



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Aproximación geoespacial para adaptar la infraestructura ferroviaria al cambio climático en México

Luz Angélica Gradilla Hernández

Publicación Técnica No. 865
Querétaro, México
2025

ISSN 0188-7297

Esta investigación fue realizada en la División de Transporte Sostenible y Cambio Climático del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Luz Angélica Gradilla Hernández.

Esta investigación es el producto final del proyecto de investigación interna CI-02/24 “Análisis geoespacial para la adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático en México”.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de la autora y no necesariamente reflejan los puntos de vista del Instituto Mexicano del Transporte.

Tabla de Contenido

	Página
Sinopsis.....	v
Abstract.....	vii
Introducción.....	1
1. Antecedentes.....	5
1.1 Sistema Ferroviario Mexicano.....	5
1.2 Posibles impactos del cambio climático y el clima extremo en la infraestructura ferroviaria.....	6
1.2.1 Impactos por altas temperaturas.....	7
1.2.2 Impactos por bajas temperaturas.....	7
1.2.3 Impactos por precipitación intensa.....	8
1.2.4 Impactos por sequía.....	9
1.2.5 Impactos por vientos fuertes.....	9
1.2.6 Impactos por aumento del nivel del mar y marejadas de tormenta.....	10
2. Información geoespacial para la adaptación al cambio climático.....	13
2.1 Enfoque para estimar el nivel de exposición de la infraestructura ferroviaria en México.....	14
2.2 Base de datos de incidentes ocurridos en el Sistema Ferroviario Mexicano.....	15
2.3 Información sobre los activos ferroviarios.....	18
3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático.....	21
3.1 Incidentes ocurridos en el Sistema Ferroviario Mexicano en el periodo 2016-2023.....	21

3.2	Escenarios de cambio climático para México	28
3.2.1	Precipitación acumulada anual	29
3.2.2	Precipitación promedio anual.....	38
3.2.3	Temperatura máxima promedio mensual	46
3.2.4	Temperatura mínima promedio mensual	70
3.3	Aumento del nivel del mar	94
	Conclusiones.....	103
	Bibliografía	105

Sinopsis

Debido a los efectos del cambio climático, es necesario transitar hacia una Sistema Ferroviario Mexicano resiliente al clima, por lo que, en el presente trabajo se propone una aproximación geoespacial que podría ser de utilidad en el proceso de adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático. Para ello, se incluyen los incidentes ocurridos en el Sistema Ferroviario Mexicano en el periodo 2016-2023, y que podrían estar relacionados a los efectos del cambio climático, mismos que fueron recopilados por la Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario, así como los escenarios de cambio climático para México del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.

La aproximación geoespacial es un elemento importante para priorizar los tramos ferroviarios con mayor nivel de exposición a diversas amenazas o que hayan sufrido daños en el pasado, para que en una fase posterior se realicen los estudios específicos *in situ* necesarios para adaptar dicha infraestructura al cambio climático.

Abstract

Due to the effects of climate change, it is necessary to move towards a climate-resilient Mexican Railway System, therefore, in this work a geospatial approach is proposed that could be useful in the process of adaptation of the Mexican Railway System to climate change. For this purpose, the incidents that occurred in the Mexican Railway System in the period 2016-2023 are included, and that could be related to the effects of climate change, which were compiled by the Railway Transport Regulatory Agency, as well as the climate change scenarios for Mexico from the National Institute of Ecology and Climate Change.

The geospatial approach is an important element to prioritize railway sections with the highest level of exposure to various threats or that have already suffered damage in the past, so that in a later phase the specific on-site studies necessary to adapt such infrastructure to climate change are carried out.

Introducción

Las sociedades pueden responder al cambio climático adaptándose a sus impactos y reduciendo las Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), de tal forma que se reduzca la tasa y la magnitud del cambio. Por tanto, la política para el cambio climático comprende dos pilares: (1) mitigación del cambio climático, y (2) adaptación al cambio climático (Rübbelke, 2011).

La mitigación es fundamental para “atenuar” los efectos del cambio climático tanto como sea posible, aunque algunos impactos ya no se pueden evitar y, por tanto, es esencial la adaptación a dichos impactos, misma que será un proceso continuo que estará presente en las próximas décadas.

En México se tiene el gran reto de avanzar en el cumplimiento de los diecisiete objetivos de las Naciones Unidas de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. El objetivo 9 consiste en construir infraestructuras resilientes, promover la industrialización inclusiva y sostenible y fomentar la innovación (JOP, 2019).

En el año 2023, México contaba con 27,732 kilómetros de vías férreas, es decir, aumentó la extensión del Sistema Ferroviario Mexicano (SFM) en 818 kilómetros con respecto al año 2022, debido al Tren Maya y el tren interurbano México-Toluca (Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario [ARTF], 2024).

Durante el año 2023, en el Sistema Ferroviario Mexicano se transportaron cerca de 131.48 millones de toneladas de carga y 45.84 millones de pasajeros, la gran mayoría de los pasajeros fueron transportados en el Tren Suburbano de la Zona Metropolitana del Valle de México y, el resto, en los tres servicios de pasajeros de carácter especial y turístico con los que se cuenta en el país (SICT, 2024).

En años recientes, las políticas públicas del Gobierno Federal han incluido el desarrollo de proyectos ferroviarios nuevos para pasajeros (Tren México-Toluca, Ramal Lechería-Aeropuerto Internacional Felipe Ángeles), para carga (Corredor Interoceánico del Istmo de Tehuantepec) y mixto (Tren Maya), entre otros que se encuentran en cartera para el sexenio 2024-2030 como el tren México-Querétaro.

Los posibles bloqueos de las vías férreas del SFM, por efectos del cambio climático, no solo afectarán económica y socialmente al país, sino también ambientalmente, ya que el autotransporte de carga emite más GEI que el ferrocarril (ARTF, 2022).

Si se quiere transitar hacia un SFM resiliente al clima, se deberá iniciar el proceso de adaptación de las vías férreas al cambio climático, mismo que tiene como objetivo principal prever los efectos adversos del clima y tomar las medidas adecuadas para evitar o minimizar los daños que puedan causar, con el fin de reducir costos futuros y, por ende, maximizar la rentabilidad de las inversiones y disminuir su vulnerabilidad.

Actualmente, los planificadores y operadores del transporte no solo deben contar con información climática histórica y de los escenarios futuros del cambio climático, sino también con datos referenciados geográficamente que les permitan identificar posibles zonas de riesgo al cambio climático, es decir, tramos de vías férreas con alta vulnerabilidad al clima o alto grado de exposición, para priorizar tramos a ser intervenidos o para nuevas obras que contemplen criterios de adaptación al cambio climático en su diseño.

En el marco de las políticas públicas del Gobierno Federal, relacionadas con la adaptación al cambio climático, en el Instituto Mexicano del Transporte (IMT) se han desarrollado proyectos relacionados con el proceso de adaptación de la infraestructura carretera en México (Mendoza et al., 2017 y 2019; Gradilla et al., 2018 y 2022) y de la infraestructura ferroviaria en México (Gradilla et al., 2024).

Para continuar con la línea de trabajo sobre la adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático, se desarrolló el presente trabajo para realizar una propuesta de análisis geoespacial de la información que pudiera ser de utilidad para el proceso de adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático.

El presente trabajo está alineado al apartado III. “Economía” del Plan Nacional de Desarrollo, así como al objetivo prioritario 1 del Programa Sectorial de Comunicaciones y Transportes 2020-2024, que consiste en “Contribuir al bienestar social mediante la construcción, modernización y conservación de infraestructura carretera accesible, segura, eficiente y sostenible, que conecte a las personas de cualquier condición, con visión de desarrollo regional e intermodal”. Dentro de dicho objetivo se alinea con la estrategia prioritaria 1.5 “Mejorar la planeación y prospectiva de la infraestructura carretera, para contar con procesos sólidos y ágiles de terminación de obra y detectar oportunamente las necesidades futuras de la infraestructura carretera”, y con la acción puntual 1.5.5 “Aumentar la

investigación científica y capacidad tecnológica vinculadas a las necesidades del sector”.

A su vez, este trabajo se enmarca en la línea de investigación “mitigación y adaptación al cambio climático” del Instituto Mexicano del Transporte, y también podría contribuir con conocimiento para la consecución del objetivo 1.9 “Construir un país más resiliente, sostenible y seguro”, ligado al Programa Especial de Cambio Climático 2019-2024, con el objeto de aumentar los niveles de resiliencia en la infraestructura para el transporte.

1. Antecedentes

De acuerdo con información del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC] (2024), las temperaturas promedio del país en los últimos 50 años han aumentado aproximadamente 0.85 grados centígrados por arriba de la normal climatológica en México. Además, se ha observado un aumento de ciclones tropicales que afectan el 60% del territorio nacional, estos fenómenos hidrometeorológicos extremos pueden ocasionar lluvias torrenciales que, a su vez, provocan inundaciones y deslaves.

Se han construido modelos matemáticos que permiten generar distintos escenarios de los impactos que se pueden presentar para el año 2100. Para México, estos modelos estiman lo siguiente: en las zonas fronterizas con Estados Unidos de América, la temperatura aumentará 4 °C y en el resto del país entre 2.5 y 3.5 °C, además se espera que las precipitaciones disminuyan en promedio entre 5 y 10% (en un rango de 22 a 4.5 mm/mes menos), aunque los diferentes modelos no coinciden en sus estimaciones, es una aproximación de lo que se puede presentar en México (INECC, 2024).

Debido a lo anterior, es necesario implementar los mecanismos necesarios para adaptar el Sistema Ferroviario Mexicano al cambio climático, con un enfoque que permita tomar en cuenta las adaptaciones basadas en la naturaleza, que ayuden a aumentar la resiliencia al clima de la infraestructura ferroviaria en México. A continuación, se hace una breve descripción del Sistema Ferroviario Mexicano y de los posibles efectos que podría sufrir debido al cambio climático.

1.1 Sistema Ferroviario Mexicano

En el año 2023, México contaba con 27,732 kilómetros de vías férreas, es decir, aumentó la extensión del Sistema Ferroviario Mexicano (SFM) en 818 kilómetros con respecto al año 2022, debido al Tren Maya y el tren interurbano México-Toluca. Dicho SFM está compuesto por 18,024 km de vías principales (65% del total), 2,759 km de vías secundarias (9.9% del total), 2,937 km de vías particulares (10.6% del total) y 4,013 km de vías no concesionadas o no asignadas (14.5%) (ARTF, 2024).

Durante el año 2023, en el Sistema Ferroviario Mexicano se transportaron cerca de 131.48 millones de toneladas de carga, lo cual representó un aumento del 2.35% respecto al año 2022. Los principales productos transportados fueron los industriales (48.54%), agrícolas (26.73%) y el petróleo y sus derivados (12.18%) (ARTF, 2024).

La Figura 1.1 muestra el Sistema Ferroviario Mexicano (SFM), el cual incluye las empresas asignatarias y concesionarias de la red.



Figura 1.1 Mapa del Sistema Ferroviario Mexicano

Fuente: ARTF (2024).

1.2 Posibles impactos del cambio climático y el clima extremo en la infraestructura ferroviaria

La exposición actual de la infraestructura ferroviaria al cambio climático, y a los eventos extremos, reduce significativamente la vida útil de los proyectos ferroviarios, ya que las condiciones de diseño originales se encuentran en la mayoría de los casos rebasadas, representando una amenaza para la seguridad y confiabilidad del servicio en la etapa de

operación, y costos adicionales para el mantenimiento o reconstrucción de la infraestructura.

Los principales impactos que alteran el desempeño de la infraestructura ferroviaria se describen a continuación.

1.2.1 Impactos por altas temperaturas

Las altas temperaturas, como consecuencia del cambio climático, imponen desafíos significativos a la infraestructura ferroviaria.

Cuando la temperatura ambiente excede los 30°C, el estrés térmico se añade a la tensión de velocidad de un tren en movimiento, lo que puede pandear la vía férrea. Por el aumento térmico y la exposición directa a la luz solar, la temperatura interna de un riel puede superar hasta en 20°C la temperatura externa, resultando en la dilatación del riel. Este fenómeno conduce a la desalineación lateral de las vías y aumenta el riesgo de descarrilamientos (Palin et al., 2013).

Algunos de los posibles impactos por el aumento generalizado de la temperatura son:

- Pandeo de los rieles y/o problemas de desalineación, esto debido a que el acero de los rieles se expande con las altas temperaturas.
- Expansión de los activos móviles, como los puentes giratorios y aparatos de vía, que dificultan el funcionamiento, ya que no se acoplan adecuadamente.
- Aumento generalizado de la tasa de fallos de los activos a altas temperaturas (sistemas de señalización, etc.).
- Pandeo de la catenaria en las líneas electrificadas.
- Incremento del riesgo de incendios forestales o de la vegetación aladaña a la vía férrea, debido al aumento de las olas de calor y los periodos de sequía.
- Modificaciones en las tensiones en el anclaje que sujeta al riel con el durmiente.
- Las afectaciones en los rieles tienen un impacto importante en las demoras operacionales de los ferrocarriles.

1.2.2 Impactos por bajas temperaturas

Las condiciones de bajas temperaturas pueden plantear un conjunto único de desafíos para las operaciones ferroviarias. Desde la congelación y la contracción de los materiales de la vía hasta el impacto en los sistemas eléctricos y el aumento del riesgo de roturas de rieles, las bajas

temperaturas pueden afectar seriamente la fiabilidad y seguridad de la infraestructura ferroviaria (Stenström *et al.*, 2012).

Los posibles impactos por bajas temperaturas son los siguientes:

- Fractura de rieles, grietas y/o problema de desalineación, debido a que el acero de los rieles se tensa con las bajas temperaturas.
- Inundaciones por granizadas que dañan las infraestructuras, especialmente a los puentes.
- Las bajas temperaturas pueden congelar el suelo de cimentación, lo que puede provocar movimientos en los materiales por la expansión y contracción del suelo.
- En el caso de la presencia de nieve, ésta tiende a bloquear la visibilidad del riel para el conductor del tren.
- Reducción de los niveles de fricción del contacto de las ruedas de los vehículos con el riel, disminuyendo su capacidad de frenado.
- Las líneas electrificadas pueden ser vulnerables debido a que el suministro de energía puede verse afectado.

1.2.3 Impactos por precipitación intensa

Las precipitaciones intensas pueden provocar inundaciones en la infraestructura ferroviaria, ya que el agua de la precipitación, los escombros y el barro pueden bloquear las vías y dañar los diversos elementos, principalmente en tramos que están contruidos en zonas con taludes de cortes/laderas o túneles a un nivel inferior, sin tomar en cuenta el debido diseño del drenaje; además, los deslizamientos de tierra de igual forma pueden ser provocados por precipitaciones intensas, ya que estos ocurren cuando el agua en el suelo la separa, perdiendo adherencia/cohesión, lo que reduce la fuerza que tiene un talud para mantenerse en pie, provocando que éste comience a deslizarse cuesta abajo, obstruyendo la vía férrea y, en algunas ocasiones, provocando daños severos a la infraestructura ferroviaria (National Rail UK, 2023).

Los posibles impactos por el aumento de episodios de precipitación intensa son los siguientes:

- Aumento del riesgo de falla en taludes de corte y laderas, provocando movimientos de tierra y desprendimiento de materiales.
- Aumento del riesgo de socavación de los puentes (estribos y pilas) debido a las inundaciones.
- Falla o colapso de los elementos de soporte de otras estructuras debido a un mayor riesgo de socavación.

- El agua acumulada contamina y dispersa el balasto de la vía, afectando su desempeño, estabilidad y durabilidad
- Aumento del riesgo de aluviones, que a su vez provocan daños estructurales en los elementos de la infraestructura ferroviaria.
- Caídas de material sobre las vías, en túneles y en sus accesos, que pueden provocar descarrilamientos.
- Afectaciones a los sistemas de drenaje por el incremento de la precipitación.
- Afectaciones en el servicio como consecuencia de obstáculos en las vías e inundaciones debido a las lluvias intensas.

1.2.4 Impactos por sequía

La sequía reduce la humedad del suelo y, por lo tanto, su capacidad de carga, lo que puede provocar hundimientos/agrietamientos del suelo de cimentación y, por lo tanto, pérdida de estabilidad para las capas de sub-balasto y balasto, que conllevan a una desnivelación de durmientes y de los rieles.

Algunos de los posibles impactos por sequía son:

- Aumento del riesgo de fallas estructurales debido a los movimientos de tierra provocados por la sequedad, ya sea en el suelo de cimentación o en los taludes.
- Desalineación de la vía férrea.
- Pérdida de vegetación y, por lo tanto, aumento de la erosión del suelo y un cambio en los patrones de escurrimiento superficial.

La vegetación junto a las vías suele ser una fuente estabilizadora del suelo y controla los escurrimientos que atraviesan la infraestructura férrea (Szymczak *et al.*, 2023).

1.2.5 Impactos por vientos fuertes

Los vientos fuertes representan un factor crítico en la infraestructura ferroviaria, con la capacidad de desencadenar diversos riesgos y desafíos operativos. Investigaciones detalladas en diferentes países han revelado que la fuerza del viento puede provocar la pérdida de contacto del colector de corriente con el hilo de contacto, aumentando así el riesgo de descarrilamiento o vuelco del tren. Este fenómeno se presenta principalmente en sistemas de alta velocidad electrificados (Andersson *et al.*, 2004; Diedrichs *et al.*, 2007; Baker *et al.*, 2004).

Especialmente destacable es la investigación realizada en Austria, donde se evidenció que vientos con velocidades superiores a 120 km/h pueden,

bajo ciertas condiciones, volcar un tren o causar daños significativos. Velocidades de viento superiores a 130 km/h pueden inducir vibraciones en el hilo de contacto, aumentando así el riesgo de problemas graves con el colector de corriente. Además, los vientos fuertes tienen la capacidad de desplazar vagones de carga estacionados y mover la carga dentro de ellos (Rachoy & Spazierer, 2008).

Dichos vientos también pueden ocasionar accidentes y perturbaciones en la red ferroviaria debido a la colisión de trenes con árboles caídos, ramas o escombros de construcción depositados en las vías por los fuertes vientos (Baker et al., 2009).

Algunos de los posibles impactos por un aumento de la intensidad máxima en las rachas de viento son los siguientes:

- Mayor riesgo de caída de hojas que provoca una baja adherencia de la vía férrea.
- Caída de árboles y ramas a las vías férreas.
- Carga excesiva de viento en estructuras como postes y torres (incluye la catenaria y el señalamiento), que pueden provocar su caída.
- Erosión de las capas de balasto y sub-balasto debido a las fuertes masas de aire.
- Mayor riesgo de daños en los puentes, en caso de vientos fuertes (para la infraestructura y la operación).
- Inestabilidad de los vagones, particularmente tratándose de doble estiba.
- Arrastre de sedimentos y escombros que caen sobre las vías.

1.2.6 Impactos por aumento del nivel del mar y marejadas de tormenta

El aumento del nivel del mar y las marejadas de tormenta son problemas que enfrentará la red ferroviaria mexicana debido a su ubicación en algunos tramos cercanos a las costas, por ende, el impacto potencial en puentes, vías y estructuras ferroviarias es sustancial, afectando no solo la operatividad sino también la seguridad del sistema.

El aumento del nivel del mar, incluso de 30 a 40 cm en las próximas décadas, puede tener graves consecuencias, tanto para tramos de ferrocarril que estén cercanas a la costa y para ferrocarriles en ciudades ubicados en las desembocaduras de los ríos. En este sentido, es necesario construir infraestructuras de protección adicionales en la costa (Baker et al., 2009).

Las líneas férreas cercanas a la costa en México son aquellas que conectan a los puertos marítimos, por lo que son de alta importancia para las cadenas logísticas.

Los posibles impactos por aumento del nivel del mar y marejadas de tormenta son los siguientes:

- Erosión costera que provoca socavación en la superestructura de la vía férrea.
- Inundación de la superestructura de la vía férrea.
- Formación de olas significativas que provocan daños en la vía.
- Acumulación de escombros en la vía férrea.
- Un oleaje excesivo puede desestabilizar la estructura ferroviaria, provocando su colapso.
- Deterioro de los rieles por su contaminación salina.
- Interrupción del servicio por efectos del oleaje.

Existen otras afectaciones directas para el equipo de tracción (locomotoras) y para el equipo de rodamiento (carros), tales como el sobrecalentamiento, aumento del consumo energético, reducción de la velocidad bajo estrés climático, etc.

2. Información geoespacial para la adaptación al cambio climático

La adaptación de la infraestructura ferroviaria implica diversas acciones (políticas, estrategias, soluciones de ingeniería o basadas en la naturaleza) que permitirán que la infraestructura permanezca operando bajo la presencia de fenómenos climáticos extremos y sus efectos derivados, sin que resulten en fallas o daños severos que repercutan en cierres parciales o totales de la vía férrea.

Cuando se adapta la infraestructura ferroviaria a los posibles efectos del cambio climático, también se fortalece la resiliencia al clima de la misma, lo que reduce el riesgo de interrupciones relacionadas con el clima, pero el riesgo no se puede eliminar completamente. El cómo el cambio climático se traduce en riesgos para la infraestructura depende de la interacción entre las amenazas por el cambio climático con la exposición (la ubicación de los activos), la sensibilidad (estado físico que guardan los activos), los cuales conjuntamente determinan la vulnerabilidad (la propensión a verse afectado negativamente).

Los riesgos climáticos para la infraestructura nueva pueden reducirse ubicando los activos en zonas que estén menos expuestas a las amenazas climáticas (por ejemplo, evitando nuevas construcciones en planicies inundables o lejos de las líneas de costa) y mejorando la capacidad de los activos para hacer frente a la materialización de los impactos climáticos (OCDE, 2018).

Debido a que no es posible que la infraestructura ferroviaria en su totalidad sea resiliente ante todo, es recomendable que primero se determinen los tramos ferroviarios, puentes o túneles que se consideran críticos, es decir, aquellos cuyo daño afectaría en mayor medida el servicio que ofrece la red ferroviaria, con un efecto en cascada hacia la actividad económica del país, para trabajar posteriormente en el mejoramiento de esa infraestructura crítica (al menos para los riesgos de mayor probabilidad de ocurrencia o con las mayores consecuencias negativas) y, en el resto de la infraestructura, que por falta de recursos no reciba una mejora de tipo adaptativo, será necesario establecer protocolos de respuesta para cada tipo de amenaza, en busca de mejorar la resiliencia

de la infraestructura a algunos de los riesgos con mayor probabilidad de ocurrencia.

Actualmente, gracias a los Sistemas de Información Geográfica, es posible hacer un análisis espacial de la infraestructura ferroviaria para estimar el nivel de exposición ante los posibles efectos del cambio climático o identificar las zonas con mayores incidentes históricos que pudieran atribuirse al cambio climático, por lo que la aproximación geoespacial podría ser de utilidad para identificar la infraestructura que se encuentra altamente expuesta, de tal manera que se prioricen los tramos ferroviarios con mayor nivel de exposición a diversas amenazas y, que a su vez, tengan un alto nivel de importancia por la alta cantidad de carga o personas que transitan en ellos, para que en una fase posterior se realicen estudios específicos *in situ* para adaptar dicha infraestructura al cambio climático.

2.1 Enfoque para estimar el nivel de exposición de la infraestructura ferroviaria en México

De acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC] (2014), la exposición es la presencia de las personas, los medios de vida, especies o ecosistemas, las funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructura o activos económicos, sociales o culturales, en sitios y entornos que podrían verse afectados de manera adversa.

México se encuentra expuesto a diferentes amenazas climáticas, particularmente aquellas del tipo hidrometeorológico, integrado por ciclones tropicales o huracanes, lluvias y precipitaciones intensas, etc. De acuerdo con el Índice Mundial de Riesgo (WRI¹) de 2024, México tiene un alto índice de riesgo y se encuentra en la posición 5 de 193 países, debido principalmente a los eventos climáticos extremos y el cambio climático. El índice mide varios indicadores, entre ellos el grado de vulnerabilidad² y exposición de los países. En términos del grado de exposición, México ocupa la segunda posición a nivel mundial.

¹ Por las siglas en inglés de World Risk Index. Bündnis Entwicklung Hilft / IFHV (2024): WorldRiskReport 2024. Berlin: Bündnis Entwicklung Hilft. <https://reliefweb.int/report/world/worldriskreport-2024-focus-multiple-crises>

² Que se mide de acuerdo con la susceptibilidad, la capacidad de adaptación y la capacidad para hacer frente a los eventos naturales extremos.

Por ello, es importante identificar los niveles de exposición de las vías férreas para evaluar las zonas con mayor riesgo al cambio climático y al clima extremo.

El nivel de exposición en un sitio puede estar basado en datos históricos y recientes, o también basarse en proyecciones climáticas de acuerdo con los diferentes escenarios asociados a las trayectorias de concentración de emisiones en la atmósfera (véase la Figura 2.1). Para ello, se requiere identificar y seleccionar las amenazas climáticas relevantes y, posteriormente, relacionarlas con la infraestructura para evaluar el nivel de exposición, en este caso, la infraestructura ferroviaria.



Figura 2.1 Proceso para la generación de mapas de riesgo en la infraestructura ferroviaria

Fuente: Gradilla et al. (2024).

2.2 Base de datos de incidentes ocurridos en el Sistema Ferroviario Mexicano

La Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario (ARTF) publica trimestralmente el Pulso del Sistema Ferroviario Mexicano - Seguridad, con el objetivo de dar a conocer los reportes relacionados con bloqueos y seguridad tanto operativa (siniestros) como pública (robo a carga y

vandalismo). Estos siniestros se clasifican conforme se indica en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1 Clasificación de siniestros ferroviarios

Grupo de siniestro	Tipo de siniestro
Grupo I. Cruces a nivel	Arrollamiento de Vehículo
	Impacto a Tren
Grupo II. Equipo ferroviario, infraestructura y operación	Afectación al paso de trenes por cables de CFE
	Alcance
	Asentamiento/Terraplén
	Cambio trillado
	Choque
	Choque técnico
	Confinamiento dañado
	Daño a Instalaciones
	Desacoplamiento de manguera de aire
	Descarrilamiento
	Deslave/ derrumbe
	Equipo en mal estado
	Faltas al reglamento interno de transporte
	Incendio
	Inundación
	Objetos sobre la vía
	Pérdida de comprobación a vía directa de aguja de cambio
	Pérdida de energía catenaria
	Pérdida de potencial
	Rozamiento
Vía en mal estado	
Grupo III. Muerte, lesión y otros	Accidente personal ferroviario
	Cadáver sobre la vía/ en derecho de vía
	Persona arrollada
Grupo IV. Materiales o residuos peligrosos	Fuga/Derrame
	Artefacto explosivo

Fuente: ARTF (2023).

Algunos de los siniestros del Grupo II (ver Tabla 2.2) podrían servir como datos históricos de incidentes que pudieron tener una causa climática y que, por lo tanto, podrían ser de utilidad para identificar las zonas vulnerables en el Sistema Ferroviario Mexicano (ver Figura 2.2).



Figura 2.2 Base de datos de incidentes en la infraestructura ferroviaria

Fuente: Gradilla et al. (2024).

En el periodo 2016-2023, se tienen 9674 registros de siniestros de los cuatro grupos, de los cuales 3887 son siniestros del Grupo II “Equipo ferroviario, infraestructura y operación” (ver Tabla 2.2).

Tabla 2.2 Siniestros del Grupo II (2016-2023)

Grupo	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Total por grupo
Grupo I	174	606	425	534	608	687	726	768	4,528
Grupo II	232	746	650	643	554	490	324	248	3,887
Grupo III	42	118	86	123	128	203	241	236	1,177
Grupo IV	7	22	19	12	8	11	1	2	82
Total por año	455	1,492	1,180	1,312	1,298	1,391	1,292	1,254	9674

Fuente: Elaboración propia con Información de la ARTF (2023).

En el Grupo II “Equipo ferroviario, infraestructura y operación”, 341 siniestros podrían deberse a eventos climáticos y geotécnicos (incendio, inundación, deslave/derrumbe), y algunos de los 3091 siniestros restantes podrían estar asociadas con amenazas climáticas, como el

descarrilamiento, los daños a instalaciones y los objetos en la vía; en la Tabla 2.3 muestra este resumen.

Tabla 2.3 Siniestros que se pueden deber a causas climáticas, geotécnicas y otras posiblemente relacionadas (2016-2023)

Tipo de siniestro	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Número de eventos
Daño a instalaciones	0	0	1	2	7	5	5	3	23
Descarrilamiento	129	527	429	509	404	381	273	198	2,850
Deslave/derrumbe	6	35	41	17	38	35	1	1	174
Incendio	2	14	40	14	8	5	2	3	88
Inundación	3	23	29	10	11	3	0	0	79
Objetos sobre la vía	73	64	34	21	21	4	0	1*	218
Total	213	663	574	573	489	433	281	206	3,432

Nota: * Cables de CFE sobre la vía

Fuente: Elaboración propia con Información de la ARTF (2023).

2.3 Información sobre los activos ferroviarios

Es importante contar con una base de datos referenciados geográficamente de los activos ferroviarios (ver recuadro resaltado en la Figura 2.9), para tal efecto, en México se cuenta con la Red Ferroviaria Nacional (RFN)³ del año 2023, de la Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario.

La RFN está conformada por cinco capas geográficas que describen la infraestructura ferroviaria en cuanto a: vías, túneles, cruces a nivel, puentes, patios, terminales, estaciones de pasajeros, puertos ferroviarios (marítimos y fronterizos), así como las placas kilométricas.

³ Declarada información de interés nacional en el Diario Oficial de la Federación el 09-02-2024.

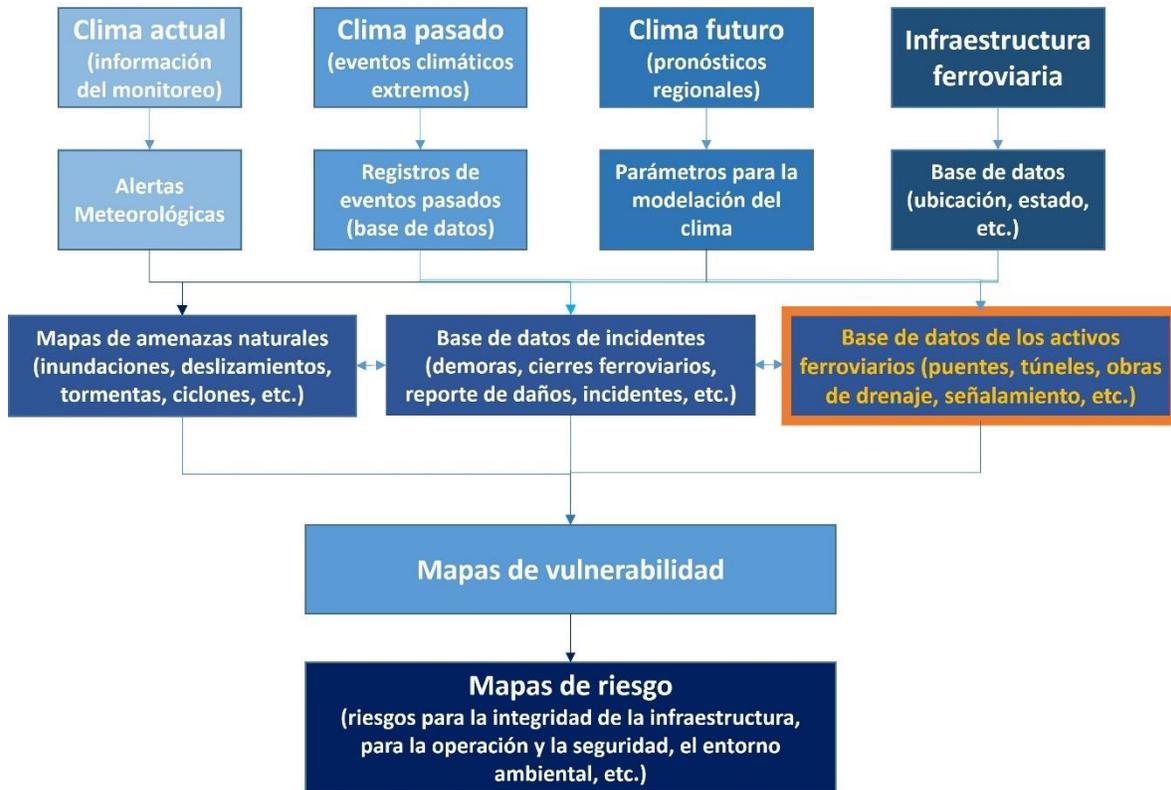


Figura 2.9 Base de datos de los activos ferroviarios

Fuente: Gradilla et al. (2024).

Cabe señalar que la Red Ferroviaria del año 2023 aún no contiene la mayor parte del trazo del Tren Maya, por lo que no aparece en los mapas de la siguiente sección.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

A continuación, se presentan algunas aproximaciones geoespaciales que podrían ser de utilidad para identificar la infraestructura ferroviaria expuesta a diversas amenazas en el pasado, o que podría verse afectada por altas o bajas temperaturas, o altos niveles de precipitación. Dichos análisis deben ser complementados con estudios específicos *in situ* para aquellos tramos altamente expuestos y que son importantes para el transporte de la carga o personas en México, de tal manera que se inicie el proceso de adaptación de dicha infraestructura al cambio climático.

3.1 Incidentes ocurridos en el Sistema Ferroviario Mexicano en el periodo 2016-2023

Como ya se mencionó en la sección 2.2, de la presente publicación, en México se cuenta con una base de datos de algunos incidentes, que la Agencia Reguladora de Transporte Ferroviaria denomina siniestros. En la Figura 3.1 se destaca el papel de dichos registros históricos en el enfoque que permite generar mapas de vulnerabilidad y de riesgo, sobre todo para aquellos lugares en donde hay reincidencia de los daños severos por alguna de las causas que pueden ser atribuibles al cambio climático.



Figura 3.1 La base de datos de incidentes históricos en la infraestructura ferroviaria

Fuente: Gradilla et al. (2024).

Para conocer la ubicación geográfica de los siniestros reportados por la ARTF durante el periodo 2016-2023, se utilizaron las placas de kilometraje más cercanas a dichos siniestros.

En la Figura 3.2 se muestran los siniestros por inundaciones referenciados geográficamente, para el periodo 2016-2023; en donde se presentan, a través de un mapa de calor, las áreas en donde se concentra el mayor número de inundaciones (con rojo más oscuro), como se puede observar, esto ocurre en los estados de Nuevo León, San Luis Potosí y en la zona del Bajío.

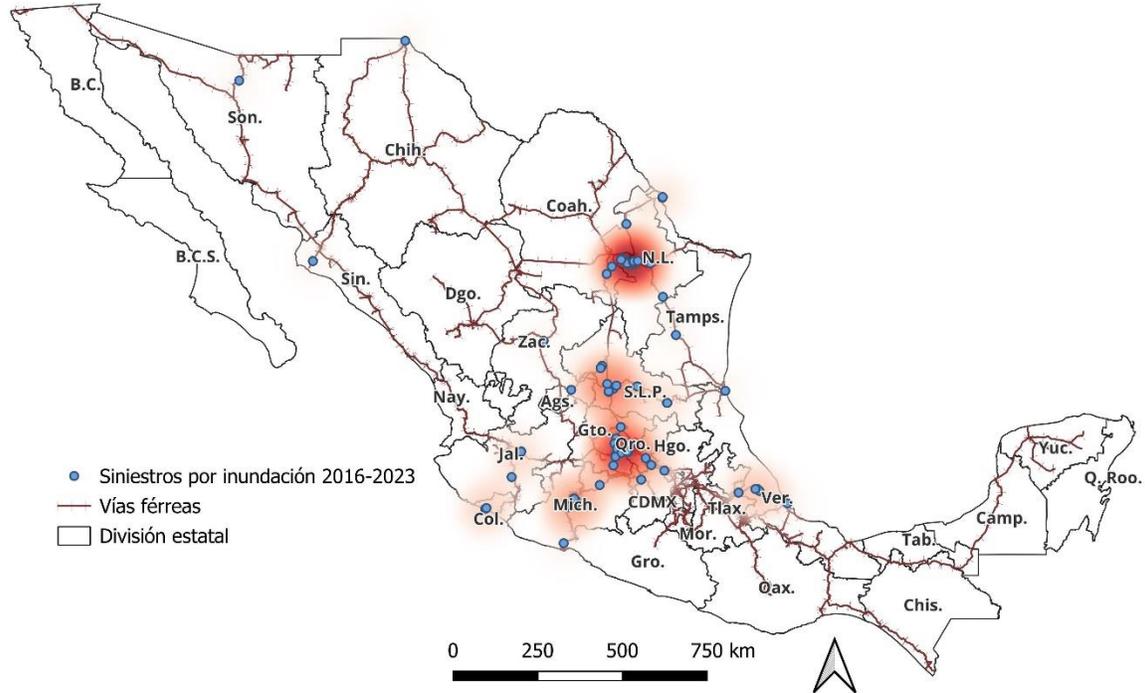


Figura 3.2 Mapa de calor de los siniestros por inundación reportados en el periodo 2016-2023

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF.

Para el caso de los siniestros por incendios, en la Figura 3.3 se muestra también un mapa de calor de la concentración de estos, siendo el estado de Yucatán en donde se concentran mayormente. A este respecto, cabe mencionar que la Comisión Nacional Forestal (CONAFOR) cuenta con una capa de información referenciada geográficamente de los riesgos de incendios para todo el país, misma que podría complementarse para tomar en cuenta los escenarios de cambio climático.

En la Figura 3.4 se muestran los siniestros por incendios registrados en el periodo 2016-2023 sobrepuestos a la capa del riesgo de incendios de la Comisión Nacional Forestal, en donde se puede observar que algunos de los incendios ocurridos en el estado de Yucatán están en la zona de alto y muy alto nivel de riesgo de incendios, también se observa que la mayoría de los siniestros por incendio que se presentaron en los estados de Michoacán, San Luis Potosí y Nuevo León, se ubicaron en zonas de alto y muy alto riesgo.

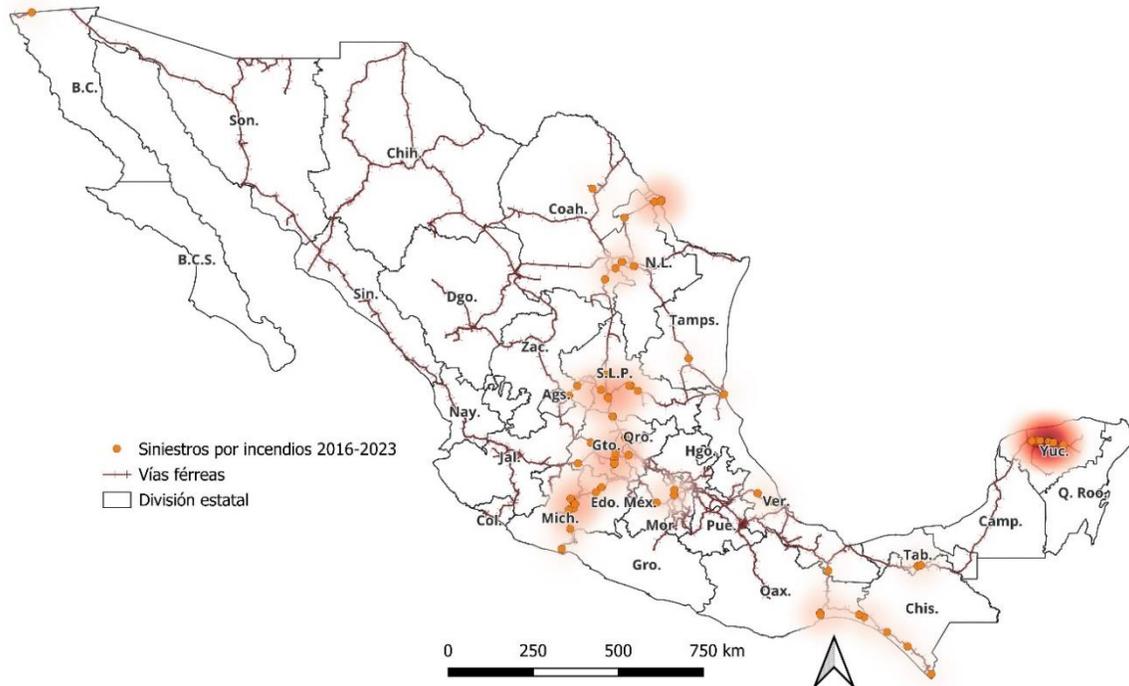


Figura 3.3 Mapa de calor de los siniestros por incendios reportados en el periodo 2016-2023

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF.

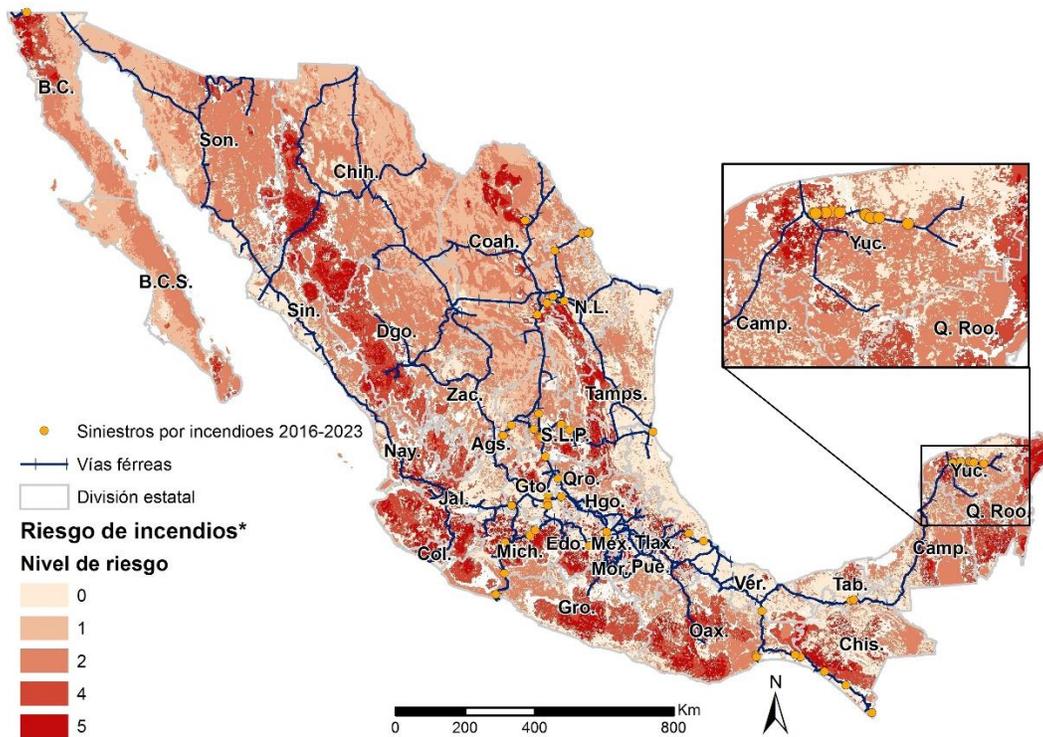


Figura 3.4 Mapa de nivel de riesgo de incendios con los siniestros por incendios reportados en el periodo 2016-2023

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y de CONAFOR*.

En la Figura 3.5 se muestra el mapa de calor para representar la mayor concentración de los siniestros catalogados como deslaves o derrumbes durante el periodo 2016-2023, en dicho mapa se puede observar una mayor concentración en los estados de Michoacán y San Luis Potosí.

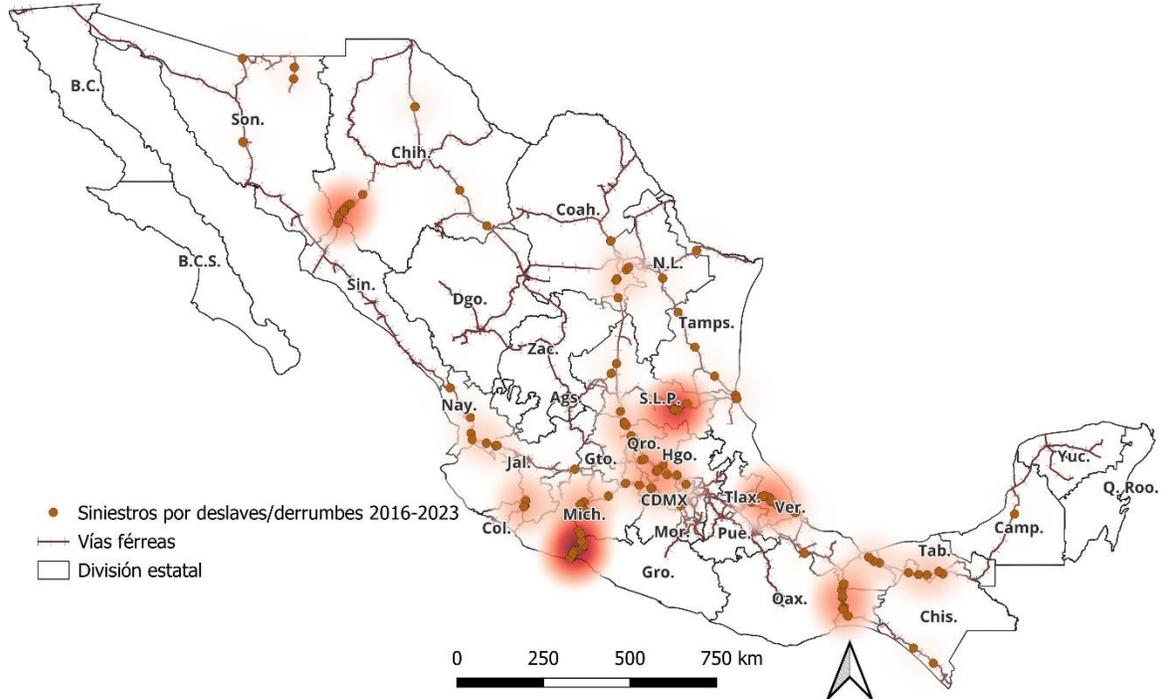


Figura 3.5 Mapa de calor de los siniestros por deslaves/derrumbes reportados en el periodo 2016-2023

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF.

En la Figura 3.6 se pueden observar los siniestros por objetos sobre la vía, que pueden deberse al desprendimiento de ramas, la caída de árboles y/o piedras u otro tipo de objetos, la mayor concentración de estos se encuentra en Michoacán y el Estado de México.

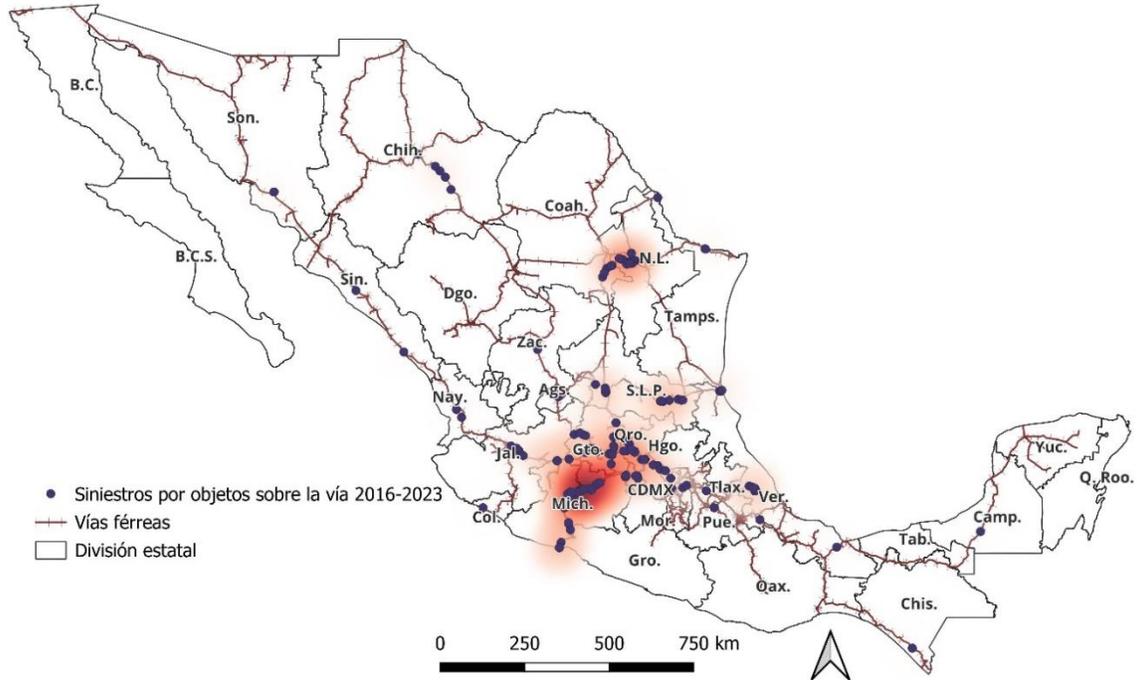


Figura 3.6 Mapa de calor de los siniestros por objetos sobre la vía reportados en el periodo 2016-2023

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF.

En cuanto a los siniestros catalogados como daños a las instalaciones, en la Figura 3.7 se muestran los 23 eventos registrados por la ARTF, siendo el Estado de México en donde se concentran la mayoría de ellos.

Como se puede observar en la Figura 3.8 los descarrilamientos se han presentado en muchos tramos de las vías férreas, con una mayor concentración en el estado de Nuevo León y el centro del país.

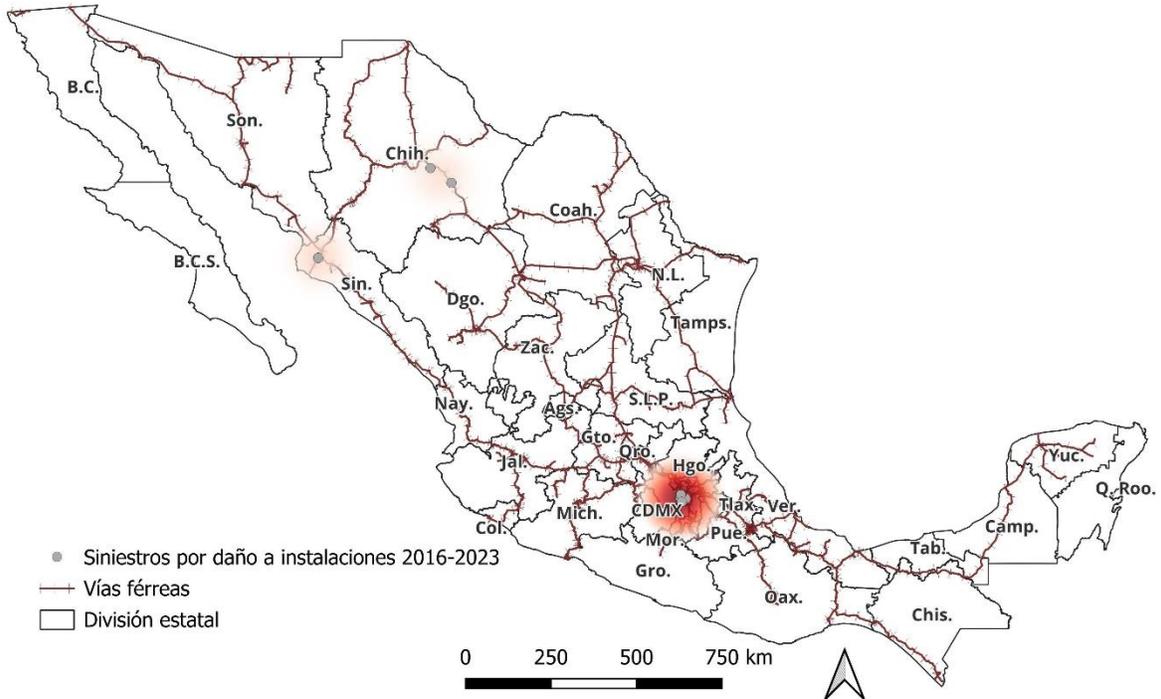


Figura 3.7 Mapa de calor de los siniestros por objetos sobre la vía reportados en el periodo 2016-2023

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF.

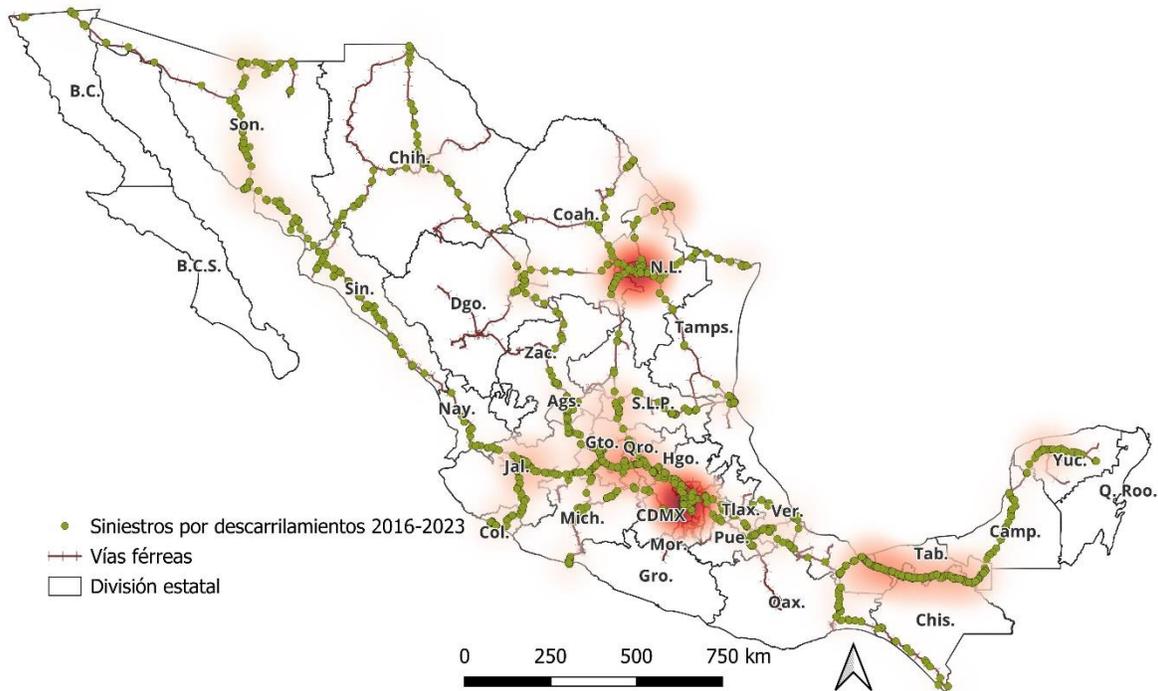


Figura 3.8 Mapa de calor de los siniestros por descarrilamientos en el periodo 2016-2023

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF.

3.2 Escenarios de cambio climático para México

De acuerdo con el informe del Grupo de Trabajo I del Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC, por sus siglas en inglés] (2021), se proyectan cinco escenarios de emisión ilustrativos que cubren un amplio rango de evolución futura de impulsores antropogénicos del cambio climático. Los escenarios se denominan SSP⁴ x-y, donde “x” se refiere a la trayectoria socioeconómica compartida e “y” al nivel aproximado de forzamiento radiactivo alcanzado en el año 2100.

Es decir, las emisiones varían entre escenarios según los supuestos socioeconómicos, los niveles de mitigación del cambio climático y los controles sobre la contaminación del aire debida a los aerosoles y precursores de ozono distintos del metano. Los resultados del siglo XXI se presentan a corto plazo (2021-2040), a mediano plazo (2041-2060) y a largo plazo (2081-2100).

En México, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) estableció como datos públicos los Escenarios de Cambio Climático para México, para las cuatro de las posibles trayectorias socioeconómicas y cuatro de los cinco niveles de forzamiento radiactivo: SSP 1-2.6, SSP 2-4.5, SSP 3-7.0 y SSP 5-8.5; para el corto plazo (2021-2040), mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100).

A continuación, se describen los cuatro escenarios:

- SSP1-2.6: es el segundo mejor escenario (después del SSP1-1.9⁵), las emisiones globales de CO₂ se reducen drásticamente, pero no tan rápido, alcanzando cero emisiones después de 2050. Se dan los mismos cambios socioeconómicos hacia la sostenibilidad que en el escenario SSP1-1.9, pero las temperaturas se estabilizan en torno a 1.8°C más altas a finales de siglo.
- SSP2-4.5: es un escenario “intermedio”. Las emisiones de CO₂ rondan los niveles actuales antes de empezar a descender a mediados de siglo, pero no llegan el cero neto hasta 2100. Los factores socioeconómicos siguen sus tendencias históricas, sin

⁴ Por las siglas en inglés de “Shared Socioeconomic Pathways”.

⁵ Este primer escenario, que no se incluye para México, es el único que cumple con el objetivo del Acuerdo de París de mantener el calentamiento global en torno a 1.5°C por encima de las temperaturas preindustriales, con un calentamiento que alcanza los 1.5°C, pero que luego desciende y se estabiliza en torno a los 1.4°C a finales de siglo.

cambios notables. El progreso hacia la sostenibilidad es lento, y el desarrollo y los ingresos crecen de manera desigual. En este escenario, las temperaturas aumentan 2.7°C a finales de siglo.

- SSP3-7.0: en este escenario, tanto las emisiones como las temperaturas aumentan de forma constante, las emisiones de CO₂ se duplican aproximadamente respecto de los niveles actuales para 2100. Los países se vuelven más competitivos entre sí, orientándose hacia la seguridad nacional y asegurando su propio suministro de alimentos. A finales de siglo, la temperatura media aumentará 3.6°C.
- SSP5-8.5: este es un escenario que representa un futuro que debe evitarse a toda costa. Los niveles actuales de emisiones de CO₂ se duplican aproximadamente en 2050. La economía mundial crece rápidamente, pero se alimenta de la explotación de los combustibles fósiles y de estilos de vida que consumen mucha energía. Para el año 2100, la temperatura media mundial ha subido 4.4°C.

En el corto plazo (2021-2040), en los escenarios de emisiones de CO₂ bajas SSP1-2.6, emisiones medias SSP2-4.5 y emisiones altas SSP3-7.0, es muy probable que la temperatura global promedio de la superficie aumente entre 1.2°C y 1.8°C, en comparación con 1850-1900, y entre 1.3°C y 1.9°C en el escenario de emisiones muy altas SSP5-8.5.

Con un calentamiento global de 1.5°C, se prevé que las precipitaciones intensas y las inundaciones asociadas se intensifiquen y sean más frecuentes en la mayoría de las regiones de África y Asia, América del Norte y Europa. Asimismo, también se prevé que las sequías agrícolas y ecológicas sean más frecuentes y/o graves en algunas regiones de todos los continentes, excepto en Asia, y se espera un aumento de las sequías meteorológicas en algunas regiones.

3.2.1 Precipitación acumulada anual

A continuación, se presentan los escenarios de cambio climático para la precipitación acumulada anual, en milímetros, para México; es decir, para los cuatro escenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, para el corto plazo (2021-2040), mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100).

3.2.1.1 Precipitación acumulada anual en SSP1-2.6

Como se puede observar en la Figura 3.11, en el largo plazo se estima una menor precipitación en algunas zonas del país, en entidades federativas como Michoacán en el Centro del país, así como Oaxaca, Chiapas,

Campeche y Quintana Roo, en el sureste, en comparación con el corto y mediano plazo (Figuras 3.9 y 3.10, respectivamente).

También cabe destacar que, en el largo plazo se estima una precipitación acumulada anual máxima para algunas zonas del sureste del País de 4073 milímetros (ver Figura 3.11), en comparación con los 4100 milímetros en el mediano plazo (Figura 3.10) y los 4150 milímetros en el corto plazo (Figura 3.9). Es decir, en el largo plazo se estima que se tenga hasta 77 milímetros menos de lluvia anual en los estados como Oaxaca y Chiapas.

Aunque en el largo plazo se espere una menor cantidad de lluvia anual es importante complementar los análisis con las Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (Curvas IDF), que son una relación matemática entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa, ya que podrían presentarse lluvias intensas de corta duración (ver posibles impactos en la sección 1.2.3) o lluvias moderadas de larga duración que afecten en gran medida a la infraestructura ferroviaria.

Incluso, una menor cantidad de lluvia podría llevar a periodos de sequía, que puede provocar una pérdida de estabilidad para las capas de sub-balasto y balasto, que conllevan a una desnivelación de durmientes y de los rieles (ver posibles impactos en la sección 1.2.4).

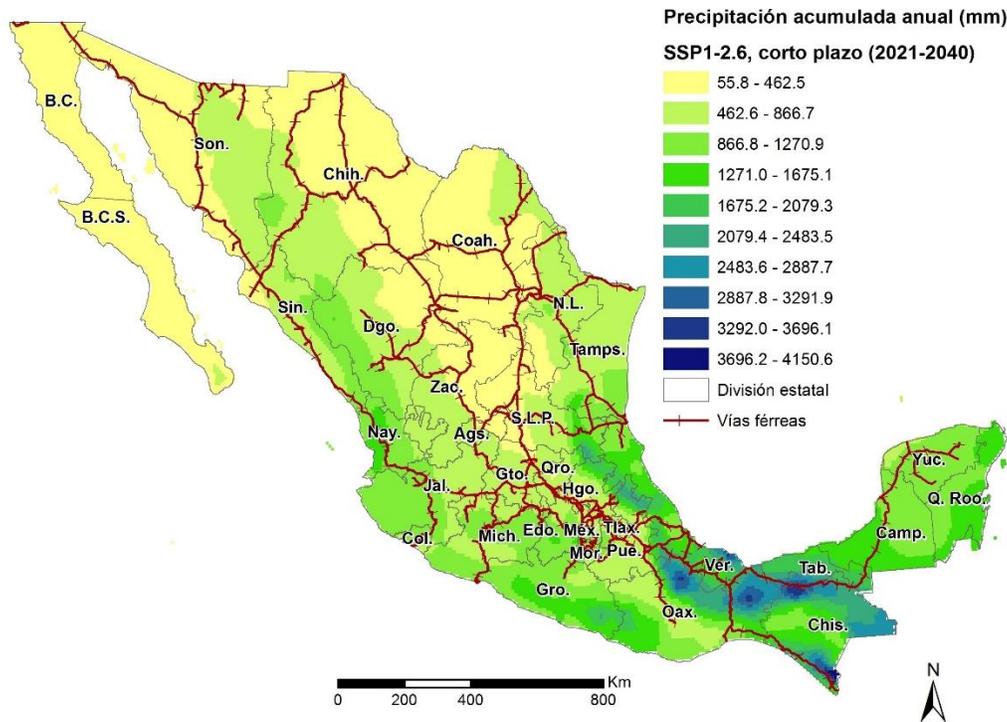


Figura 3.9 Precipitación acumulada anual estimada, escenario SSP1-2.6 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

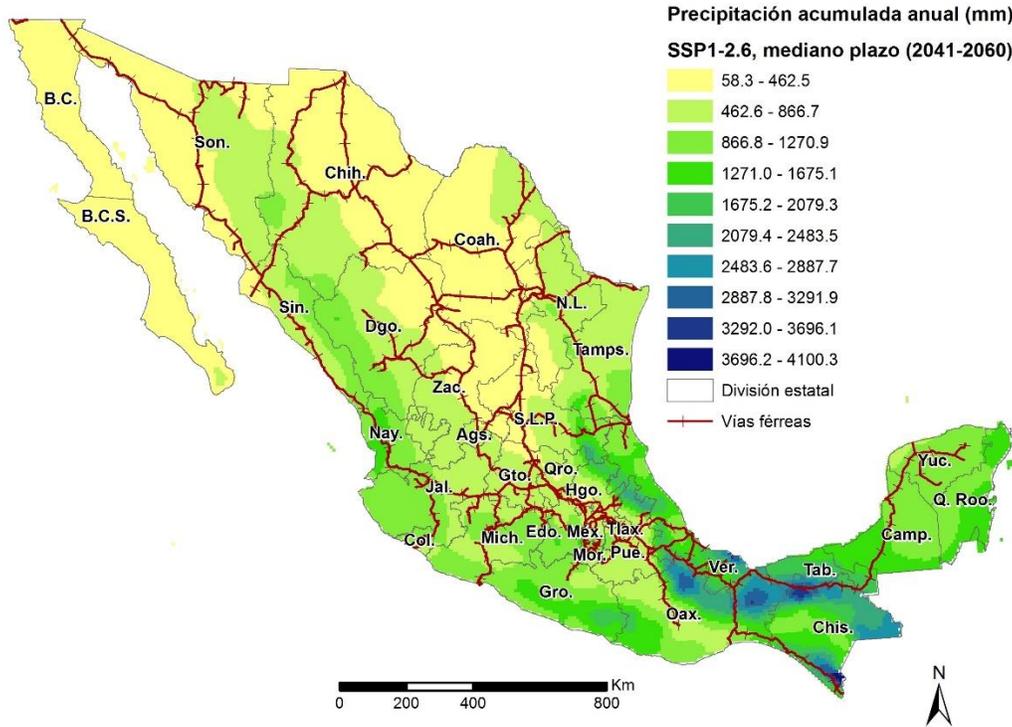


Figura 3.10 Precipitación acumulada anual, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

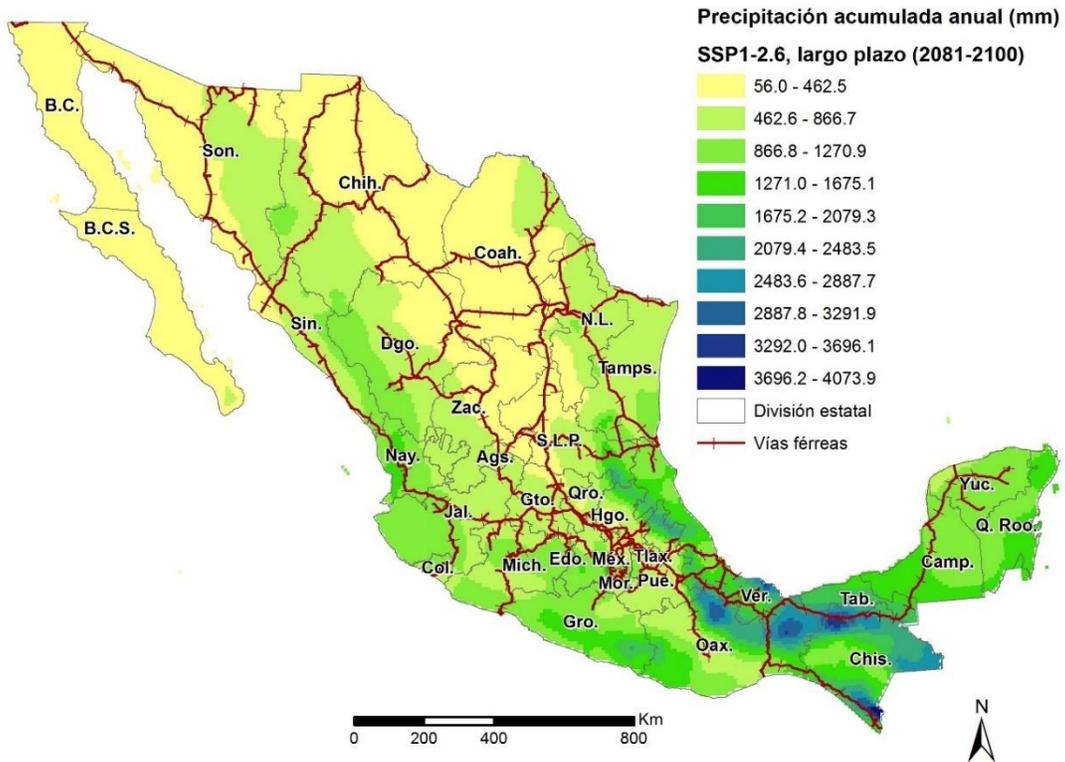


Figura 3.11 Precipitación acumulada anual, escenario SSP1-2.6 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.1.2 Precipitación acumulada anual en SSP2-4.5

Como se puede observar en la Figura 3.14, para el escenario SSP2-4.5, en el largo plazo se estima una menor precipitación acumulada en entidades federativas como Sonora, Sinaloa, Durango, Nayarit y Jalisco, provocando un mayor índice de aridez en esa zona, así como en Oaxaca, Chiapas, Campeche y Quintana Roo, en el sureste, en comparación con el mediano plazo (Figura 3.13).

También cabe destacar que, en el largo plazo, se estima una precipitación acumulada anual máxima para algunas zonas del sureste de México de 4018 milímetros (ver Figura 3.14), en comparación con los 4095 milímetros en el mediano plazo (ver Figura 3.13) y los 4121 milímetros en el corto plazo (ver Figura 3.12). Es decir, en el largo plazo se estima que se tenga hasta 103 milímetros menos de lluvia anual en los estados como Oaxaca y Chiapas, en comparación con el corto plazo.

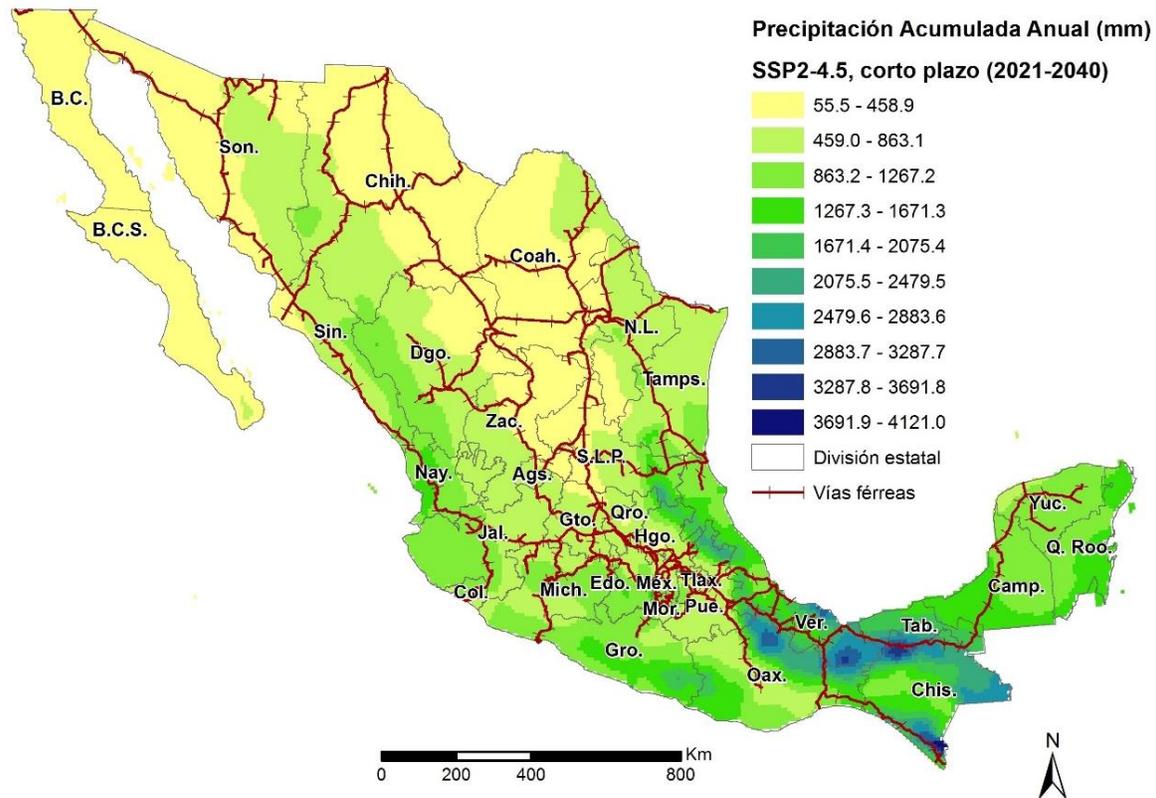


Figura 3.12 Precipitación acumulada anual estimada, escenario SSP2-4.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

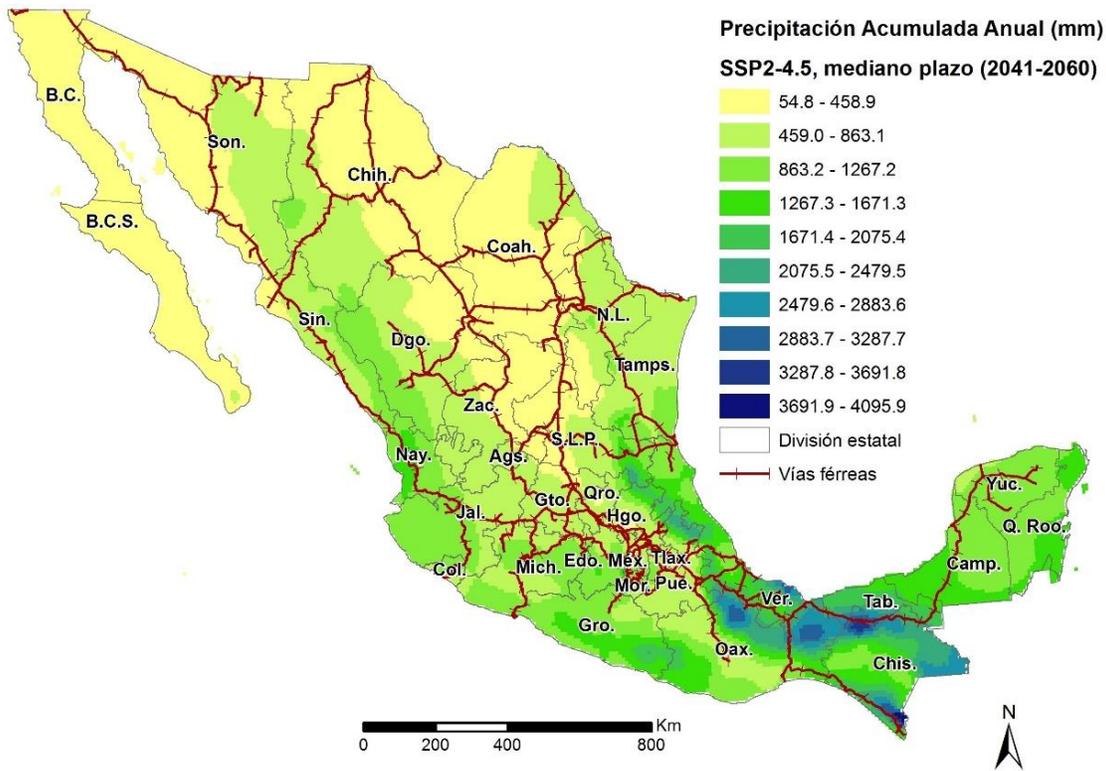


Figura 3.13 Precipitación acumulada anual, escenario SSP2-4.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

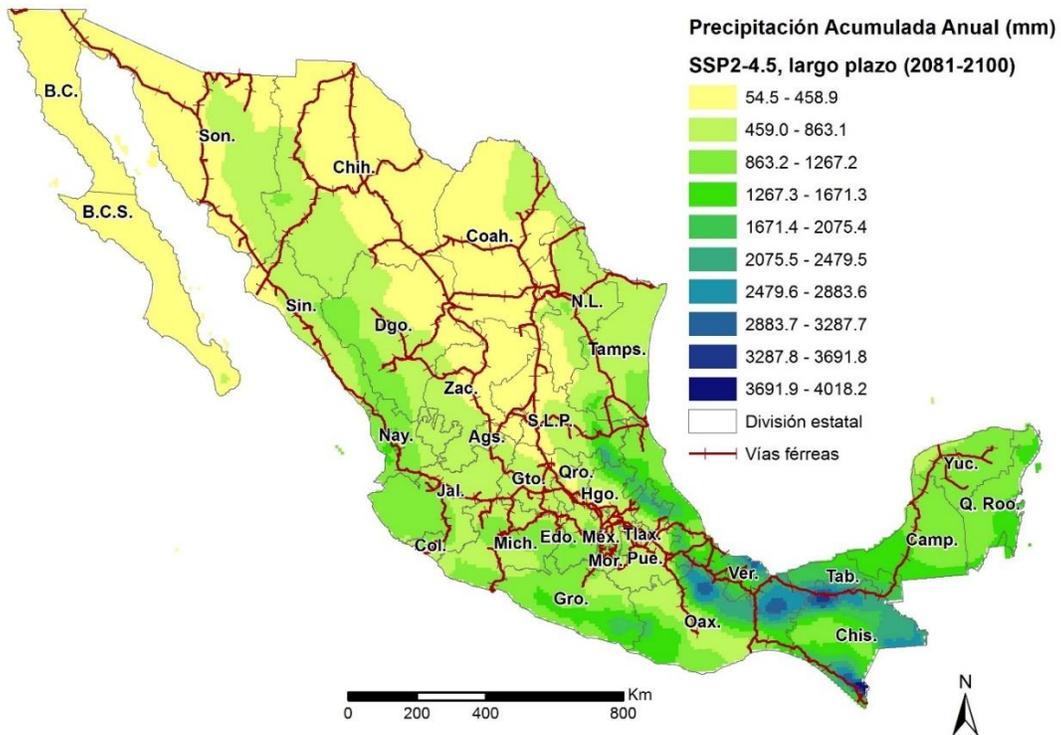


Figura 3.14 Precipitación acumulada anual, escenario SSP2-4.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.1.3 Precipitación acumulada anual en SSP3-7.0

Como se puede observar en la Figura 3.17, para el escenario SSP3-7.0, en el largo plazo se estima una menor precipitación acumulada anual en entidades federativas como Sonora, Sinaloa, Durango, Nayarit y Jalisco, provocando un mayor índice de aridez en esa zona, así como en Tamaulipas, Veracruz, Oaxaca, Chiapas, Campeche y Quintana Roo, en comparación con el corto y mediano plazo (Figura 3.15 y 3.16, respectivamente).

También se puede observar que, en el largo plazo se estima una precipitación acumulada anual máxima para algunas zonas del sureste del País de 3647 milímetros (ver Figura 3.17), en comparación con los 3953 milímetros en el mediano plazo (ver Figura 3.16) y los 4020 milímetros en el corto plazo (ver Figura 3.15); es decir, 373 milímetros menos en el periodo 2081-2100 en comparación con el corto plazo (periodo 2021-2040).

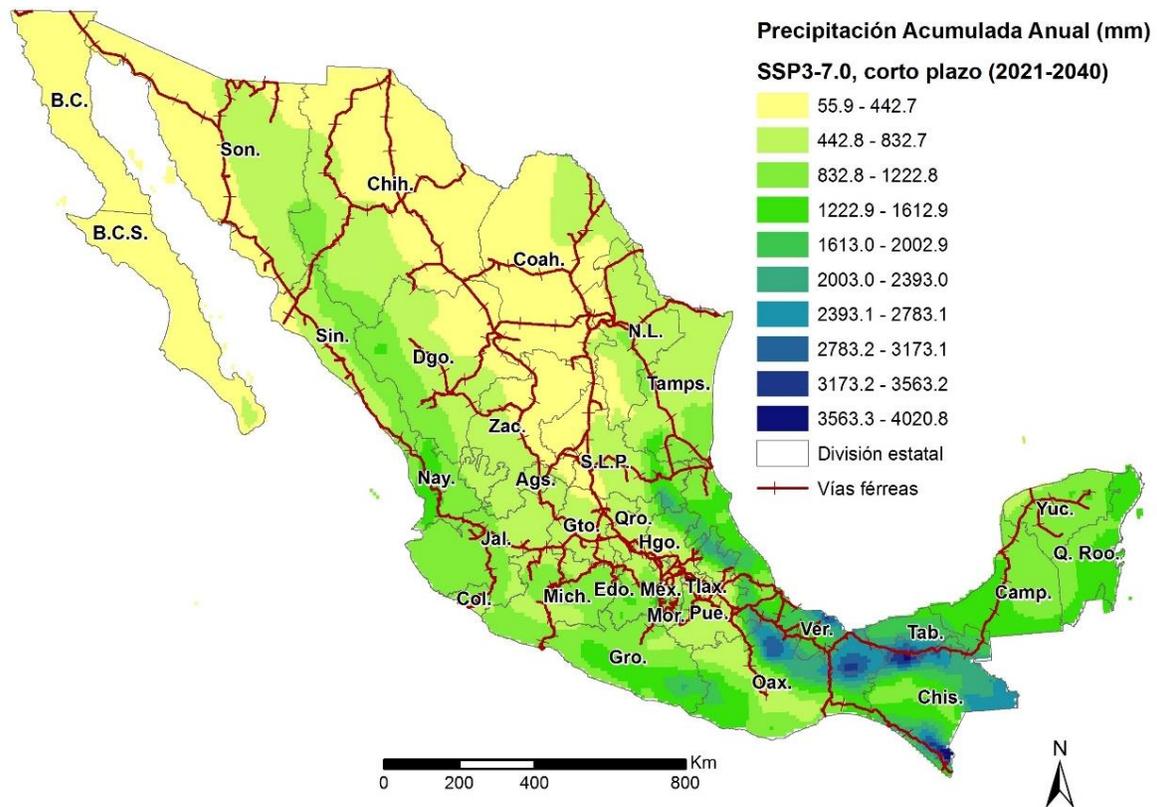


Figura 3.15 Precipitación acumulada anual estimada, escenario SSP3-7.0 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

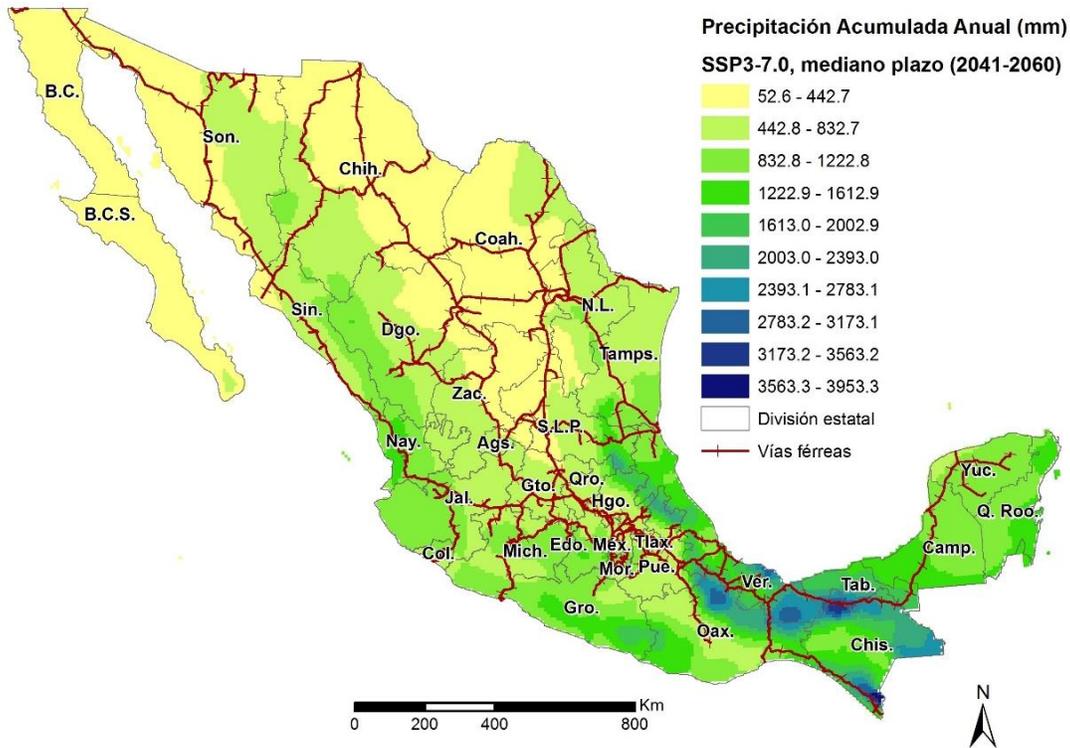


Figura 3.16 Precipitación acumulada anual, escenario SSP3-7.0 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

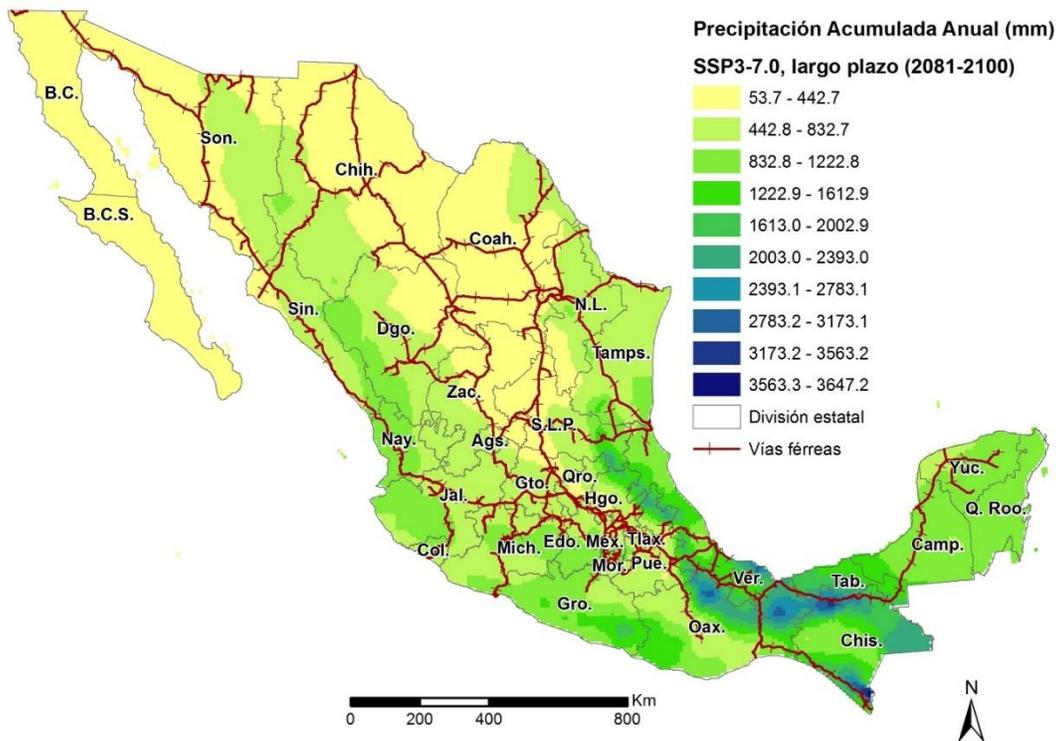


Figura 3.17 Precipitación acumulada anual, escenario SSP3-7.0 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.1.4 Precipitación acumulada anual en SSP5-8.5

Como se puede observar en la Figura 3.20, para el escenario SSP5-8.5, en el largo plazo (2081-2100) se estima una menor precipitación acumulada en entidades federativas como Coahuila, Sonora, Sinaloa, Durango, Nayarit y Jalisco, provocando un mayor índice de aridez para dichas entidades, así como en Tamaulipas, Veracruz, Oaxaca, Chiapas, Campeche y Quintana Roo, la diferencia es más marcada con respecto al mediano plazo (Figura 3.19).

También se puede observar que, en el largo plazo se estima una precipitación acumulada anual máxima para algunas zonas del sureste de 3585 milímetros (ver Figura 3.20), en comparación con los 3827 milímetros en el mediano plazo (ver Figura 3.19) y los 4083 milímetros en el corto plazo (ver Figura 3.18); es decir, 498 milímetros menos en el periodo 2081-2100 en comparación con el corto plazo (periodo 2021-2040).

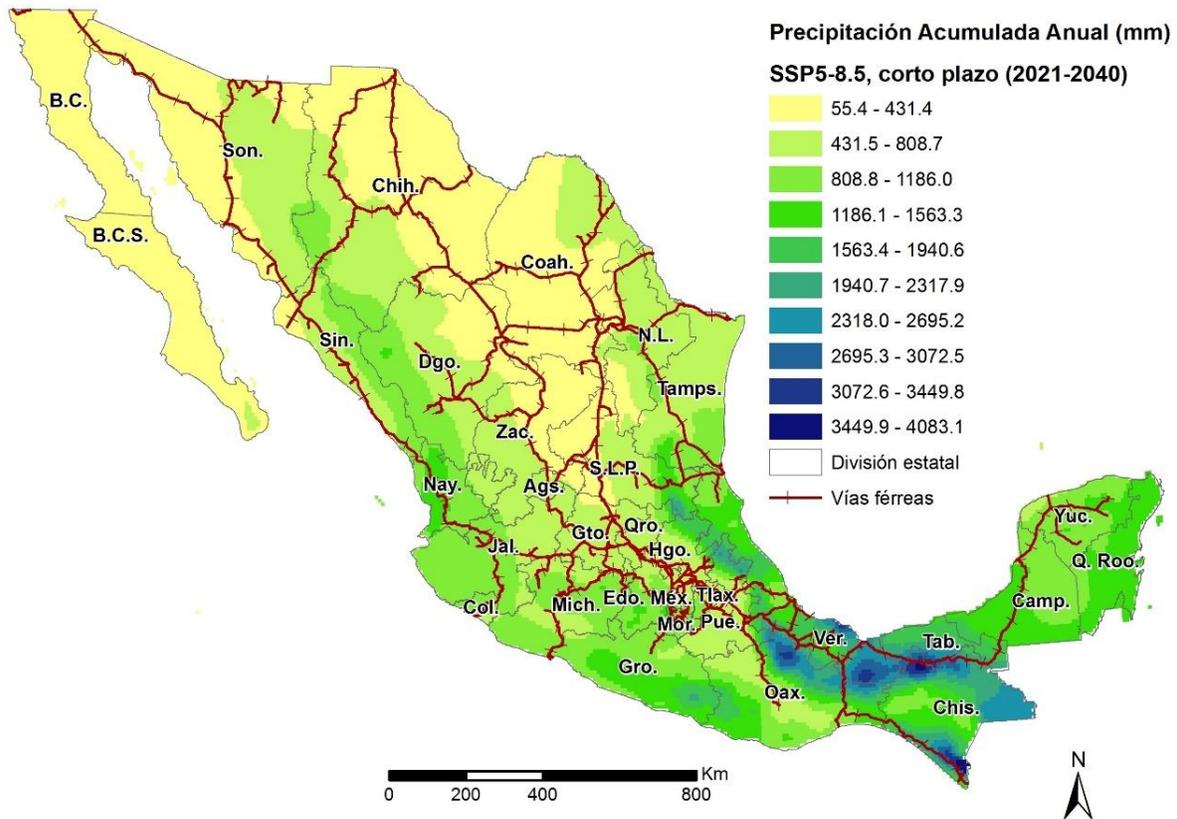


Figura 3.18 Precipitación acumulada anual estimada, escenario SSP5-8.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

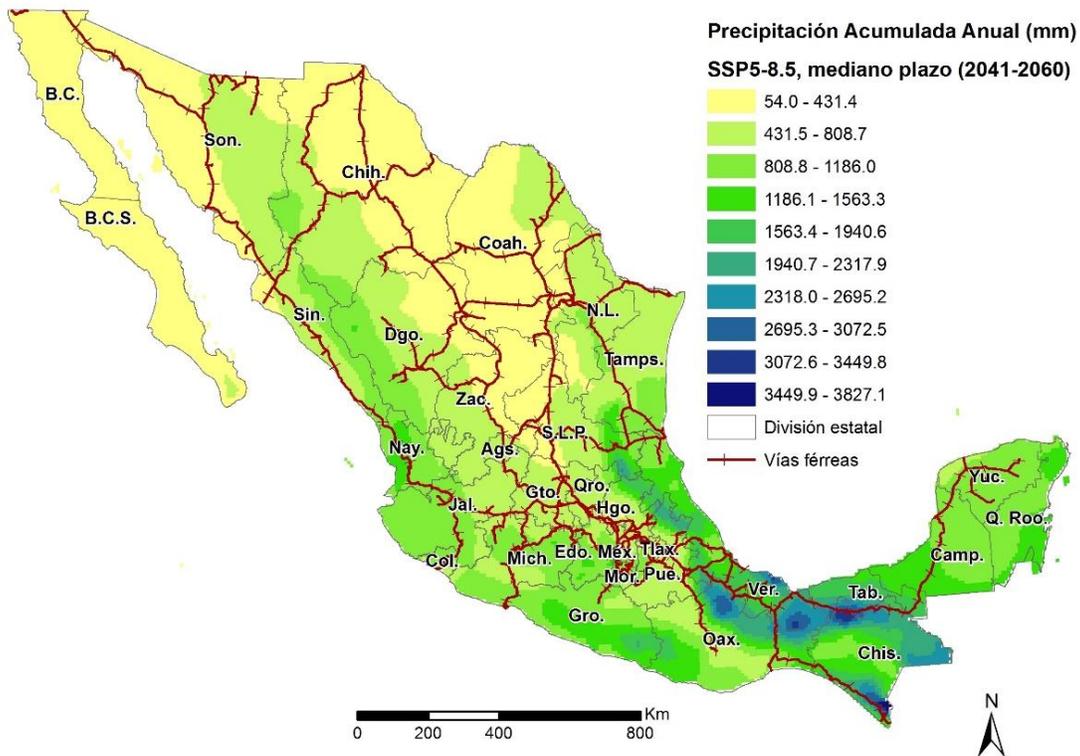


Figura 3.19 Precipitación acumulada anual, escenario SSP5-8.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

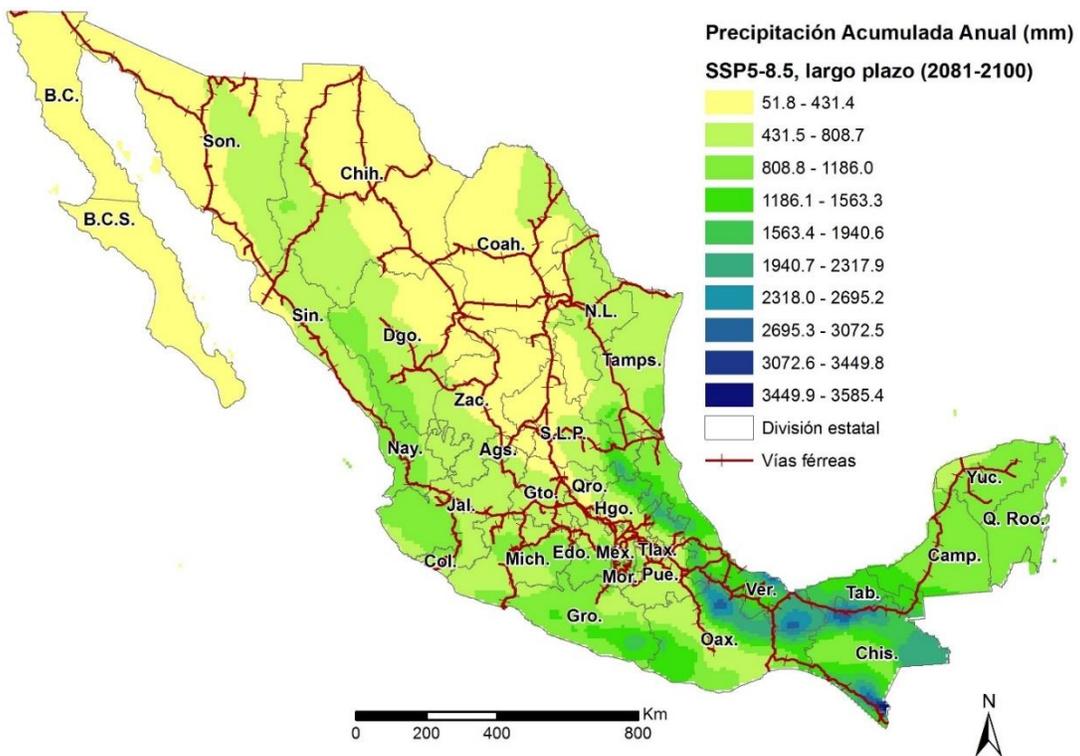


Figura 3.20 Precipitación acumulada anual, escenario SSP5-8.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.2 Precipitación promedio anual

En esta sección se presentan los escenarios de cambio climático para la precipitación promedio anual, en milímetros, para México; es decir, para los cuatro escenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, para el corto plazo (2021-2040), mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100).

Como ya se mencionó en la sección 3.2.1, es importante complementar esta primera aproximación geoespacial con las Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia, ya que podrían presentarse lluvias intensas de corta duración o lluvias moderadas de larga duración que afecten a la infraestructura ferroviaria de manera diferente.

3.2.2.1 Precipitación promedio anual en SSP1-2.6

Como se puede observar en la Figura 3.23, para el escenario SSP1-2.6, en el largo plazo se estima una menor precipitación promedio anual en entidades federativas de la región sureste, como Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Tabasco, Campeche y Quintana Roo, en comparación con el mediano plazo (Figura 3.22)

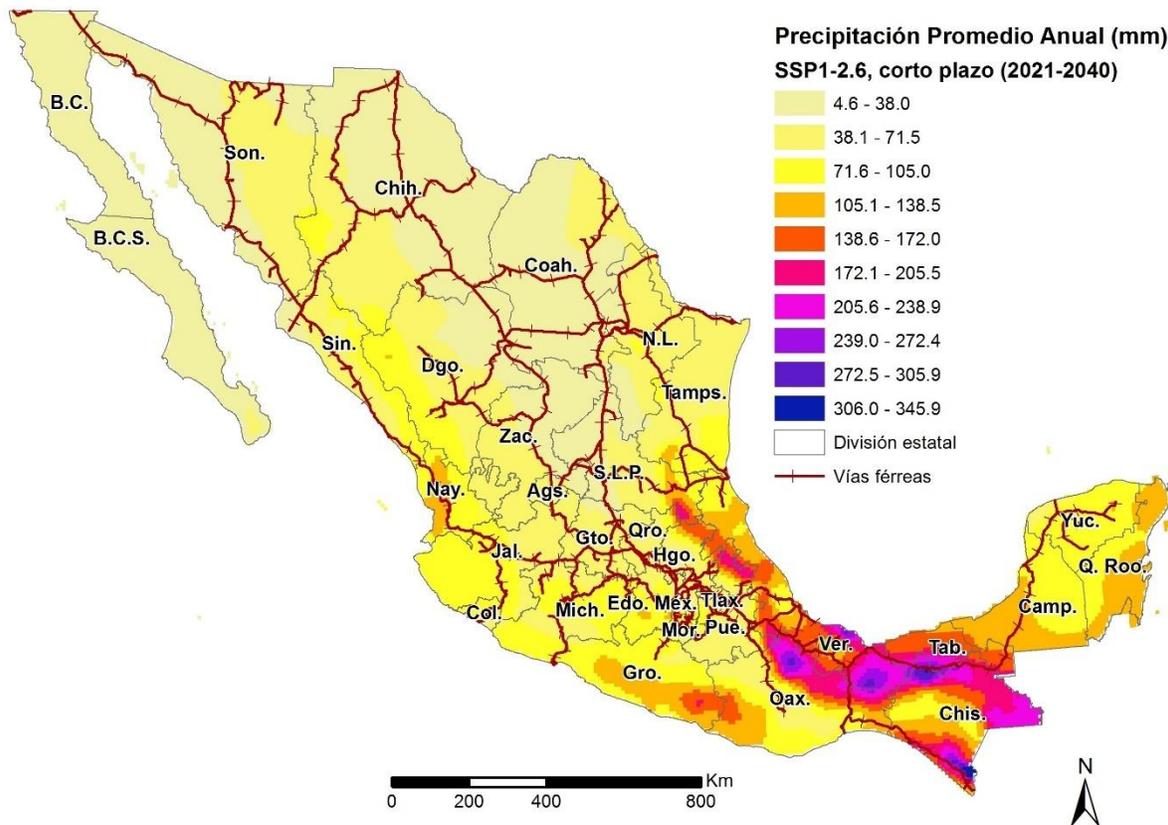


Figura 3.21 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP1-2.6 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

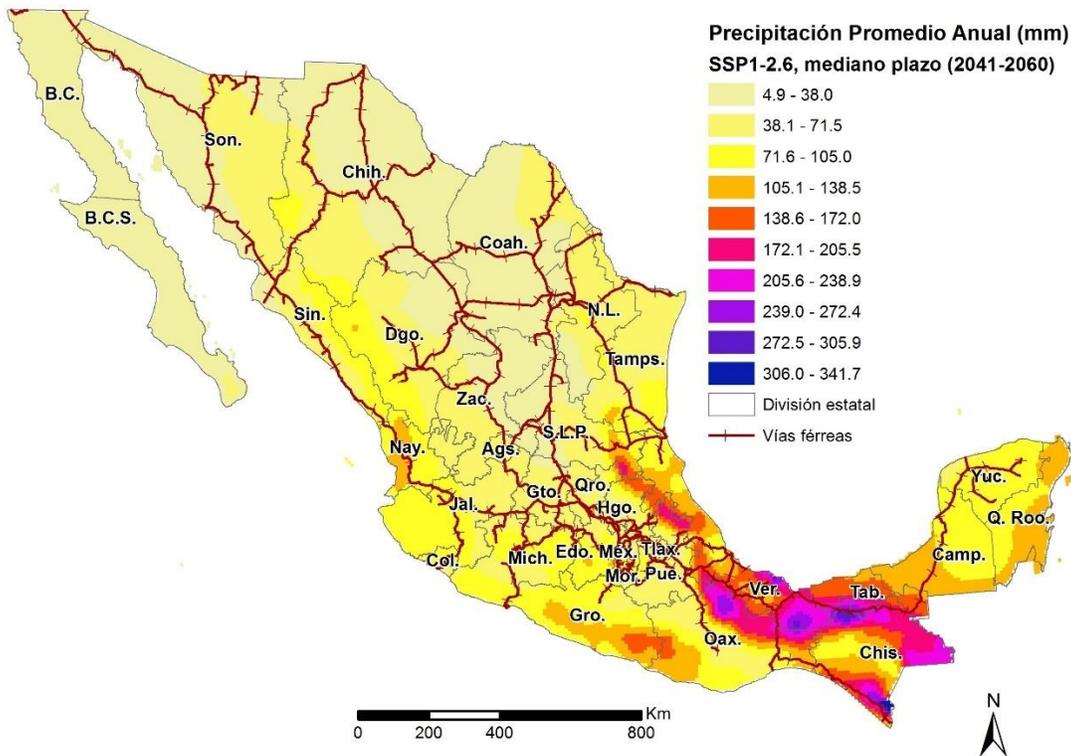


Figura 3.22 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

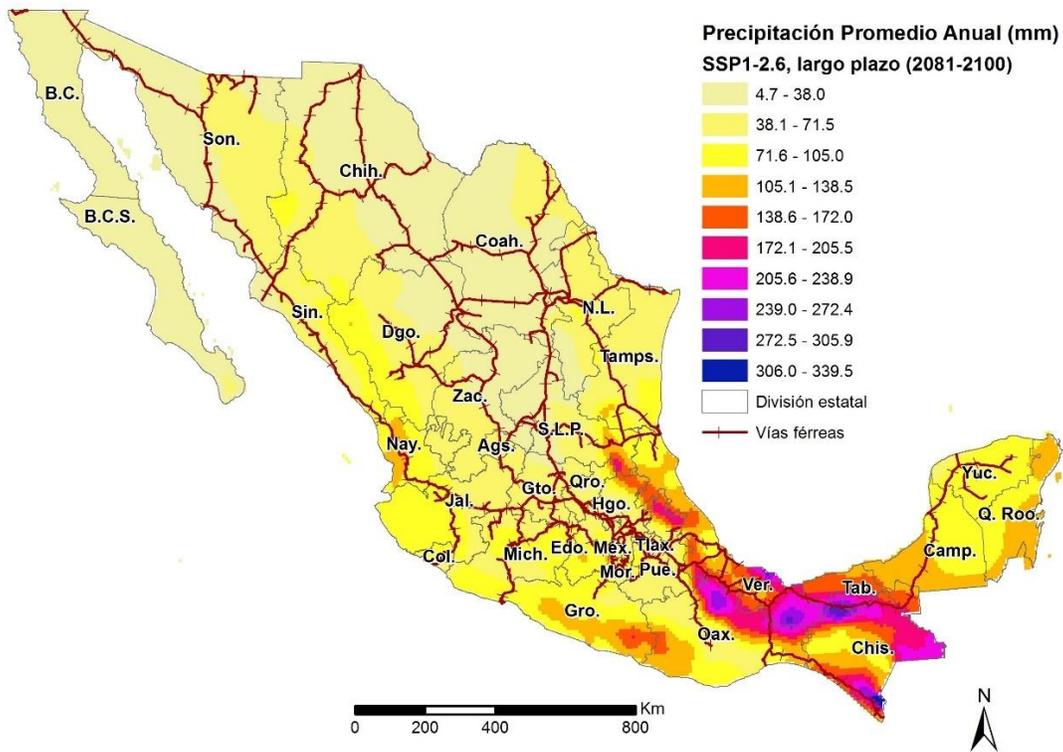


Figura 3.23 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP1-2.6 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.2.2 Precipitación promedio anual en SSP2-4.5

Como se puede observar en la Figura 3.26, para el escenario SSP2-4.5, en el estado de Nayarit se puede apreciar una diferencia más marcada con respecto al escenario SSP1-2.6, ya que en el largo plazo (2081-2100) se estima una menor precipitación promedio anual, la misma tendencia sigue para el sureste de México, en estados como Guerrero, Oaxaca, Veracruz, Tabasco, Campeche y Quintana Roo, en comparación con el corto (Figura 3.24) y mediano plazo (Figura 3.25); así como en el norte del estado de Hidalgo.

Asimismo, el límite superior de la estimación de la precipitación promedio anual disminuyó a 343.4 mm en el corto plazo (2021-2040), a 341.3 mm en el mediano plazo (2041-2060) y 334.8 mm en el largo plazo (2081-2100), siendo el sur del estado de Veracruz la zona en donde se estima que se presentaría en mayor medida dicha disminución.

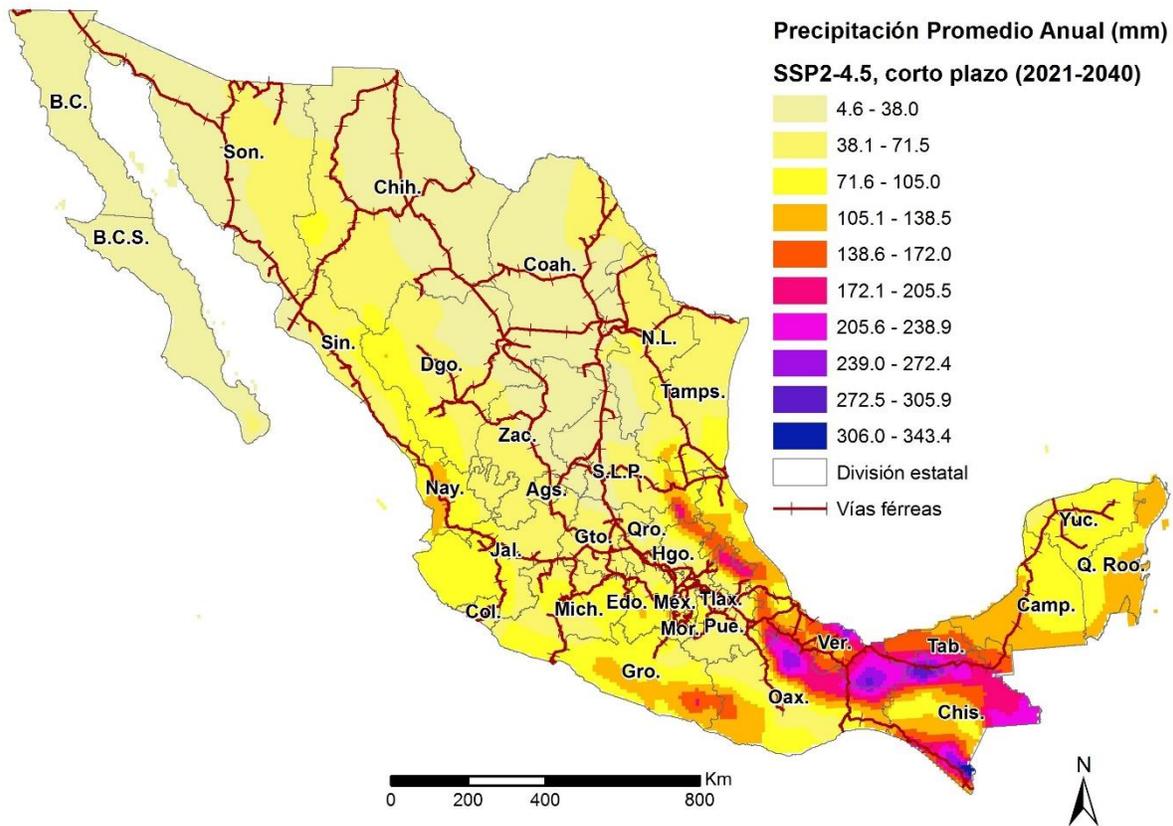


Figura 3.24 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP2-4.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

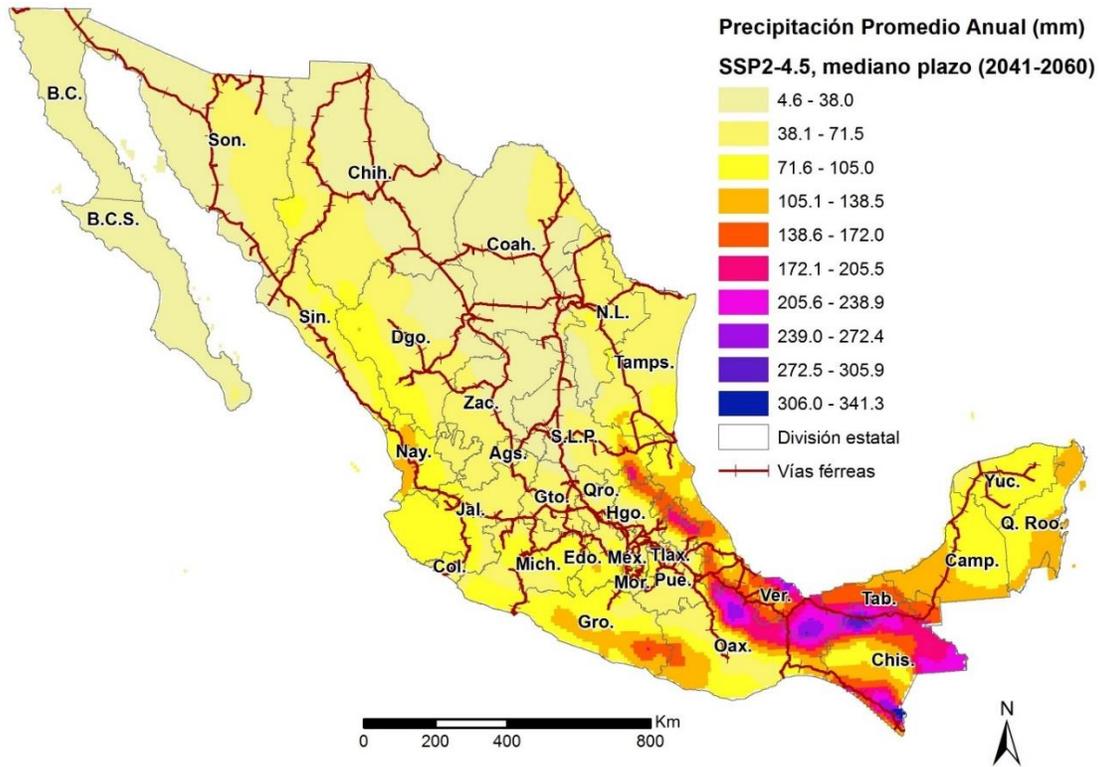


Figura 3.25 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP2-4.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

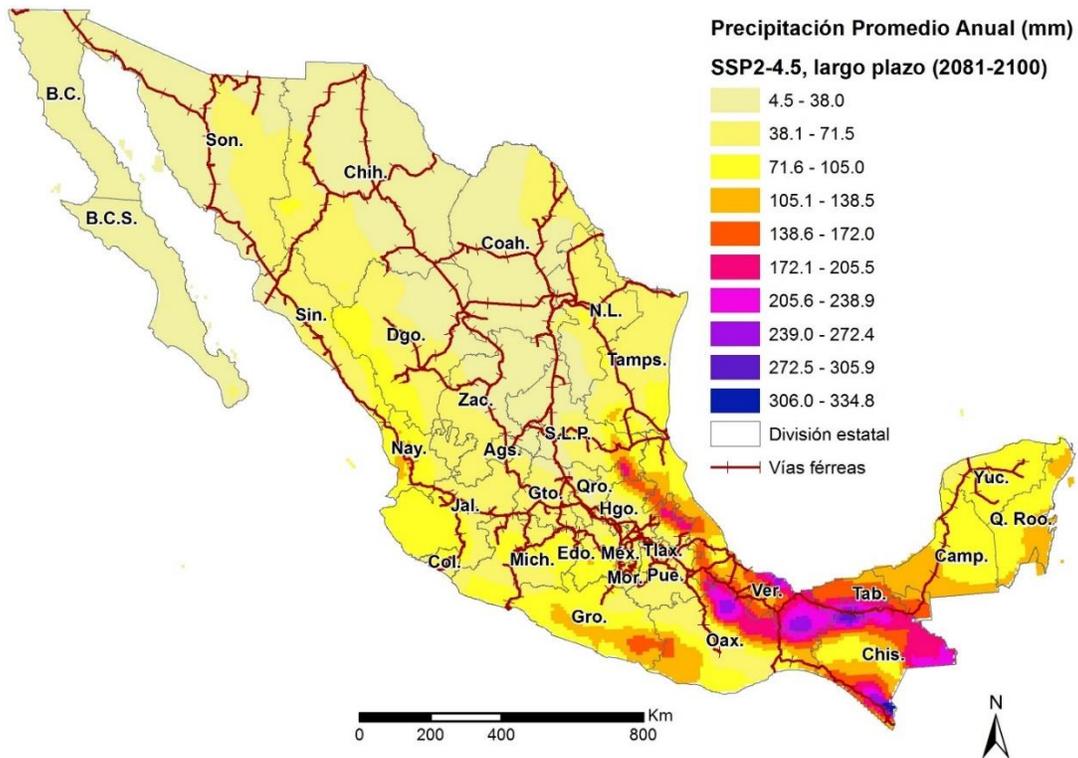


Figura 3.26 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP2-4.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.2.3 Precipitación promedio anual en SSP3-7.0

Como se puede observar en la Figura 3.29, para el escenario SSP3-7.0, en el estado de Nayarit, Campeche y Quintana Roo se puede apreciar una diferencia más marcada con respecto al escenario SSP2-4.5, ya que en el largo plazo (2081-2100) se estima una menor precipitación promedio anual, la misma tendencia se presenta para el sureste de México, sobre todo en el sur del estado de Veracruz y el norte del estado de Oaxaca, en comparación con el corto (Figura 3.27) y mediano plazo (Figura 3.28).

Asimismo, el límite superior de la estimación de la precipitación promedio anual disminuyó a 335.1 mm en el corto plazo (2021-2040), a 329.4 mm en el mediano plazo (2041-2060) y 303.9 mm en el largo plazo (2081-2100), siendo el sur del estado de Veracruz y el norte del estado de Chiapas las zonas en donde se estima que se presentaría en mayor medida dicha disminución.

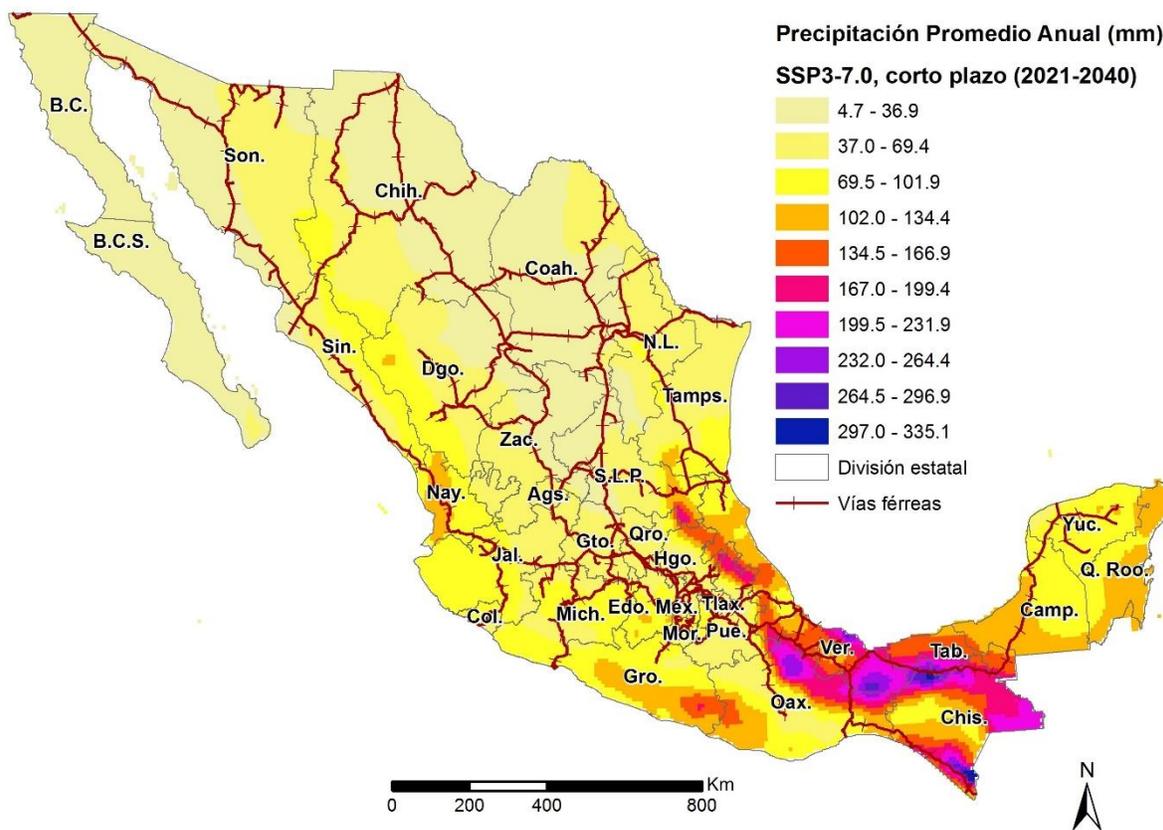


Figura 3.27 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP3-7.0 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

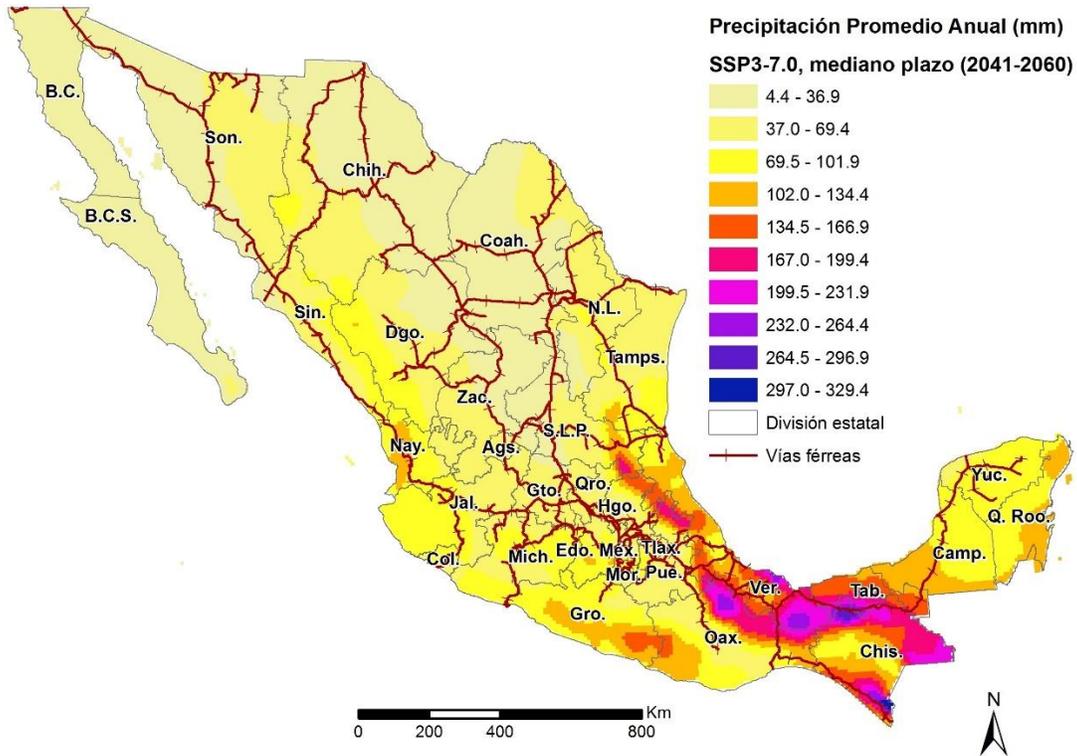


Figura 3.28 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP3-7.0 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

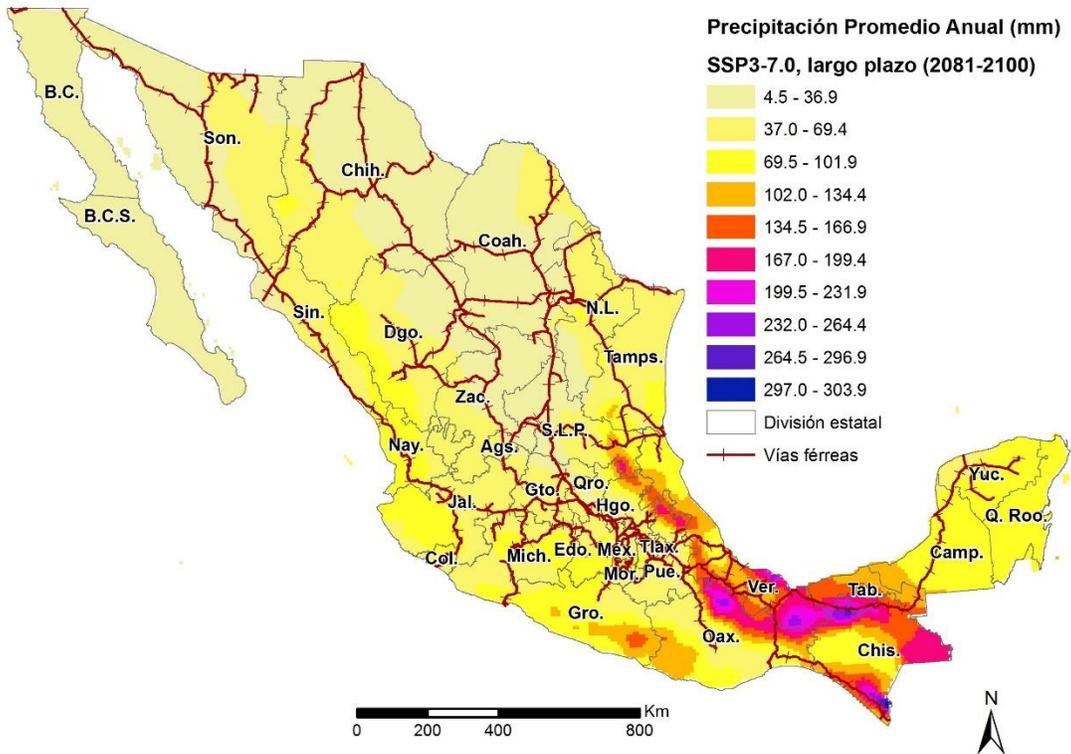


Figura 3.29 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP3-7.0 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.2.4 Precipitación promedio anual en SSP5-8.5

En la Figura 3.32, para el escenario SSP5-8.5, en el estado de Nayarit, Guerrero, Campeche y Quintana Roo se puede apreciar una diferencia más marcada con respecto al escenario SSP3-7.0, ya que en el largo plazo (2081-2100) se estima una menor precipitación promedio anual, la misma tendencia sigue para el sureste de México, sobre todo en el sur del estado de Veracruz, el norte del estado de Oaxaca y Tabasco, en comparación con el corto (Figura 3.30) y mediano plazo (Figura 3.31).

Asimismo, el límite superior de la estimación de la precipitación promedio anual disminuyó a 340.3 mm en el corto plazo (2021-2040), a 318.9 mm en el mediano plazo (2041-2060) y 298.8 mm en el largo plazo (2081-2100), siendo el sur del estado de Veracruz y el norte de los estados de Oaxaca y Chiapas las zonas en donde se estima que se presente de manera más drástica dicha disminución.

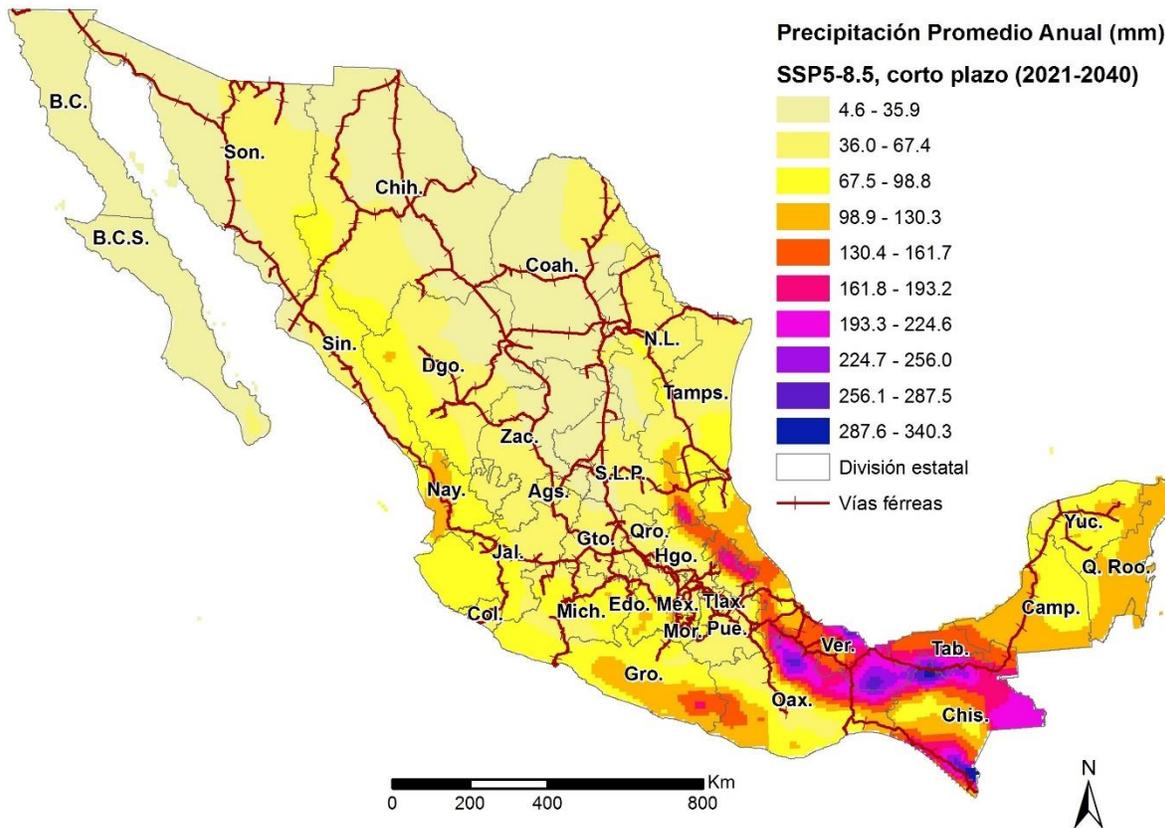


Figura 3.30 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP5-8.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

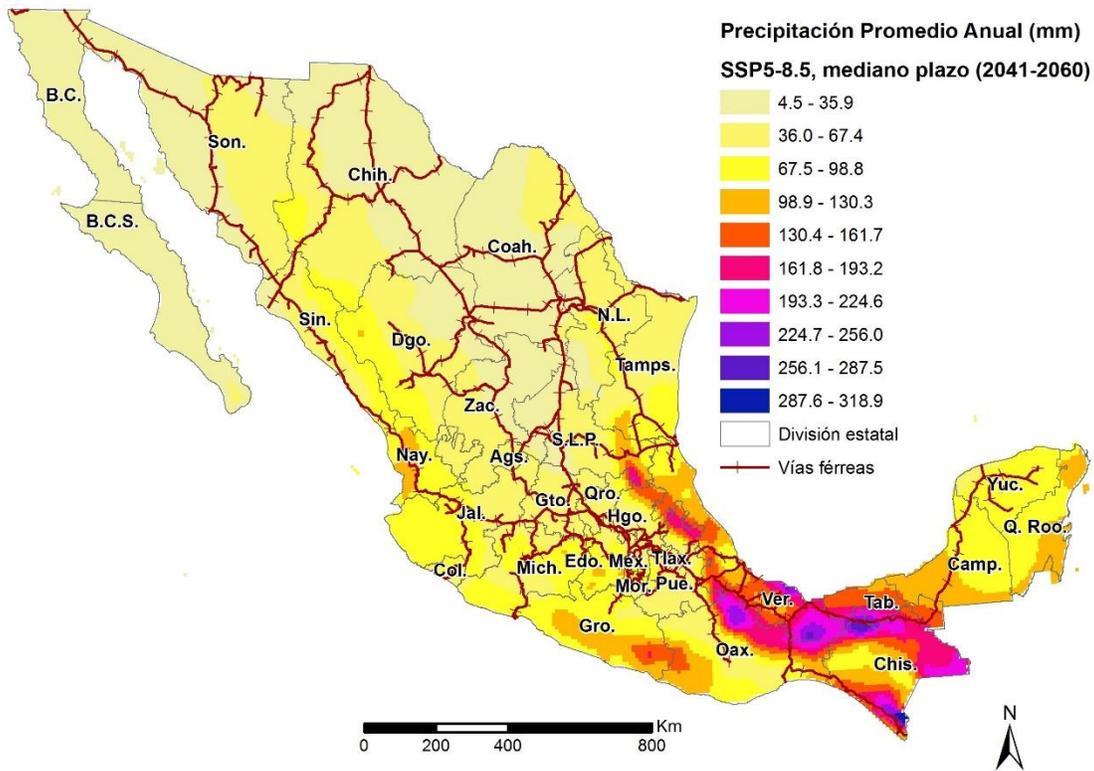


Figura 3.31 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP5-8.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

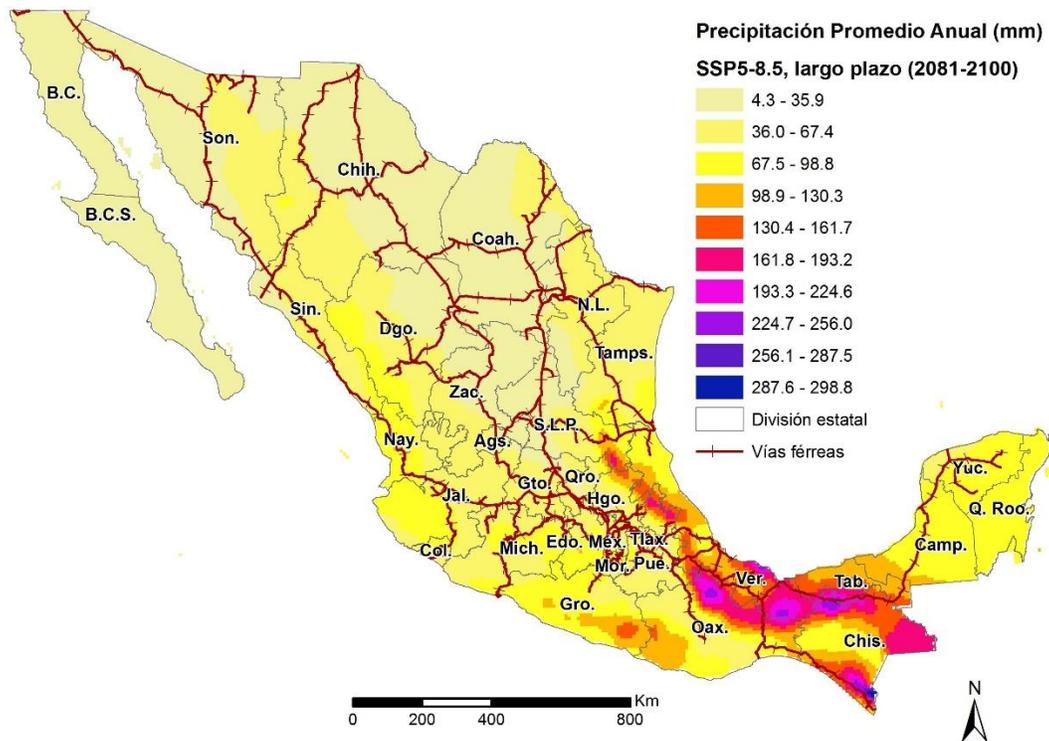


Figura 3.32 Precipitación promedio anual estimada, escenario SSP5-8.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.3 Temperatura máxima promedio mensual

En esta sección se presentan los escenarios de cambio climático para la temperatura máxima promedio mensual, en grados centígrados (°C), para México; es decir, para los cuatro escenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, para el corto plazo (2021-2040), mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100).

Esta información podría ser de utilidad para conocer aquellos puntos en donde las altas temperaturas promedio en algunos meses del año podrían ocasionar daños en la infraestructura ferroviaria, como el pandeo de los rieles y/o problemas de desalineación, esto debido a que el acero de los rieles se expande con las altas temperaturas (ver posibles impactos de las altas temperaturas en la sección 1.2.1).

3.2.3.1 Temperatura máxima promedio mensual en SSP1-2.6

En la Figura 3.33 se muestra la temperatura máxima promedio estimada para el mes de mayo, para el corto plazo (2021-2040) en el escenario SSP1-2.6, en las Figuras 3.34 y 3.35 se muestra la estimación para el mediano y largo plazo, respectivamente; en donde se puede observar que la temperatura máxima promedio aumenta un poco en el norte y el sureste de México.

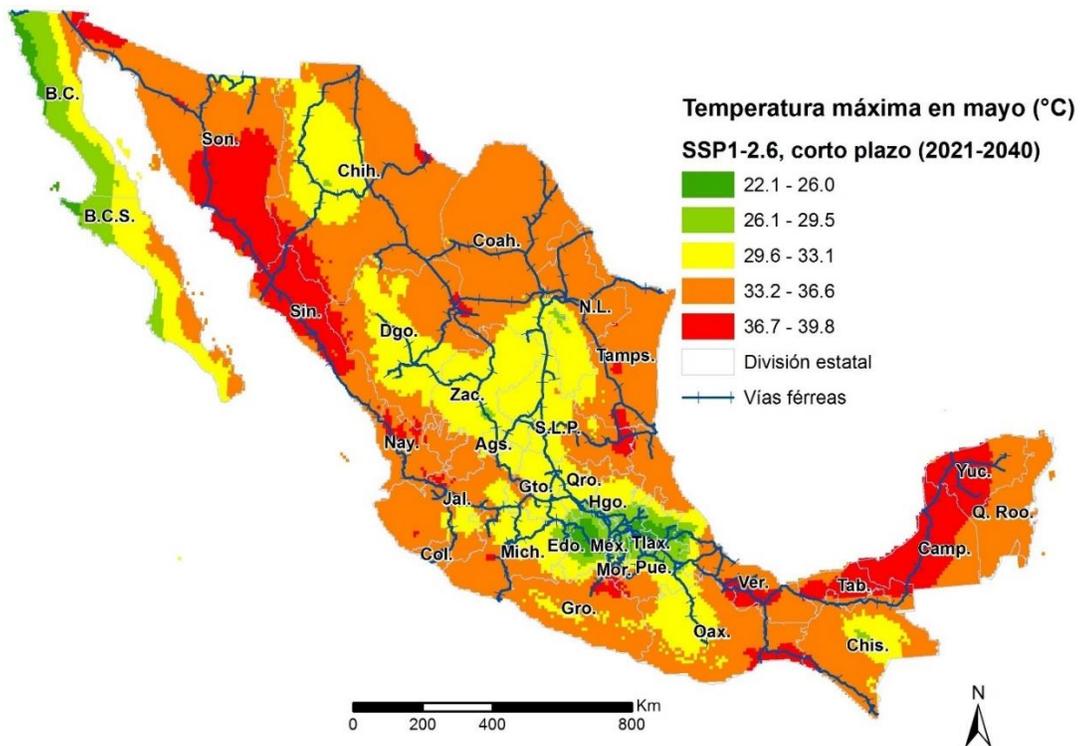


Figura 3.33 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP1-2.6 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

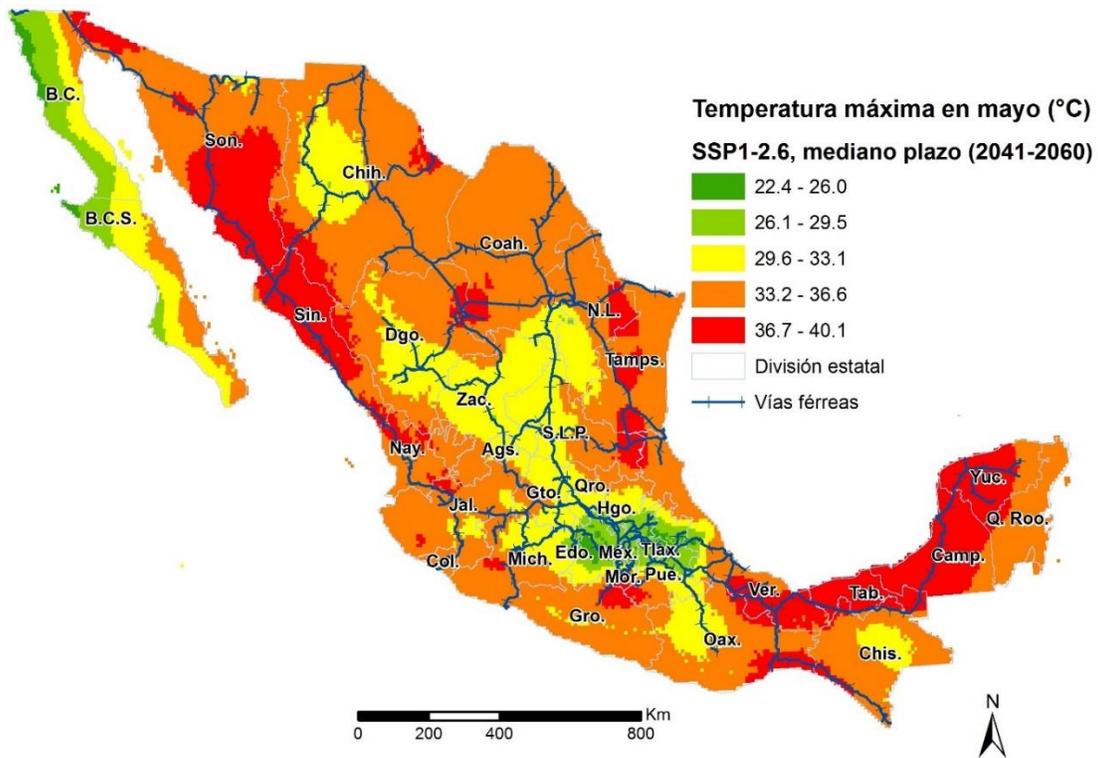


Figura 3.34 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

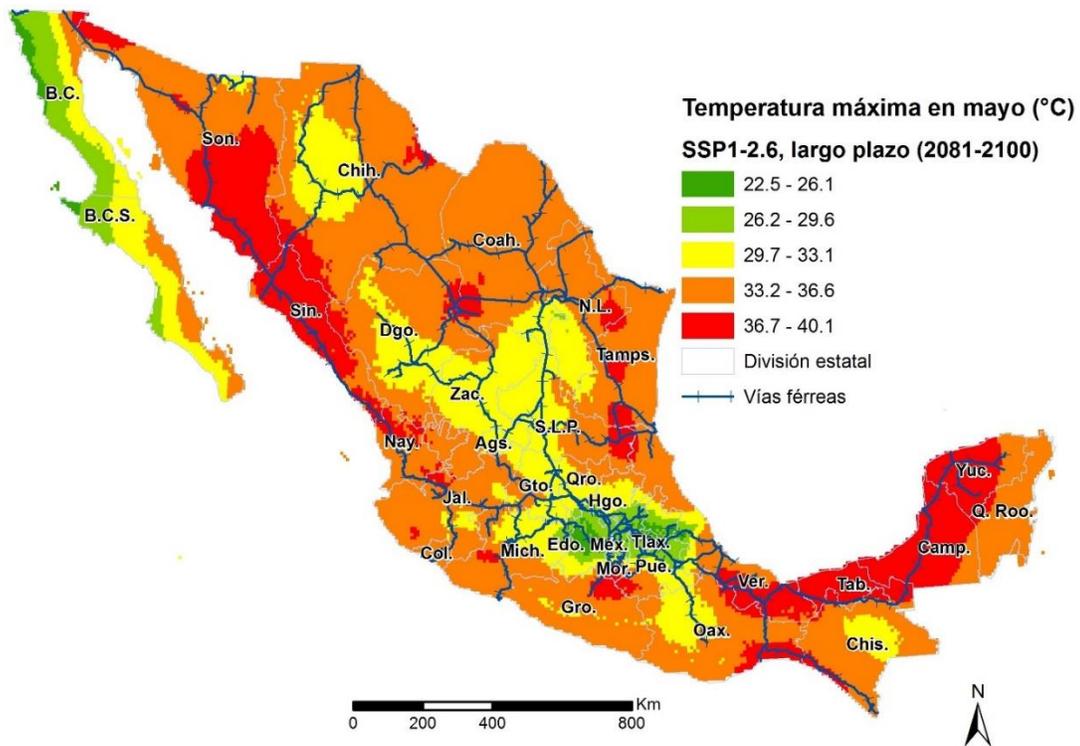


Figura 3.35 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP1-2.6 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

La temperatura máxima promedio estimada para el mes de junio, para el corto plazo (2021-2040) se muestra en la Figura 3.36, en el escenario SSP1-2.6, en las Figuras 3.37 y 3.38 se muestra la estimación para el mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento gradual de la temperatura máxima promedio en el occidente y sureste del país, y en estados del norte como Sonora, en donde se estima que la mayor parte de su territorio pase de los 38.9°C en promedio, en el mes de junio, así como el norte del estado de Chihuahua, en la frontera, lo cual afectaría principalmente a los pasos fronterizos del ferrocarril y las cadenas de suministro que necesitan de dichas conexiones.

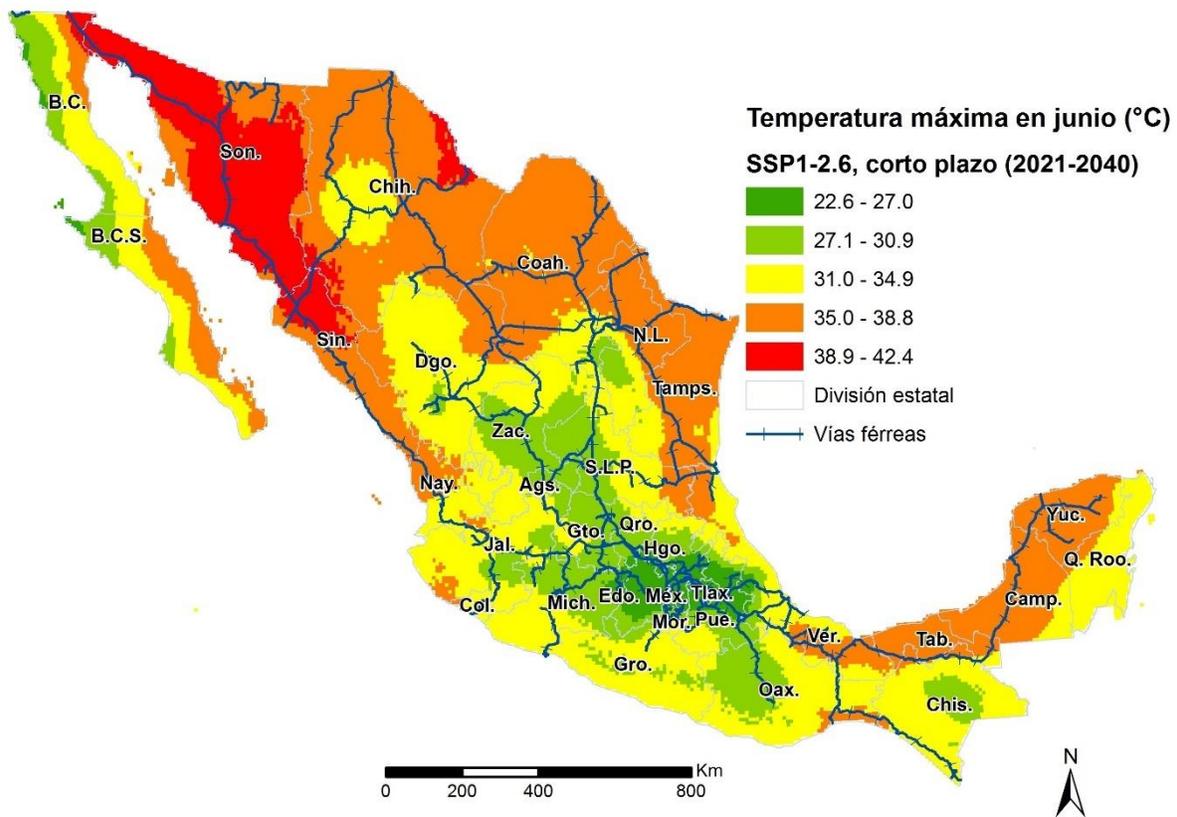


Figura 3.36 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP1-2.6 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

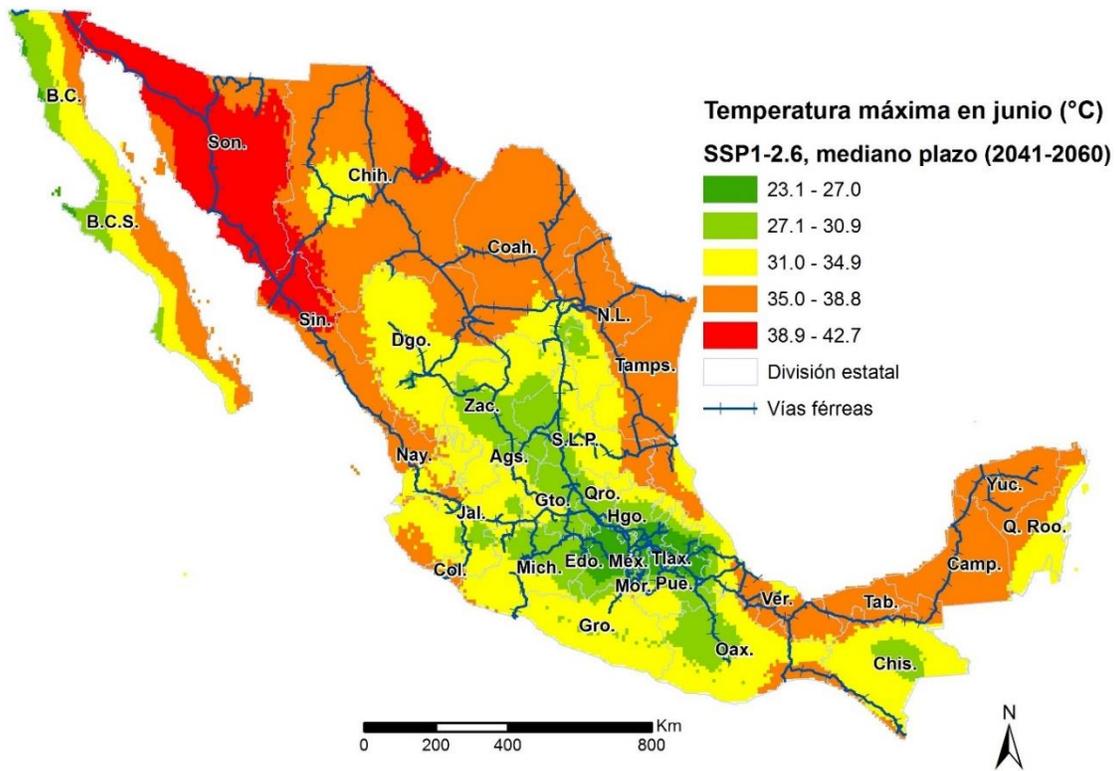


Figura 3.37 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

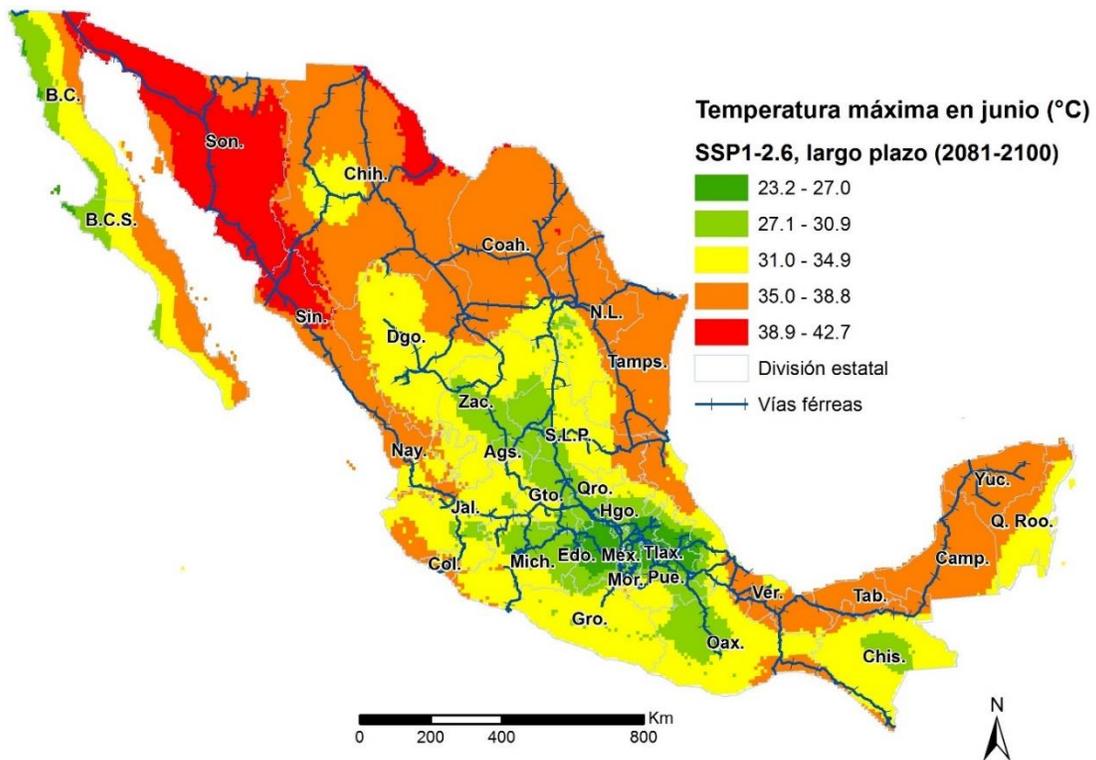


Figura 3.38 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP1-2.6 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de julio, en la Figura 3.39 se puede observar la temperatura máxima promedio, estimada para el corto plazo (2021-2040) en el escenario SSP1-2.6, en las Figuras 3.40 y 3.41 se muestra la estimación para el mediano y largo plazo, respectivamente; en donde se puede observar un aumento gradual de la temperatura máxima promedio del mes de julio en el norte y sureste del país.

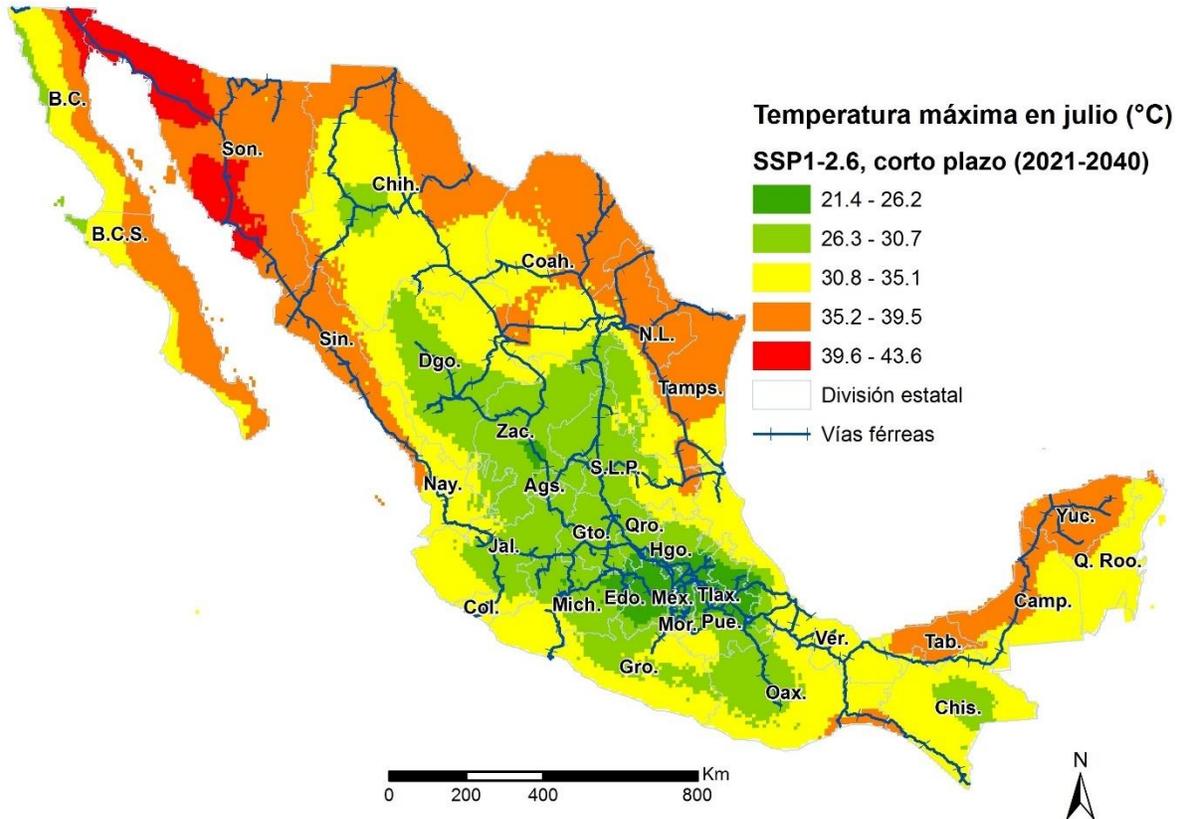


Figura 3.39 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP1-2.6 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

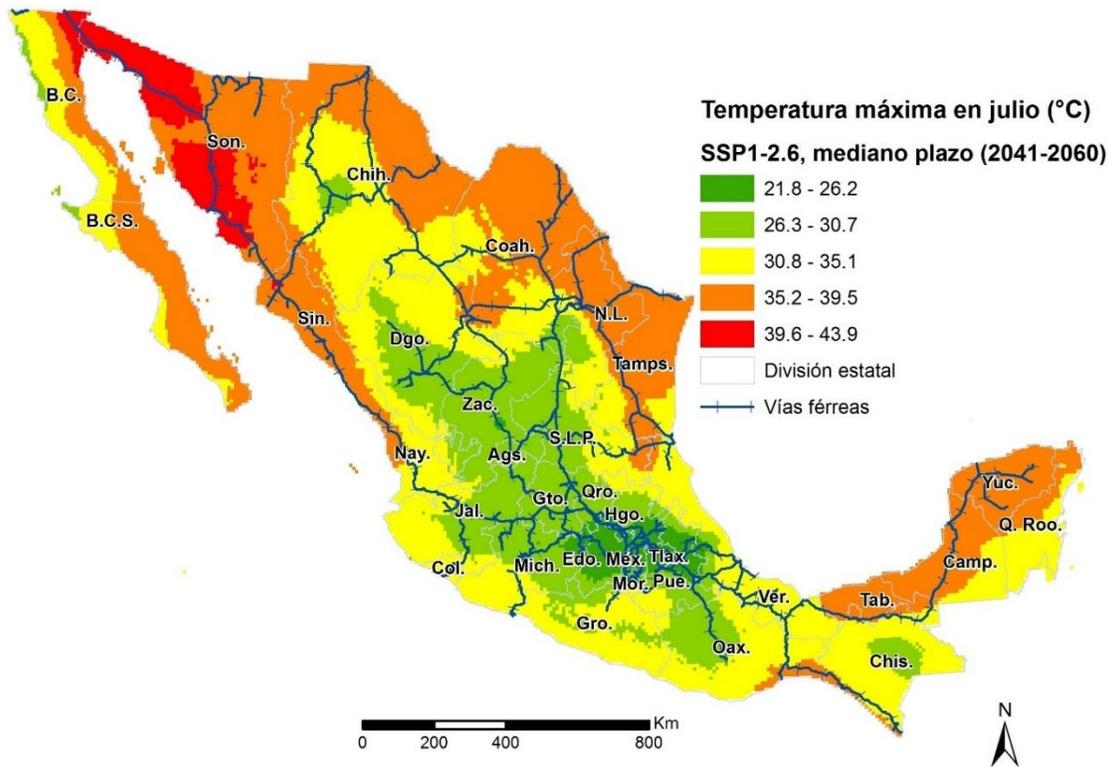


Figura 3.40 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

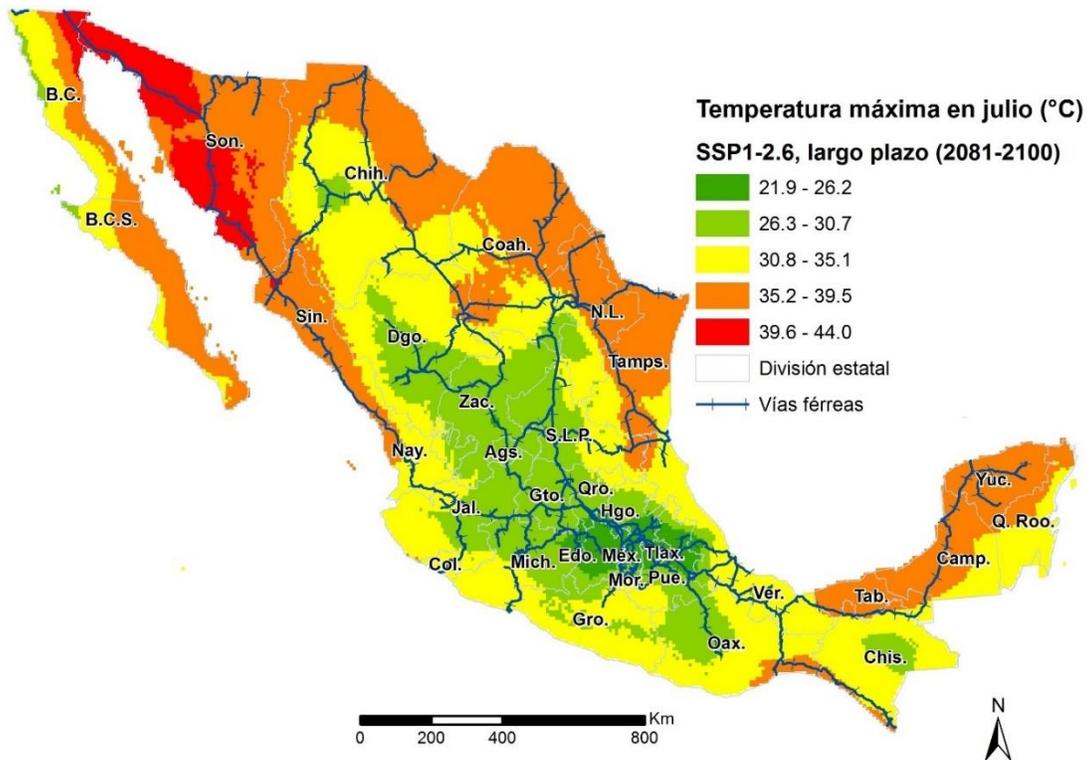


Figura 3.41 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP1-2.6 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.3.2 Temperatura máxima promedio mensual en el escenario SSP2-4.5

En la Figura 3.42 se muestra la temperatura máxima promedio, estimada para el mes de mayo, para el corto plazo (2021-2040) en el escenario SSP2-4.5, en las Figuras 3.43 y 3.44 se muestra la estimación para el mediano y largo plazo, respectivamente; aunque en general, en la mayoría de las entidades federativas se estima un aumento de la temperatura promedio para el mes de mayo, se presentaría una mayor diferencia en el norte y el sureste del país, lo cual afectaría a las nuevas obras ferroviarias ubicadas en el sureste de México, como el Tren Maya y el Ferrocarril Interoceánico.

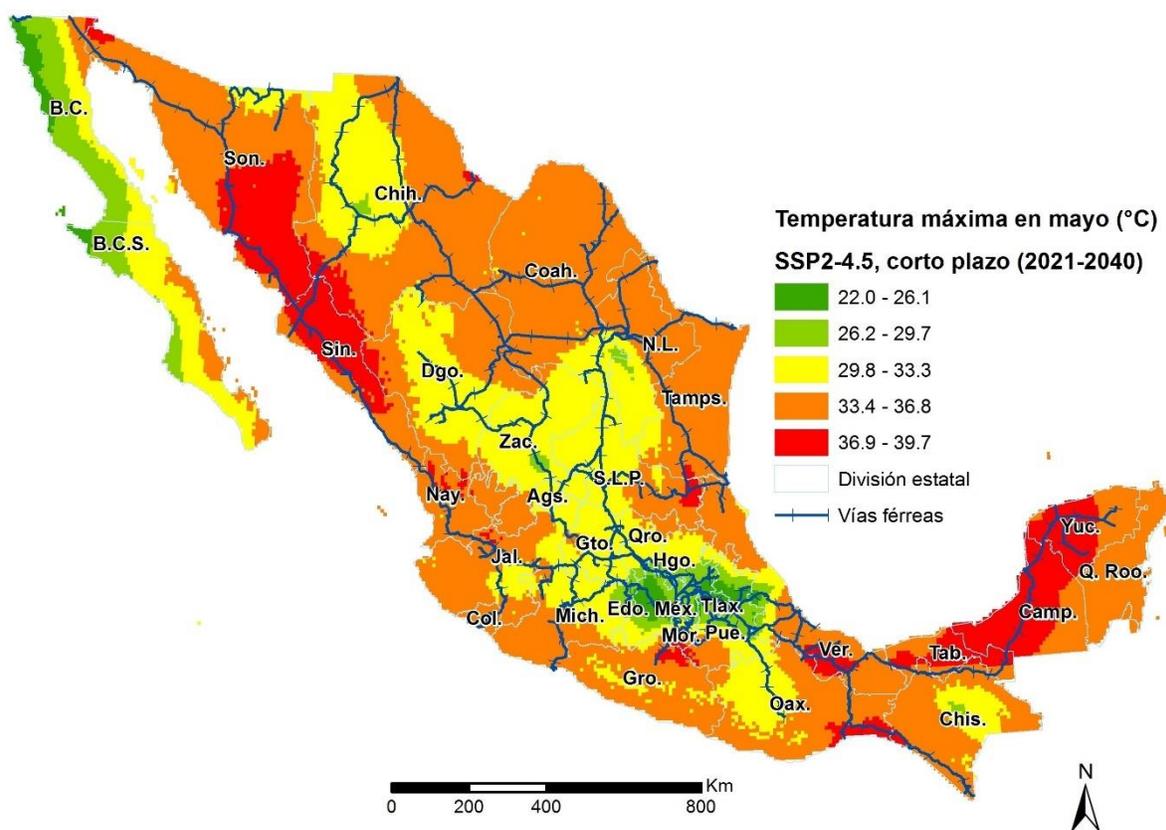


Figura 3.42 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP2-4.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

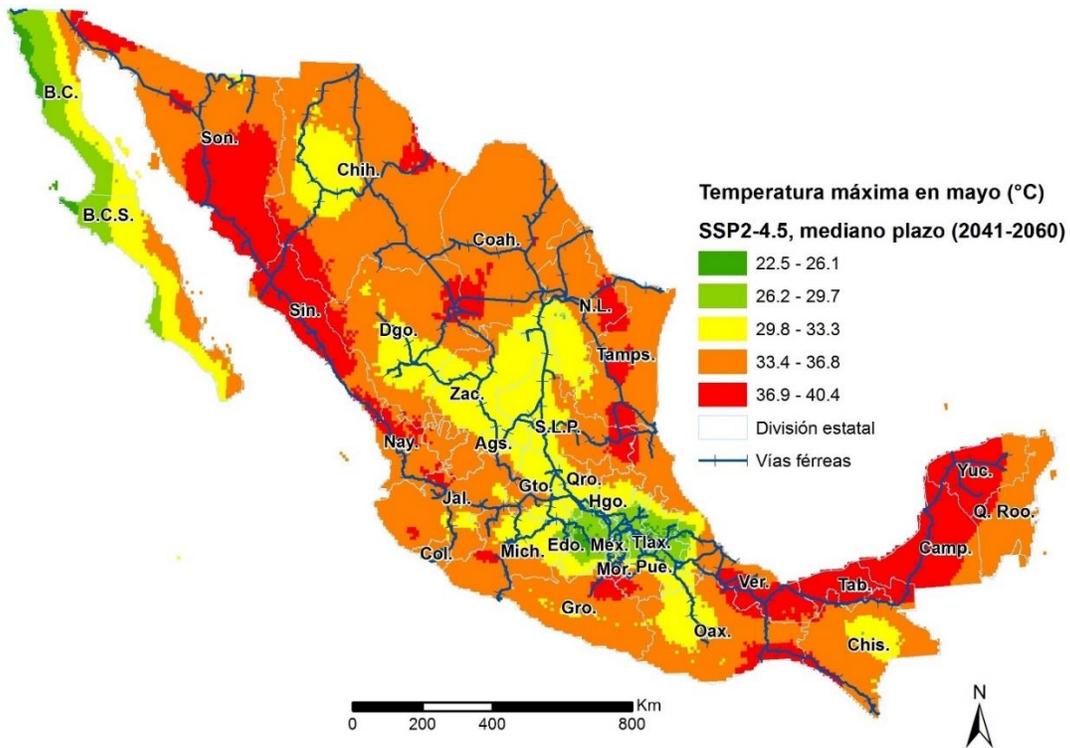


Figura 3.43 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP2-4.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

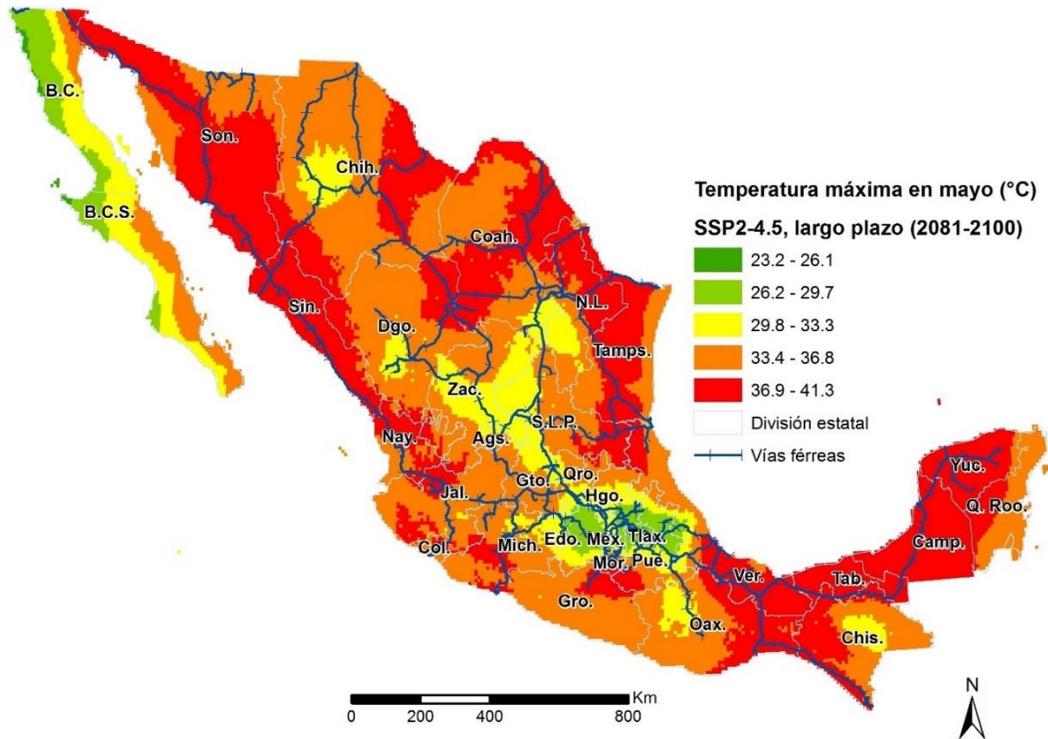


Figura 3.44 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP2-4.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

La temperatura máxima promedio estimada para el mes de junio, para el corto plazo (2021-2040) se muestra en la Figura 3.45, en el escenario SSP2-4.5, en las Figuras 3.46 y 3.47 se muestra la estimación para el mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento de la temperatura máxima promedio del mes de junio en el norte del país, afectando en mayor medida a la frontera norte y, por consecuencia, a los pasos fronterizos por ferrocarril.

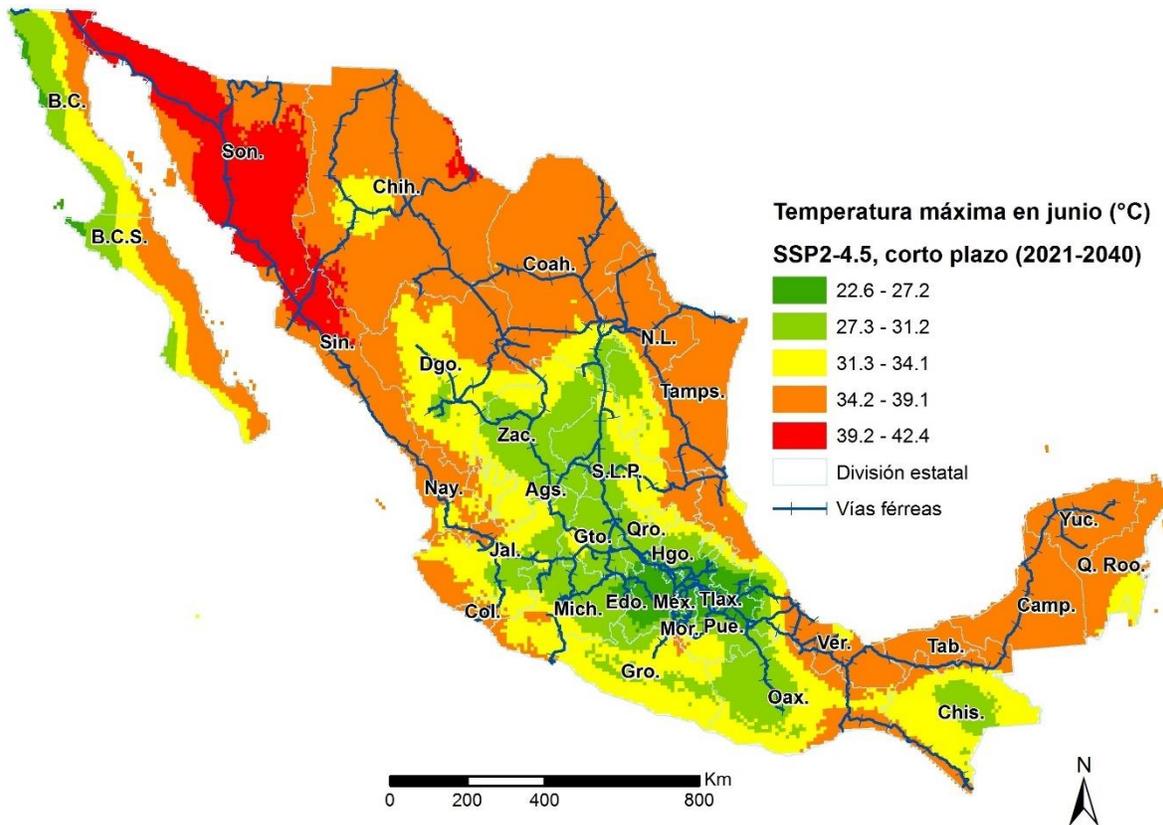


Figura 3.45 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP2-4.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

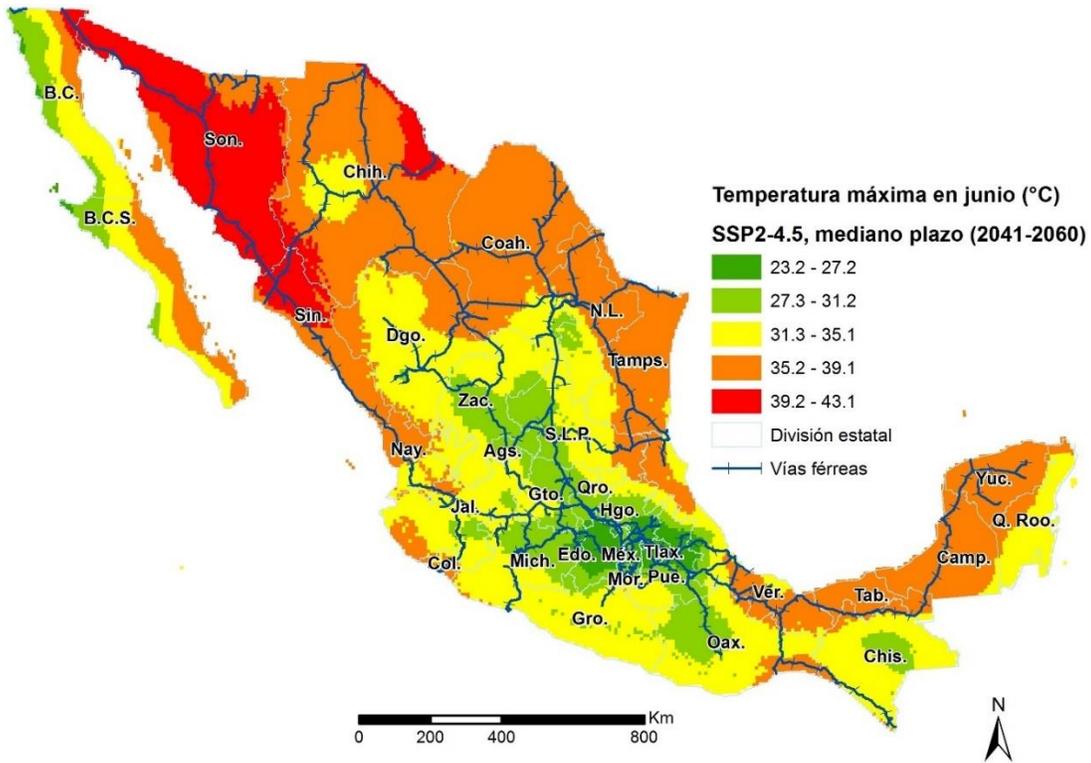


Figura 3.46 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP2-4.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

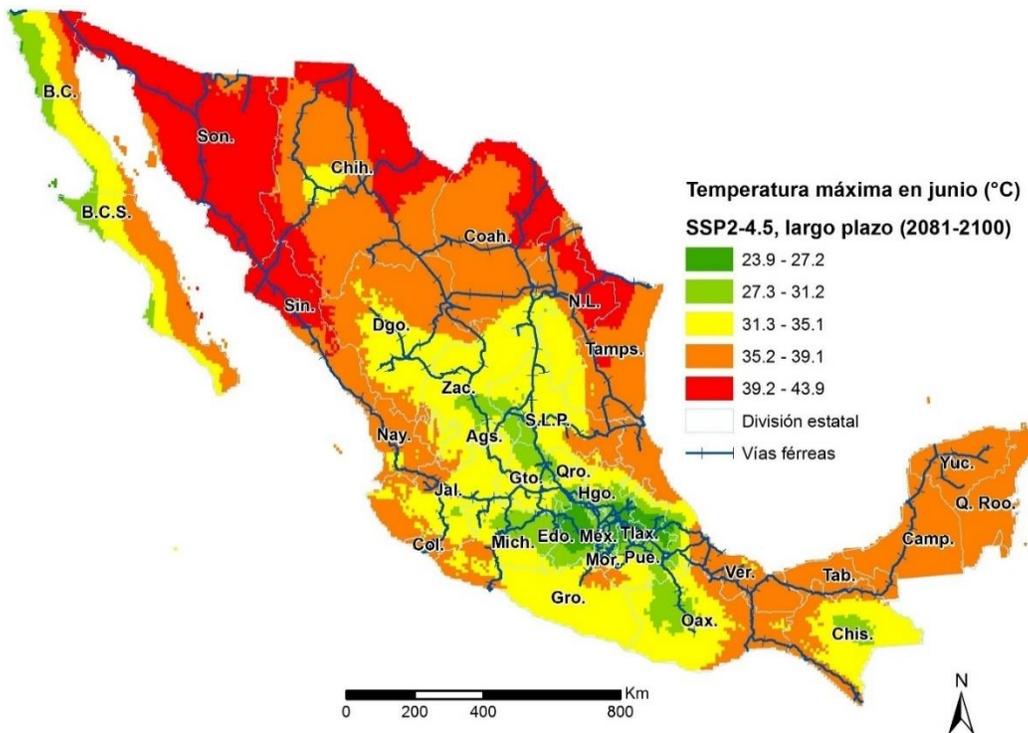


Figura 3.47 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP2-4.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de julio, en la Figura 3.48 se puede observar la temperatura máxima promedio, estimada para el corto plazo (2021-2040) en el escenario SSP2-4.5, en las Figuras 3.49 y 3.50 se muestra la estimación para el mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento de la temperatura máxima promedio, del mes de julio, en prácticamente todas las entidades federativas, presentándose una posible mayor afectación en los estados de la frontera norte de México.

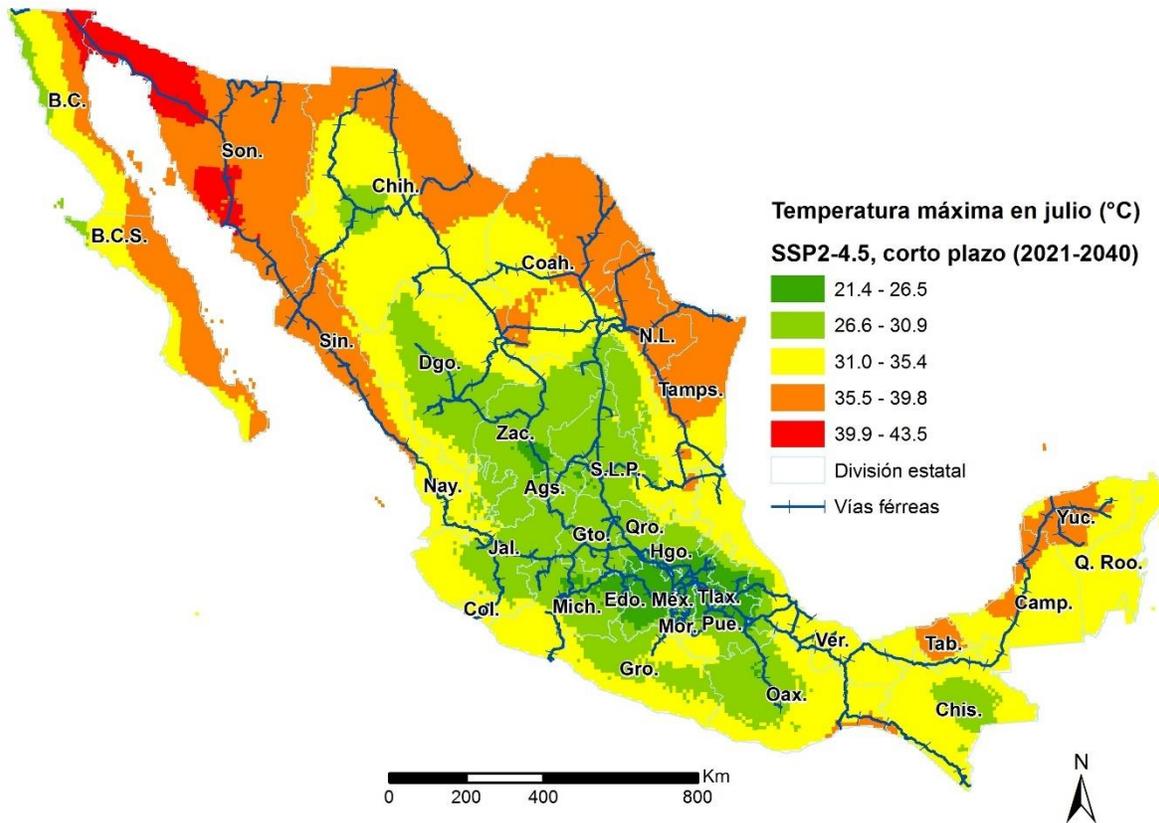


Figura 3.48 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP2-4.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

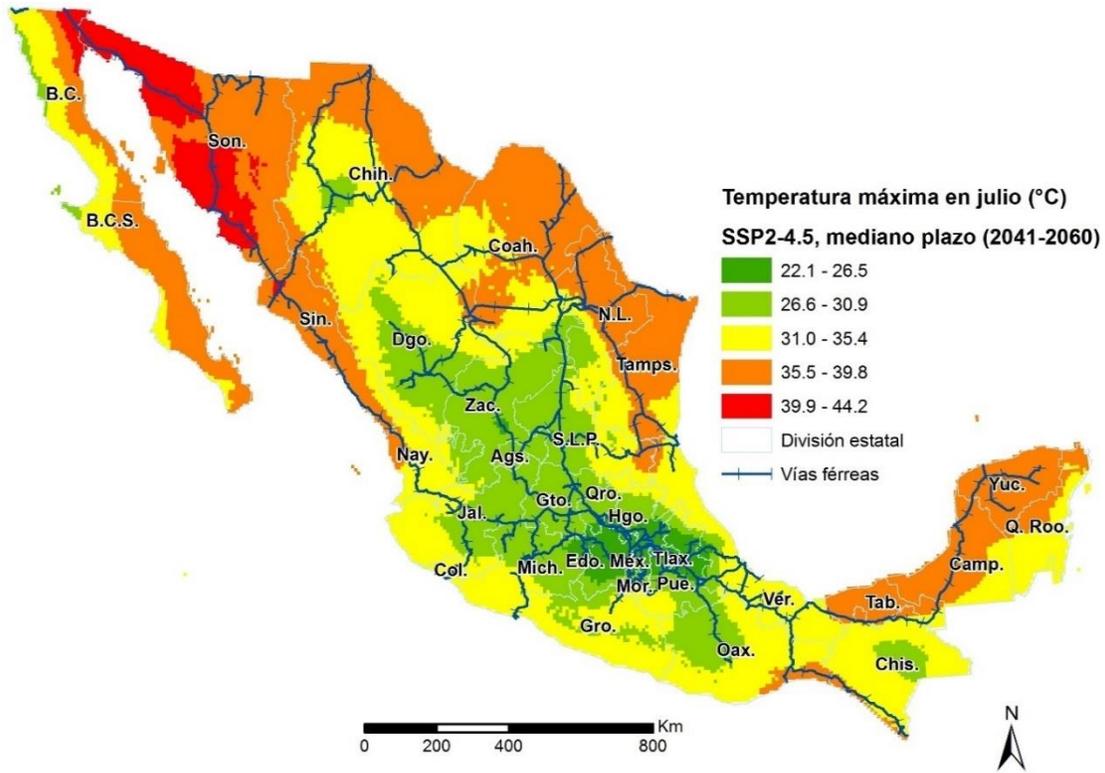


Figura 3.49 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP2-4.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

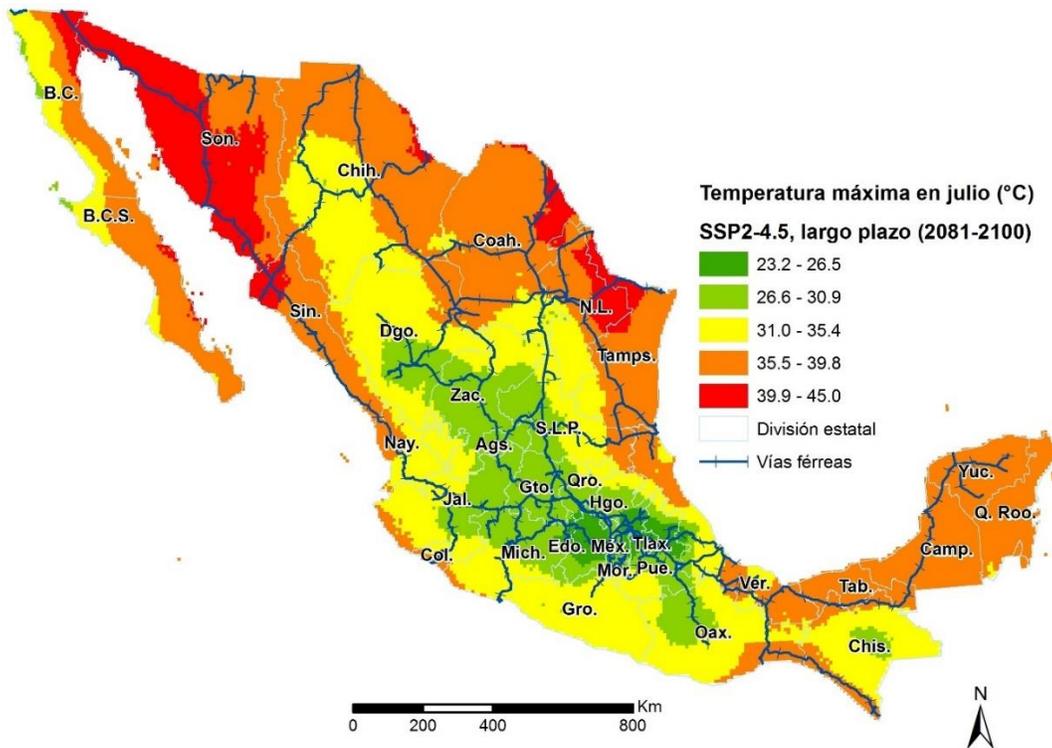


Figura 3.50 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP2-4.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.3.3 Temperatura máxima promedio mensual en el escenario SSP3-7.0

En la Figura 3.51 se muestra la temperatura máxima promedio, estimada para el mes de mayo, para el corto plazo (2021-2040) en el escenario SSP3-7.0, en las Figuras 3.52 y 3.53 se muestra la estimación para el mediano y largo plazo, respectivamente; en general se aprecia un aumento considerable de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, siendo algunos estados de la frontera norte, del occidente y del sureste los que presentarían las mayores temperaturas promedio en el mes de mayo, bajo este escenario, teniendo un rango de temperatura entre 37.1 y 42.3 °C en el largo plazo.

Las estimaciones indican que, por las altas temperaturas promedio, en el mes de mayo se vería afectada la ruta México-Nogales del ferrocarril de carga, y hacia Mexicali, así como el corredor interoceánico del ferrocarril del Istmo de Tehuantepec y los pasos fronterizos por ferrocarril en la frontera norte.

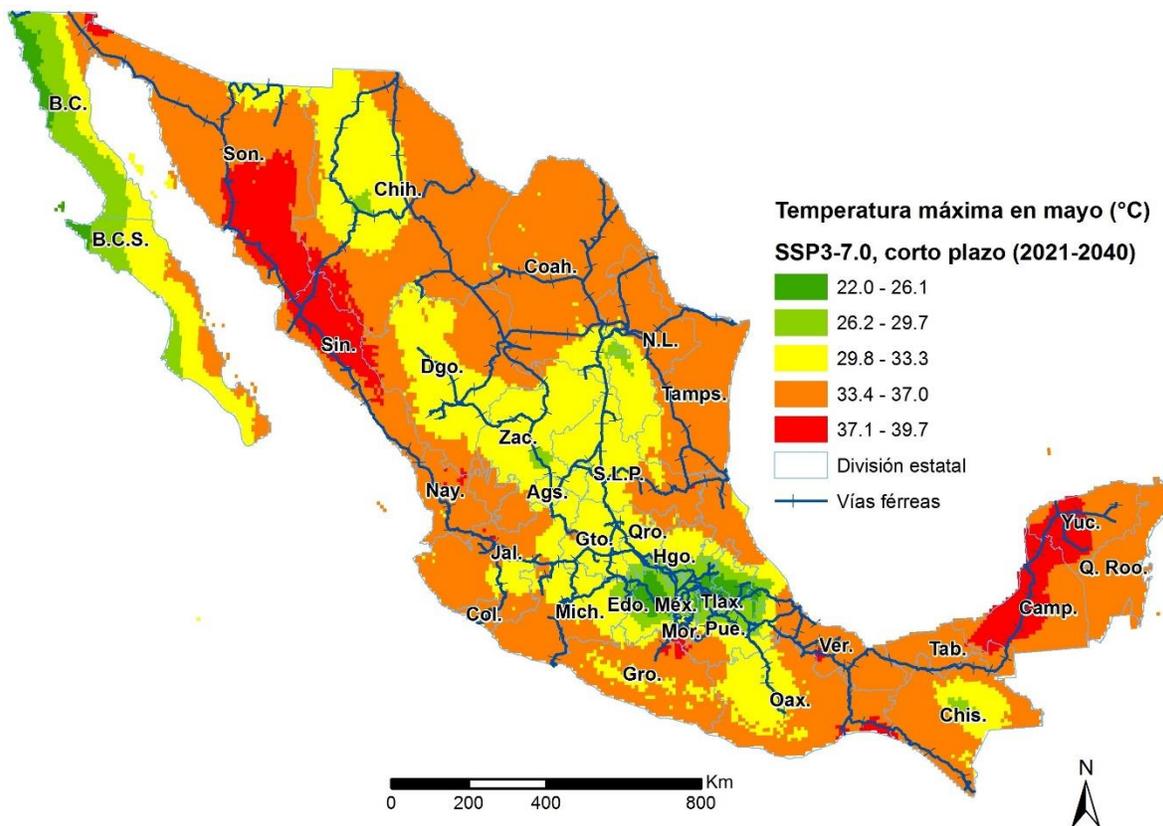


Figura 3.51 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP3-7.0 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

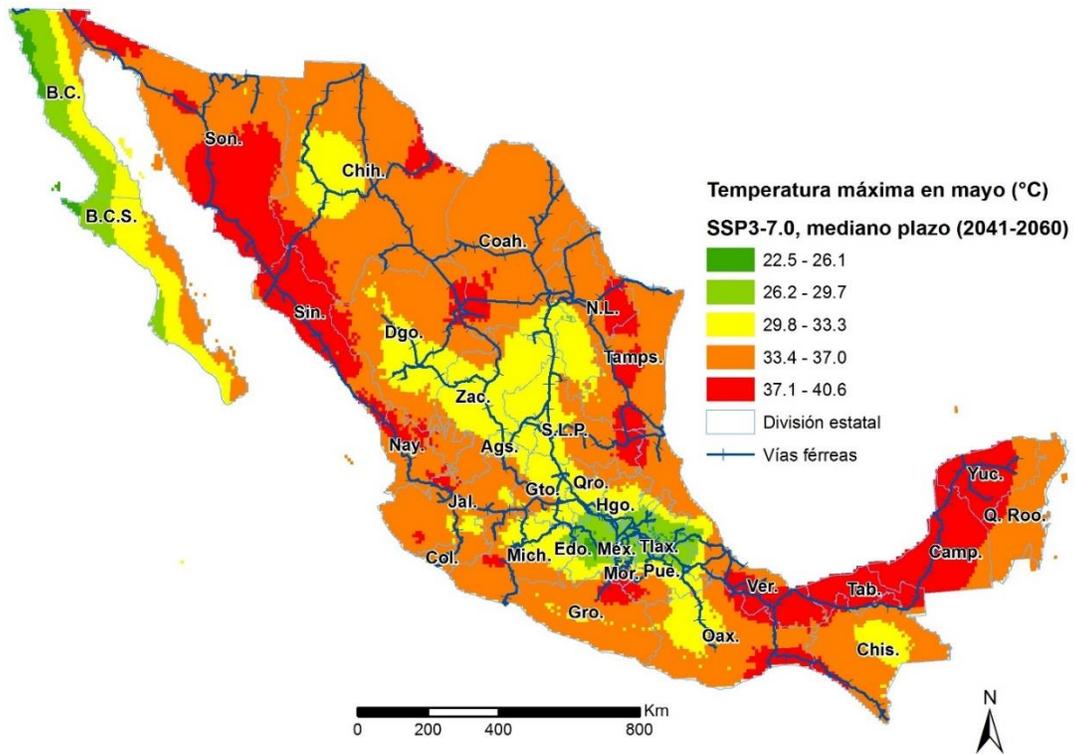


Figura 3.52 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP3-7.0 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

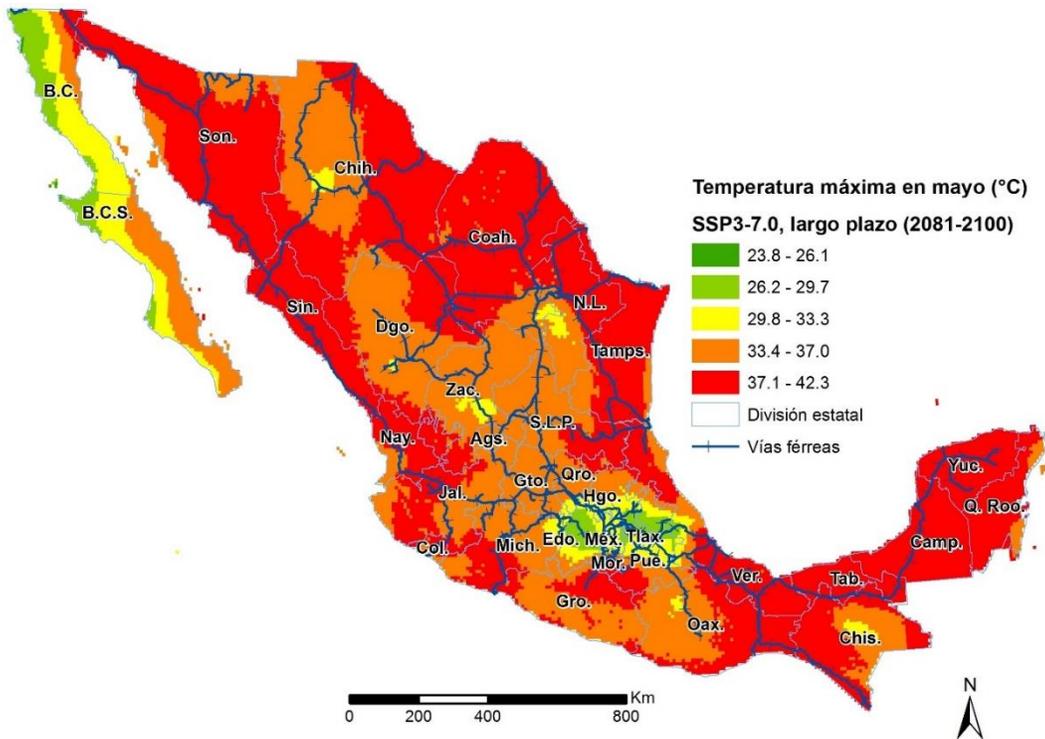


Figura 3.53 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP3-7.0 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

La temperatura máxima promedio, estimada para el mes de junio, para el corto plazo (2021-2040) se muestra en la Figura 3.54, en el escenario SSP3-7.0, en las Figuras 3.55 y 3.56 se muestra la estimación para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento de la temperatura máxima promedio para el mes de junio en el norte del país, que afectaría en mayor medida a la frontera norte y, por consecuencia, a los pasos fronterizos por ferrocarril.

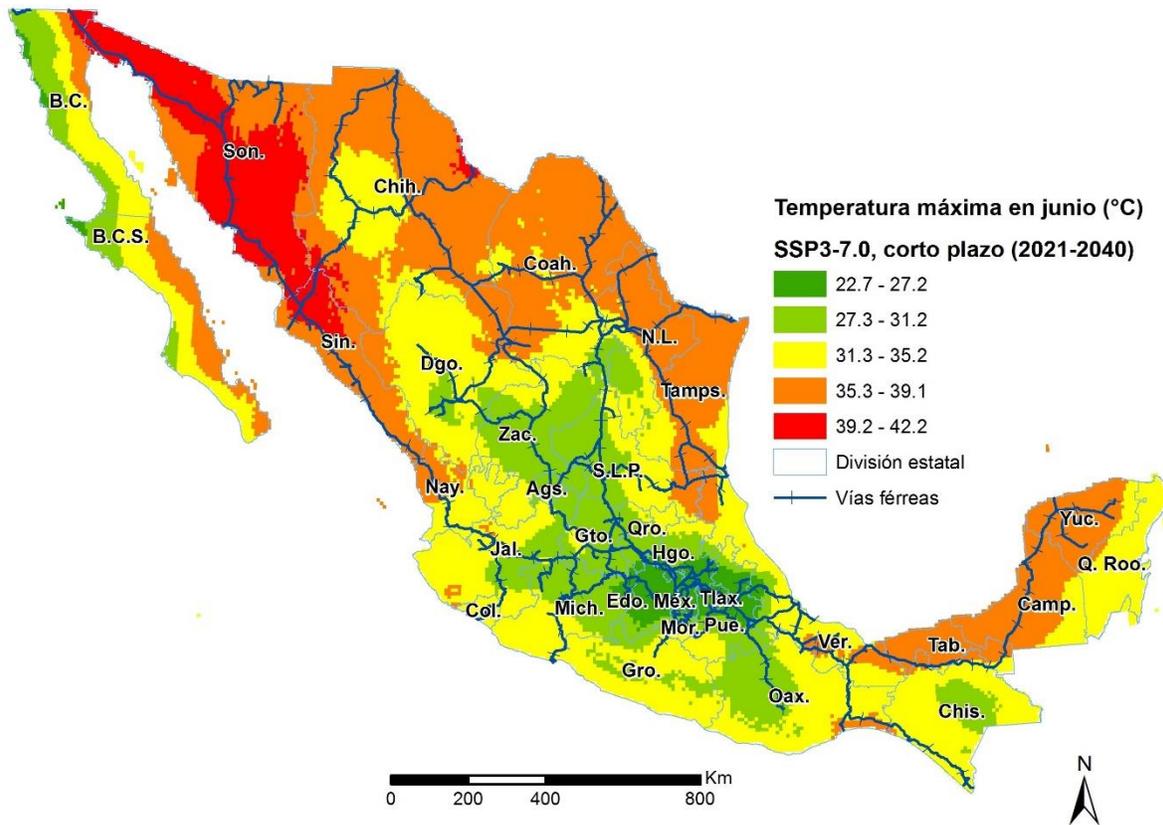


Figura 3.54 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP3-7.0 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

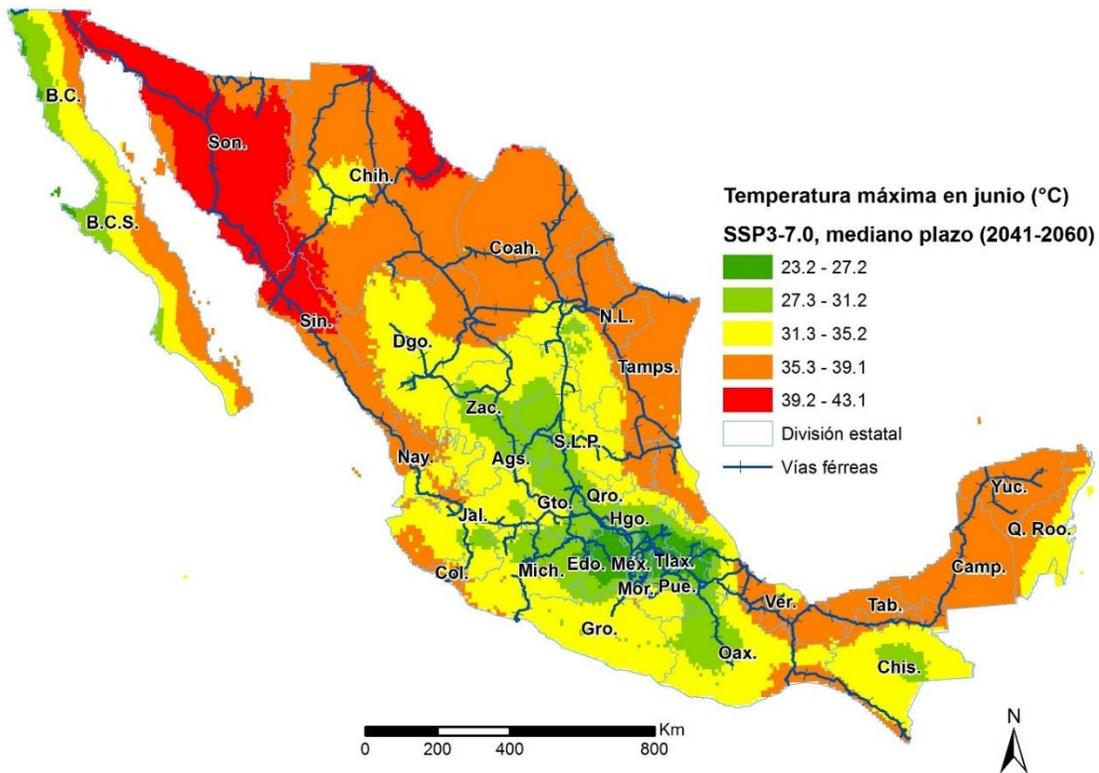


Figura 3.55 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP3-7.0 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

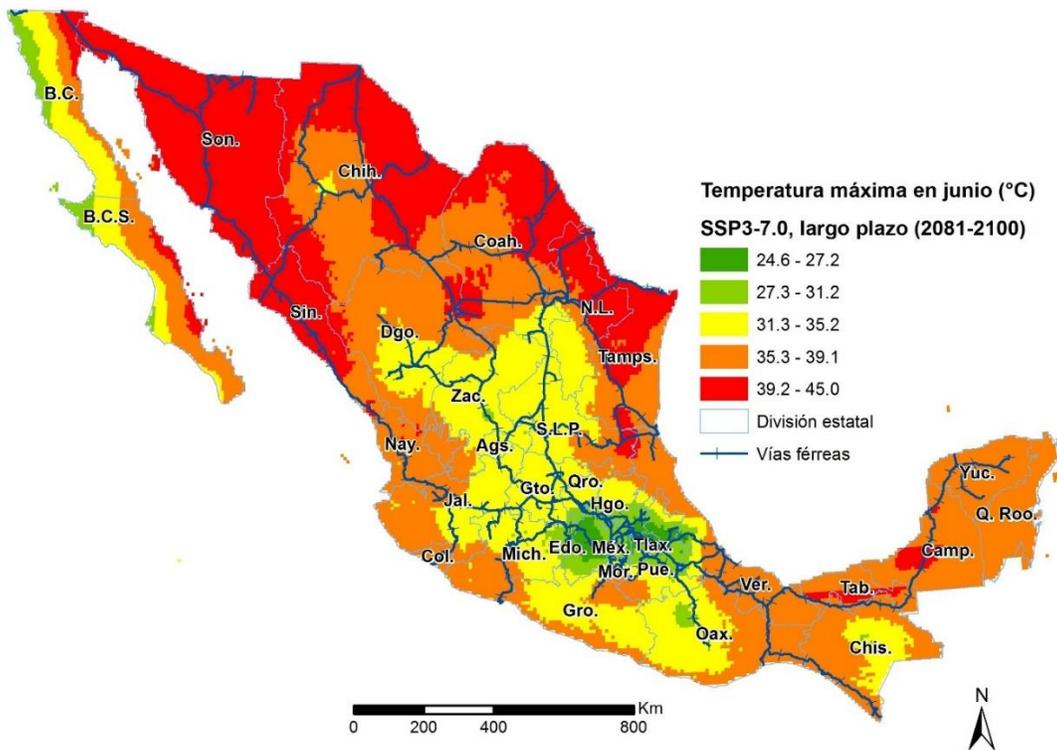


Figura 3.56 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP3-7.0 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de julio, en la Figura 3.57 se puede observar la temperatura máxima promedio, estimada para el corto plazo (2021-2040) en el escenario SSP3-7.0 en México, en las Figuras 3.58 y 3.59 se muestra la estimación para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento de la temperatura máxima promedio, para el mes de julio, en prácticamente todas las entidades federativas, teniendo una posible mayor afectación los estados de la frontera norte de México.

Por lo anterior, los estados de la frontera norte de México tendrían que implementar medidas para contrarrestar el efecto de las altas temperaturas en los rieles ferroviarios, así como tomar medidas para la mitigación de los posibles incendios.

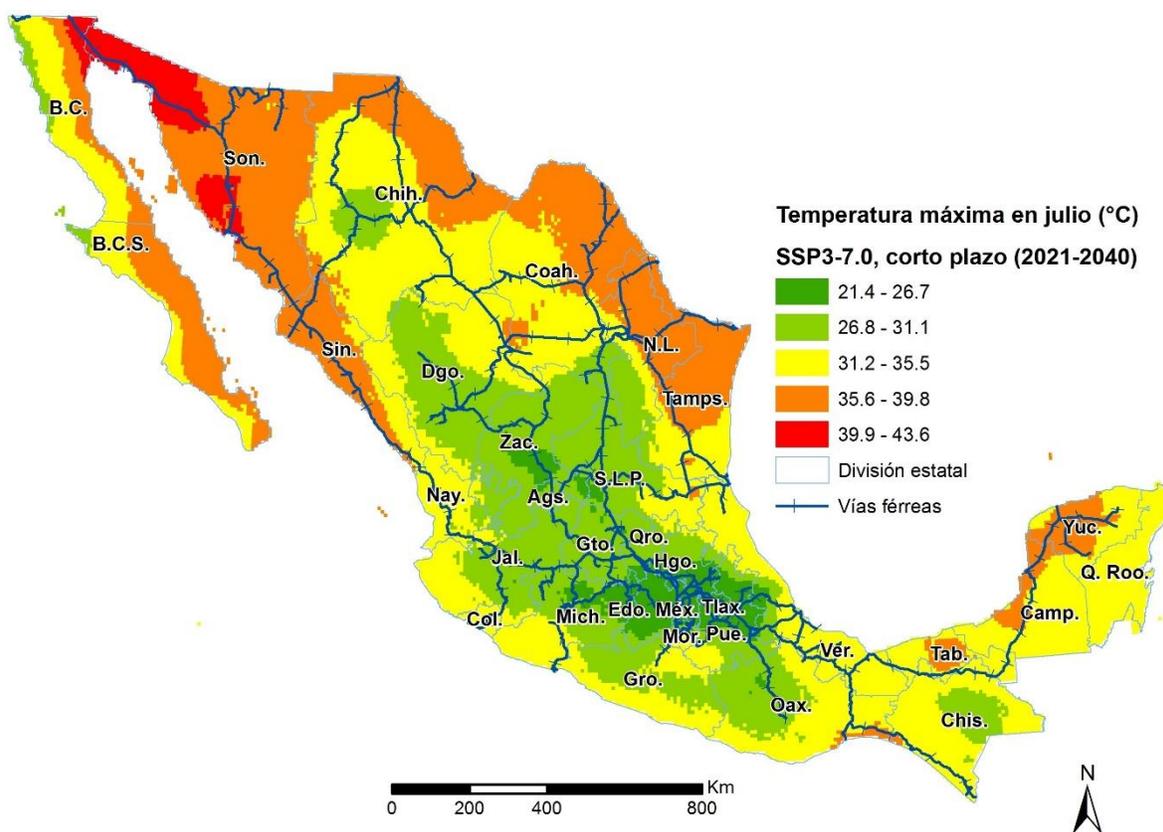


Figura 3.57 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP3-7.0 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

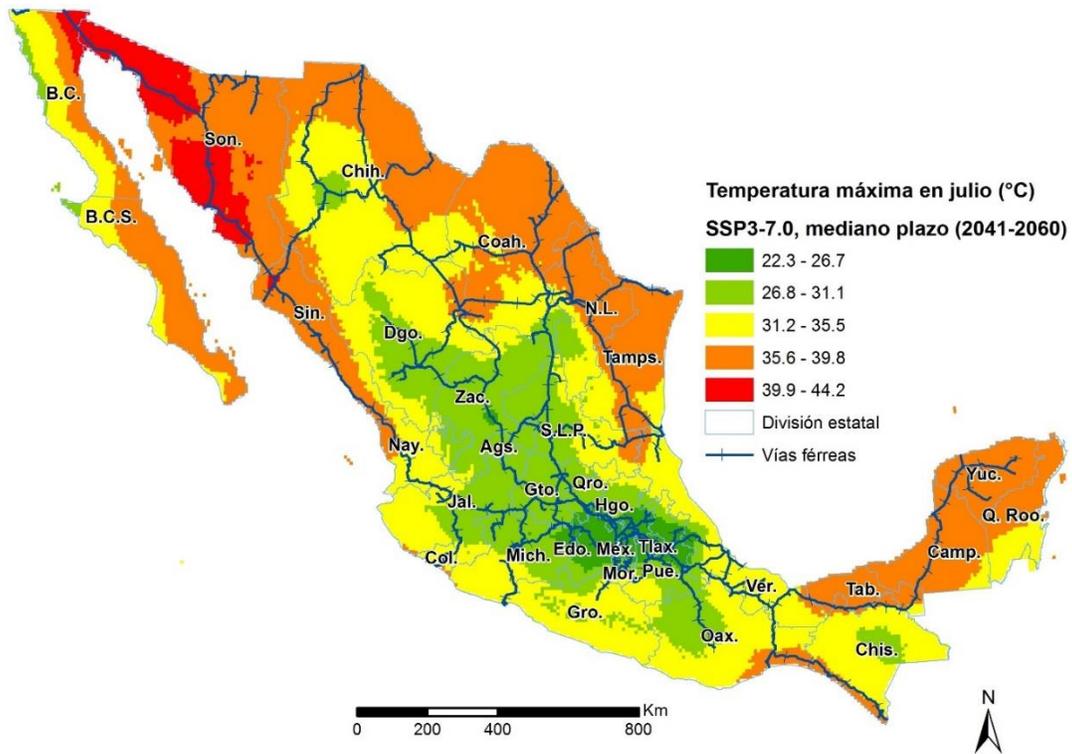


Figura 3.58 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP3-7.0 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

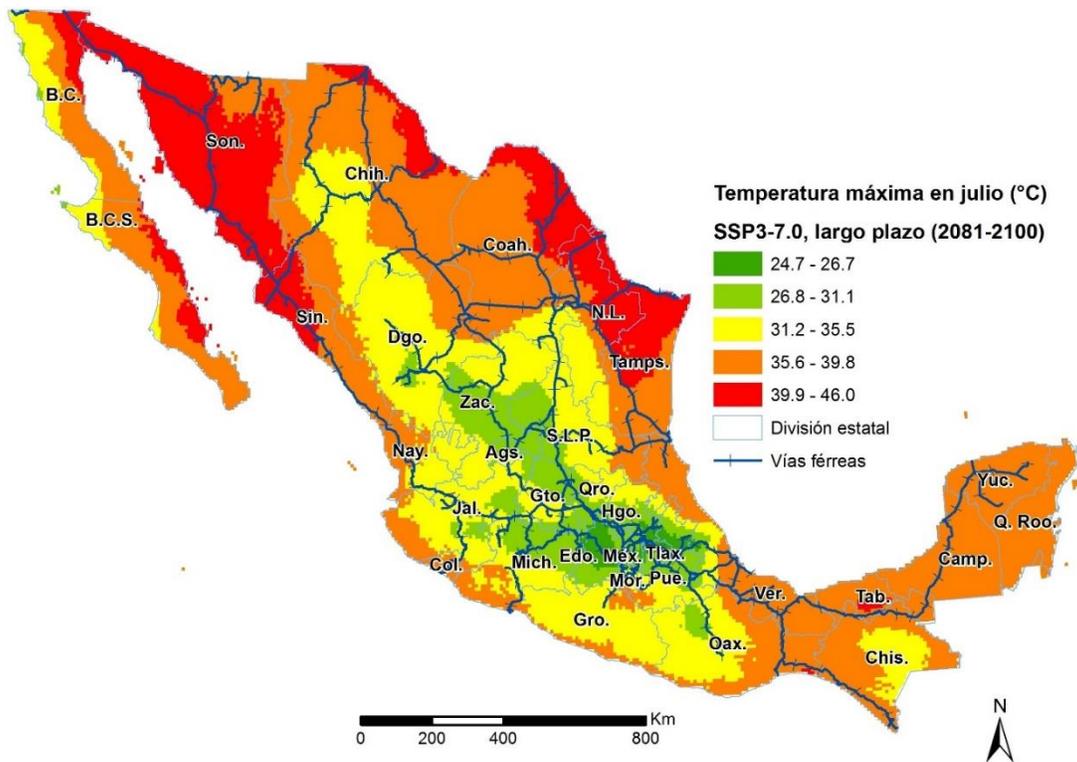


Figura 3.59 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP3-7.0 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.3.4 Temperatura máxima promedio mensual en el escenario SSP5-8.5

En la Figura 3.60 se muestra la temperatura máxima promedio, estimada para el mes de mayo, en el corto plazo (2021-2040) para el escenario SSP5-8.5, en las Figuras 3.61 y 3.62 se muestra la estimación para el mediano y largo plazo, respectivamente; en general se aprecia un aumento significativo de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, siendo algunos estados de la frontera norte, del occidente y del sureste los que podrían presentar las mayores temperaturas bajo este escenario, teniendo un rango de temperatura máxima promedio, en el mes de mayo, entre 37.3 y 43.3 °C en el largo plazo (2061-2100).

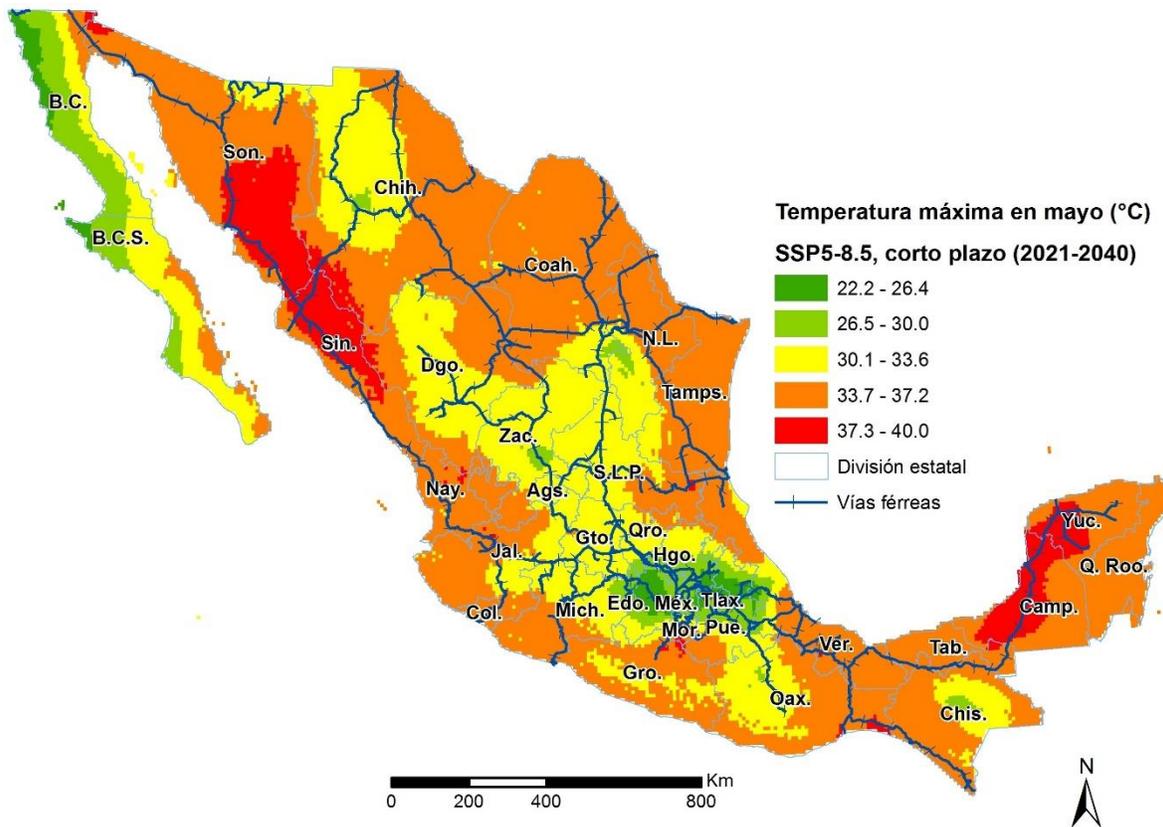


Figura 3.60 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP5-8.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

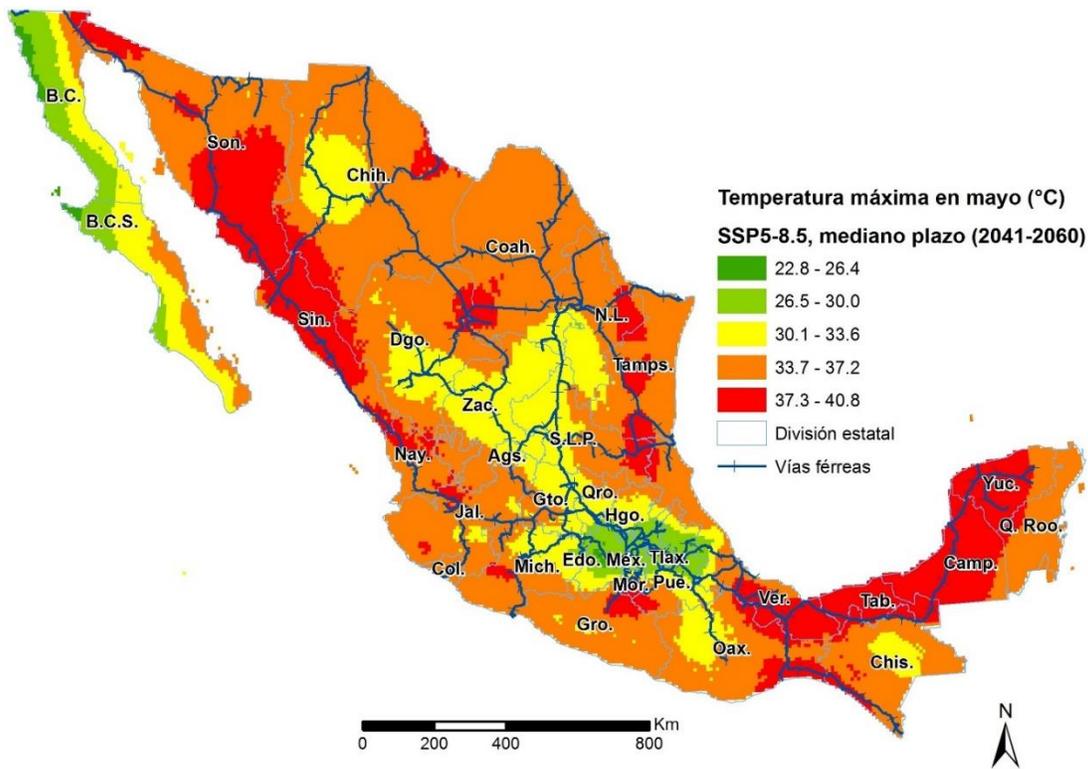


Figura 3.61 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP5-8.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

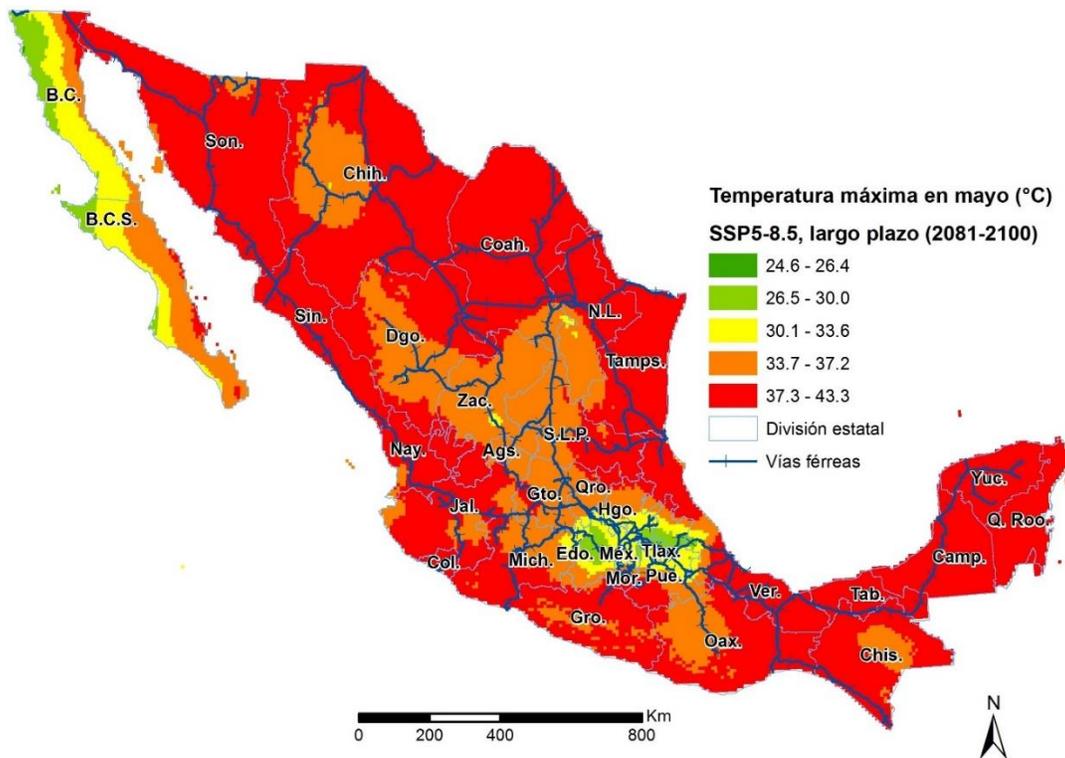


Figura 3.62 Temperatura máxima estimada en mayo, escenario SSP5-8.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

La temperatura máxima promedio estimada para el mes de junio, en el corto plazo (2021-2040), se muestra en la Figura 3.63, para el escenario SSP5-8.5, en las Figuras 3.64 y 3.65 se muestra la estimación para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento considerable de la temperatura máxima promedio para el mes de junio en el norte y sureste del país, que afectaría en mayor medida a la frontera norte y, por consecuencia, se podría ver interrumpido el flujo de la carga que transita por los pasos fronterizos del ferrocarril.

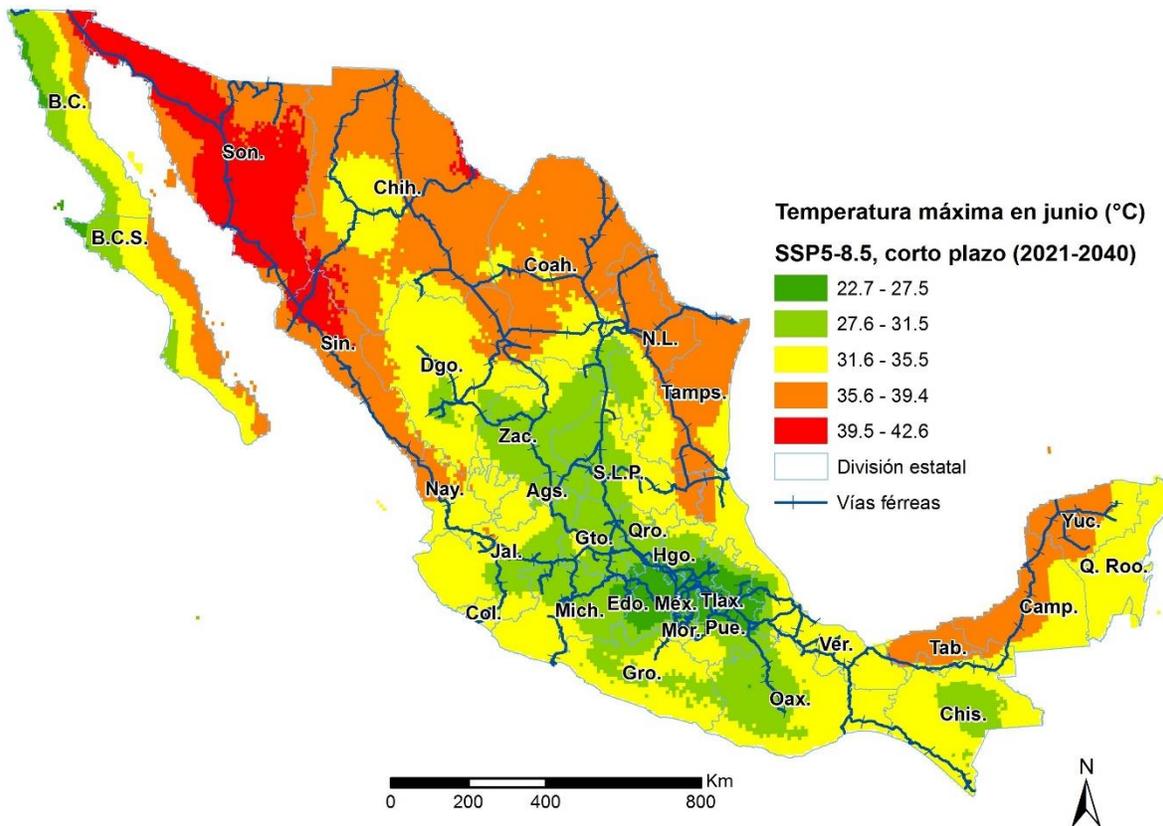


Figura 3.63 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP5-8.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

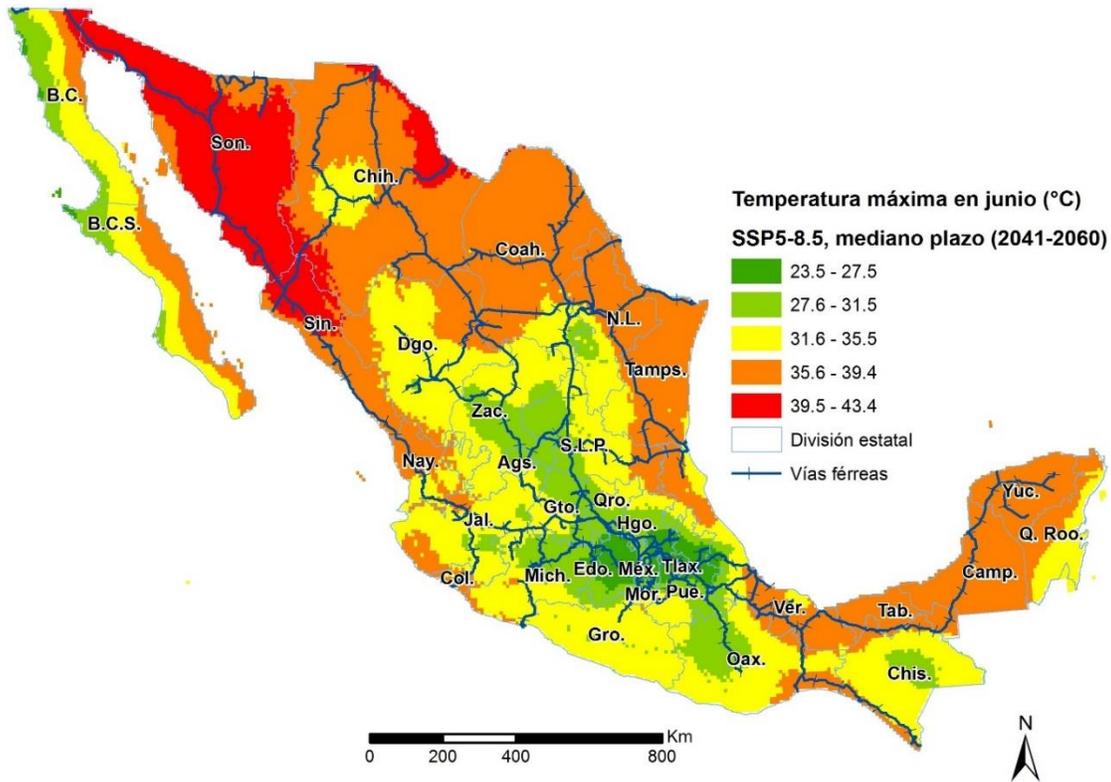


Figura 3.64 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP5-8.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

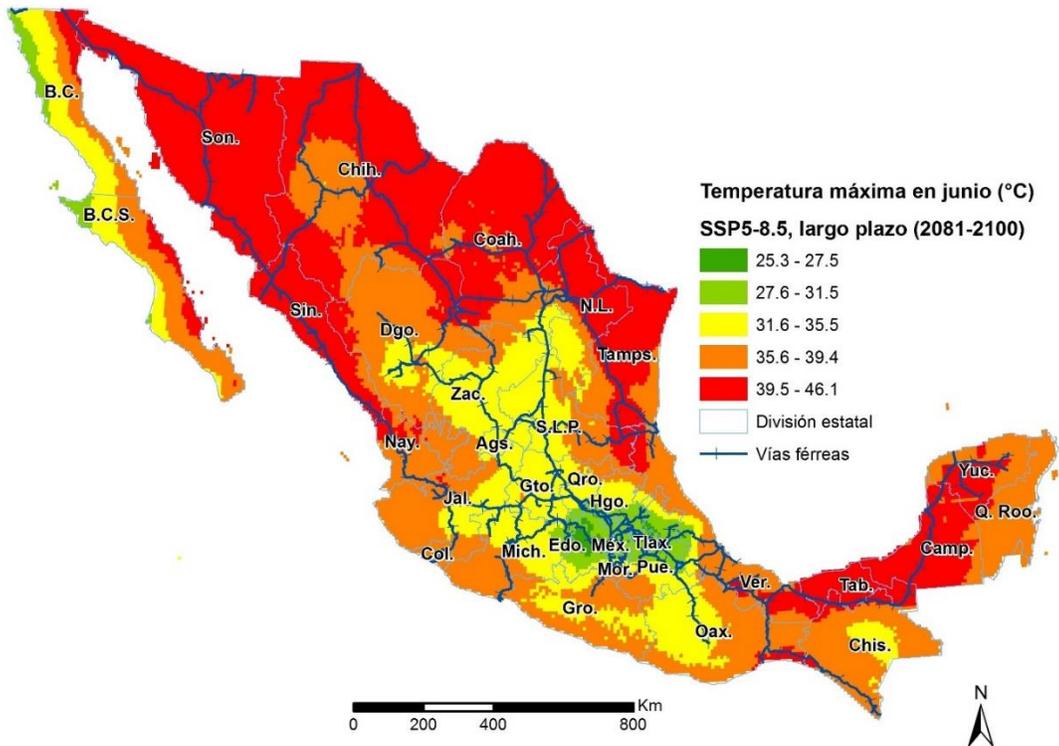


Figura 3.65 Temperatura máxima estimada en junio, escenario SSP5-8.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de julio, en la Figura 3.66 se puede observar la temperatura máxima promedio, estimada para el corto plazo (2021-2040) en el escenario SSP5-8.5 en México, en las Figuras 3.67 y 3.68 se muestra la estimación para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento de la temperatura máxima promedio, para el mes de julio, en prácticamente todas las entidades federativas, presentándose una mayor afectación en la franja de la frontera norte de México, y por consiguiente, en los pasos fronterizos por ferrocarril.

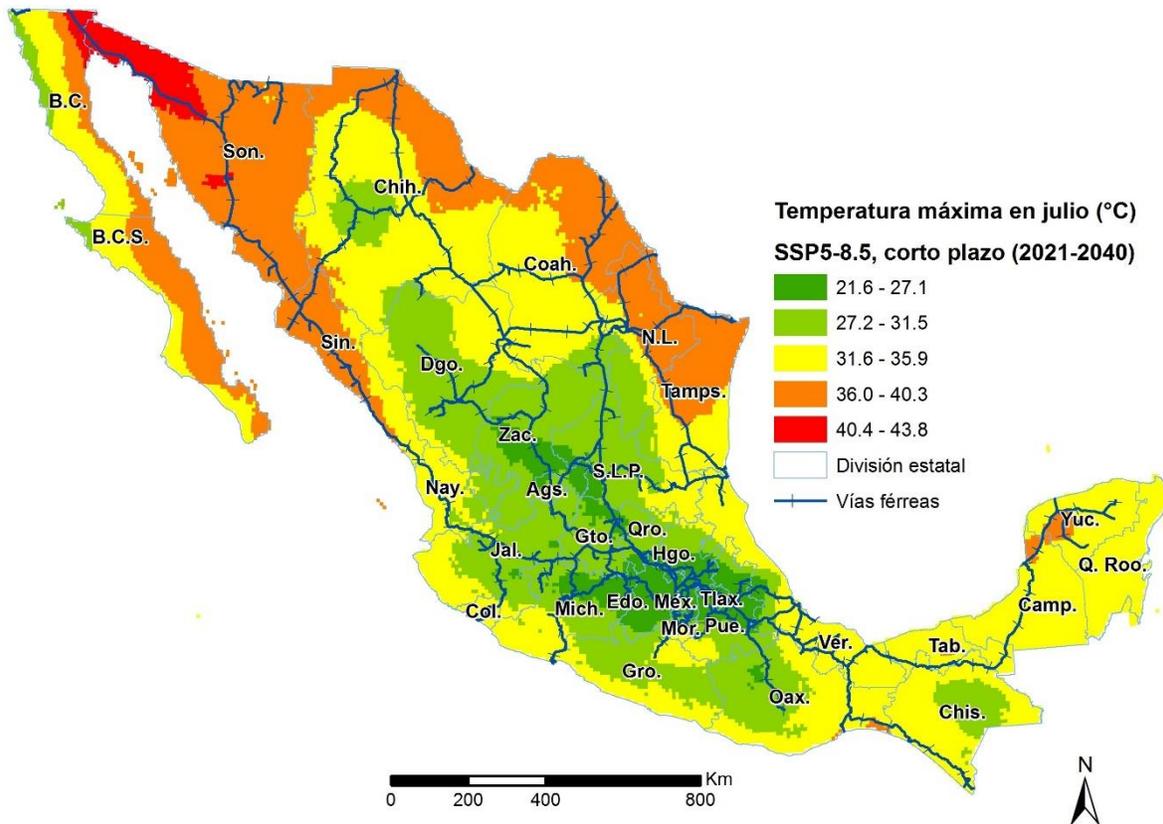


Figura 3.66 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP5-8.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

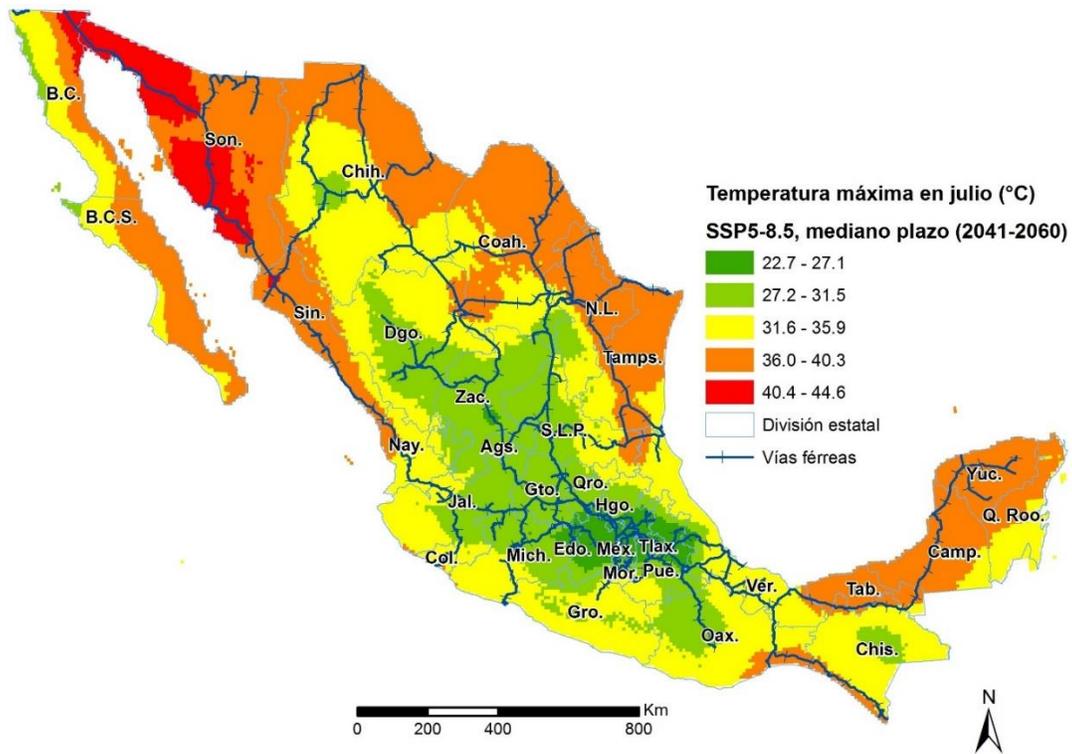


Figura 3.67 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP5-8.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

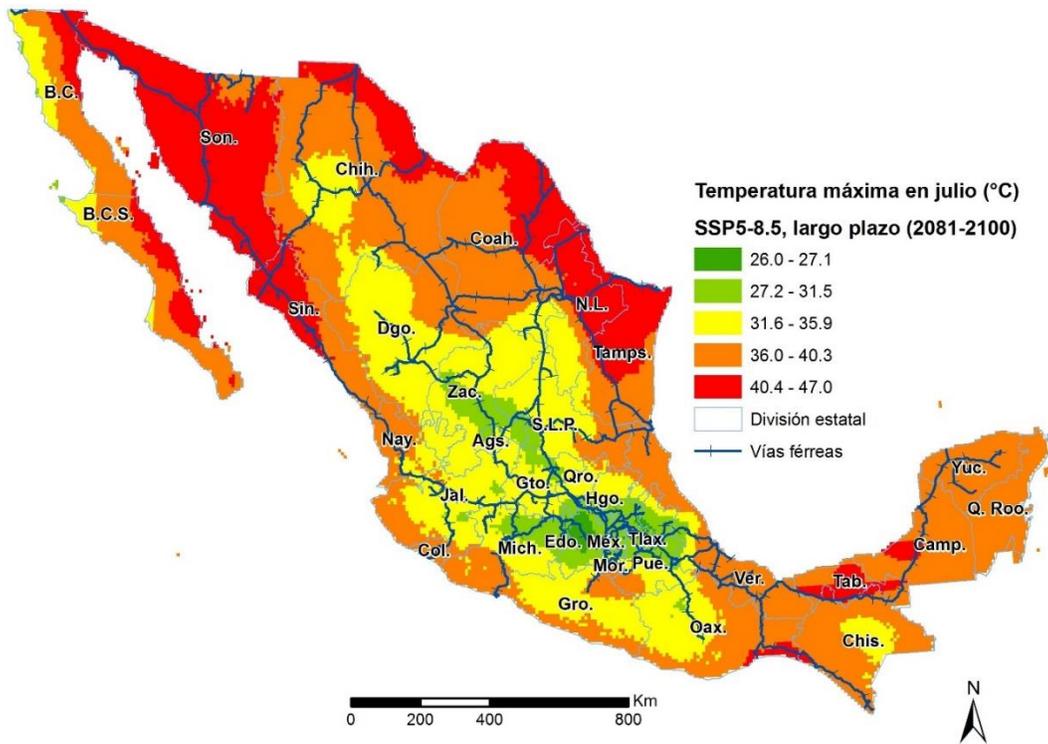


Figura 3.68 Temperatura máxima estimada en julio, escenario SSP5-8.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.4 Temperatura mínima promedio mensual

En esta sección se presentan los escenarios de cambio climático para la temperatura mínima promedio mensual, en grados centígrados (°C), para México; es decir, para los cuatro escenarios: SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0 y SSP5-8.5, tanto para el corto plazo (2021-2040), como para el mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2100).

Esta información sería de utilidad para conocer aquellos puntos en donde las bajas temperaturas podrían ocasionar daños en la infraestructura ferroviaria, en algunos meses del año, como la fractura de rieles, grietas y/o problema de desalineación, debido a que el acero de los rieles se vuelve menos flexible con las bajas temperaturas, además de que se puede presentar una disminución de los niveles de fricción del contacto de las ruedas de los vehículos con el riel, disminuyendo su capacidad de frenado (ver otros posibles impactos de las bajas temperaturas en la sección 1.2.2).

3.2.4.1 Temperatura mínima promedio mensual en el escenario SSP1-2.6

En la Figura 3.69 se muestra la temperatura mínima promedio estimada para el mes de diciembre en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP1-2.6 en México, en las Figuras 3.70 y 3.71 se muestra la estimación para el mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en general se aprecia un mínimo aumento de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, siendo algunas zonas de los estados de Chihuahua, Durango y el Estado de México los que mantienen las temperaturas bajo cero, alcanzando una temperatura mínima promedio de -2 °C en el largo plazo en comparación con los -2.3 °C en el corto plazo.

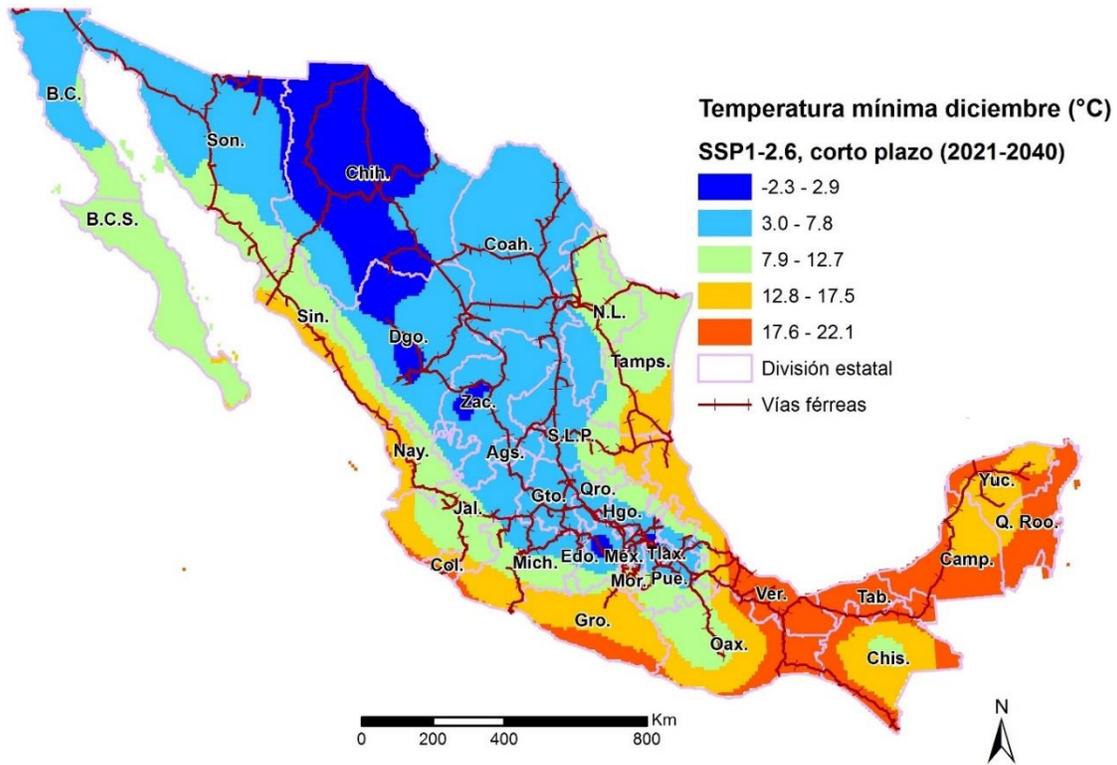


Figura 3.69 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP1-2.6 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

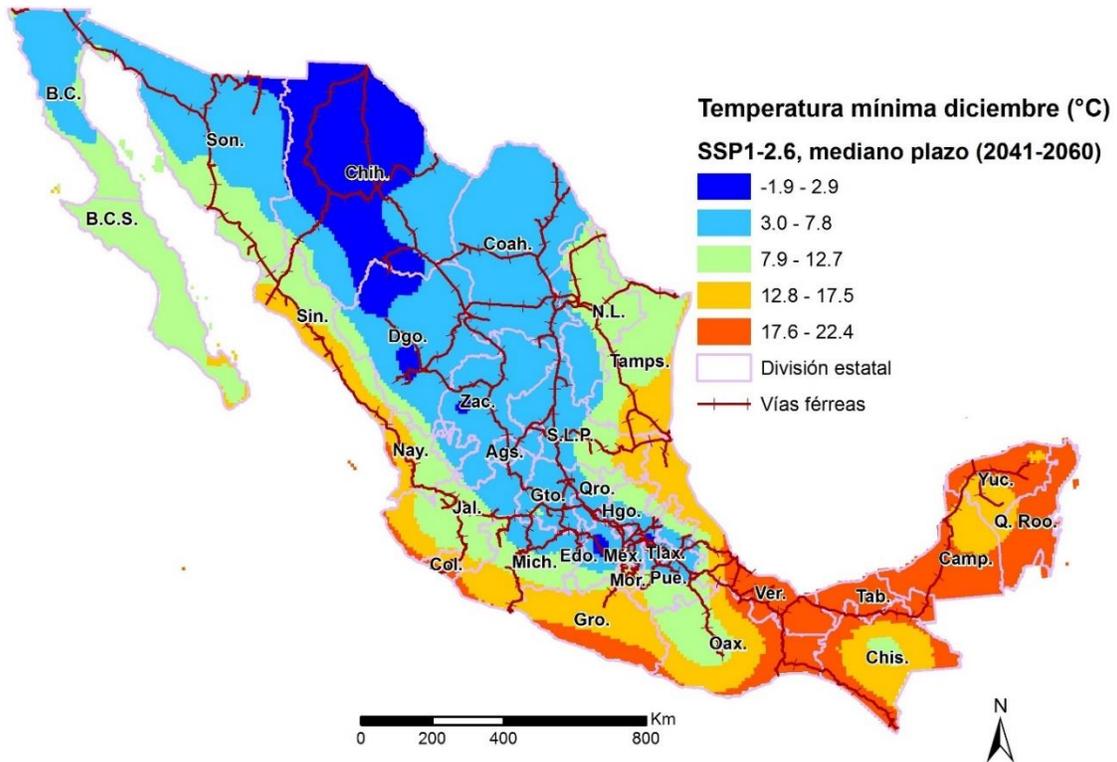


Figura 3.70 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

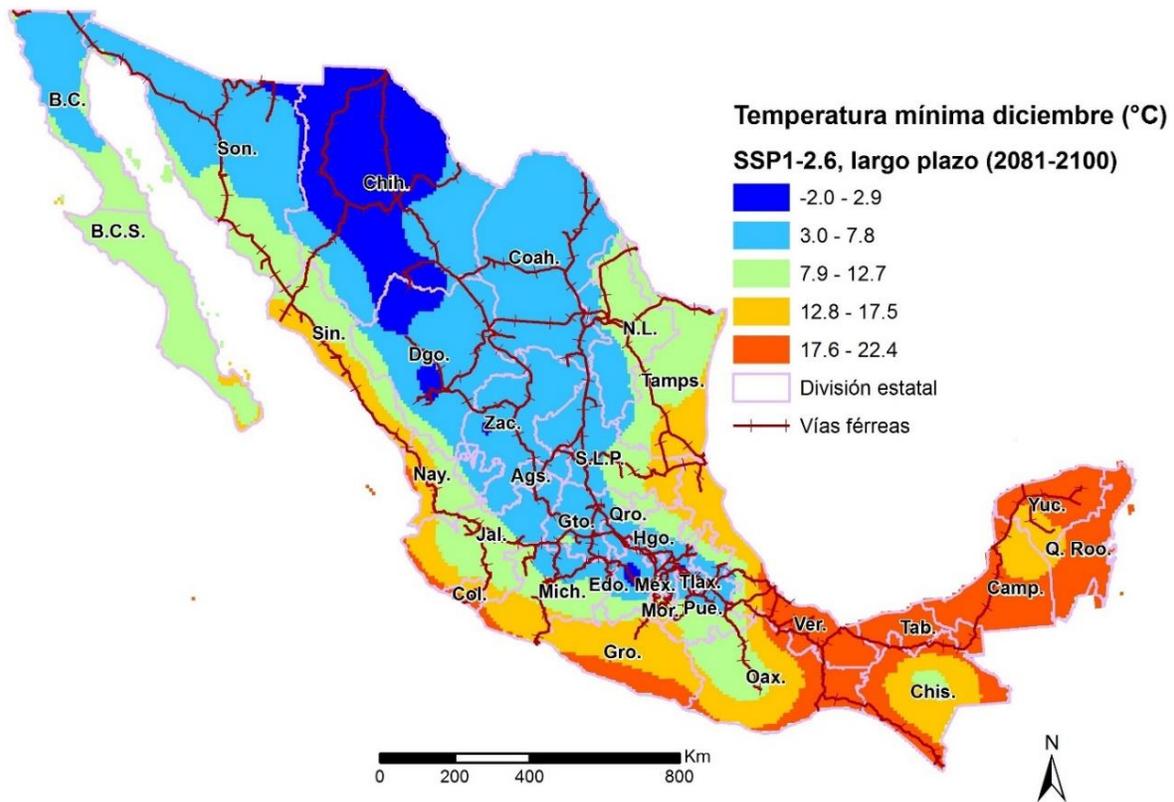


Figura 3.71 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP1-2.6 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de enero, en la Figura 3.72 se puede observar la temperatura mínima promedio, estimada en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP1-2.6 en México, en las Figuras 3.73 y 3.74 se muestra la estimación para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en general se puede apreciar un leve aumento de la temperatura mínima promedio en prácticamente todas las entidades federativas, siendo algunas zonas de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y el Estado de México en las que se mantienen las temperaturas mínimas promedio bajo cero en el mes de enero, alcanzando una temperatura mínima promedio de -1.7°C en el largo plazo en comparación con los -1.9°C en el corto plazo.

Por lo que, principalmente el estado de Chihuahua tendría que continuar con medidas preventivas para mitigar los impactos negativos de las bajas temperaturas en sus vías férreas.

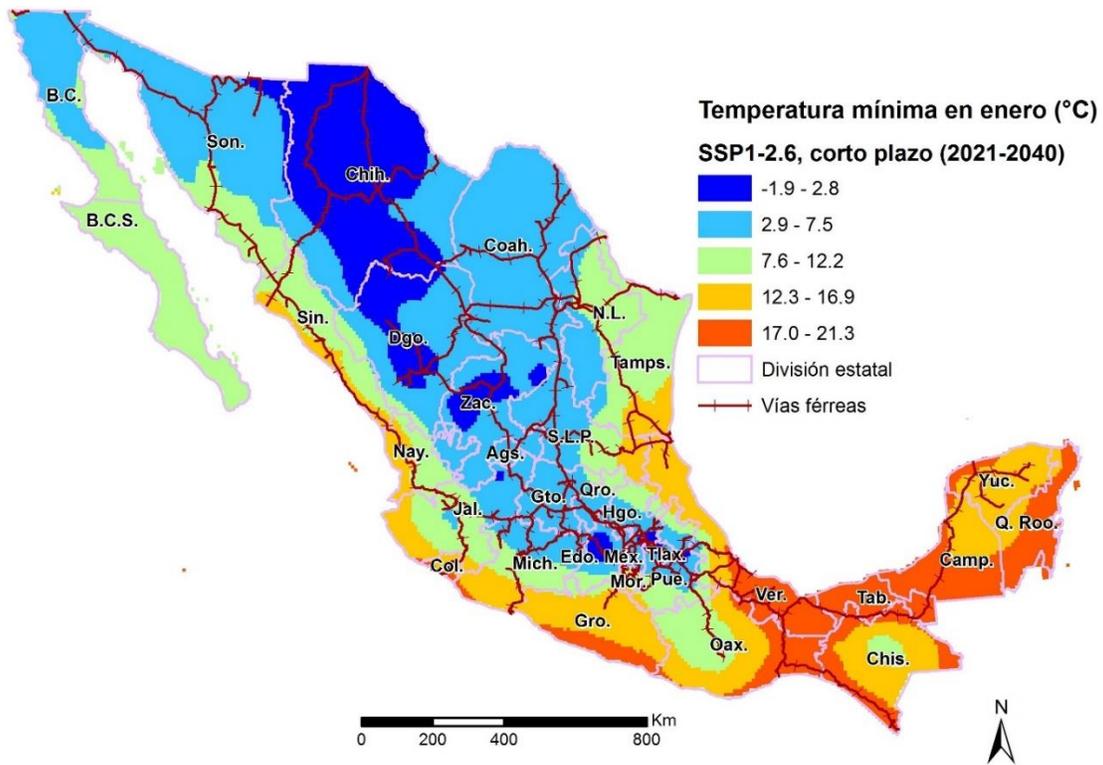


Figura 3.72 Temperatura mínima en enero, escenario SSP1-2.6 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

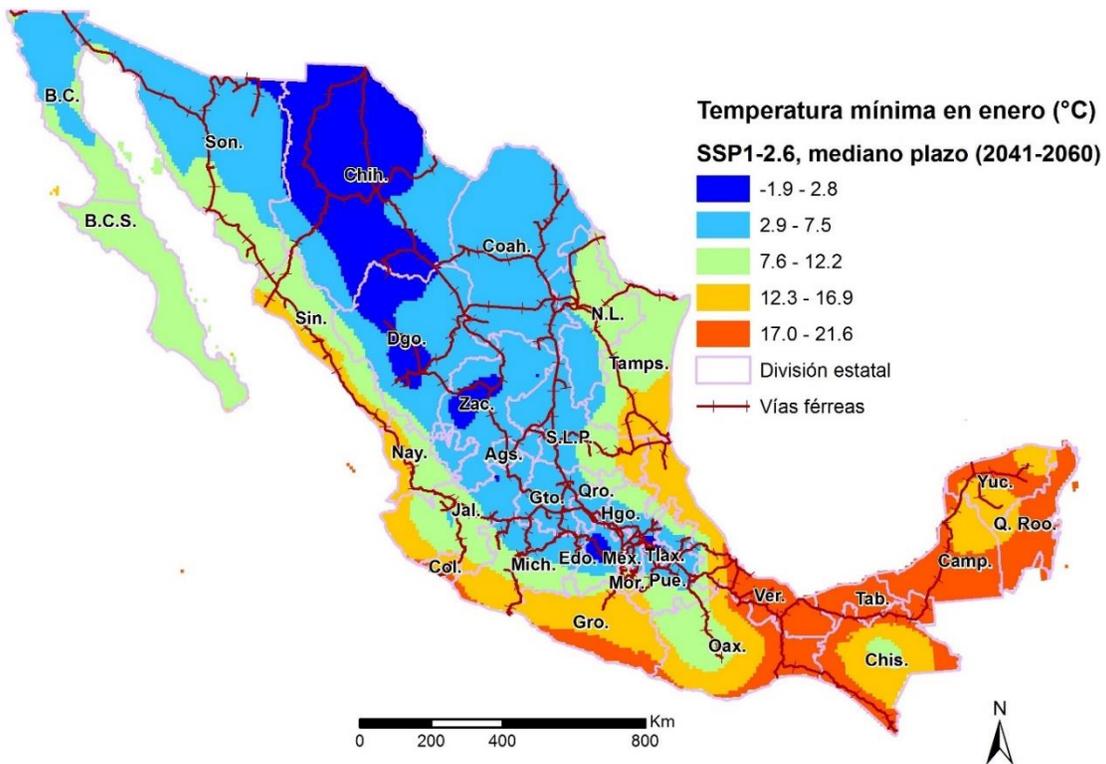


Figura 3.73 Temperatura mínima en enero, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

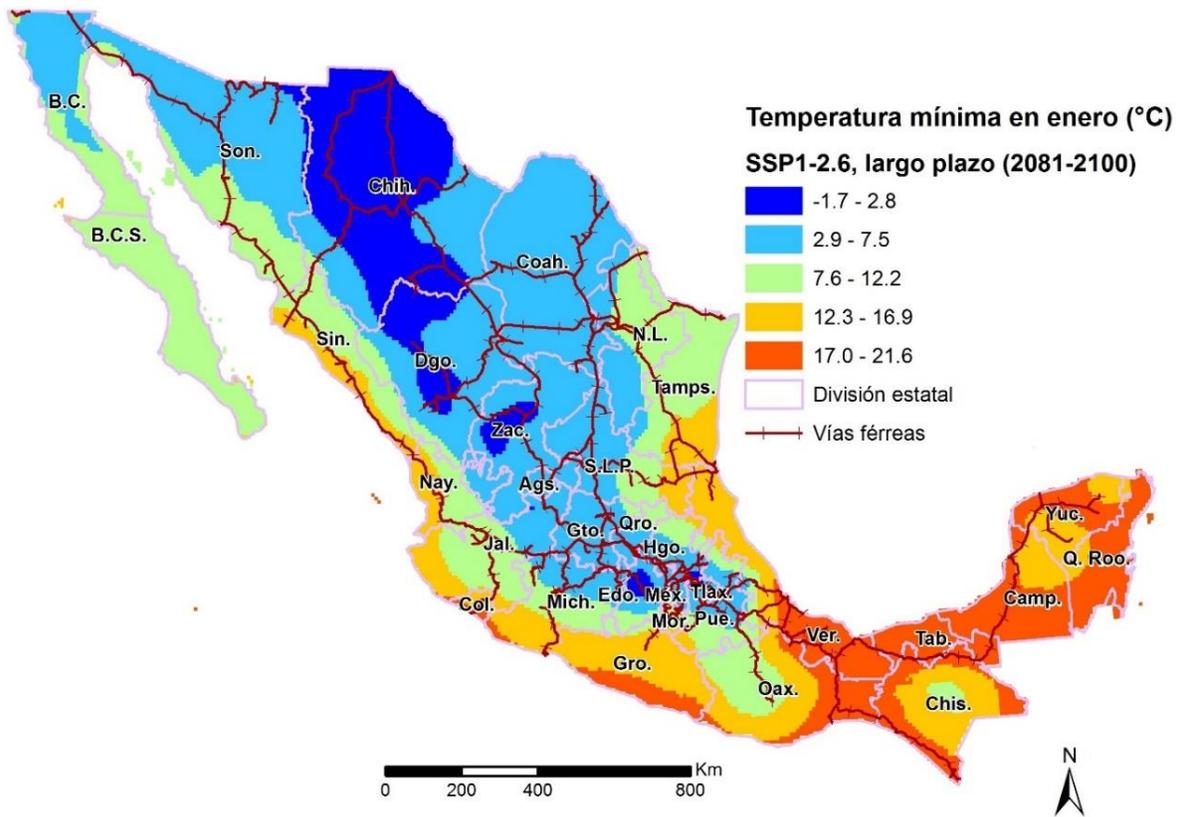


Figura 3.74 Temperatura mínima en enero, escenario SSP1-2.6 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de febrero, en la Figura 3.75 se puede observar la temperatura mínima promedio, estimada en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP1-2.6 en México, en las Figuras 3.76 y 3.77 se muestra la estimación para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un leve aumento de la temperatura mínima promedio en prácticamente todas las entidades federativas, siendo algunas zonas de los estados de Chihuahua, Durango, Zacatecas y el Estado de México en las que se mantienen las temperaturas mínimas promedio bajo cero, en el mediano y largo plazo, alcanzando una temperatura mínima de -0.9°C en el largo plazo en comparación con la temperatura de -1.1°C en el corto plazo.

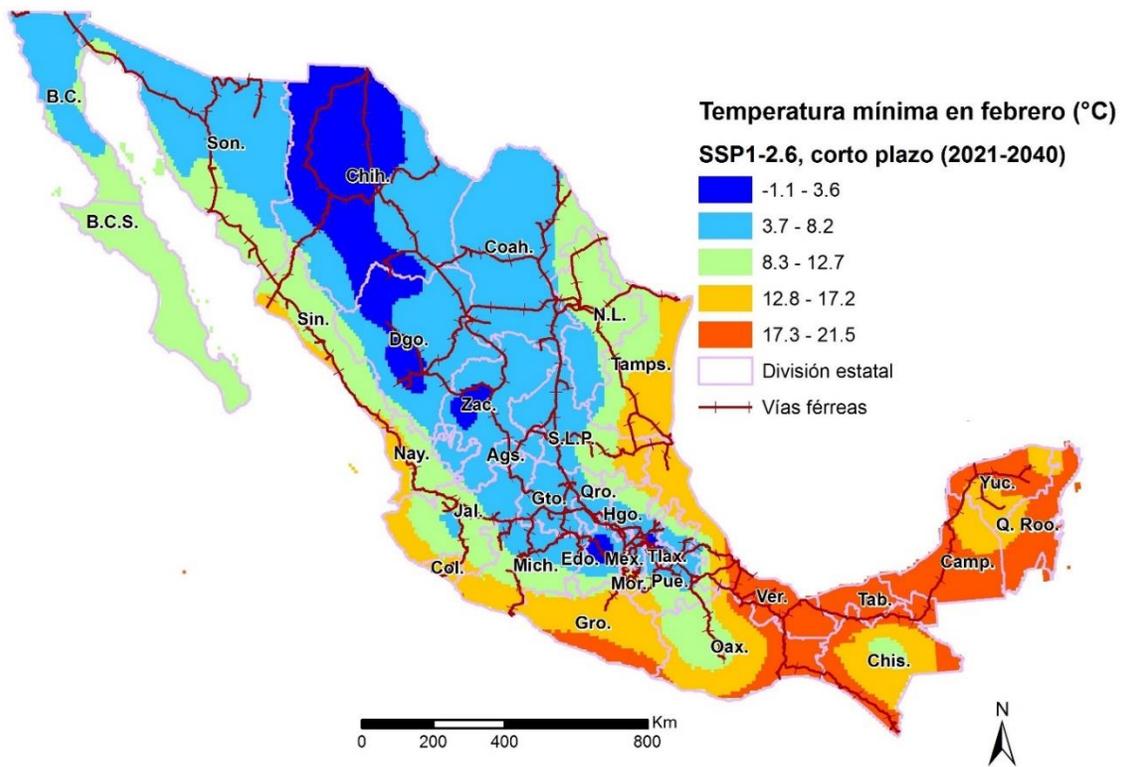


Figura 3.75 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP1-2.6 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

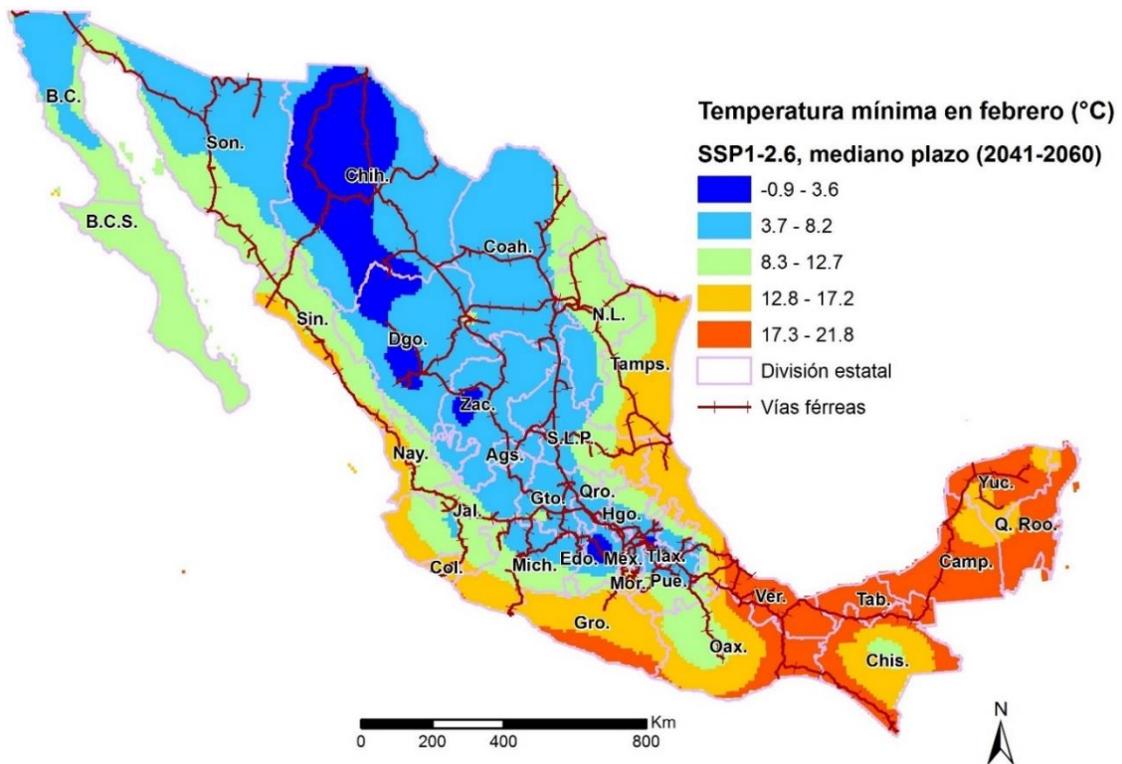


Figura 3.76 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

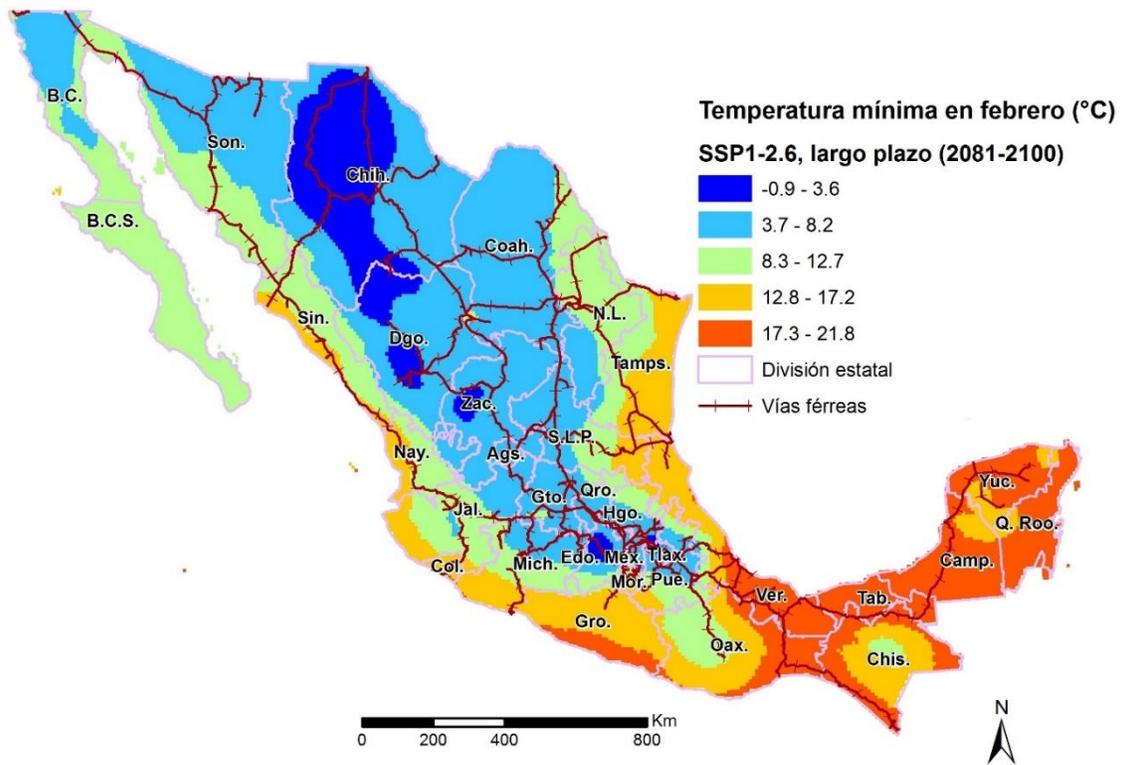


Figura 3.77 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP1-2.6 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.4.2 Temperatura mínima promedio mensual en el escenario SSP2-4.5

En la Figura 3.78 se muestra la temperatura mínima promedio estimada para el mes de diciembre, en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP2-4.5 en México, en las Figuras 3.79 y 3.80 se muestra la estimación para el mediano y largo plazo, respectivamente; en general, se presentaría un mínimo aumento de la temperatura mínima promedio mensual en prácticamente todas las entidades federativas, siendo el estado de Chihuahua el que, a pesar del aumento de su temperatura, aún mantendría las temperaturas mínimas promedio bajo cero, en el mediano y largo plazo, alcanzando una temperatura mínima promedio de $-0.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el largo plazo, en comparación con la temperatura mínima promedio de $-2.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el corto plazo.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

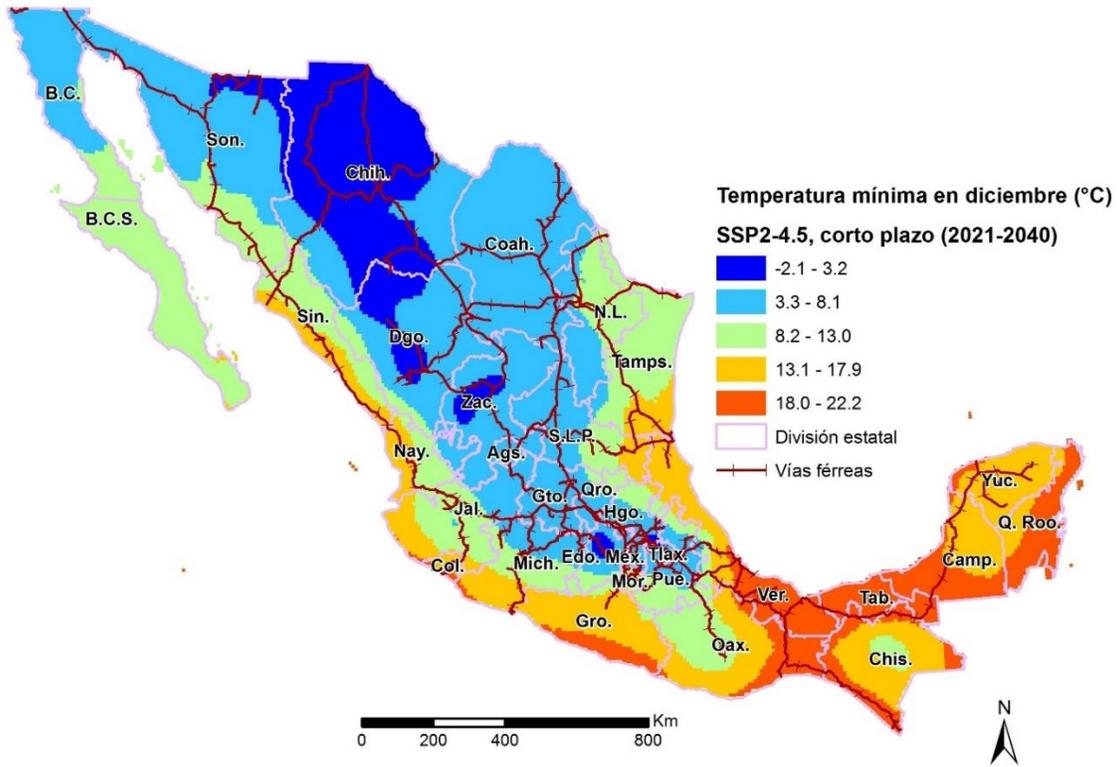


Figura 3.78 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP2-4.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

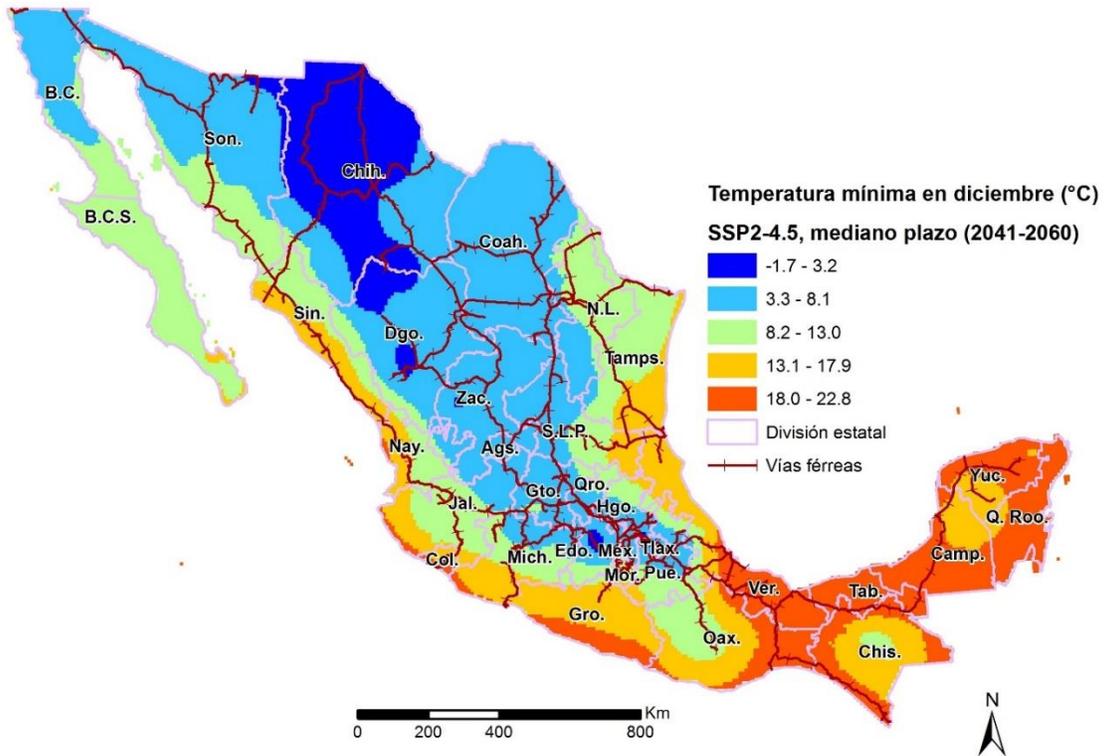


Figura 3.79 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP2-4.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

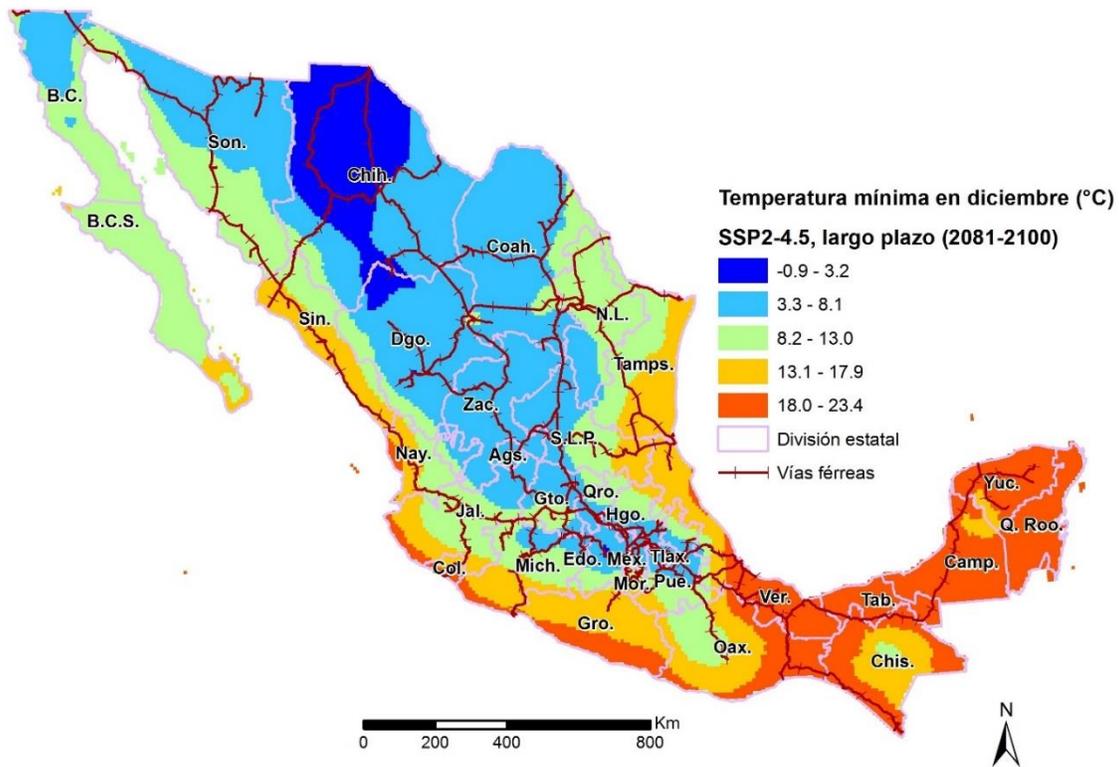


Figura 3.80 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP2-4.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de enero, en la Figura 3.81 se puede observar la temperatura mínima promedio estimada en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP2-4.5 en México, en las Figuras 3.82 y 3.83 se muestra la estimación para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en general se puede apreciar un mínimo aumento de la temperatura promedio mensual en prácticamente todas las entidades federativas, siendo el estado de Chihuahua el que mantiene su temperatura mínima promedio bajo cero en el largo plazo, alcanzando una temperatura mínima promedio de $-0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el largo plazo en comparación con la temperatura mínima promedio de $-1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el mediano plazo y de $-1.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el corto plazo.

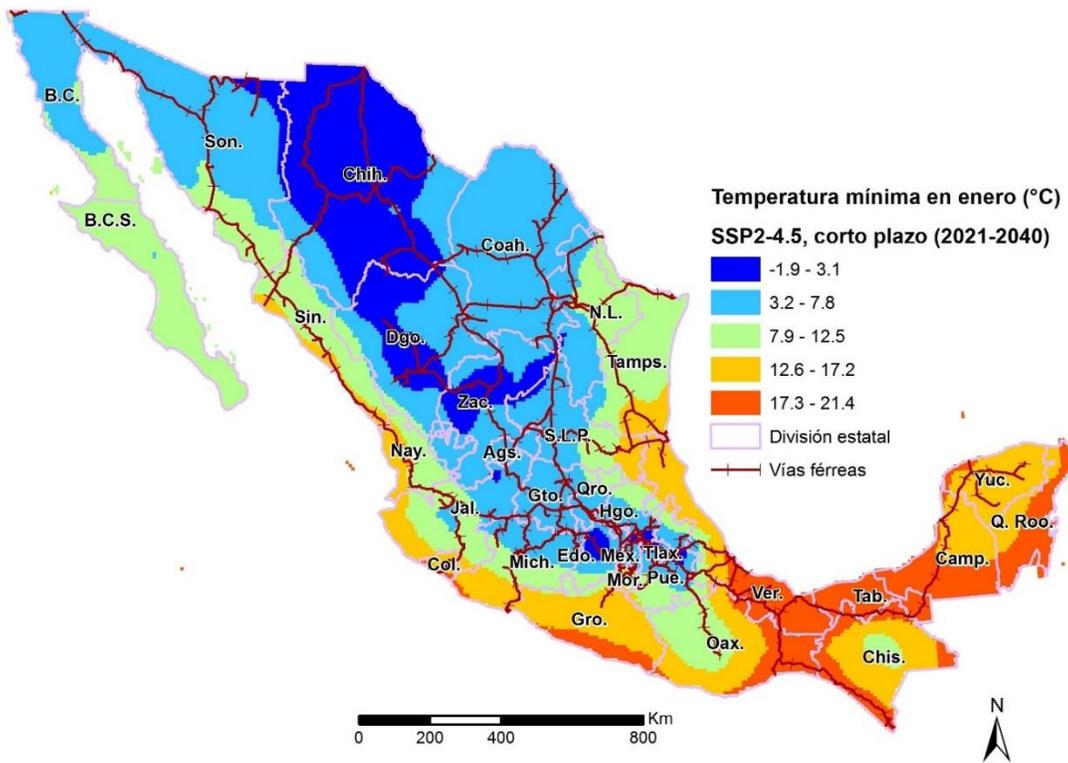


Figura 3.81 Temperatura mínima en enero, escenario SSP2-4.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

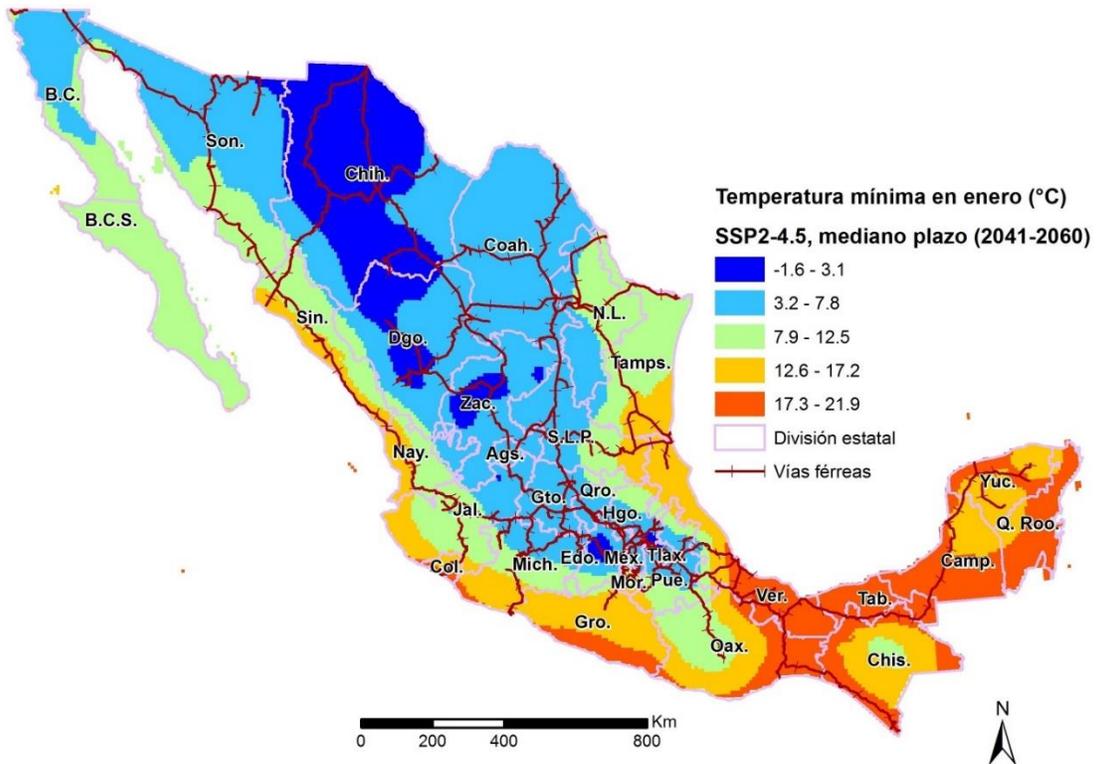


Figura 3.82 Temperatura mínima en enero, escenario SSP2-4.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

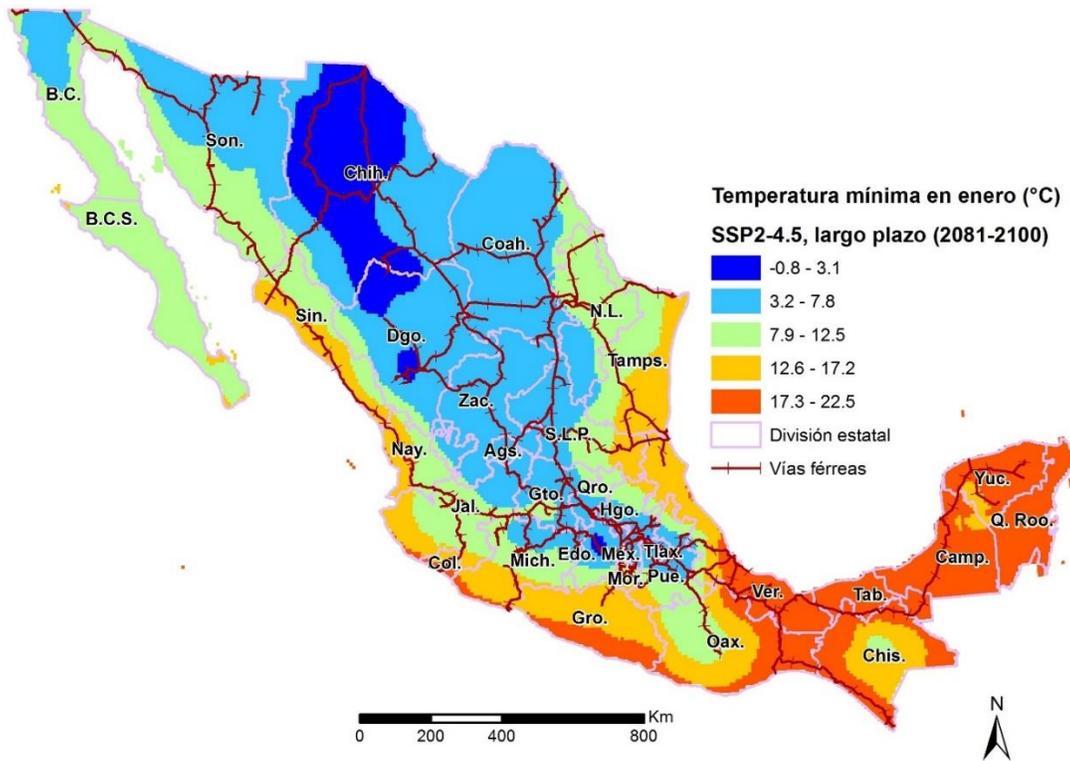


Figura 3.83 Temperatura mínima en enero, escenario SSP2-4.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de febrero, en la Figura 3.84 se puede observar la temperatura mínima promedio estimada en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP2-4.5 en México, en las Figuras 3.85 y 3.86 se muestra la estimación de la temperatura mínima promedio para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, de tal manera que en el largo plazo ninguna entidad federativa tendría temperaturas mínimas promedio bajo cero en el mes de febrero, presentándose una temperatura mínima promedio de 0.1°C en comparación con la temperatura mínima promedio de -0.6 °C en el mediano plazo y de -1.1 °C en el corto plazo.

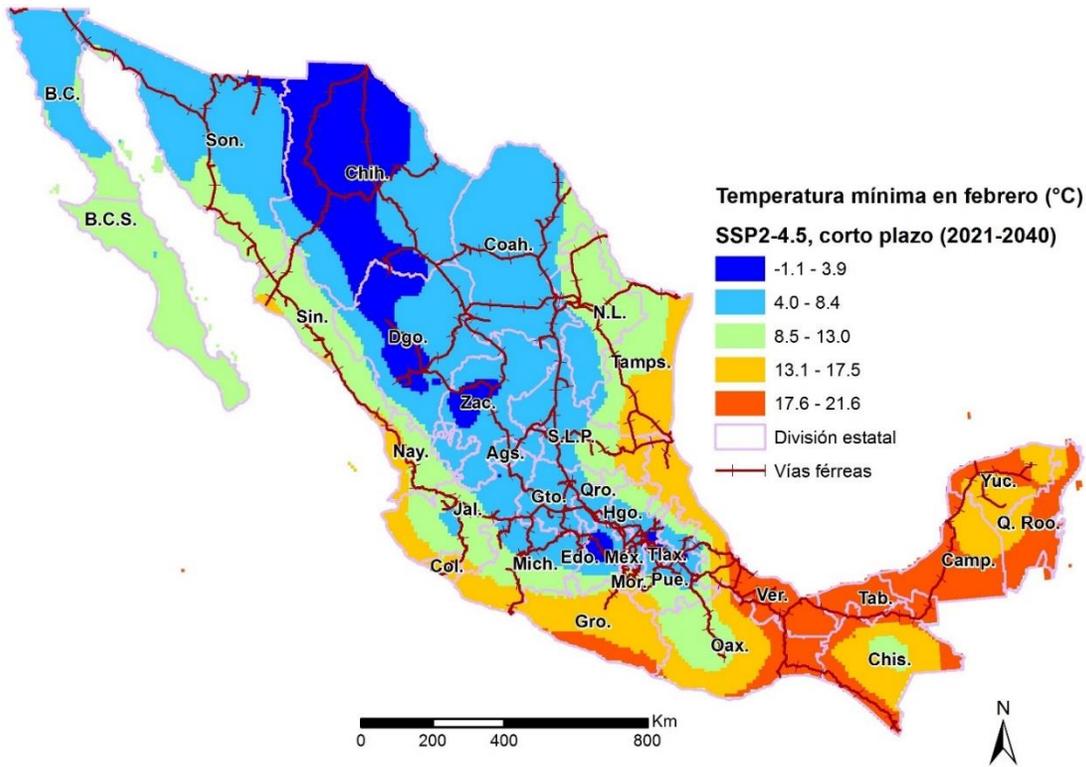


Figura 3.84 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP2-4.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

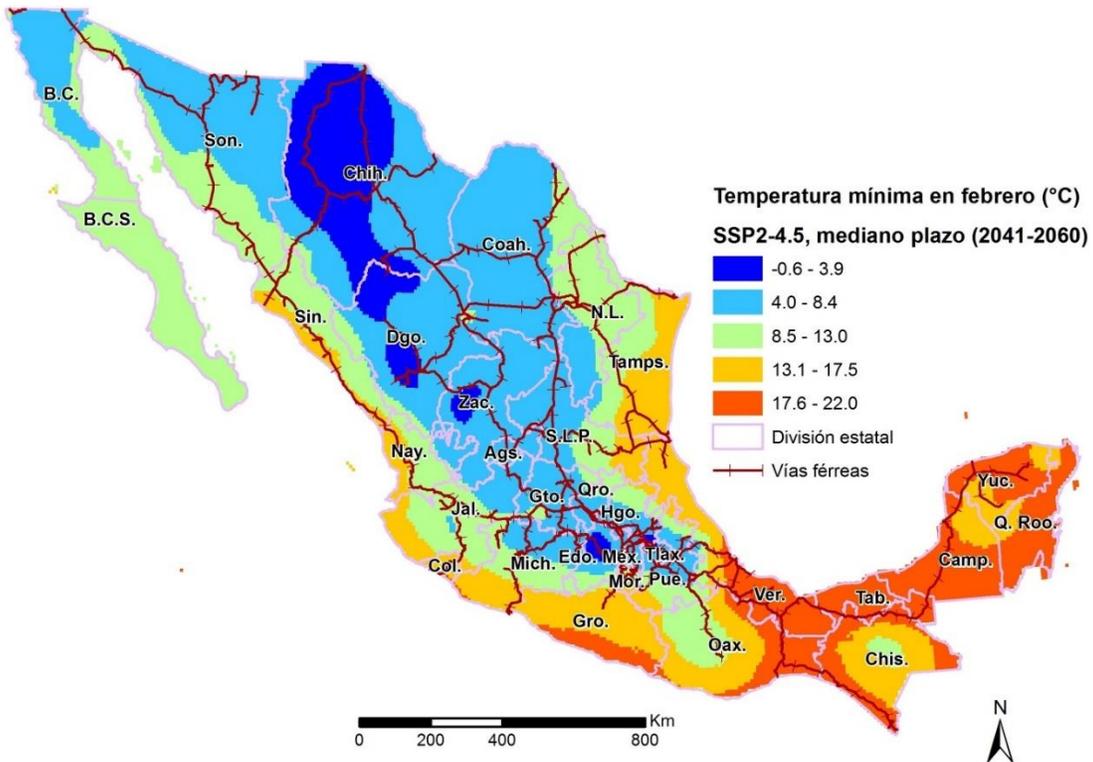


Figura 3.85 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP2-4.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

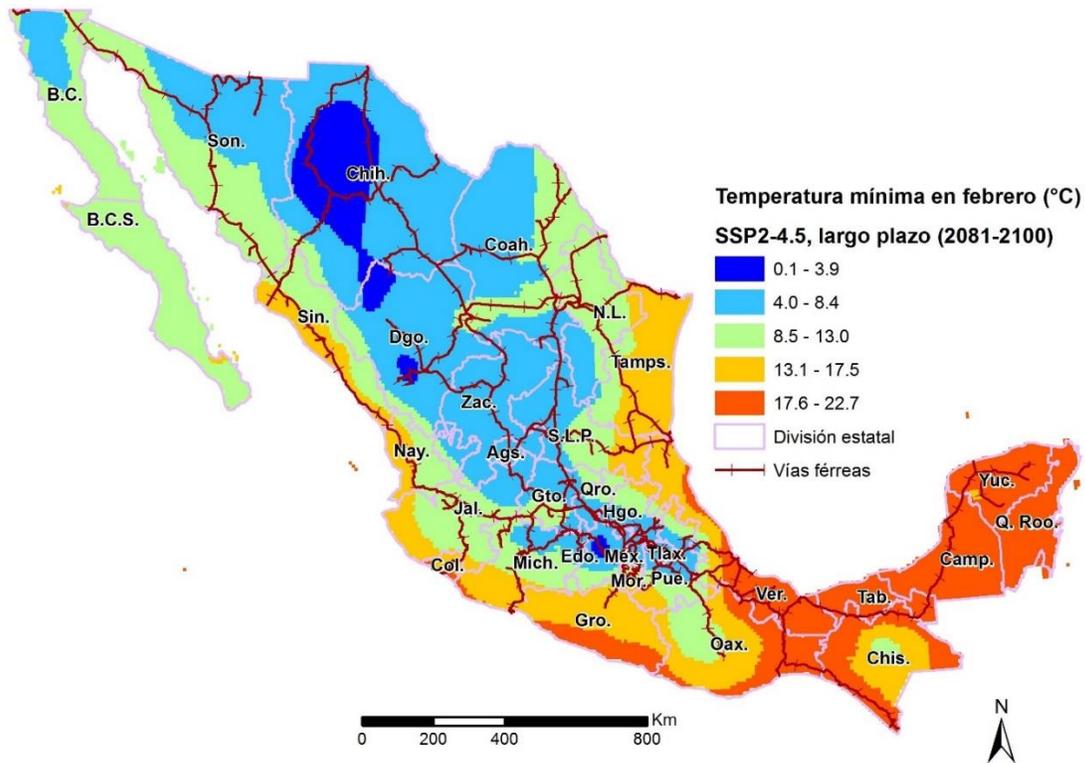


Figura 3.86 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP2-4.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.4.3 Temperatura mínima promedio mensual en el escenario SSP3-7.0

En la Figura 3.87 se muestra la temperatura mínima promedio estimada para el mes de diciembre en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP3-7.0 en México, en las Figuras 3.88 y 3.89 se muestra la estimación para el mediano y largo plazo, respectivamente; en general se presentaría un aumento de la temperatura mínima en prácticamente todas las entidades federativas, siendo el estado de Chihuahua el que, a pesar del aumento de su temperatura mínima promedio en diciembre, mantendría la temperatura mínima promedio bajo cero solo para el mediano plazo, ya que en el largo plazo ninguna entidad federativa tendría temperaturas mínimas promedio bajo cero en el mes de diciembre.

Los estados de la República Mexicana que menores temperaturas mínimas promedio tendrían en diciembre estarían en el rango inferior de una temperatura mínima promedio de $-2.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el corto plazo, de $-1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en el mediano plazo y de $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ en largo plazo.

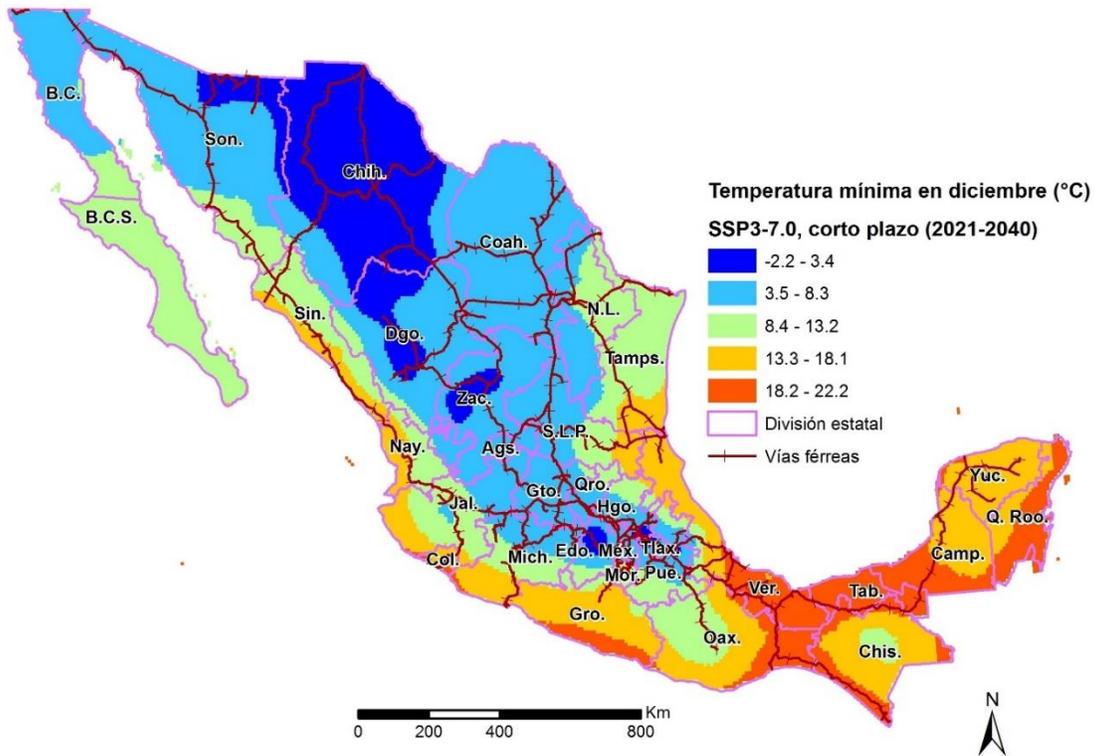


Figura 3.87 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP3-7.0 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

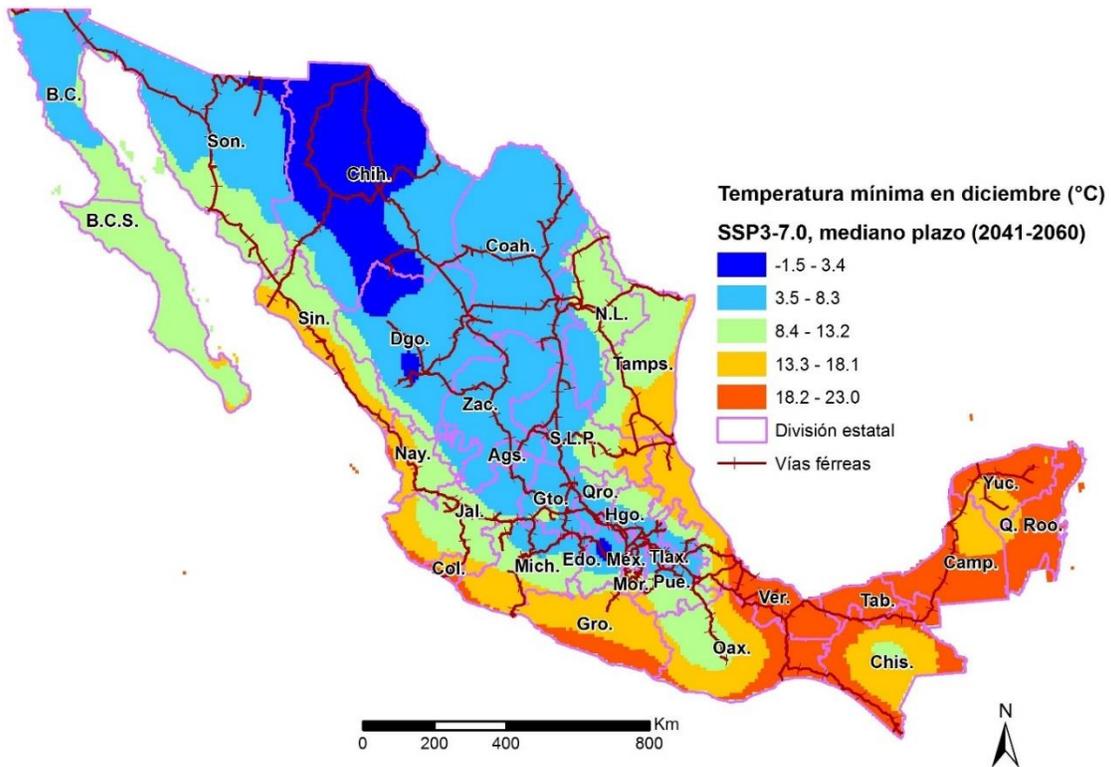


Figura 3.88 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP3-7.0 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

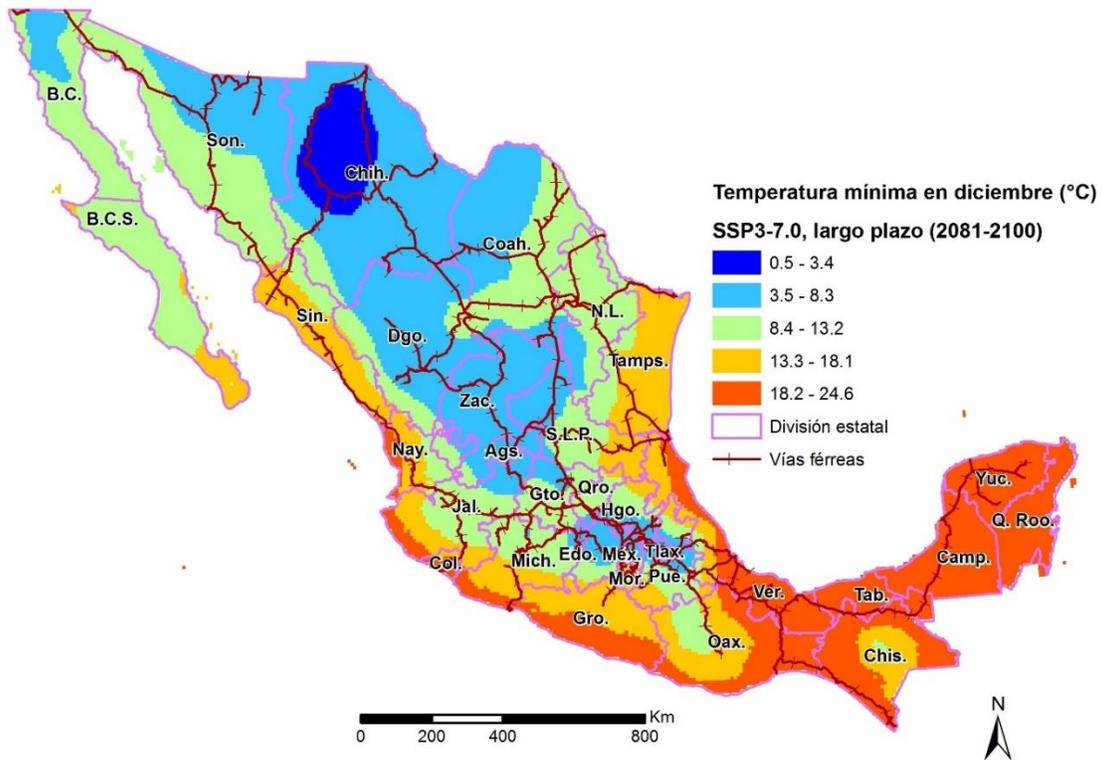


Figura 3.89 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP3-7.0 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de enero, en la Figura 3.90 se puede observar la temperatura mínima estimada en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP3-7.0 en México, en las Figuras 3.91 y 3.92 se muestra la estimación de la temperatura mínima en enero para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en general se puede apreciar un aumento de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, por lo que en el largo plazo ninguno de los estados tendrían temperaturas mínimas bajo cero en promedio, en el mes de enero.

Los estados de la República Mexicana que menores temperaturas promedio tendrían en el mes de enero oscilarían en el rango inferior de -1.9 °C en el corto plazo, de -1.3 °C en el mediano plazo y de 0.4°C en largo plazo.

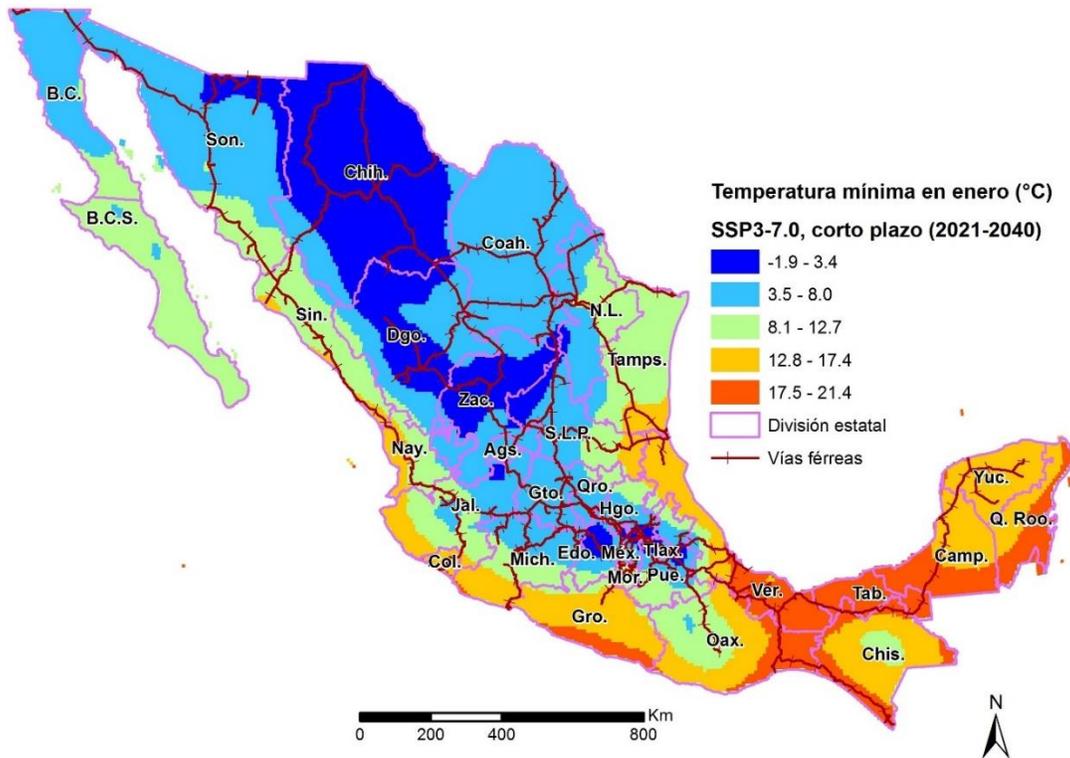


Figura 3.90 Temperatura mínima en enero, escenario SSP3-7.0 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

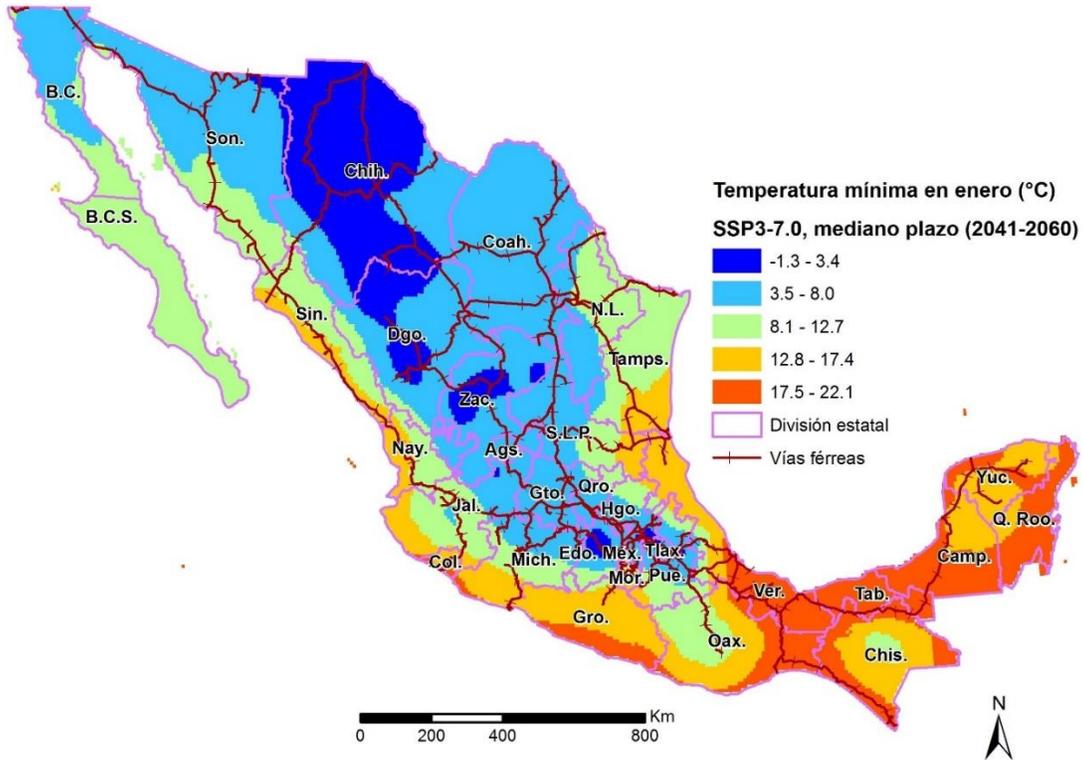


Figura 3.91 Temperatura mínima en enero, escenario SSP3-7.0 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

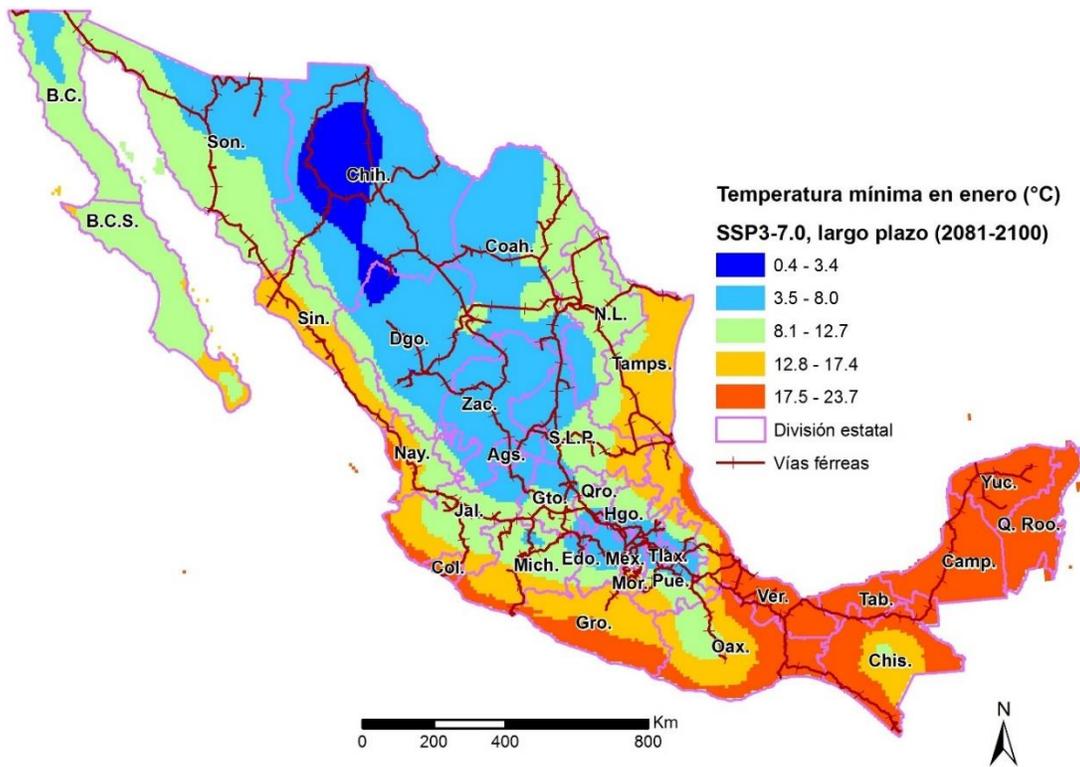


Figura 3.92 Temperatura mínima en enero, escenario SSP3-7.0 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de febrero, en la Figura 3.93 se puede observar la temperatura mínima promedio estimada en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP3-7.0 en México, en las Figuras 3.94 y 3.95 se muestra la estimación de la temperatura mínima promedio en febrero para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, de tal manera que en el largo plazo ninguna entidad federativa tendría temperaturas mínimas promedio bajo cero en el mes de febrero, teniendo una temperatura mínima promedio de 1.3°C en comparación con la temperatura promedio de -0.5 °C en el mediano plazo y de -1.1 °C en el corto plazo.

Por ejemplo, el Estado de México y Chihuahua dejarían de tener temperaturas mínimas promedio bajo cero en el mes de febrero, a partir del 2081 (ver Figura 3.95).

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

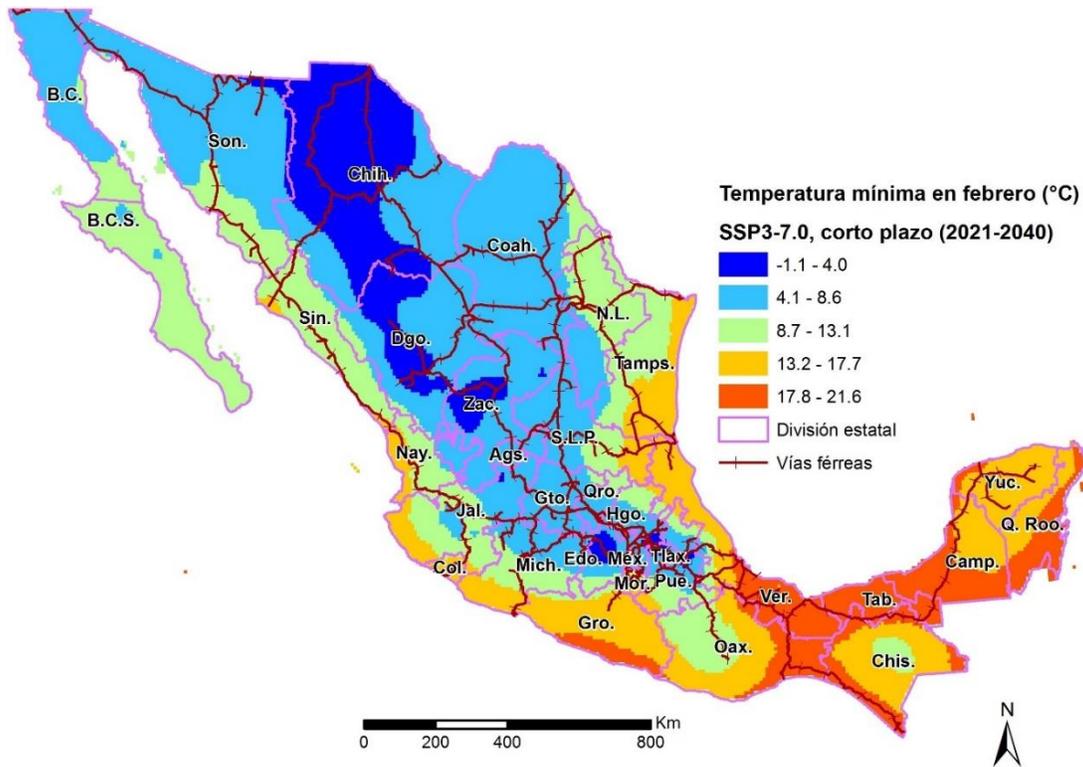


Figura 3.93 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP3-7.0 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

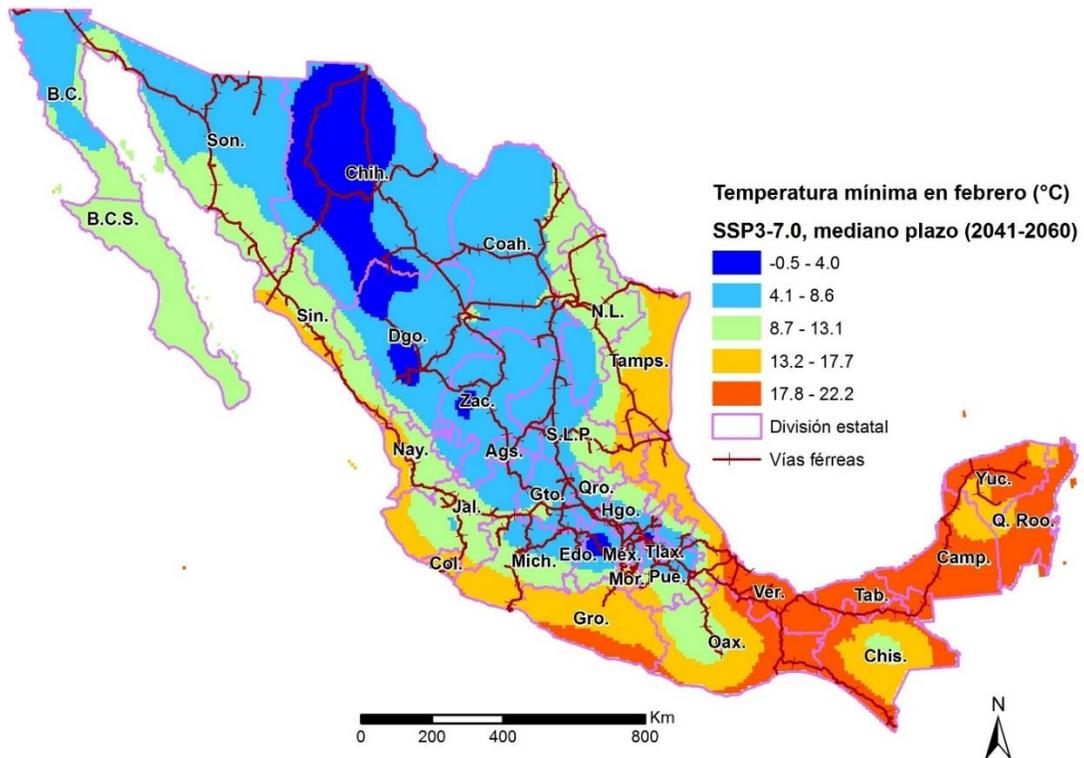


Figura 3.94 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP3-7.0 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

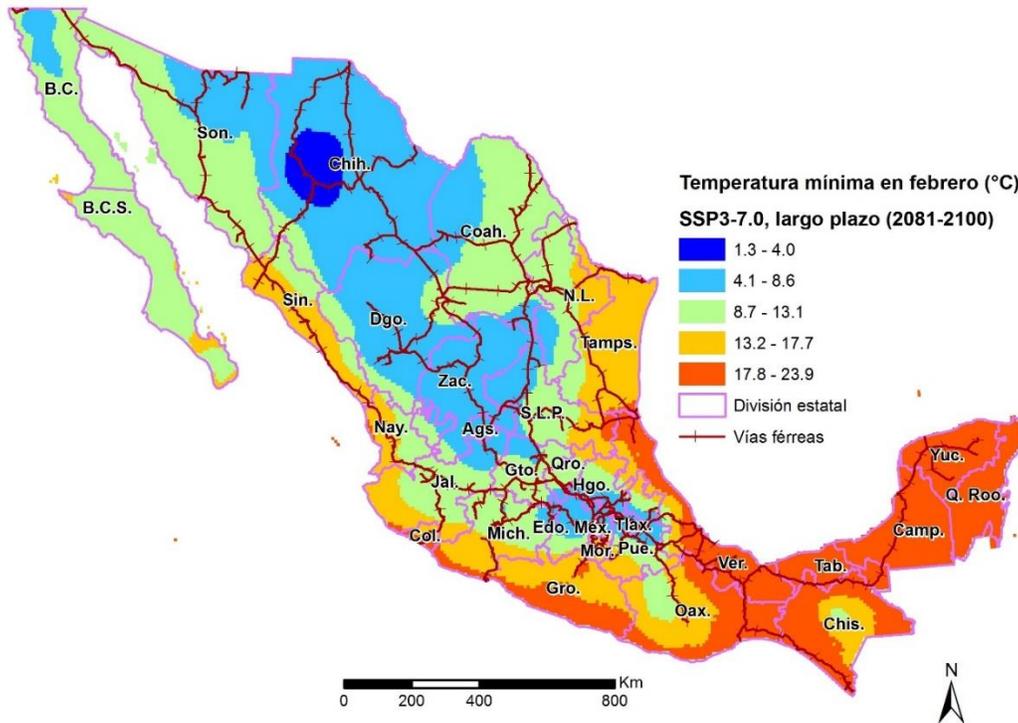


Figura 3.95 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP3-7.0 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.2.4.4 Temperatura mínima mensual en SSP5-8.5

En la Figura 3.96 se muestra la temperatura mínima promedio estimada para el mes de diciembre en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP5-8.5 en México, en las Figuras 3.97 y 3.98 se muestra la estimación para el mediano y largo plazo, respectivamente; en general se aprecia un aumento de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, siendo Chihuahua, Durango y el Estado de México, los estados que mantienen las temperaturas mínimas promedio más bajas hasta el mediano plazo, ya que en el largo plazo ninguna entidad federativa tendría temperaturas mínimas promedio bajo cero en el mes de diciembre.

Los estados de la República Mexicana que menores temperaturas promedio tendrían en diciembre estarían en el rango inferior de una temperatura mínima promedio de -2.1°C en el corto plazo, de -1.1°C en el mediano plazo y de 1.5°C en largo plazo.

3. Aproximación geoespacial para la adaptación del Sistema Ferroviario Mexicano ante el cambio climático

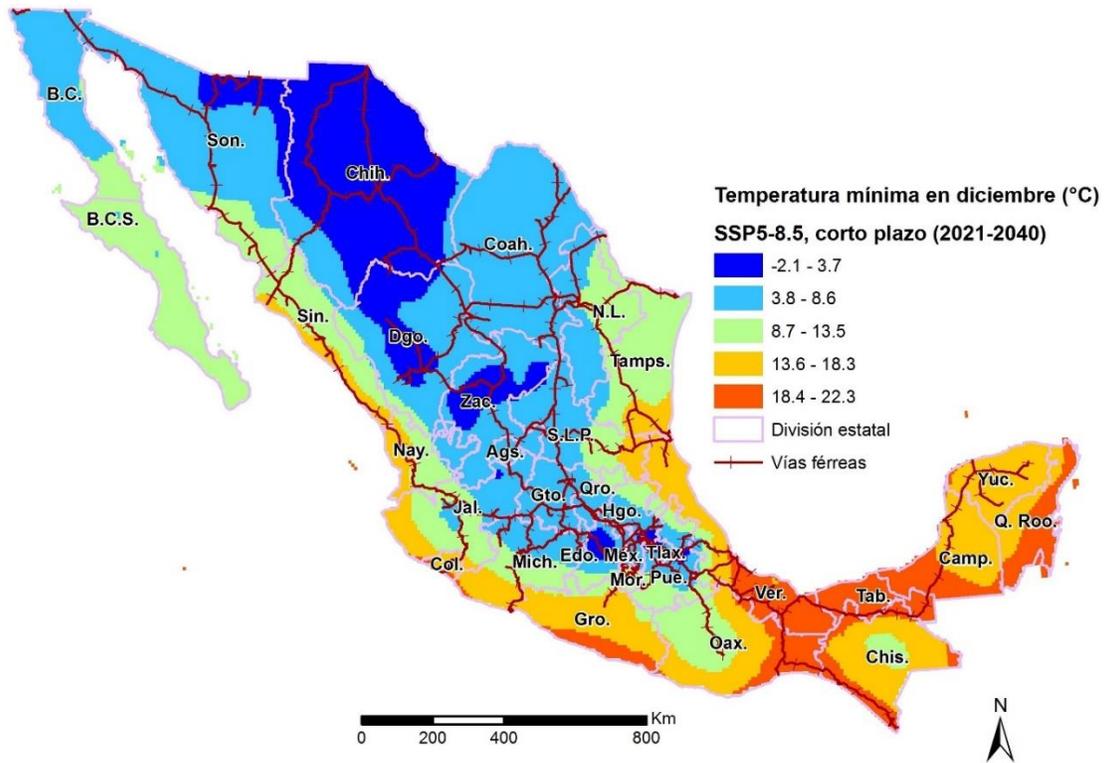


Figura 3.96 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP5-8.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

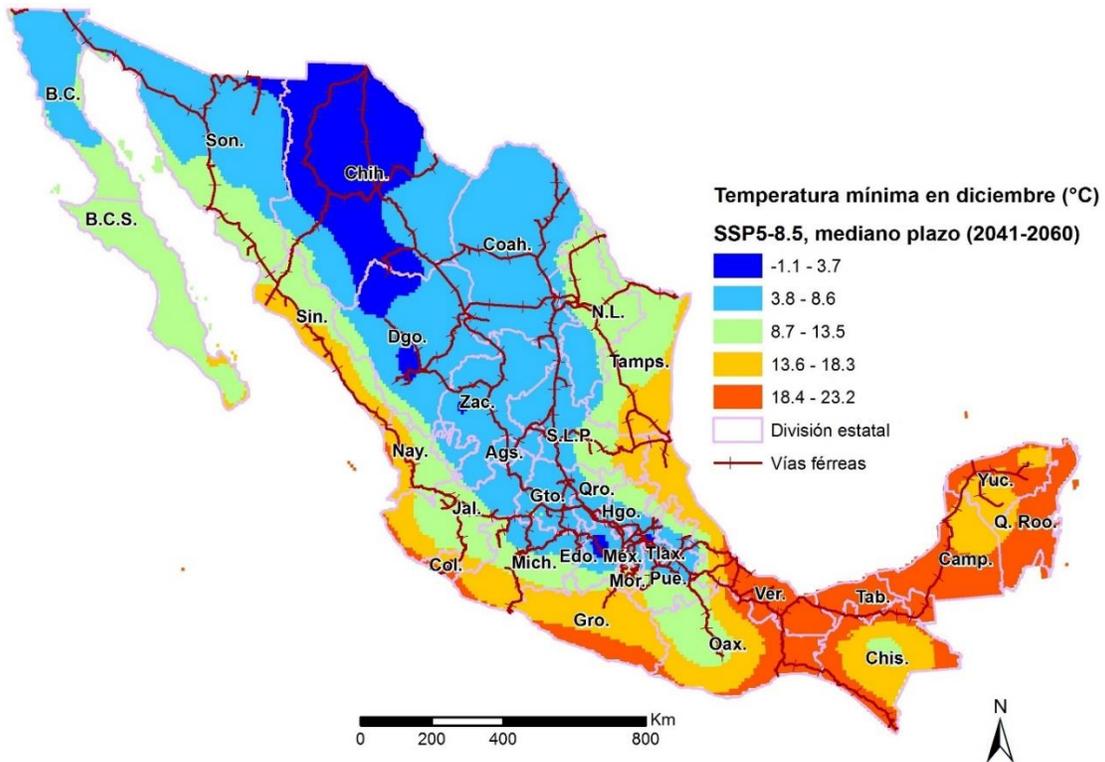


Figura 3.97 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP5-8.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

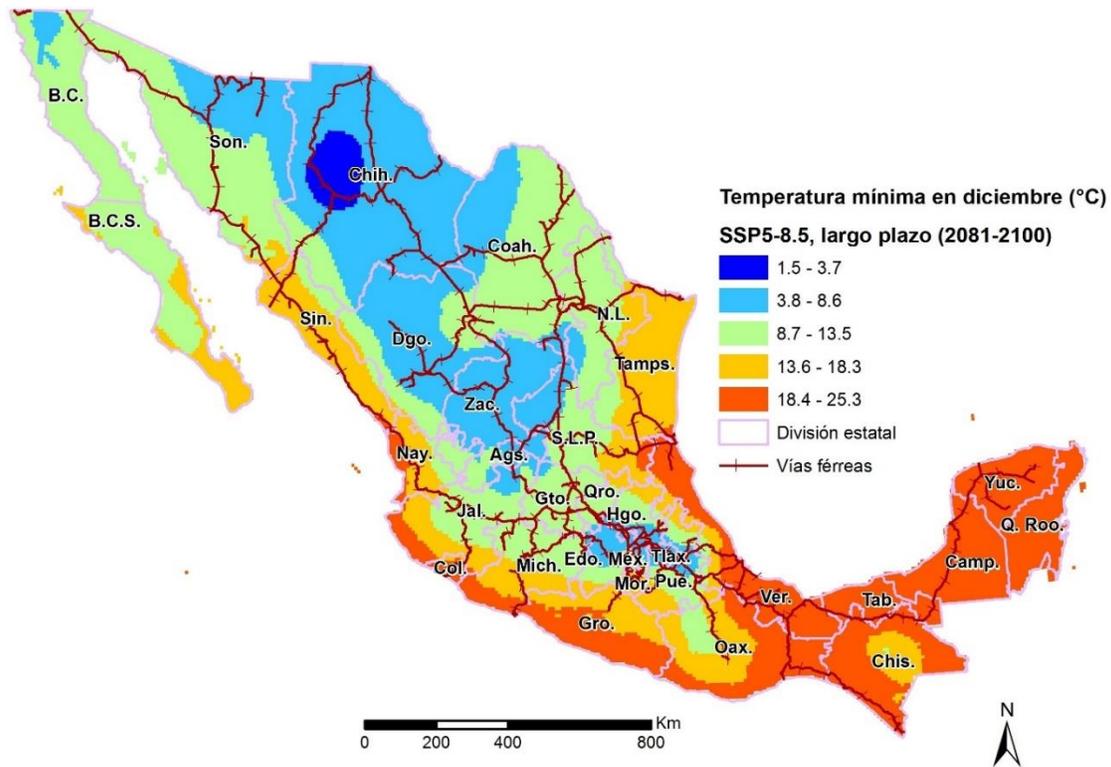


Figura 3.98 Temperatura mínima en diciembre, escenario SSP5-8.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de enero, en la Figura 3.99 se puede observar la temperatura mínima promedio estimada en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP5-8.5 en México, en las Figuras 3.100 y 3.101 se muestra la estimación de la temperatura mínima promedio en enero para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en general se puede apreciar un aumento de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, por lo que en el largo plazo ninguno de los estados tendrían temperaturas mínimas promedio bajo cero en promedio, en el mes de enero.

Los estados de la República Mexicana que menores temperaturas promedio tendrían en el mes de enero, como Chihuahua y Durango, estarían en el rango inferior de -1.8 °C en el corto plazo, de -1.1 °C en el mediano plazo y de 1.2 °C en largo plazo.

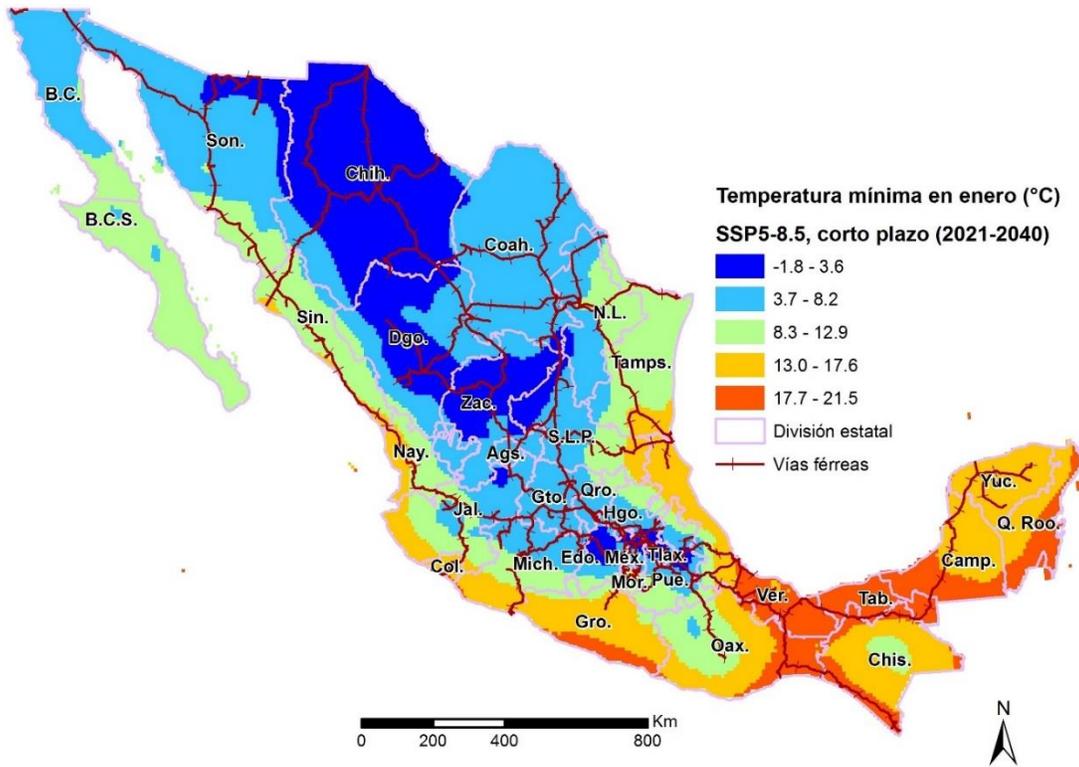


Figura 3.99 Temperatura mínima en enero, escenario SSP5-8.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

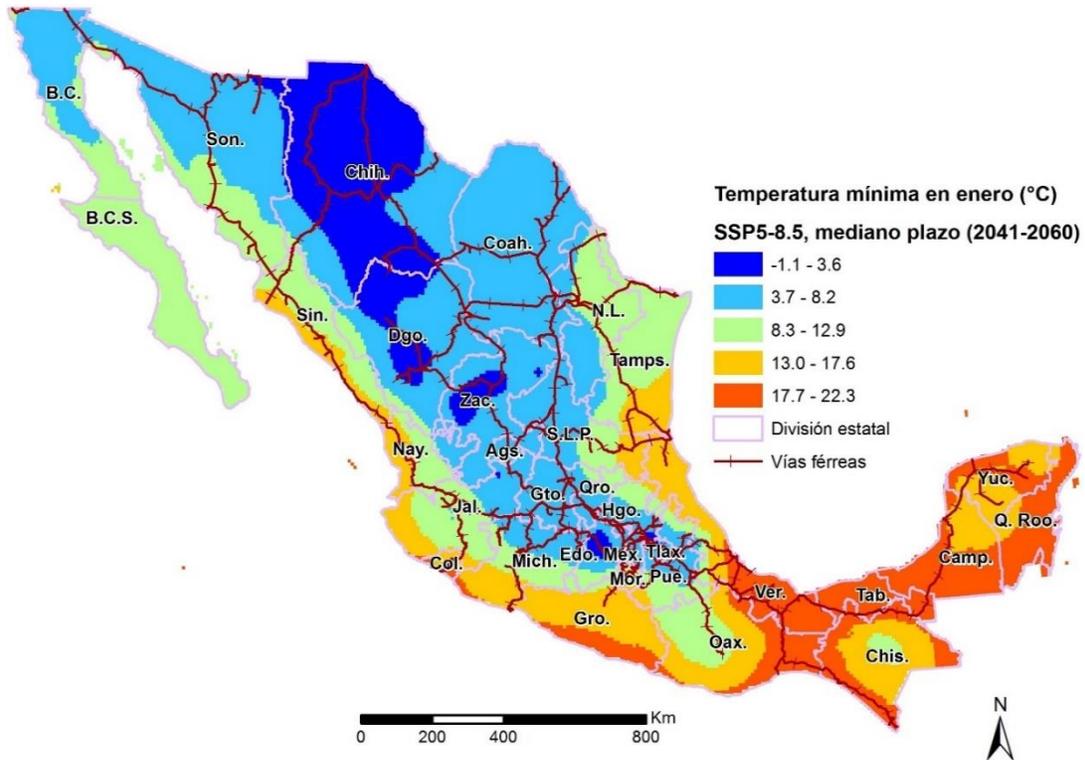


Figura 3.100 Temperatura mínima en enero, escenario SSP5-8.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

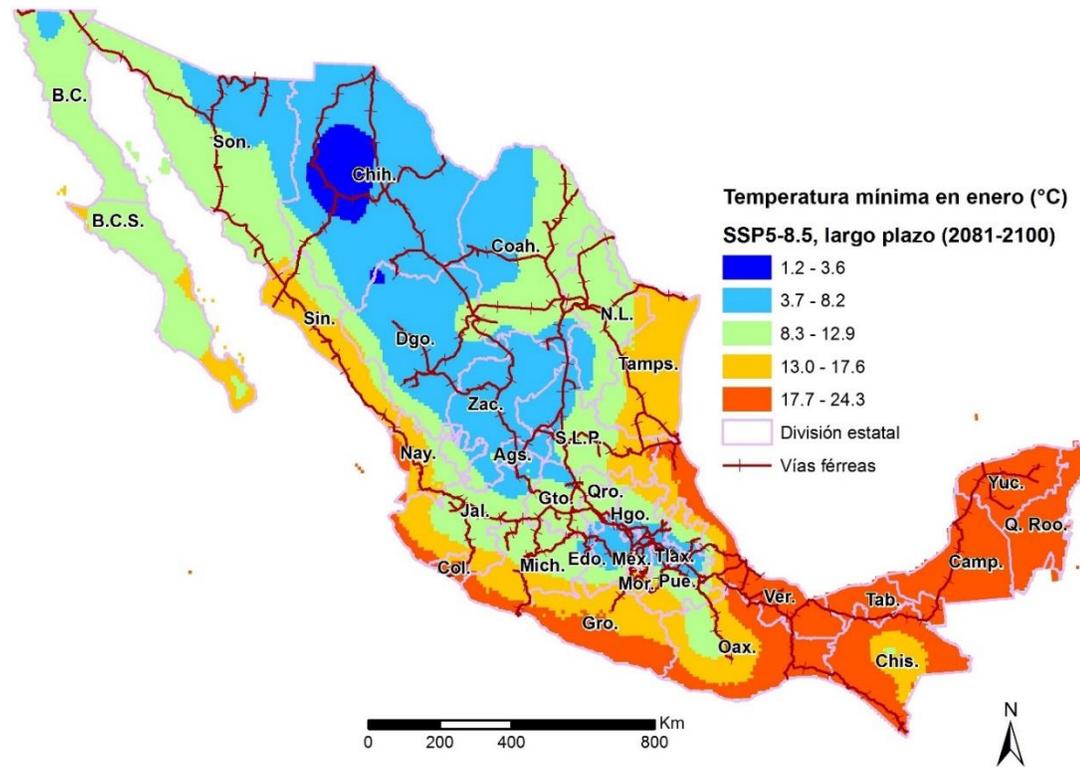


Figura 3.101 Temperatura mínima en enero, escenario SSP5-8.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

Para el caso del mes de febrero, en la Figura 3.102 se puede observar la temperatura mínima promedio estimada en el corto plazo (2021-2040), para el escenario SSP5-8.5 en México, en las Figuras 3.103 y 3.104 se muestra la estimación de la temperatura mínima promedio en febrero para el mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2100), respectivamente; en donde se puede observar un aumento considerable de la temperatura en prácticamente todas las entidades federativas, de tal manera que en el largo plazo ninguna entidad federativa tendría temperaturas mínimas promedio bajo cero en el mes de febrero, ya que en ese mes se tendría una temperatura mínima promedio de 2.3°C en comparación con la temperatura mínima promedio de -0.1 °C en el mediano plazo y de -1.1 °C en el corto plazo.

Por ejemplo, el Estado de México, Durango, Zacatecas y Chihuahua ya no tendrían temperaturas mínimas promedio bajo cero en el mes de febrero, a partir del año 2081 (ver Figura 3.104).

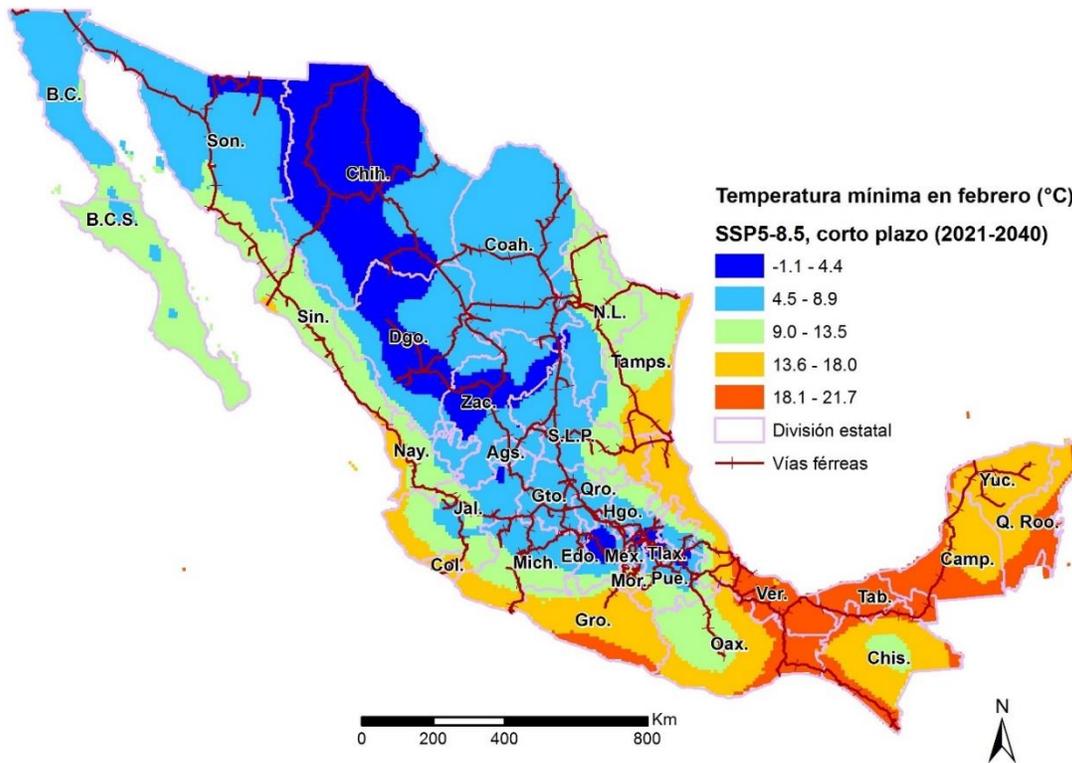


Figura 3.102 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP5-8.5 (2021-2040)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

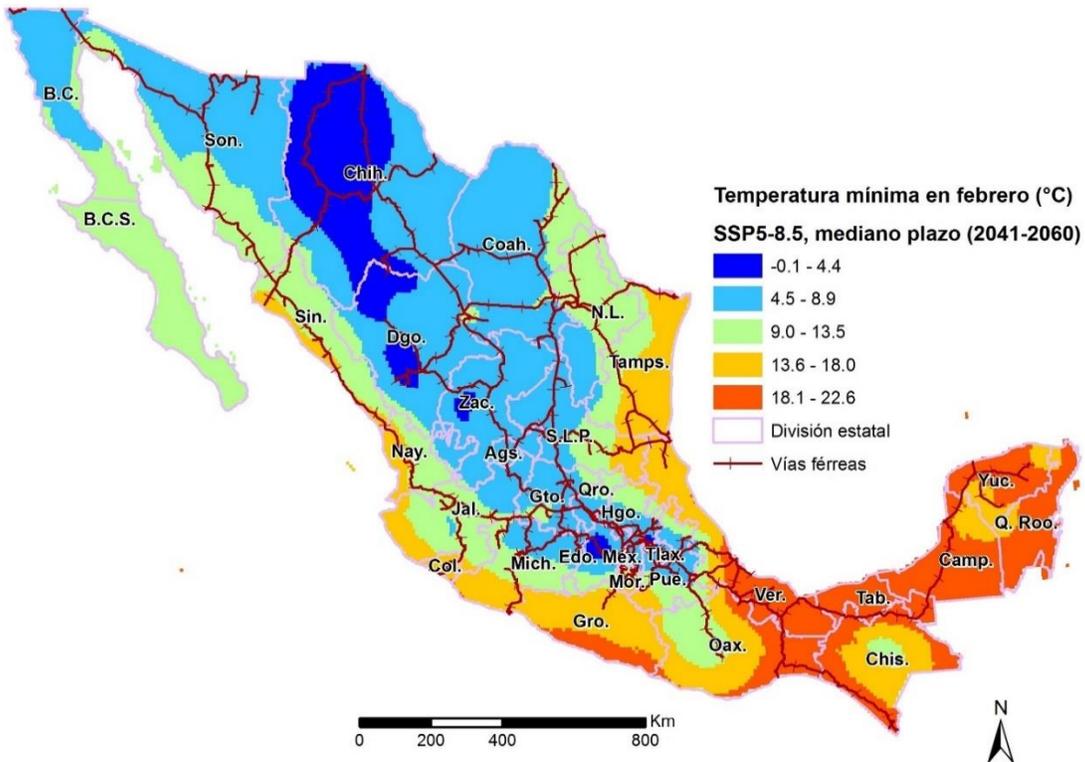


Figura 3.103 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP5-8.5 (2041-2060)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

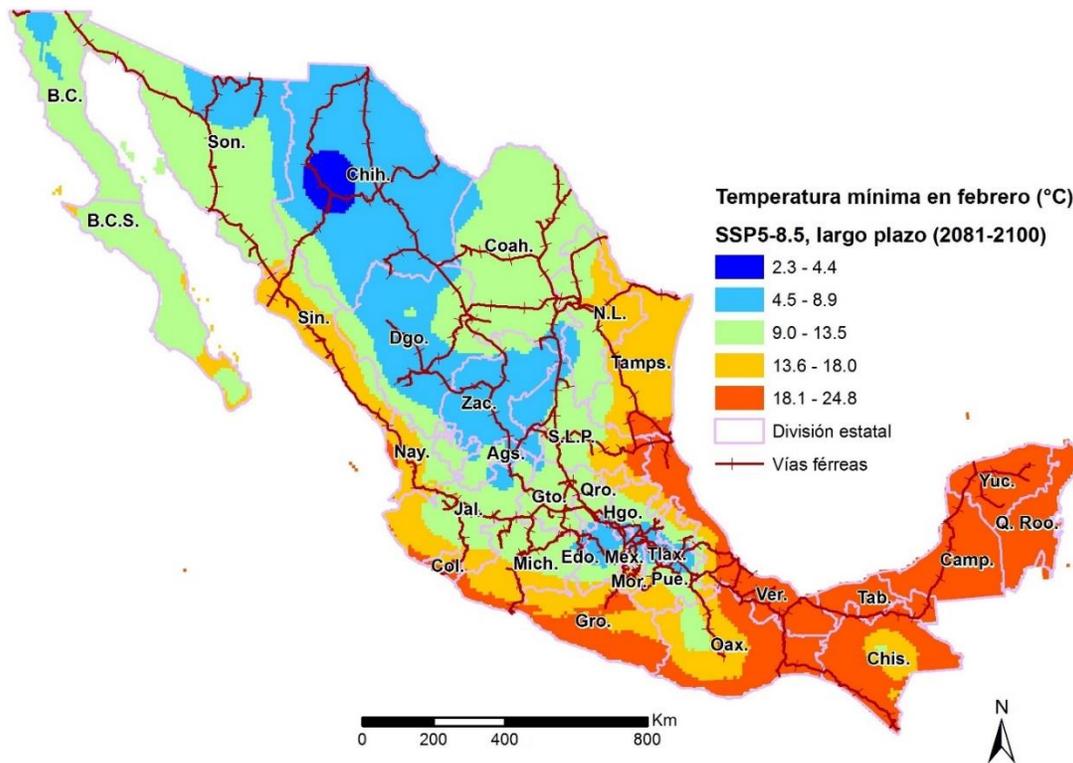


Figura 3.104 Temperatura mínima en febrero, escenario SSP5-8.5 (2081-2100)

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y del INECC.

3.3 Aumento del nivel del mar

En relación con el periodo 1995-2014, la probable subida media global del nivel del mar en el escenario de emisiones de GEI SSP1-1.9 es de 0.15-0.23 metros para 2050 y de 0.28-0.55 metros para 2100; mientras que para el escenario de emisiones de GEI SSP5-8.5 es de 0.20-0.29 metros para 2050 y de 0.63-1.01 metros para 2100 (confianza media). En los próximos 2000 años, el nivel medio global del mar aumentará de 2 a 3 metros si el calentamiento se limita a 1.5 °C y de 2 a 6 metros si se limita a 2 °C (confianza baja) (IPCC, 2023).

Las proyecciones globales y regionales del 6° Informe de Evaluación (AR6), del IPCC, sobre el nivel del mar están alojadas en una plataforma de la NASA⁶, que permite a los usuarios visualizar y descargar los datos de proyección del nivel del mar. Para el caso de México, se puede obtener información para Ensenada, en Baja California; La Paz y Cabo San Lucas en Baja California Sur; Guaymas, Sonora; Mazatlán, Sinaloa; Manzanillo, Colima (ver Figura 3.105); Acapulco, Guerrero (ver Figura 3.106); Tuxpan (ver

⁶ <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>

Figura 3.107), Alvarado y Coatzacoalcos, en Veracruz; Salina Cruz, Oaxaca; Ciudad Madero, Tamaulipas (ver Figura 3.108); Ciudad del Carmen, Campeche y Progreso, Yucatán (ver Figura 3.109).

Para el puerto de Manzanillo, Colima se estima que en el año 2040 se tenga un incremento de 21 cm para el SSP1-1.9, 22 cm para el SSP1-2.6, 22 cm para el SSP2-4.5, 23 cm para el SSP3-7.0 y 24 cm para el SSP5-8.5 (ver Figura 3.105). Para el año 2060 se estima un incremento de 34 cm para el SSP1-1.9, 37 cm para el SSP1-2.6, 39 cm para el SSP2-4.5, 41 cm para el SSP3-7.0 y 44 cm para el SSP5-8.5.

Para el año 2080 se estima un incremento de 48 cm, en Manzanillo, para el SSP1-1.9, 52 cm para el SSP1-2.6, 58 cm para el SSP2-4.5, 63 cm para el SSP3-7.0 y 68 cm para el SSP5-8.5. Para el año 2100 se estima un incremento de 63 cm para el SSP1-1.9, 68 cm para el SSP1-2.6, 78 cm para el SSP2-4.5, 91 cm para el SSP3-7.0 y 98 cm para el SSP5-8.5. Para el año 2150 se estima un incremento de 95 cm para el SSP1-1.9, 1.06 m para el SSP1-2.6, 1.27 m para el SSP2-4.5, 1.54 m para el SSP3-7.0 y 1.65 m para el SSP5-8.5.

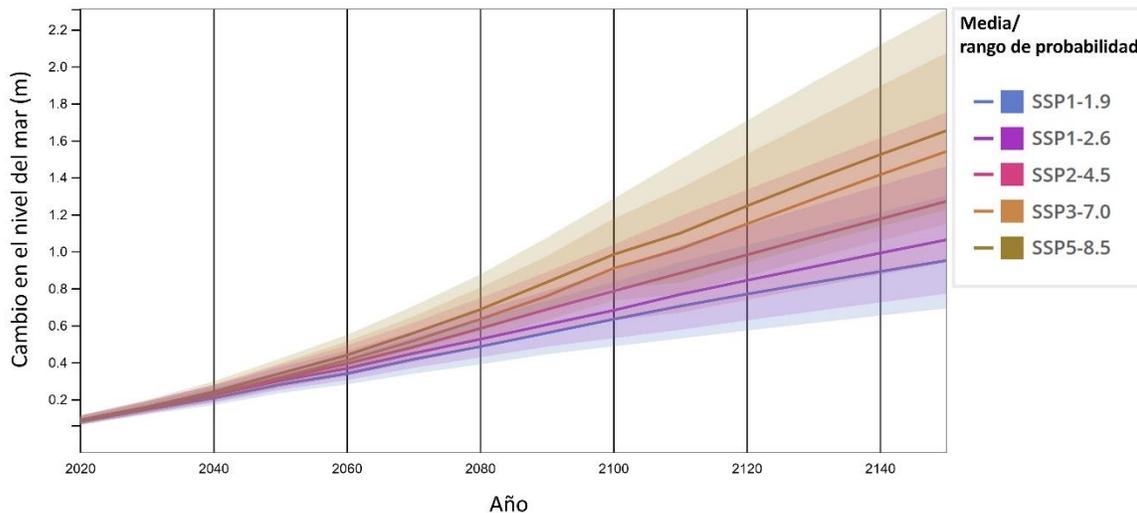


Figura 3.105 Estimación del aumento del nivel del mar para la zona del puerto de Manzanillo, México

Fuente: https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=737&data_layer=scenario

Para Acapulco, Guerrero se estima que en el año 2040 se tenga un incremento de 30 cm para el SSP1-1.9, 31 cm para el SSP1-2.6, 31 cm para el SSP2-4.5, 32 cm para el SSP3-7.0 y 33 cm para el SSP5-8.5 (ver Figura 3.106). Para el año 2060 se estima un incremento de 48 cm para el SSP1-1.9, 51 cm para el SSP1-2.6, 54 cm para el SSP2-4.5, 55 cm para el SSP3-7.0 y 58 cm para el SSP5-8.5.

Para el año 2080 se estima un incremento de 68 cm, en Acapulco, para el escenario SSP1-1.9, 72 cm para el escenario SSP1-2.6, 78 cm para el escenario SSP2-4.5, 83 cm para el escenario SSP3-7.0 y 88 cm para el escenario SSP5-8.5. Para el año 2100 se estima un incremento de 88 cm para el SSP1-1.9, 93 cm para el SSP1-2.6, 1.03 m para el SSP2-4.5, 1.16 m para el SSP3-7.0 y 1.23 m para el SSP5-8.5. Para el año 2150 se estima un incremento de 1.33 m para el SSP1-1.9, 1.44 m para el SSP1-2.6, 1.65 m para el SSP2-4.5, 1.93 m para el SSP3-7.0 y 2.04 m para el SSP5-8.5.

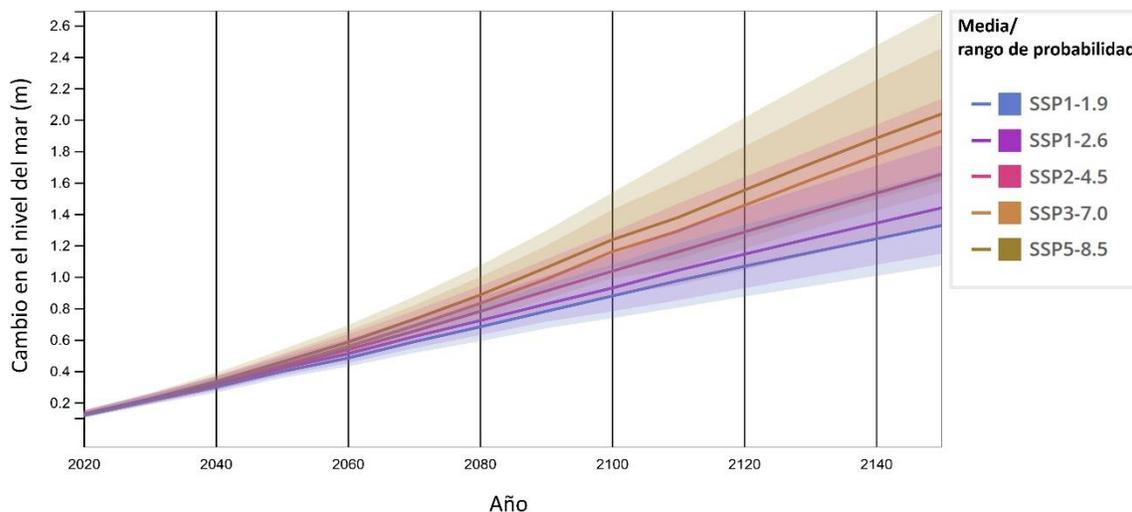


Figura 3.106 Estimación del aumento del nivel del mar para Acapulco, México

Fuente: https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=686&data_layer=scenario

Para Tuxpan, Veracruz se estima que en el año 2040 se tenga un incremento de 23 cm para el SSP1-1.9, 23 cm para el SSP1-2.6, 24 cm para el SSP2-4.5, 24 cm para el SSP3-7.0 y 25 cm para el SSP5-8.5 (ver Figura 3.107). Para el año 2060 se estima un incremento de 36 cm para el SSP1-1.9, 37 cm para el SSP1-2.6, 40 cm para el SSP2-4.5, 42 cm para el SSP3-7.0 y 44 cm para el SSP5-8.5.

Para el año 2080 se estima un incremento de 48 cm, en Tuxpan, para el SSP1-1.9, 52 cm para el SSP1-2.6, 58 cm para el SSP2-4.5, 63 cm para el SSP3-7.0 y 69 cm para el SSP5-8.5. Para el año 2100 se estima un incremento de 59 cm para el SSP1-1.9, 65 cm para el SSP1-2.6, 76 cm para el SSP2-4.5, 89 cm para el SSP3-7.0 y 98 cm para el SSP5-8.5. Para el año 2150 se estima un incremento de 89 cm para el SSP1-1.9, 98 cm para el SSP1-2.6, 1.23 m para el SSP2-4.5, 1.49 m para el SSP3-7.0 y 1.64 m para el SSP5-8.5.

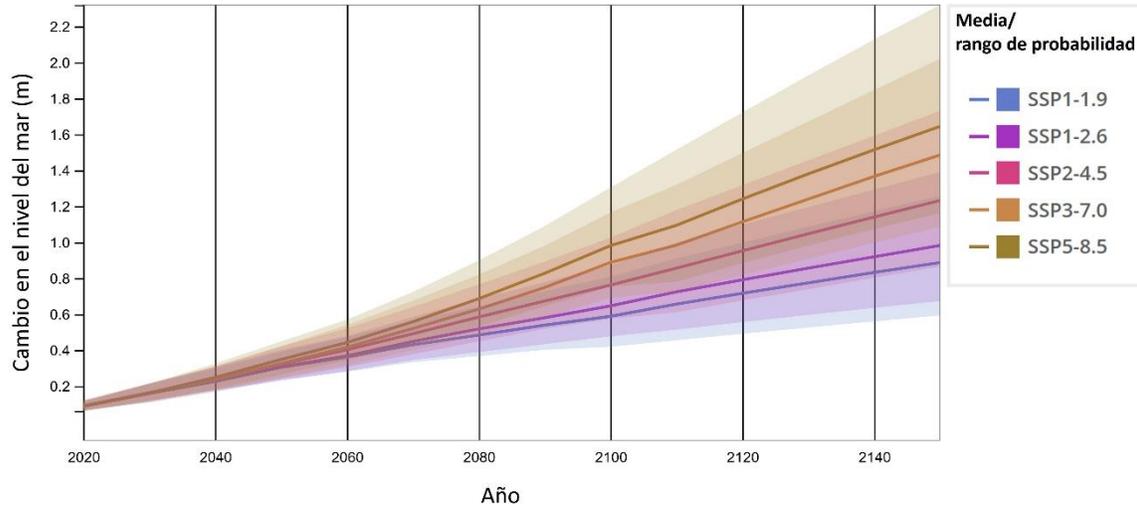


Figura 3.107 Estimación del aumento del nivel del mar para Tuxpan, México

Fuente: https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=918&data_layer=scenario

Para Ciudad Madero, Tamaulipas se estima que en el año 2040 se tenga un incremento de 24 cm para el SSP1-1.9, 25 cm para el SSP1-2.6, 25 cm para el SSP2-4.5, 26 cm para el SSP3-7.0 y 27 cm para el SSP5-8.5 (ver Figura 3.108). Para el año 2060 se estima un incremento de 39 cm para el SSP1-1.9, 40 cm para el SSP1-2.6, 43 cm para el SSP2-4.5, 44 cm para el SSP3-7.0 y 47 cm para el SSP5-8.5.

Para el año 2080 se estima un incremento de 52 cm, en Ciudad Madero, en el escenario SSP1-1.9, 55 cm para el SSP1-2.6, 62 cm para el SSP2-4.5, 66 cm para el SSP3-7.0 y 72 cm para el SSP5-8.5. Para el año 2100 se estima un incremento de 63 cm para el SSP1-1.9, 69 cm para el SSP1-2.6, 81 cm para el SSP2-4.5, 93 cm para el SSP3-7.0 y 1.03 m para el SSP5-8.5. Para el año 2150 se estima un incremento de 95 cm para el SSP1-1.9, 1.05 m para el SSP1-2.6, 1.30 m para el SSP2-4.5, 1.55 m para el SSP3-7.0 y 1.71 m para el SSP5-8.5.

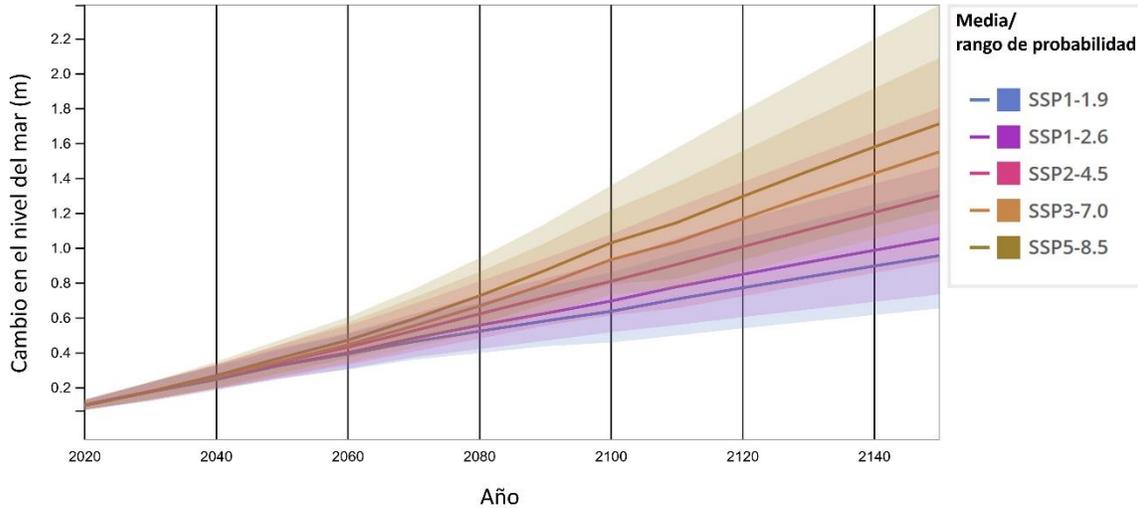


Figura 3.108 Estimación del aumento del nivel del mar para Ciudad Madero, México

Fuente: https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=1020&data_layer=scenario

Para Progreso, Yucatán se estima que en el año 2040 se tenga un incremento de 24 cm para el SSP1-1.9, 25 cm para el SSP1-2.6, 25 cm para el SSP2-4.5, 25 cm para el SSP3-7.0 y 26 cm para el SSP5-8.5 (ver Figura 3.109). Para el año 2060 se estima un incremento de 39 cm para el escenario SSP1-1.9, 40 cm para el escenario SSP1-2.6, 43 cm para el escenario SSP2-4.5, 44 cm para el escenario SSP3-7.0 y 47 cm para el escenario SSP5-8.5.

Para el año 2080 se estima un incremento de 52 cm, en Progreso, para el SSP1-1.9, 55 cm para el SSP1-2.6, 62 cm para el SSP2-4.5, 67 cm para el SSP3-7.0 y 72 cm para el SSP5-8.5. Para el año 2100 se estima un incremento de 64 cm para el SSP1-1.9, 69 cm para el SSP1-2.6, 81 cm para el SSP2-4.5, 94 cm para el SSP3-7.0 y 1.03 m para el SSP5-8.5. Para el año 2150 se estima un incremento de 97 cm para el SSP1-1.9, 1.05 m para el SSP1-2.6, 1.31 m para el SSP2-4.5, 1.56 m para el SSP3-7.0 y 1.72 m para el SSP5-8.5.

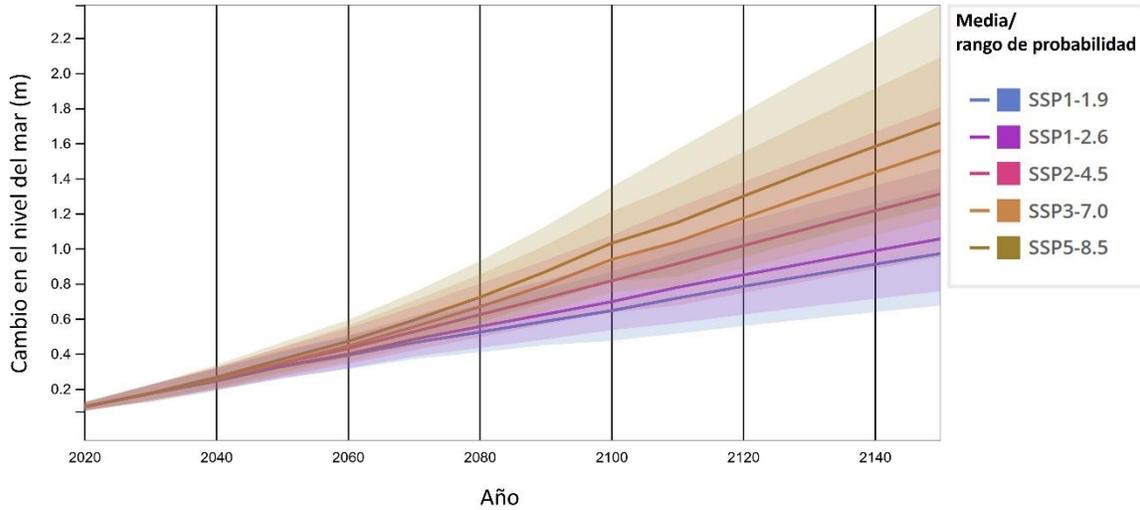


Figura 3.109 Estimación del aumento del nivel del mar para Progreso, México

Fuente: https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool?psmsl_id=690&data_layer=scenario

En la Figura 3.110 se representa la estimación para un escenario de aumento del nivel del mar de un metro para México, lo que coincidiría con el escenario SSP5-8.5, que estima una subida del nivel del mar en un rango que va de 0.63 a 1.01 metros para el año 2100. En la misma Figura 3.110 se muestran en color naranja los posibles tramos ferroviarios que se verían afectados por el aumento del nivel del mar de un metro.

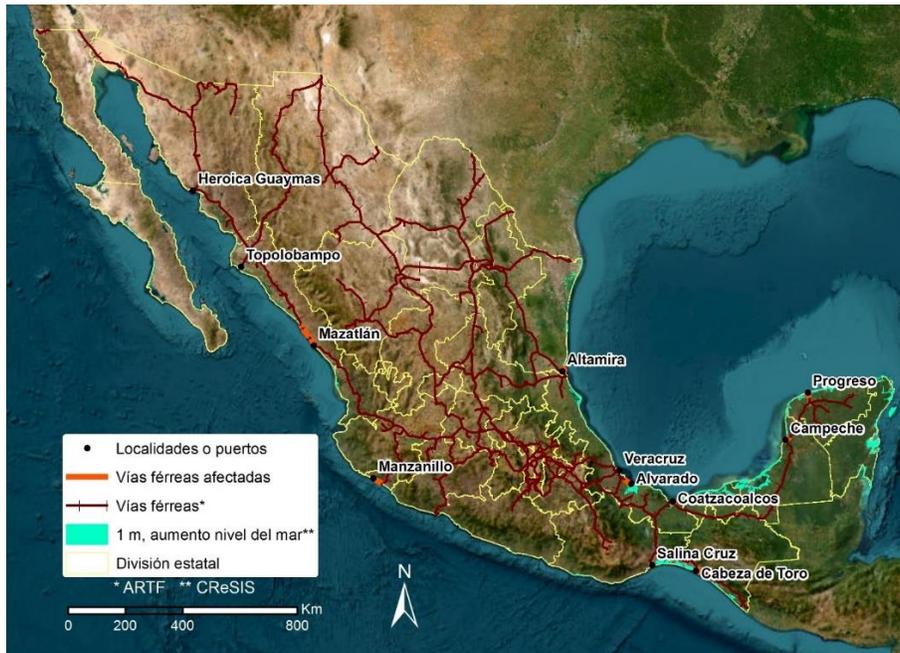


Figura 3.110 Estimación del aumento del nivel del mar para México

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y CReSIS (Center for Remote Sensing and Integrated Systems).

En la Figura 3.111 se muestra un acercamiento a la región sureste de México y parte del norte, para el escenario de aumento del nivel de un metro para México, en donde también se pueden observar, en color naranja, los posibles tramos ferroviarios que se verían afectados y que están próximos a Altamira, Tamaulipas; Alvarado y Coatzacoalcos, Veracruz; Campeche, Campeche; Progreso, Yucatán; Salina Cruz, Oaxaca y Cabeza de Toro, Chiapas.



Figura 3.111 Estimación del aumento del nivel del mar para la región sureste y parte del noreste de México

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y CReSIS (*Center for Remote Sensing and Integrated Systems*).

En la Figura 3.112 se muestra un acercamiento a la región occidente y parte del noroeste de México, para el escenario de aumento del nivel de un metro para México, en donde también se pueden observar los posibles tramos ferroviarios que se verían afectados (en color naranja) y que están próximos a Guaymas, Sonora; Topolobampo y Mazatlán, Sinaloa; así como Manzanillo, Colima.



Figura 3.112 Estimación del aumento del nivel del mar para parte de la región occidental y noroccidente de México

Fuente: Elaboración propia con información de la ARTF y CReSIS (Center for Remote Sensing and Integrated Systems).

Conclusiones

Se espera que los eventos climáticos extremos (huracanes, lluvias intensas, etc.) sean cada vez más frecuentes, derivado de los efectos del cambio climático, por lo que también podrían aumentar las afectaciones en el Sistema Ferroviario Mexicano.

Derivado de lo anterior y debido al plan que, actualmente, se tiene en el país de retomar al ferrocarril como una opción más atractiva para el transporte de pasajeros y de la carga, es menester iniciar los trabajos para la identificación y evaluación de las amenazas que el cambio climático representa para la infraestructura ferroviaria y su operación; siendo el enfoque presentado en este trabajo uno de los pasos iniciales para estimar el grado de exposición ante las diferentes amenazas climáticas que enfrentaría la infraestructura ferroviaria en el corto, mediano y largo plazo.

Si se desea transitar hacia un Sistema Ferroviario Mexicano resiliente al clima, se deberá, a su vez, iniciar el proceso de adaptación de las vías férreas al cambio climático, mismo que tiene como objetivo principal prever los efectos adversos del clima y tomar las medidas adecuadas para evitar o minimizar los daños que puedan causar, con el fin de reducir costos futuros y, por ende, maximizar la rentabilidad de las inversiones y disminuir su vulnerabilidad.

Es importante destacar que sería de utilidad contar con información complementaria a los escenarios de cambio climático presentados en esta publicación, como las Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia (Curvas IDF), que son una relación matemática entre la intensidad de una precipitación, su duración y la frecuencia con la que se observa. Ya que permitirían identificar lluvias intensas de corta duración o lluvias moderadas de larga duración, que tienen distintos efectos sobre los caminos; por ejemplo, una curva IDF-5 días mide tormentas prolongadas. Una vez que se tengan dichas curvas se podría estimar si tendrían o no variación bajo los distintos escenarios de cambio climático, en las zonas geográficas donde actualmente se planea construir nuevas ferrovías o donde se deban reconstruir por los daños ocasionados por los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Adicionalmente, sería importante modificar el riesgo de incendios de la Comisión Nacional Forestal tomando en cuenta los cambios de

temperatura máxima esperada para los distintos escenarios de cambio climático, así como el índice de aridez.

Es primordial continuar con el registro de los eventos históricos, por ejemplo, de eventos hidrometeorológicos, así como los daños que sufran las ferrovías bajo dichos eventos, especificando la parte de la infraestructura ferroviaria que se dañó, de tal manera que se pueda determinar la posible causa.

En la medida de lo posible, también sería de gran utilidad contar con la evaluación *in situ*, de algunos de los elementos de la infraestructura que hayan soportaron bien los impactos de los eventos hidrometeorológicos extremos, es decir, que los umbrales de diseño actuales permitieron cierta resiliencia en el elemento de la ferrovía, sobre todo cuando se trata de infraestructura estratégica. De esta forma se estarían recopilando las mejores prácticas de construcción para ciertas zonas. En caso contrario, sería recomendable analizar las causas de la falla para implementar medidas de adaptación en la reconstrucción de la infraestructura ferroviaria.

Conforme se tenga información más detallada y datos espaciales a mayor escala, se podrán hacer mejores estimaciones de las variaciones futuras del clima y desarrollar mejores medidas de adaptación.

Y, por último, sería conveniente tomar en cuenta la importancia de cada tramo ferroviaria en la red, es decir, identificar aquellos tramos que son críticos para el óptimo funcionamiento de la red ferroviaria, debido a que por ellos transita el mayor número de carga y pasajeros. De tal forma que los tramos críticos que se encuentran altamente expuestos a diversas amenazas sean prioritarios en el proceso de adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático.

Bibliografía

- Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario [ARTF]. (2024). Anuario Estadístico Ferroviario 2023. [Consulta en línea]. https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/920778/Anuario_2023_ARTF.pdf
- Agencia Reguladora del Transporte Ferroviario [ARTF]. (2022). *Modelo para el cálculo de las afectaciones económicas por bloqueos a las vías férreas del Sistema Ferroviario Mexicano 2022*. México: Dirección General de Regulación Ferroviaria, ARTF.
- Andersson, E.; Häggström, J.; Sima, M. y Stichel, S. (2004). *Assessment of train-overtaking risk due to strong cross-winds*. Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 218(3), pp. 213–223. <https://doi.org/10.1243/0954409042389382>
- Baker, C.; Jones, J.; López, F. y Munday, J. (2004). *Measurements of the cross wind forces on trains*. Aerodyn, 92 (7-8), pp. 547–563. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2004.03.002>
- Baker, C.J.; Chapman, L.; Quinn, A. y Dobney, K. (2009). *Climate change and the railway industry: a review*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 224 (3), pp. 519-528. <https://doi.org/10.1243/09544062JMES1558>
- Dindar, S.; Kaewunruena, S. y Sussman, J. M. (2017). *Climate Change Adaptation for GeoRisks Mitigation of Railway Turnout Systems*. *Procedia Engineering*, 189, pp. 199-206. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.032>
- Diedrichs, B., Sima, M., Orellano, A., y Tengstrand, H. (2007). *Crosswind stability of a high-speed train on a high embankment*. Proc. IMechE, Part F: J. Rail and Rapid Transit, 221(2), pp. 205–225. <https://doi.org/10.1243/0954409JRRT126>
- Gradilla, L.; Mendoza, J.; Orantes, H. y Marcos, O. (2018). *Aproximación geoespacial para la adaptación al cambio climático de la infraestructura carretera en México*. [Publicación Técnica No. 523].

México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt523.pdf>

Gradilla, L.; Mendoza, J.; García, A. y Balbuena, J. (2022). *Consideraciones para la adaptación ante el cambio climático de los caminos rurales y alimentadores*. [Publicación Técnica No. 713]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt713.pdf>

Gradilla, L.; Mendoza, J. y Aburto, J. (2024). *Consideraciones para la adaptación de la infraestructura ferroviaria al cambio climático*. [Publicación Técnica No. 784]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt784.pdf>

Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático [INECC]. (2024). Material del curso de adaptación al cambio climático. México: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

Jefatura de la Oficina de la Presidencia de la República [JOP]. (2019). *Estrategia nacional para la implementación de la Agenda 2030 en México*. México: Jefatura de la Oficina de la Presidencia de la República.

Mendoza, J. y Marcos, O. (2017). *Panorama internacional de la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático*. [Publicación Técnica No. 488]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt488.pdf>

Mendoza, J.; Marcos, O. y Orantes, H. (2019). *Marco metodológico para la adaptación de la infraestructura carretera ante el cambio climático en México*. [Publicación Técnica No. 557]. México: Instituto Mexicano del Transporte. [Archivo PDF]. <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt557.pdf>

National Rail (2023). *How can heavy rainfall impact the railway?* United Kingdom: National Rail. [Consulta en línea]. <https://www.nationalrail.co.uk/rain/>

Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos [OCDE]. (2018). *Climate-resilient infrastructure*. Policy Paper No. 14. Francia: OCDE.

-
- Palin, E.; Thornton, H.; Mathison, C.; McCarthy, R.; Clark, R. y Dora, J. (2013). *Future projections of temperature-related climate change impacts on the railway network of Great Britain*. *Climatic Change*, 120, pp. 71-93. <https://doi.org/10.1007/s10584-013-0810-8>
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC]. (2023). *Summary for Policymakers*. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. A Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Suiza: IPCC.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC]. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis*. Contribución del Grupo de Trabajo I (bases físicas del clima) al sexto informe de evaluación “AR6” del IPCC. United Kingdom and USA: Cambridge University Press.
- Panel Intergubernamental del Cambio Climático [IPCC]. (2014). *Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects*. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (AR5). United Kingdom and USA: Cambridge University Press.
- Rachoy, C. y Spazierer, M. (2008). *Meteorological information and warning system for railway infrastructure decision support for natural hazards management*. In: *Proceedings of the World Congress on Rail Research*, Seoul, Korea.
- Rübelke, D. (2011). *International support of climate change policies in developing countries: strategic, moral and fairness aspects*. *Ecological Economics*, 70 (8), pp. 1470-1480. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.03.007>
- Secretaría de Infraestructura, Comunicaciones y Transportes [SICT]. (2024). *Principales estadísticas del sector infraestructura, comunicaciones y transportes 2023*. México: Dirección General de Planeación, SICT.
- Stenström, C.; Famurewa, S.; Parida, A. y Galar, D. (2012). *Impact of cold climate on failures in railway infrastructure*. In *International Conference on Maintenance Performance Measurement & Management*. United Kingdom: University of Sunderland.
- Szymczak, S.; Backendorf, F.; Blauhut, V.; Bott, F.; Fricke, K.; Herrmann, C.; Klippel, L. y Walter, A. (2023). *Heat and Drought Induced Impacts on*
-

the German Railway Network. Transportation Research Procedia, 72, pp. 696-703. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.457>



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE INFRAESTRUCTURA, COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 "El Colorado-Galindo"
San Fandila, Pedro Escobedo
C.P. 76703
Querétaro, México
Tel: +52 442 216 97 77 ext. 2610

publicaciones@imt.mx

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