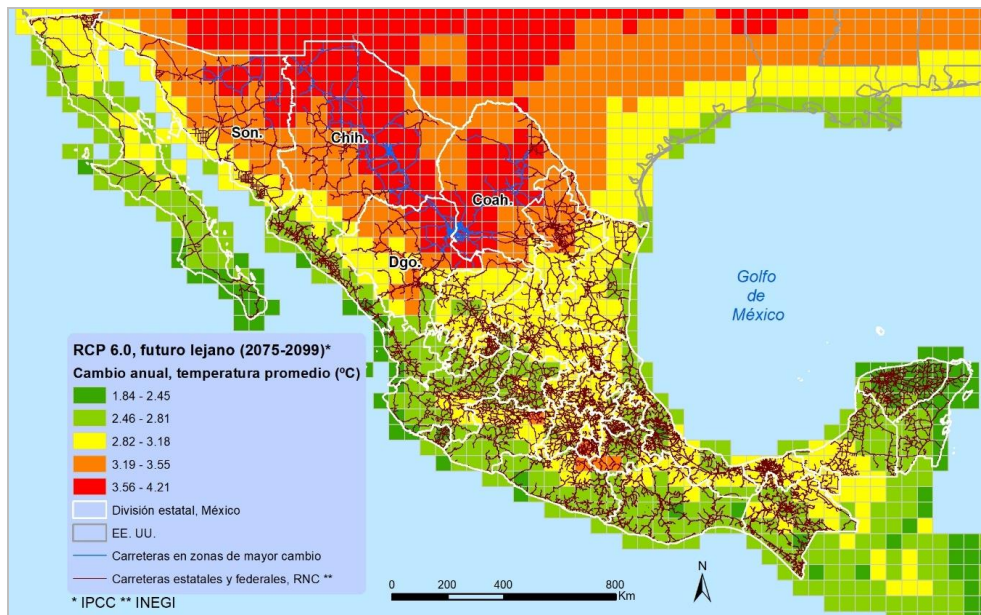
Al superponer el escenario RCP 6.0 futuro lejano de la figura 3.47 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 20,271 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura máxima; de los cuales 12,576 estatales y 7,695 son federales.





**Figura 3.47 Escenario RCP 6.0, futuro lejano, cambio anual, temperatura máxima promedio.**

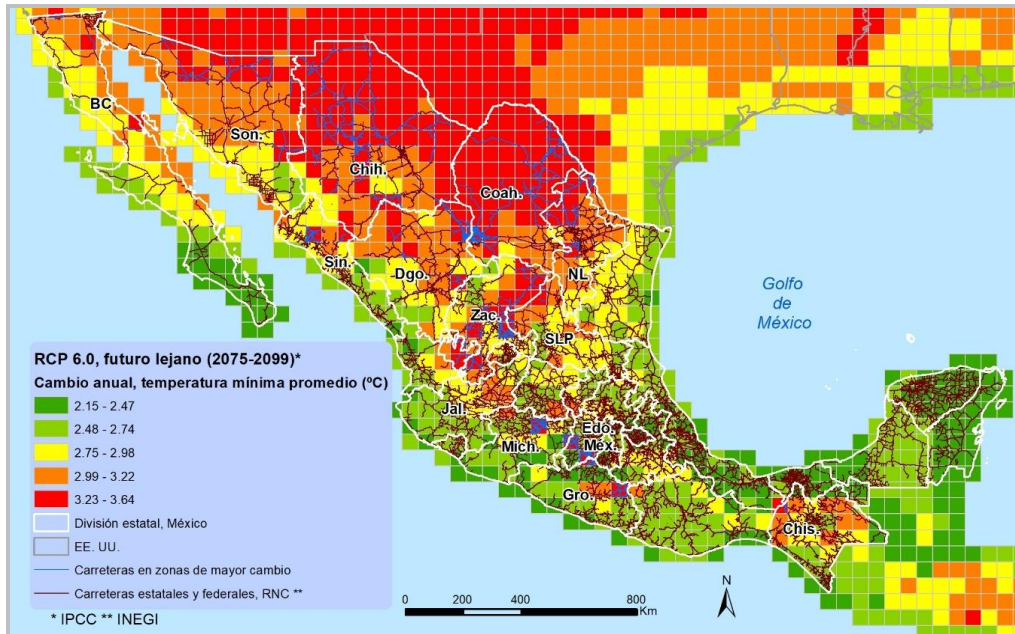
Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.



**Figura 3.48 Escenario RCP 6.0, futuro lejano, cambio anual, temperatura promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 6.0 futuro lejano de la figura 3.48 con la red nacional de carreteras, se deduce que 22,520 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura promedio; de los cuales 13,061 son estatales y 9,459 son federales.

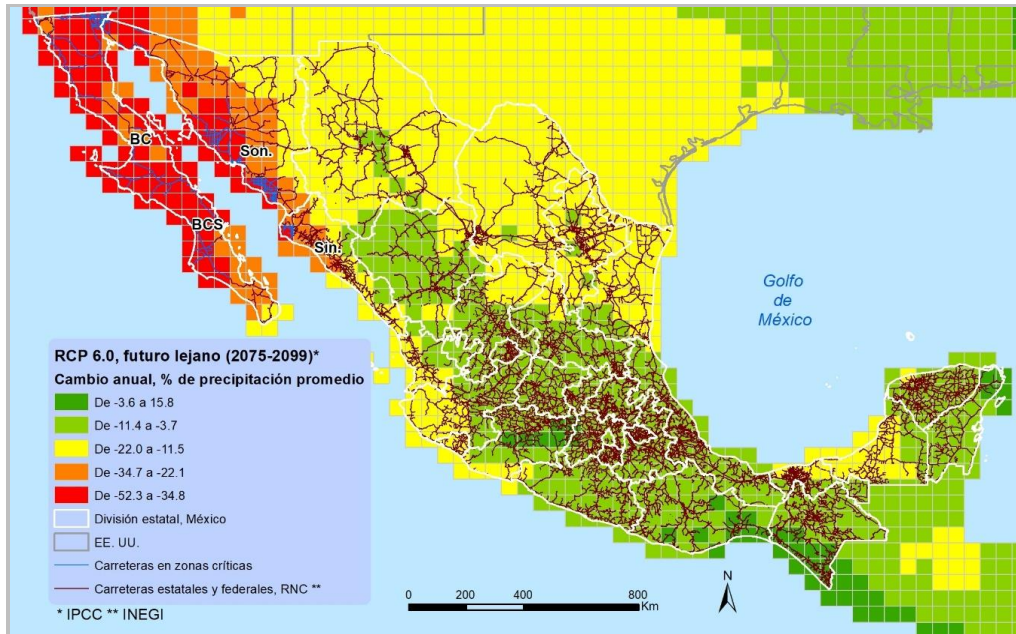


**Figura 3.49 Escenario RCP 6.0, futuro lejano, cambio anual, temperatura mínima promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 6.0 futuro lejano de la figura 3.49 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 39,545 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura mínima promedio; de los cuales 23,846 son estatales y 15,699 son federales.

Finalmente se realizó un análisis con el escenario RCP 6.0 futuro lejano para los cambios en la precipitación, el cual se muestra en la figura 3.50.



**Figura 3.50 Escenario CP 6.0, futuro lejano, cambio anual, porcentaje de la precipitación promedio.**

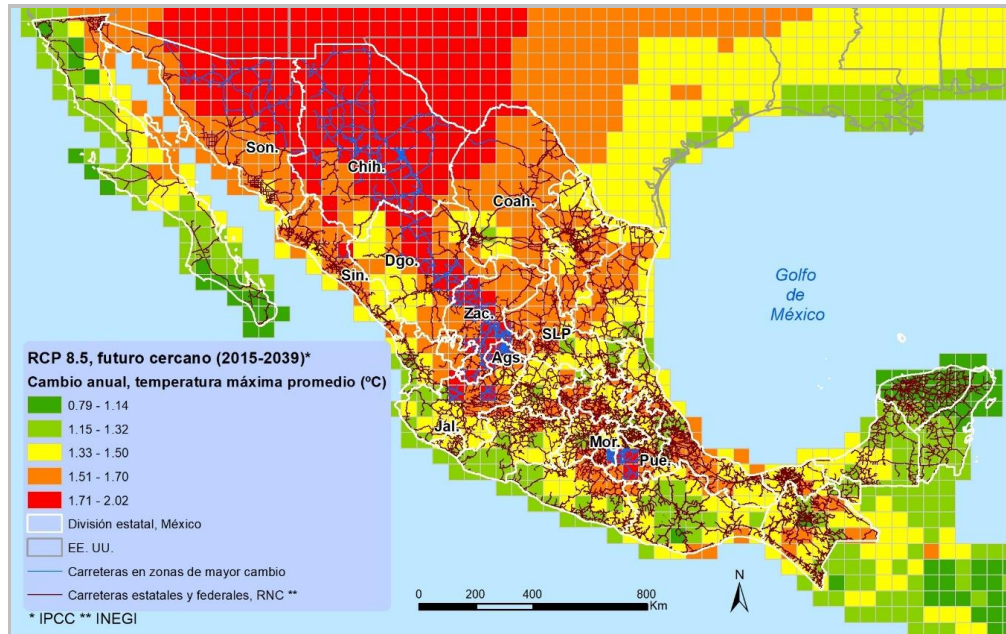
Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 6.0 futuro lejano de la figura 3.50 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 13,657 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la precipitación promedio; de los cuales 7,774 son estatales y 5,883 son federales. En dichas carreteras se ubican 409 puentes.

### 3.3.2.5 Escenario RCP 8.5 – Futuro cercano

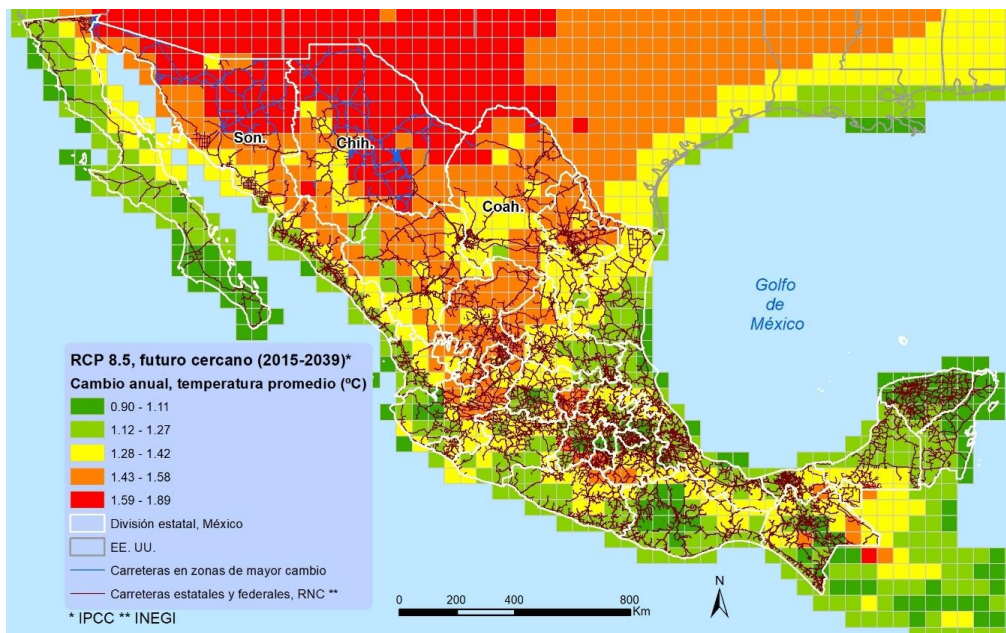
Para el escenario RCP 8.5 y el periodo de análisis futuro cercano se obtuvieron los mapas proyectados por el INECC basados en el IPCC. Los primeros análisis fueron los cambios en las temperaturas máxima, mínima y promedio registradas en el país; los cuales se muestran en las figuras 3.51 a la 3.53.

Al superponer el escenario RCP 8.5 futuro cercano de la figura 3.51 con la red nacional de carreteras, se calcula que 39,985 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura máxima; de los cuales 24,983 son estatales y 15,002 son federales.



**Figura 3.51 Escenario RCP 8.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura máxima promedio.**

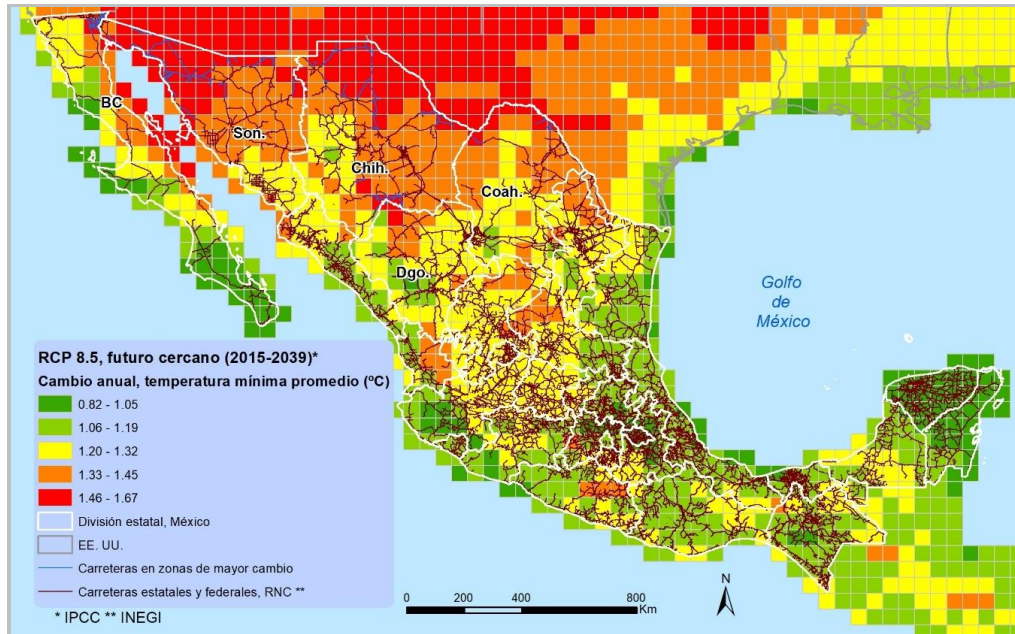
Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.



**Figura 3.52 Escenario CP 8.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 8.5 futuro cercano de la figura 3.52 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 18,765 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura promedio; de los cuales 11,376 son estatales y 7,389 son federales.



**Figura 3.53 Escenario CP 8.5, futuro cercano, cambio anual, temperatura mínima promedio.**

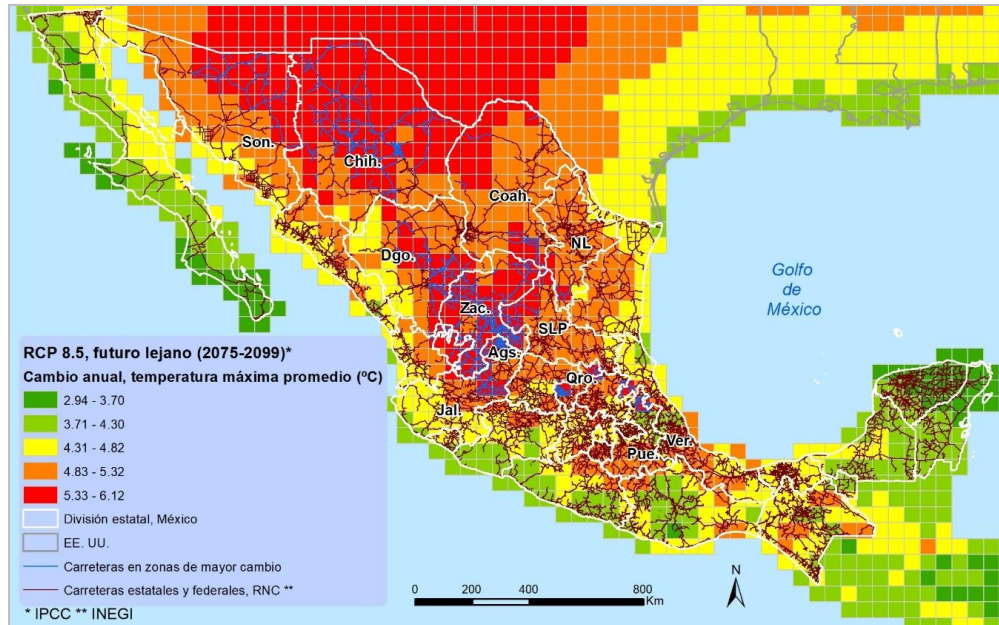
Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 8.5 futuro cercano de la figura 3.53 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 9,022 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura mínima promedio; de los cuales 4,759 son estatales y 4,263 son federales.

### 3.3.2.6 Escenario RCP 8.5 – Futuro lejano

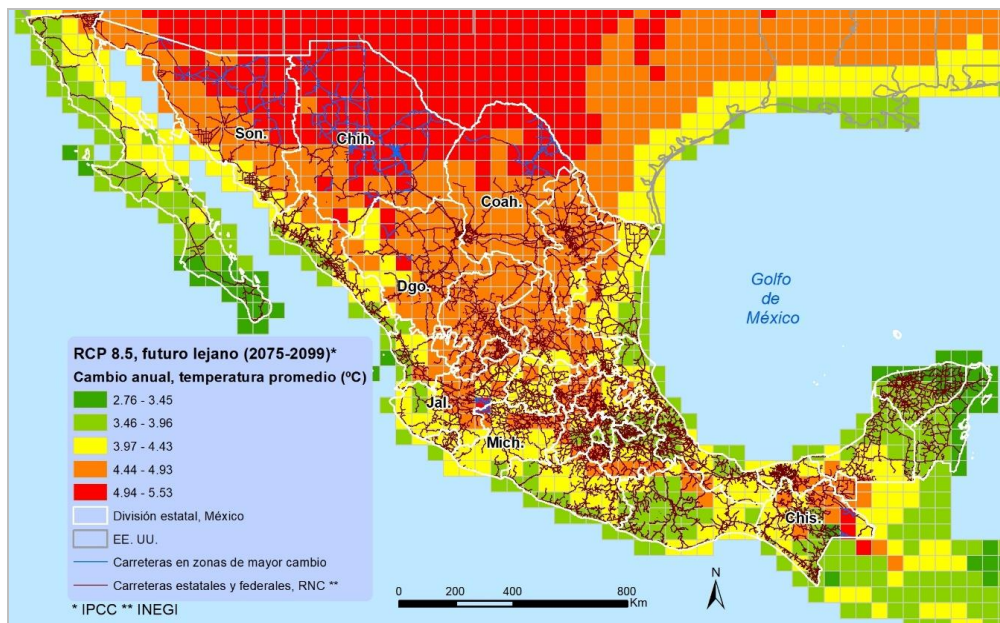
Para el escenario RCP 8.5 y el periodo de análisis lejano cercano se obtuvieron los mapas proyectados por el INECC basados en el IPCC. Los primeros análisis fueron los cambios en las temperaturas máxima, mínima y promedio registradas en el país; los cuales se muestran en las figuras 3.54 a la 3.56.

Al superponer el escenario RCP 8.5 futuro lejano de la figura 3.54 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 46,783 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura máxima; de los cuales 30,066 son estatales y 16,717 son federales.



**Figura 3.54 Escenario RCP 8.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura máxima promedio.**

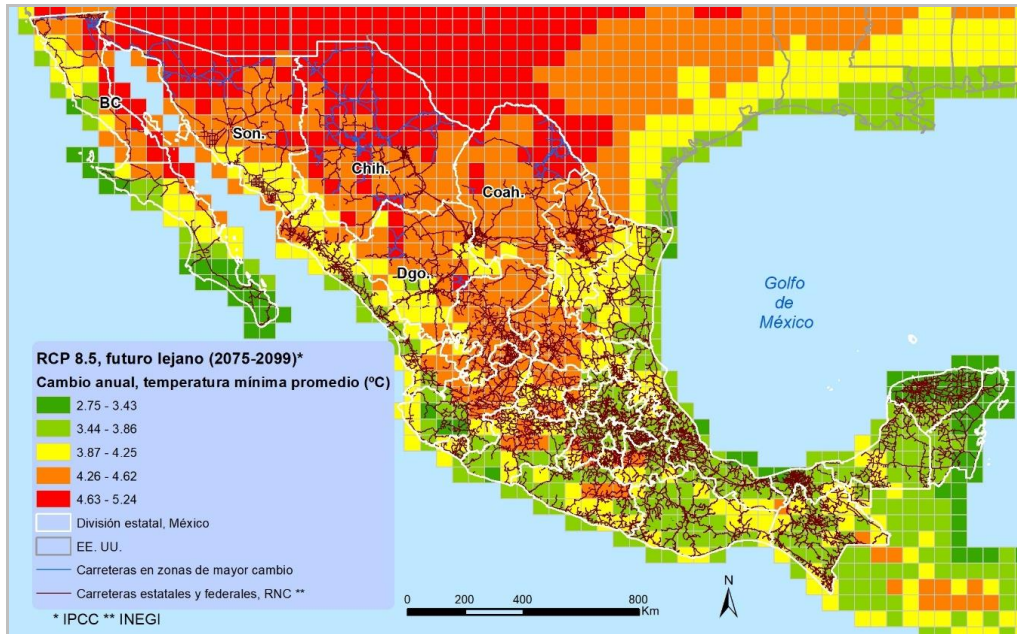
Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.



**Figura 3.55 Escenario RCP 8.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 8.5 futuro lejano de la figura 3.55 con la red nacional de carreteras, se encontró que 22,749 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura promedio; de los cuales 14,250 son estatales y 8,499 son federales.



**Figura 3.56 Escenario RCP 8.5, futuro lejano, cambio anual, temperatura mínima promedio.**

Fuente: Elaboración propia con información del INECC y del INEGI-SCT-IMT.

Al superponer el escenario RCP 8.5 futuro lejano de la figura 3.56 con la red nacional de carreteras, se obtuvo que 19,862 km-carril de carreteras se encuentran en zonas de mayor cambio en la temperatura mínima promedio; de los cuales 11,631 son estatales y 8,231 son federales.





## Conclusiones

---

La demanda de servicios de transporte aumenta conforme crecen las economías de los países, el comercio y la población. Esta demanda tiene una presión directa en la operación y funcionalidad de los sistemas de transporte, al formar parte las cadenas de producción y su distribución, del comercio y de los puntos de consumo, del turismo y su distribución, etc.; por lo que los desafíos para que las redes de transporte sean resiliente al clima son y serán muchísimos.

El cambio climático actual y el proyectado tendrán un impacto en la infraestructura, las operaciones, la seguridad y el mantenimiento de los sistemas carreteros; lo que afectaría a los administradores y a los usuarios de la red.

Los impactos asociados al cambio climático pueden ser directos e indirectos, y se pueden materializar en diferentes regiones de la red de carreteras del país; por lo que las bases sentadas en el presente trabajo ayudarán en el proceso continuo de identificar las zonas de riesgo, donde la infraestructura carretera ha estado expuesta y que continuará peligrando su integridad en el futuro.

Se recomienda el uso de los SIG para el análisis geoespacial de la información requerida y así tomar decisiones estratégicas en el proceso continuo de la adaptación al cambio climático; una vez que se cuente con información geoespacial más detallada. También se destaca la ventaja de utilizar los mapas para mostrar una gran cantidad de información de una manera simplificada y que puede ser visualmente más atractiva para los actores involucrados.

Sin duda queda mucho por hacer, como continuar los esfuerzos para concentrar y acrecentar la información geoespacial que esté relacionada al cambio climático del sector transporte; así como, por ejemplo, incluir los umbrales límites de diseño de la infraestructura para establecer mapas de vulnerabilidad y, posteriormente, hacer estudios más detallados en campo para los que se consideren puntos críticos de la infraestructura al cambio climático.

A medida que se adquiera más conocimiento, será posible ser más asertivo en el diseño de las medidas de adaptación, por lo pronto, es menester evaluar las incertidumbres actuales del clima y tomar las mejores decisiones posibles con la información con que se cuenta.



## Bibliografía

---

Asociación Mundial de Carreteras. (2015). Marco Internacional de Adaptación al Cambio Climático para la Infraestructura Vial. París, Francia. [AMC, 2015]

Austroroads. (2004). Impact of Climate Change on Road Infrastructure. Sidney, Australia.

Bhamidipati, Srirama. (2014). Simulation framework for asset management in climate-change adaptation of transportation infrastructure. European Transport Conference 2014. Transportation Research Procedia 8 (2015), pag. 17 – 28. Netherlands.

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

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

Chinowsky, Paul; Schweikert, Amy; Strzepek, Niko; Strzepek, Ken. (2015). Infrastructure and climate change: a study of impacts and adaptations in Malawi, Mozambique, and Zambia. Climatic Change; Volume 130. UNU-WIDER 2014.

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

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

Dangermond, Jack and Baker, James. (2010). GIS for Climate Change. GIS Best Practices. ESRI. Redlands, USA.

De Sherbinin, Alex. (2014). Climate change hotspots mapping: what have we learned? Climatic Change. Volume 123, Issue 1, pp 23–37. Springer Netherlands.

ESPACE project (European Spatial Planning: Adapting to Climate Events). (2008). Climate Change Impacts and Spatial Planning – Decision Support Guidance. EU.

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2013). Estrategia Nacional de Cambio Climático. Visión 10-20-40. Gobierno de la República. México, D.F [INECC, 2013]

Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change (2000). Special Report on Emissions Scenarios. A special report of working group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK. [IPCC, 2000]

Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change (2014). Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. [IPCC, 2014]

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Liu, J.; Folberth, C.; Yang, H.; Röckström, J.; Abbaspour, K.; Zehnder, A.J.B. (2013). A Global and Spatially Explicit Assessment of Climate Change Impacts on Crop Production and Consumptive Water Use. PLoS ONE 8(2): e57750.

Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Marcos Palomares, Omar Alejandro. (2017a). Panorama Internacional de la Adaptación de la Infraestructura Carretera ante el Cambio Climático. Publicación Técnica No. 488 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

Mendoza Sánchez, Juan Fernando; Marcos Palomares, Omar Alejandro; Mobayed Vega, Nabil Jorge; Orantes Olvera, Héctor (2017b). El clima y las carreteras en México. Publicación Técnica No. 498 del Instituto Mexicano del Transporte. Sanfandila, Querétaro, México.

National Academy of Sciences. (2008). New Directions in Climate Change Vulnerability, Impacts, and Adaptation Assessment: Summary of a Workshop. ISBN: 0-309-13007-7. [NAS, 2008]

Norwegian Public Roads Administration. (2007). R&D Programme "Climate and Transport" 2007-2013. Oslo, Norway.

Organization for Economic Co-operation and Development. (2008). Economic aspects of adaptation to climate change. Costs, benefits and policy instruments. Paris, France. [OECD, 2008]

Preston, B.L., Abbs, D., Beveridge, B., Brooke, C., Goddard, R., Hunt, G. & McInnes, K. (2007). Spatial Approaches for Assessing Vulnerability and Consequences in Climate Change Assessments Paper presented at the Proceedings of MODSIM 2007: International Congress on Modelling and Simulation, Christchurch, NZ. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand.

Schweikert, Amy; Chinowsky, Paul; Espinet, Xavier; Tarbert, Michael. (2014). Climate Change and Infrastructure Impacts: Comparing the Impact on Roads in ten Countries through 2100. Procedia Engineering, Elsevier. Institute of Climate and Civil Systems. Colorado, USA.

Secretaría de Comunicaciones y Transportes. (2016). Aplicación del Marco Internacional de Adaptación al Cambio Climático para la Infraestructura Carretera. Dirección General de Servicios Técnicos. Cd. de México, México.

Stern, Nicholas. (2006). Stern Review on the Economics of Climate Change. The Office of Climate Change. UK Government.

United Nations Economic Commission for Europe. (2013). Climate Change Impacts and Adaptation for International Transport Networks. Expert Group Report. Geneva, Switzerland.

United States Agency for International Development. (2014). Spatial Climate Change Vulnerability Assessments: A Review of Data, Methods, and Issues. African and Latin American Resilience to Climate Change (ARCC). Washington, DC, USA.

### **Páginas web:**

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

Red Nacional de Caminos (RNC), <https://datos.gob.mx/busca/dataset/red-nacional-de-caminos-representacion-cartografica-en-formato-digital-y-georreferenciada>

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

# Anexo 1. Base de datos de DesInventar

## Registro de impactos de fenómenos climáticos en México

No.	EVENTO	CANTIDAD DE EVENTOS REGISTRADOS ENTRE 1970 Y 2013, RELACIONADOS AL TRANSPORTE	ESTADOS Y CANTIDAD DE EVENTOS POR ESTADO	DESASTRES REGISTRADOS RELACIONADOS AL TRANSPORTE DESDE 1970 A 2013
1	ALUVION	10	Chiapas: 1 Distrito Federal: 1 Guanajuato: 1 Guerrero: 1 Michoacán: 1 Estado de México: 1 Jalisco: 1 Puebla: 1 Quintana Roo: 1 Veracruz: 1	-1 puente vehicular y 3 puentes peatonales destruidos por las avenidas de lodo y agua causadas por las lluvias. -Varias calles de ciudades y pueblos, y 1 G5 solo registro de carretera Federal cerradas a circulación debido a la presencia de lodo y agua.
2	AVENIDA TORRENCIAL	54	Chiapas: 10 Chihuahua: 3 Distrito Federal: 2 Durango: 1 Guanajuato: 1 Guerrero: 3 Jalisco: 2 Michoacán: 2 Morelos: 1 Nayarit: 3 Nuevo León: 3 Oaxaca: 3 Querétaro: 3 San Luis Potosí: 3 Sonora: 3 Tabasco: 2 Veracruz: 9 Zacatecas: 1	- 28 puentes vehiculares y 1 puente de madera destruidos por el arrastre de ríos - Varias calles de ciudades y pueblos intransitables y destruidas por la creciente y desbordamiento de ríos - 14 registros de carreteras federales, estatales o autopistas cerradas a la circulación debido a las crecientes y desbordamiento de ríos -3 registros tienen cuantificados 7,600 km de tramo afectado - 1 registro de afectación a vías férreas por la avenida de un río
3	DESLIZAMIENTO	380	Baja California Sur: 5 Baja California: 6 Chiapas: 36 Coahuila: 7 Colima: 4 Distrito Federal: 11 Durango: 10 Estado de México: 23 Guanajuato: 7 Guerrero: 56 Hidalgo: 34 Jalisco: 14 Michoacán: 9 Morelos: 13 Nayarit: 5 Nuevo León: 2 Oaxaca: 32 Puebla: 25 Querétaro: 13 San Luis Potosí: 5 Sinaloa: 4 Sonora: 1 Tabasco: 2 Tamaulipas: 5 Tlaxcala: 3	- 113 puentes vehiculares y 1 puente provisional destruidos por deslaves, deslizamientos y derrumbes en el terreno - Varias calles de ciudades y pueblos destruidas o intransitables por derrumbes y deslaves. - 232 registros de carreteras federales, estatales o autopistas cerradas a la circulación por deslaves, deslizamientos y derrumbes sobre las carreteras. -19 registros tienen cuantificados 4,467 km de tramo afectado - 13 registros de afectación y cierre de vías férreas por deslizamientos y derrumbes de terraplenes. -2 registros de cierre de aeropuertos, un hundimiento de un puente dentro del aeropuerto -2 registros de cierre de puerto naviero debido al deslizamiento de tierra.

No.	EVENTO	CANTIDAD DE EVENTOS REGISTRADOS ENTRE 1970 Y 2013, RELACIONADOS AL TRANSPORTE	ESTADOS Y CANTIDAD DE EVENTOS POR ESTADO	DESASTRES REGISTRADOS RELACIONADOS AL TRANSPORTE DESDE 1970 A 2013
			Veracruz: 43 Yucatán: 1 Zacatecas: 3	
4	GRANIZADA	24	Aguas Calientes: 1 Chihuahua: 1 Distrito Federal: 5 Estado de México: 3 Hidalgo: 2 Michoacán: 1 Nuevo León: 2 Querétaro: 2 Sinaloa: 1 Sonora: 1 Tlaxcala: 1 Veracruz: 3 Zacatecas: 1	- Varias calles de ciudades y pueblos intransitables por encharcamientos causadas por el granizo - 7 registros mencionan carreteras federales, estatales o autopistas cerradas, donde se impidió la circulación debido a la capa de hielo formada por el granizo - 1 registro de afectación a la línea METRO, disminución en su velocidad de operación debido al hielo en las vías.
5	HELADA	19	Baja California: 2 Chihuahua: 3 Coahuila: 2 Estado de México: 1 Nuevo León: 2 Sinaloa: 1 Sonora: 6 Tamaulipas: 1 Veracruz: 1 Yucatán: 1 Zacatecas: 1	- Varias calles de ciudades y pueblos afectadas por el congelamiento de la cinta asfáltica - 5 registros mencionan cierres de carreteras federales, estatales o autopistas por causa de congelamiento - 4 registros de cierre de puerto naviero debido a las bajas temperaturas
6	INCENDIO	6	Chihuahua: 2 Coahuila: 1 Hidalgo: 1 Nuevo León: 1 Veracruz: 1	- 1 registro de carretera federal cerrada debido a la poca visibilidad causada por el fuego. - 3 registros de afectación a vías férreas, uno con dos puentes ferroviarios afectados por el fuego, daños en durmientes - 1 registro de cierre de aeropuerto por poca visibilidad en la pista.
7	INCENDIO FORESTAL	3	Guerrero: 1 Chiapas: 1 Nuevo León: 1	- Afectación en calles y entradas de un pueblo por poca visibilidad - 1 puente incendiado - 1 registro de cierre de aeropuerto debido al incendio de pastizales que impidieron la visibilidad
8	INUNDACION	518	Aguascalientes: 2 Baja California Sur: 7 Baja California: 12 Campeche: 14 Chiapas: 38 Chihuahua: 18 Coahuila: 13 Colima: 8 Distrito Federal: 35 Durango: 7 Estado de México: 32 Guanajuato: 8 Guerrero: 19 Hidalgo: 17 Jalisco: 16 Michoacán: 10 Morelos: 7 Nayarit: 8 Nuevo León: 18 Oaxaca: 30 Puebla: 9 Querétaro: 7 Quintana Roo: 7 San Luis Potosí: 9	- 737 puentes vehiculares y 7 puentes peatonales destruidos causados por fuertes lluvias y desbordamiento de ríos. - Varias calles de ciudades y pueblos intransitables por inundación - 73 carreteras federales, estatales o autopistas parcialmente destruidas y cerradas debido a los desbordamientos de ríos y fuertes lluvias. - 29 registros tienen cuantificados 21,585.18 km de tramo afectado - 13 registros de cierres de vías férreas por inundaciones y deslizamientos - 8 registros de cierre de METRO por inundación en sus instalaciones - 1 registro de cierre de MEXIBUS por inundación en sus instalaciones - 14 registros de cierre de aeropuertos por inundación de la pista de aterrizaje. - 38 registros de cierre de puerto naviero a embarcaciones por tormentas tropicales y huracanes.

No.	EVENTO	CANTIDAD DE EVENTOS REGISTRADOS ENTRE 1970 Y 2013, RELACIONADOS AL TRANSPORTE	ESTADOS Y CANTIDAD DE EVENTOS POR ESTADO	DESASTRES REGISTRADOS RELACIONADOS AL TRANSPORTE DESDE 1970 A 2013
			Sinaloa: 12 Sonora: 16 Tabasco: 25 Tamaulipas: 21 Tlaxcala: 1 Veracruz: 80 Yucatán: 6 Zacatecas: 5	
9	LLUVIAS	277	Baja California Sur: 19 Baja California: 1 Campeche: 7 Chiapas: 28 Chihuahua: 1 Coahuila: 3 Colima: 10 Distrito Federal: 16 Durango: 4 Estado de México: 3 Guanajuato: 3 Guerrero: 21 Hidalgo: 5 Jalisco: 5 Michoacán: 10 Morelos: 1 Nayarit: 4 Nuevo León: 5 Oaxaca: 22 Puebla: 8 Querétaro: 1 Quintana Roo: 14 San Luis Potosí: 6 Sinaloa: 19 Sonora: 5 Tabasco: 3 Tamaulipas: 6 Veracruz: 36 Yucatán: 8 Zacatecas: 2	- 98 puentes vehiculares y 6 puentes colgantes derrumbados o destruidos por crecientes de ríos. - Varias calles de ciudades y pueblos intransitables por inundación - 12 registros mencionan carreteras federales, estatales o autopistas interrumpidas o cerradas debido a las fuertes lluvias e inundación de las mismas. -14 registros tienen cuantificados 4,690.93 km de tramo afectado - 6 registros de afectaciones a vías férreas, debido a descarrilamientos, o derrumbes sobre las vías -1 registros de cierre de METRO con reducción en su velocidad debido a la intensa lluvia -1 registro de cierre del TREN LIGERO con reducción en su velocidad debido a la intensa lluvia -21 registros de cierre de aeropuertos debido a la intensa lluvia, que imposibilitaba la visibilidad -97 registros de cierre de puerto naviero a embarcaciones debido a los fuertes vientos y lluvias -34 embarcaciones mayores destruidas y 25 dañadas. -347 embarcaciones menores destruidas y 992 dañadas.
10	MAREJADA	107	Baja California Sur: 4 Baja California: 3 Campeche: 12 Chiapas: 10 Colima: 5 Coahuila: 3 Colima: 10 Guerrero: 6 Jalisco: 1 Michoacán: 3 Nayarit: 3 Oaxaca: 5 Sinaloa: 13 Tabasco: 10 Tamaulipas: 7 Veracruz: 16 Yucatán: 8	- 6 registros mencionan carreteras federales, estatales o autopistas con daños, 5 de daños por inundación de la cinta asfáltica y 1 de corte en la carretera. -2 registros tienen cuantificados 4.02 km de tramo inundado. -102 registros de cierre de puerto naviero debido al fuerte oleaje y viento -15 embarcaciones destruidas -400 embarcaciones varadas
11	NEBLINA	21	Aguascalientes: 2 Baja California: 1 Distrito Federal: 12 Nuevo León: 2 Querétaro: 1 San Luis Potosí: 1 Veracruz: 1	-3 registros mencionan en que carreteras federales, estatales o autopistas se cerraron debido a la intensa neblina -16 registros de cierre de aeropuertos debido a la intensa neblina. -1 registro de cierre de puerto naviero debido a la intensa neblina.
12	NEVADA	228	Aguascalientes: 1 Baja California Sur: 22 Chihuahua: 73	- 1 puente destruido por derretimiento de nieve y 7 cerrados por congelamiento - Varias calles de ciudades y pueblos



No.	EVENTO	CANTIDAD DE EVENTOS REGISTRADOS ENTRE 1970 Y 2013, RELACIONADOS AL TRANSPORTE	ESTADOS Y CANTIDAD DE EVENTOS POR ESTADO	DESASTRES REGISTRADOS RELACIONADOS AL TRANSPORTE DESDE 1970 A 2013
			Coahuila: 12 Colima: 4 Distrito Federal: 9 Durango: 18 Estado de México: 20 Guanajuato: 2 Hidalgo: 4 Jalisco: 4 Morelos: 2 Nuevo León: 6 Oaxaca: 1 Puebla: 3 Querétaro: 1 San Luis Potosí: 2 Sinaloa: 2 Sonora: 28 Tamaulipas: 2 Veracruz: 7 Zacatecas: 5	intransitables por hielo, nieve y congelamiento - 74 registros mencionan cierre de carreteras federales, estatales o autopistas debido a la nieve y al congelamiento del pavimento. -3 registros tienen cuantificados 102 km de tramo afectado - 13 registros de cierre de vías férreas debido a nevadas. -14 registros de cierre y cancelación de vuelos en aeropuertos por nieve en la pista y heladas.
13	SEQUIA	1	Veracruz: 1	-700 km de vialidades afectadas por la sequía, rompimiento de la capa asfáltica.
14	TEMPESTAD	234	Baja California Sur: 15 Baja California: 8 Campeche: 9 Chiapas: 9 Chihuahua: 8 Coahuila: 6 Colima: 10 Distrito Federal: 23 Durango: 5 Estado de México: 2 Guanajuato: 2 Guerrero: 21 Hidalgo: 2 Jalisco: 7 Michoacán: 8 Nayarit: 4 Nuevo León: 3 Oaxaca: 13 Puebla: 2 Querétaro: 1 Quintana Roo: 7 San Luis Potosí: 2 Sinaloa: 11 Sonora: 6 Tabasco: 2 Tamaulipas: 9 Tlaxcala: 1 Veracruz: 27 Yucatán: 8 Zacatecas: 1	- 33 puentes vehiculares, 7 puentes colgantes y 2 puentes peatonales derrumbados o destruidos por la creciente del agua debido a las lluvias - Varias calles de ciudades y pueblos inundadas - 16 registros mencionan carreteras federales, estatales o autopistas interrumpidas o cerradas debido a las fuertes lluvias y vientos -6 registros tienen cuantificados 68.4 km de tramo afectado - 5 registros de cierre de vías férreas, debido a fuertes lluvias -1 registros de cierre de METRO con reducción en su velocidad debido a la intensa lluvia -15 registros de cierre de aeropuertos debido a la intensa lluvia, y los fuertes vientos, 1 reporta daño severo a pista de aterrizaje. -97 registros de cierre de puerto naviero a embarcaciones, debido a los fuertes vientos y lluvias -79 embarcaciones destruidas y 8150 varadas.
15	VENDAVAL	237	Baja California Sur: 2 Campeche: 30 Chiapas: 3 Chihuahua: 5 Distrito Federal: 4 Estado de México: 1 Guerrero: 4 Hidalgo: 1 Nuevo León: 1 Oaxaca: 11 Quintana Roo: 8 San Luis Potosí: 2 Tabasco: 30 Tamaulipas: 29	- Varias calles de ciudades y pueblos cerradas por caída de objetos y letreros y los fuertes vientos. - 5 registros mencionan carreteras federales, estatales o autopistas cerradas debido a los fuertes vientos y tolvaneras creadas por el aire -1 registros de suspensión de METROBUS debido a los fuertes vientos -3 registros de cierre de aeropuertos debido al intenso viento. -220 registros de cierre de puerto naviero a embarcaciones, debido a los fuertes vientos y lluvias - 118 embarcaciones destruidas y 7450 varadas.

No.	EVENTO	CANTIDAD DE EVENTOS REGISTRADOS ENTRE 1970 Y 2013, RELACIONADOS AL TRANSPORTE	ESTADOS Y CANTIDAD DE EVENTOS POR ESTADO	DESASTRES REGISTRADOS RELACIONADOS AL TRANSPORTE DESDE 1970 A 2013
			Veracruz: 75 Yucatán: 29 Zacatecas: 1	
16	ONDA FRIA	5	Chihuahua: 2 Distrito Federal: 1 Sonora: 1 Tamaulipas: 1	- Tramos carreteros bloqueados por nieve y hielo - 1 registro de cierre de puerto debido a la onda fría.



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

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

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

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