

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-2903

# Exposición de la infraestructura de transporte a los efectos del cambio climático en América Latina y el Caribe

Jessica Camacho

Banco Interamericano de Desarrollo  
División de Transporte

Julio 2024



# Exposición de la infraestructura de transporte a los efectos del cambio climático en América Latina y el Caribe

Jessica Camacho

Banco Interamericano de Desarrollo  
División de Transporte

Julio 2024



## **Catalogación en la fuente proporcionada por la Biblioteca Felipe Herrera del Banco Interamericano de Desarrollo**

Camacho, Jessica.

Exposición de la infraestructura de transporte a los efectos del cambio climático en América Latina y el Caribe / Jessica Camacho.

p. cm. - (Nota técnica del BID ; 2903)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Transportation-Climatic factors-Latin America. 2. Transportation-Climatic factors-Caribbean Area. 3. Infrastructure (Economics)-Government policy-Latin America. 4. Infrastructure (Economics)-Government policy-Caribbean Area. 5. Climate change mitigation-Latin America. 6. Climate change mitigation-Caribbean Area. I. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. II. Título. III. Serie.

IDB-TN-2903

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2024 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



# Exposición de la infraestructura de transporte a los efectos del cambio climático en América Latina y el Caribe

## Abstract

El Cambio Climático (CC) ha generado importantes impactos negativos para el sector transporte de América Latina y el Caribe (ALC) durante las últimas décadas. El incremento en la intensidad y frecuencia de tormentas tropicales, inundaciones, deslizamientos de tierra y sequías ha ocasionado daños a la infraestructura y interrupciones operacionales sobre los sistemas de transporte de la región, resultando en costos significativos para las economías. Adicionalmente, se espera que esta problemática se agudice a futuro, ya que se proyecta aún mayor intensidad y frecuencia en los fenómenos meteorológicos extremos, a la vez que continúan los cambios en variables climáticas promedio. Para poder desarrollar medidas de adaptación apropiadas que mejoren la resiliencia de los sistemas de transporte, es necesario entender qué activos de la infraestructura existente se encontrarán más expuestos a los efectos del CC. Buscando contribuir en esa dirección, este estudio se enfocó en analizar la exposición de aeropuertos costeros, puertos marítimos y carreteras a cambios proyectados en algunas de las variables climáticas más relevantes para cada modo de transporte bajo un escenario pesimista (SSP5-8.5/RCP8.5) y uno intermedio (SSP2-4.5/RCP4.5). En el caso de aeropuertos costeros y puertos marítimos, se evaluó la exposición a incrementos en el nivel del mar hacia finales de siglo. En el caso de carreteras, se analizaron proyecciones de incrementos en el número de días bajo temperaturas extremas (TX35) e incrementos en la precipitación máxima acumulada durante cinco días consecutivos (RX5), teniendo en cuenta los efectos de la temperatura en el deterioro acelerado de los pavimentos y de la precipitación acumulada en los deslizamientos por saturación del suelo. Los resultados indican que diversos aeropuertos costeros y puertos marítimos de la región podrían experimentar incrementos en el nivel del mar superiores a un metro hacia finales de siglo, aumentando su susceptibilidad a inundaciones temporales o permanentes. Asimismo, porcentajes significativos de la red vial de varios países de la región podrían quedar expuestos a incrementos de más de 20 días por año bajo temperaturas iguales o superiores a 35°C. Esta nota técnica analiza los posibles impactos de los resultados obtenidos sobre los activos y países con mayores niveles de exposición, presentando recomendaciones sobre acciones de política pública que deberán ser implementadas a fin de garantizar la resiliencia de los sistemas de transporte de la región.

**Clasificación JEL:** O18, R42, Q54

**Palabras clave:** Cambio Climático, Adaptación, Resiliencia, Infraestructura, Exposición, Proyecciones, Modelos Climáticos, Escenarios Climáticos, Transporte, Transporte Aéreo, Transporte Marítimo, Transporte Carretero, Nivel del Mar, Temperatura, Precipitación.

## Agradecimientos

Un agradecimiento muy especial para Agustina Calatayud por sus valiosos aportes y mentoría durante todo el desarrollo de este estudio, Mariano Ansaldo por sus contribuciones como revisor técnico del documento, Richard Mix por su contribución como revisor de forma, Alfred Grunwaldt por su asesoría sobre proyecciones de cambio climático y Ernesto Monter por sus recomendaciones sobre impactos de las variables climáticas en la infraestructura carretera.

## Contenido

Resumen Ejecutivo.....	1
1. Introducción .....	4
2. Metodología .....	5
2.1 Variables de interés .....	6
2.2 Modelos Climáticos.....	9
2.3 Escenarios Climáticos.....	11
2.4 Procesamiento de datos .....	12
3. Resultados.....	12
3.1. Exposición de aeropuertos a incrementos en el nivel del mar.....	12
3.2. Exposición de puertos marítimos a incrementos en el nivel del mar.....	15
3.3. Exposición de carreteras a temperaturas extremas .....	19
3.4. Exposición de carreteras a precipitaciones extremas .....	21
4. Discusión de Resultados .....	24
5. Recomendaciones de Política Pública.....	26
Referencias.....	30

## Resumen Ejecutivo

Los sistemas de transporte desempeñan un papel fundamental en el desarrollo económico y la reducción de la pobreza de América Latina y el Caribe (ALC). La provisión de infraestructura y servicios de transporte de calidad contribuye en la reducción de costos logísticos y aumenta la productividad de las empresas, a la vez que facilita el acceso a oportunidades, bienes y servicios para la población. En un contexto de Cambio Climático (CC), estos sistemas de transporte enfrentan amenazas significativas que podrían resultar en pérdidas económicas por interrupciones operacionales y costos elevados por daños a la infraestructura, limitando a la vez el acceso a oportunidades, bienes y servicios para las poblaciones más vulnerables.

El CC ya ha generado un gran número de impactos negativos sobre los sistemas de transporte de la región durante los últimos años (EM-DAT, 2023; Olaya González et al., 2022; IPCC, 2022; BID, 2021; Deopersad et al., 2020). Múltiples huracanes y tormentas tropicales han causado el colapso de estructuras clave en aeropuertos costeros y puertos marítimos de la región, así como inundaciones que resultan en daños a la maquinaria e impiden la operación. Las precipitaciones extremas han resultado en numerosos deslizamientos de tierra en países montañosos de la región, afectando la infraestructura carretera y generando el aislamiento de zonas remotas. Los daños y pérdidas económicas para el sector transporte han sido muy significativos. Algunos ejemplos incluyen más de USD 88 millones en daños y pérdidas enfrentados por el sector transporte de Las Bahamas a raíz del paso del Huracán Dorian en 2019, más de USD 140 millones en daños y pérdidas para el sector transporte de Honduras por la tormenta tropical Eta y el huracán Iota en 2020, así como más de USD 1.600 millones por el fenómeno de la niña en Colombia (Ministerio de Transporte, 2014).

El panorama futuro no es muy alentador, ya que las proyecciones indican que los eventos meteorológicos extremos ocurrirán cada vez con mayor frecuencia y los cambios de largo plazo en las variables climáticas promedio serán cada vez más intensos (IPCC, 2022; Lempert et al., 2021). En este contexto, resulta fundamental desarrollar medidas de adaptación que permitan minimizar los impactos futuros del CC sobre los sistemas de transporte de la región. El punto de partida para desarrollar estas medidas es contar con información sobre la vulnerabilidad de los activos frente a las diferentes amenazas generadas por el CC. Sin embargo, a pesar de que algunos países han empezado a desarrollar estudios detallados para tal fin (BID, 2022; Olaya González et al., 2022; Deltares, 2020; AECOM, 2019), un gran número de países de la región no cuentan con este tipo de análisis. Adicionalmente, los estudios realizados hasta el momento han empleado metodologías distintas, dificultando la comparación de niveles de exposición proyectados entre países.

Este estudio busca contribuir en la identificación de necesidades de adaptación para el sector transporte de ALC mediante el desarrollo de un análisis regional de exposición de la infraestructura aérea, marítima y carretera a los cambios proyectados en algunas de las variables climáticas más relevantes para cada modo de transporte. El análisis realizado permitió identificar activos de infraestructura y países de la región que se encontrarán más expuestos a los cambios más drásticos en algunas de las variables climáticas más relevantes para cada modo de transporte. Los resultados del análisis de exposición presentados en esta nota técnica alimentaron el capítulo de escenarios futuros presentado en el reporte insignia del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) sobre Transporte y CC (Calatayud et al., 2023). A su vez, las recomendaciones de política pública presentadas en dicho reporte fueron empleadas para

definir las recomendaciones de política pública sobre adaptación al CC que se presentan en este documento.

El análisis consistió en calcular los niveles de exposición de aeropuertos costeros y puertos marítimos de la región a incrementos proyectados en el nivel medio del mar, así como los niveles de exposición de las carreteras de la región a incrementos en la frecuencia de ocurrencia de temperaturas y precipitaciones extremas. Lo anterior, teniendo en cuenta que los incrementos en el nivel del mar aumentan la susceptibilidad a inundaciones temporales y permanentes en infraestructura costera, mientras que las temperaturas extremas aceleran el deterioro de los pavimentos y los altos niveles de precipitación acumulada aumentan el riesgo de deslizamientos en carreteras por saturación del suelo.

Los niveles de exposición se calcularon a partir del cruce de capas geográficas de activos de infraestructura existentes en la región con capas geográficas que representaban la distribución espacial de los cambios proyectados en las variables climáticas más relevantes para cada modo de transporte. Las proyecciones de incrementos en el nivel del mar corresponden a las empleadas en el sexto reporte de evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) (Garner et al., 2021; Kopp et al., 2023; Fox-Kemper et al., 2021) y provienen de la sexta fase del Proyecto de Inter Comparación de Modelos Acoplados (CMIP6). Por otro lado, las proyecciones de incremento en el número de días al año bajo temperaturas superiores a 35°C (TX35) e incremento en la precipitación máxima acumulada durante cinco días consecutivos (RX5) provienen de los ensambles de modelos CORDEX para Norteamérica, Centroamérica y Suramérica disponibles en el atlas interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

Se evaluaron los niveles de exposición de la infraestructura a estas variables climáticas bajo un escenario pesimista de emisiones (SSP5-8.5 para el nivel del mar y RCP8.5 para temperatura y precipitación) y bajo un escenario intermedio de emisiones (SSP2-4.5 en el caso del nivel del mar, RCP4.5 en el caso de temperatura y precipitación). Adicionalmente, se consideraron diferentes cortes temporales teniendo en cuenta las diferencias en la vida útil de los tipos de infraestructura considerados. Así, la exposición de aeropuertos costeros y puertos marítimos a incrementos proyectados en el nivel del mar fue evaluada hacia fin de siglo, mientras que la exposición de carreteras a incrementos en temperaturas y precipitaciones extremas fue evaluada hacia mitad de siglo.

Los resultados indican que diversos aeropuertos costeros y puertos marítimos de la región podrían experimentar incrementos superiores a un metro en el nivel del mar hacia finales de siglo, tanto bajo el escenario pesimista como bajo el escenario intermedio. Como resultado, estos activos podrían sufrir inundaciones permanentes en los casos donde el incremento proyectado en el nivel del mar supere su elevación actual. Adicionalmente, aún en los casos en donde el incremento proyectado no supere la elevación actual, se espera que los incrementos en el nivel del mar y los patrones locales de hundimiento del terreno aumenten la vulnerabilidad de aeropuertos y puertos frente a la ocurrencia de eventos extremos.

Se destaca la necesidad de evaluar posibles medidas de adaptación sobre aeropuertos clave para el turismo y la conectividad, en los que se proyectan las mayores afectaciones hacia fines de siglo bajo los escenarios pesimista e intermedio. Este es el caso de los aeropuertos ubicados en Cartagena, algunas islas en Las Bahamas y Ciudad de Belice. Asimismo, se resalta la importancia de desarrollar medidas de adaptación en aquellos puertos con mayores niveles de exposición y niveles de participación en el

transporte marítimo de la región. Algunos ejemplos incluyen el puerto de Cartagena en Colombia, Puerto Cortés en Honduras, Lázaro Cárdenas en México y los puertos de Colón y Balboa en Panamá.

En cuanto las carreteras de la región, se proyectan los mayores porcentajes de red vial expuesta a incrementos elevados en la variable TX35 para Surinam, Paraguay y Venezuela en los dos escenarios analizados. Dentro de estos países, la red vial de Venezuela experimentaría los incrementos más drásticos en la frecuencia de ocurrencia de temperaturas extremas, con más del 45% de su red expuesta a 60 días adicionales por año bajo temperaturas extremas en el escenario pesimista y más del 25% de su red vial expuesta a 40 días adicionales por año bajo temperaturas extremas en el escenario intermedio. En este sentido, se espera que los países con mayores niveles de exposición a temperaturas extremas enfrenten mayores costos de mantenimiento por el deterioro acelerado de sus pavimentos. Por su parte, los resultados obtenidos para la variable RX5 asociados a mayores precipitaciones acumuladas no presentan una tendencia consistente entre los escenarios pesimista e intermedio. Bajo el escenario pesimista, más del 50% de la red vial de Paraguay, El Salvador, Uruguay, Bolivia y Brasil experimentarían incrementos de 8% o más en la variable de precipitación máxima acumulada hacia mitad de siglo. En contraste, bajo el escenario intermedio, Surinam sería el único país que cumpliría con estos niveles de exposición para el mismo horizonte temporal, con más del 88% de su red vial expuesta a incrementos de 8% o más en la variable analizada. Con el fin de afinar estas proyecciones, se requieren estudios adicionales que involucren datos históricos de precipitación a nivel local y modelos que representen adecuadamente los patrones de precipitación de cada país.

La información sobre los activos para los que se proyectan los mayores niveles de exposición a las variables analizadas contribuye en la identificación y priorización de necesidades de adaptación. Las posibles medidas de adaptación a implementar en el caso de aeropuertos costeros y puertos marítimos incluyen la construcción o modificación de estructuras de defensa (diques, murallones, compuertas, sistemas de drenaje, soluciones basadas en la naturaleza), la elevación de la infraestructura existente para hacerla menos vulnerable, o la reubicación de estos activos en zonas de menor exposición a esta amenaza. En el caso de carreteras, se recomienda evaluar la posibilidad de emplear materiales más resistentes a temperaturas extremas y al mismo tiempo incrementar la periodicidad de actividades de mantenimiento rutinario. La definición de medidas de adaptación concretas a implementar en cada caso requerirá de análisis adicionales por parte de expertos, basados en información climática y de contexto más detallada y modelos que representen apropiadamente las dinámicas locales (BID, 2019). Lo anterior, teniendo en cuenta que el presente estudio tuvo un carácter regional y por lo tanto se basó en fuentes de datos globales y regionales que contaran con información comparable para todos los países analizados.

En términos de política pública, se enfatiza la necesidad de abordar las necesidades de adaptación del sector transporte a partir de un cambio sistémico del sector que involucre cuatro líneas de acción principales: priorizar la descarbonización y adaptación del sector en los planes sectoriales y subsectoriales, desarrollar instrumentos de política que permitan materializar esta priorización, adecuar las instituciones para poder implementar los cambios requeridos y desarrollar alianzas estratégicas con el sector privado, la academia y la sociedad civil. El análisis de exposición de la infraestructura de transporte presentado en esta nota técnica se enmarca dentro de las acciones necesarias para priorizar la adaptación del transporte al CC, contribuyendo en los procesos de planificación necesarios para implementar las medidas de adaptación requeridas. Sin embargo, para garantizar la resiliencia de los sistemas de transporte de la región y minimizar los daños y pérdidas asociados al CC es necesario

implementar un cambio sistémico en el sector transporte, abordando conjuntamente descarbonización y adaptación con medidas que abarquen las cuatro líneas de acción propuestas.

## 1. Introducción

Durante las últimas décadas, los esfuerzos del sector transporte en relación con el CC han estado centrados en el desarrollo de políticas para la reducción de emisiones. Este énfasis en la mitigación del CC no es sorprendente, teniendo en cuenta que el 25% de emisiones globales de CO<sub>2</sub> derivadas de la quema de combustibles son generadas por el sector transporte (IEA, 2022). No obstante, la relación entre el sector transporte y el CC es bidireccional: el transporte no solo contribuye al CC, sino que también se ve afectado negativamente por el mismo (Andrey et al., 2003; Wang et al., 2020). Tanto los eventos meteorológicos extremos como los cambios de largo plazo en variables como temperatura, precipitación y nivel del mar pueden generar impactos negativos sobre los sistemas de transporte, que van desde interrupciones temporales en el servicio hasta daños permanentes a la infraestructura (Black & Pyatt, 2021; Christodoulou et al., 2019; Ebinger & Vanduycke, 2015; Eisenack et al., 2012; Nemry & Demirel, 2012).

A pesar de los esfuerzos que se están haciendo en reducción de emisiones y mitigación del CC a nivel global, en todos los escenarios futuros se proyecta que los eventos meteorológicos extremos ocurrirán cada vez con mayor frecuencia e intensidad (IPCC, 2022; Lempert et al., 2021). Los cambios en eventos extremos, sumados a los cambios esperados en variables meteorológicas promedio, generarán cada vez mayor presión sobre los sistemas de transporte (Bowyer et al., 2020). Las disrupciones generadas por estos cambios pueden llegar a limitar el acceso a bienes y servicios básicos y también dificultar la evacuación oportuna y conexión con servicios críticos como hospitales ante eventos extremos (Black & Pyatt, 2021; Eichhorst et al., 2011). Por estas razones, no solo es necesario continuar con los esfuerzos de mitigación del CC, sino también invertir cada vez más en la adaptación del sector transporte al CC.

En ALC, los eventos meteorológicos extremos ya vienen generando importantes impactos negativos. De acuerdo con los datos reportados en la base de datos internacional de desastres (EM-DAT, 2023), en la región han ocurrido más de 2.300 desastres naturales desde 1990, incluyendo más de 1.000 inundaciones y 397 ciclones tropicales. Algunos ejemplos de los impactos sobre sistemas de transporte de la región incluyen más de US\$88 millones en daños y pérdidas causados por el Huracán Dorian en Las Bahamas durante 2019 (Deopersad et al., 2020), más de US\$140 millones en daños y pérdidas causados por la tormenta tropical Eta y el huracán Iota en 2020 (BID, 2021) y más de US\$1.600 millones por el fenómeno de la niña en Colombia (Ministerio de Transporte, 2014).

En este contexto, resulta fundamental desarrollar estrategias que permitan adaptar los sistemas de transporte de la región a los cambios esperados, para continuar garantizando la prestación de los servicios y minimizar los posibles daños y pérdidas. El punto de partida para poder desarrollar y priorizar las medidas de adaptación apropiadas es contar con información sobre los niveles de exposición actuales y futuros de los sistemas de transporte a las principales amenazas que impone el CC. Si bien existen algunos países de la región que han desarrollado estudios detallados evaluando los posibles impactos del CC sobre sus sistemas de transporte, un gran número de países de la región no cuentan con este tipo de análisis. Adicionalmente, los estudios realizados hasta el momento han empleado metodologías distintas, dificultando la comparación de niveles de exposición proyectados entre países.

Este estudio busca complementar los análisis previos desarrollados a nivel local, brindando una perspectiva regional sobre la exposición de la infraestructura de transporte de ALC a las principales amenazas derivadas del CC. El estudio constituye un punto de partida para los países de ALC que aún no cuentan con este tipo de análisis y al mismo tiempo proporciona un marco de referencia a nivel de toda la región, basado en redes de transporte interdependientes. El uso de información y proyecciones climáticas con el mismo nivel de detalle para todos los países evaluados permitió obtener estimaciones comparables sobre la exposición de la infraestructura de transporte aéreo, marítimo y carretero de cada país a las amenazas más relevantes relacionadas con el CC. Los resultados obtenidos, junto con las conclusiones derivadas de estudios previos a nivel local, aportan en la identificación de los países y activos de la región que estarán expuestos a los cambios más drásticos en las variables climáticas más relevantes y por lo tanto requerirán el desarrollo de estudios más detallados que permitan proponer acciones de adaptación concretas.

El BID se comprometió en 2021 a alinear todas sus operaciones de financiamiento con los objetivos del Acuerdo de París, como una estrategia para contribuir en el desarrollo de políticas públicas que favorezcan la adopción de acciones decisivas para la mitigación y adaptación al CC en ALC. Asimismo, el BID es un socio clave para el desarrollo de políticas en este ámbito, proveyendo asistencia técnica, facilitando el intercambio de conocimiento e impulsando la acción colectiva en la región. Un ejemplo de esto es el reporte insignia del BID sobre transporte y CC (Calatayud et al., 2023), el cual presenta una hoja de ruta para la descarbonización y adaptación del sector transporte desarrollada a partir de un diagnóstico de la situación actual en ALC, proyecciones futuras sobre emisiones y exposición del sector al CC para la región, el análisis de los compromisos internacionales adquiridos por los países de la región en la lucha contra el CC y la revisión de mejores prácticas en descarbonización y adaptación del transporte a nivel internacional. Las proyecciones futuras que se presentan allí sobre exposición del sector transporte al CC fueron desarrolladas en el presente estudio, empleando la metodología que se describe en mayor detalle en esta nota técnica.

El documento está organizado de la siguiente manera: el Capítulo 2 describe los detalles metodológicos del análisis realizado, incluyendo las fuentes de datos empleadas. El Capítulo 3 presenta los resultados de nivel de exposición para los países de la región. El Capítulo 4 incluye el análisis de resultados y conclusiones. Finalmente, el Capítulo 5 resume recomendaciones de política pública para la adaptación al CC.

## 2. Metodología

Este estudio se enfocó en evaluar la exposición de la infraestructura de transporte aéreo, marítimo y carretero de la región a posibles cambios futuros en variables climáticas seleccionadas. La metodología consistió en cruzar capas geográficas que describieran la ubicación de activos de infraestructura de transporte existentes en la región con capas geográficas que incluyeran la distribución espacial de los cambios proyectados en las variables climáticas más relevantes para cada modo de transporte. Se emplearon fuentes de datos de libre acceso con cobertura para toda la región, con el fin de obtener resultados comparables entre países. El análisis permitió identificar aquellos países en los que se proyectan los mayores cambios en las variables climáticas relevantes, para los que se recomienda llevar a cabo análisis más detallados que permitan identificar y priorizar necesidades específicas de adaptación.

La metodología se divide en cuatro secciones: la sección 2.1 describe las variables climáticas y de infraestructura requeridas para el análisis; la sección 2.2 presenta los modelos utilizados para obtener las proyecciones futuras de variables climáticas; la sección 2.3 detalla los escenarios climáticos analizados; y la sección 2.4 explica los detalles metodológicos del procesamiento de datos realizado para obtener los resultados de exposición de la infraestructura.

## 2.1 Variables de interés

No todos los modos de transporte se verán afectados de la misma manera por el CC. Existen variables climáticas que afectarán a unos modos más que a otros, así como variables que afectarán en mayor medida a la infraestructura en comparación con las variables que podrían tener un mayor impacto sobre las operaciones.

En el caso del transporte aéreo, la principal afectación a la infraestructura aérea estará relacionada con la posible inundación de aeropuertos costeros a causa de los incrementos proyectados en el nivel medio del mar, teniendo en cuenta que 166 aeropuertos de la región (más del 66%) se encuentran ubicados a menos de 100km de la costa. Por su parte, las operaciones aéreas podrían verse afectadas por los incrementos de temperatura, cambios en los patrones de vientos y mayor ocurrencia de eventos meteorológicos extremos, requiriendo mayores distancias de despegue, permitiendo menores niveles de carga, e incrementando las demoras.

En el caso del transporte marítimo, los incrementos en el nivel medio del mar estarán asociados con los mayores riesgos para la infraestructura portuaria por posibles inundaciones temporales o permanentes de los puertos marítimos. Adicionalmente, se espera que las tormentas tropicales y vientos severos puedan impedir las operaciones y causar daños significativos sobre estructuras y maquinaria portuaria, mientras que las temperaturas extremas podrían limitar las horas de trabajo al aire libre en zonas portuarias e incrementar el consumo de energía para refrigeración.

En el caso del transporte carretero, las temperaturas extremas acelerarán el deterioro de pavimentos, mientras que las precipitaciones extremas podrían causar mayores inundaciones y deslizamientos de tierra por saturación del suelo, afectando tanto a la infraestructura como a las operaciones.

Este estudio se enfocó en las posibles afectaciones a la infraestructura, mas no en las afectaciones a las operaciones. Se evaluó la exposición futura de la infraestructura aérea, marítima y carretera de la región a posibles cambios futuros en las variables climáticas más relevantes. Para el transporte aéreo y marítimo se evaluó la posible exposición futura de los principales aeropuertos costeros y puertos marítimos a incrementos en el nivel medio del mar, mientras que para el transporte carretero se evaluó la exposición futura de la red vial a cambios en la frecuencia de ocurrencia de temperaturas y precipitaciones extremas. Las principales variables de interés y fuentes de información empleadas se resumen en la Tabla 1 y se describen en mayor detalle en las siguientes sub-secciones.

**Tabla 1.** Fuentes de información empleadas en el análisis regional de exposición

Modo	Proyecciones Climáticas					Elevación	Inventario de Infraestructura	Demanda
	Variables	Modelos Climáticos	Escenario	Periodo Base	Periodo Futuro			
Aéreo	Incremento en el nivel medio del mar	IPCC AR6 <sup>1</sup> (CMIP6)	SSP5-8.5	2014	2100	Satélite ICESAT2 de la NASA <sup>3</sup>	Banco Mundial <sup>4</sup>	OAG <sup>7</sup>
Marítimo							World Port Index <sup>5</sup>	CEPAL <sup>8</sup>
Carretero	Cambio en temperaturas y precipitaciones extremas (TX35 y RX5)	Ensamble modelos CORDEX <sup>2</sup> (CMIP5)	RCP 8.5	1995-2014	2041-2060	N/A	OpenStreetMap <sup>6</sup>	N/A

Fuentes:

1. Las proyecciones de incremento en el nivel del mar son las mismas empleadas en el sexto reporte de evaluación del IPCC (Garner et al., 2021; Kopp et al., 2023) (Fox-Kemper et al., 2021) y provienen de la sexta fase del Proyecto de Inter Comparación de Modelos Acoplados (CMIP6).
2. Las proyecciones de incremento en el número de días al año bajo temperaturas superiores a 35°C (TX35) e incremento en la precipitación máxima acumulada durante cinco días consecutivos (RX5) provienen de los ensambles de modelos CORDEX para Norteamérica, Centroamérica y Suramérica disponibles en el atlas interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021). Las proyecciones CORDEX se basan en modelos climáticos de circulación general, pero adicionalmente incluyen un proceso de desagregación espacial dinámica para obtener estimaciones a una resolución de 50km<sup>2</sup>.
3. La elevación de aeropuertos y puertos marítimos se calculó usando una base de datos global de elevación para zonas costeras bajas (Vernimmen & Hooijer, 2022), la cual fue generada usando datos LiDAR producidos por el satélite ICESAT2 y ha sido validada para el análisis de inundaciones costeras (Hooijer & Vernimmen, 2021; Vernimmen & Hooijer, 2023).
4. Ubicación de aeropuertos tomada de la Base global de aeropuertos del Banco Mundial (2020).
5. Ubicación de puertos marítimos tomada de la publicación World Port Index (National Geospatial Intelligence Agency, 2019).
6. Malla vial primaria, secundaria y terciaria de cada país provenientes de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023).
7. Se empleó información del número de sillas en vuelos de salida por aeropuerto por año como un indicador de la importancia relativa de cada aeropuerto de la región. Los datos provienen de OAG (OAG, 2019).
8. Se emplearon datos de movimiento de contenedores por puerto por año como un indicador de la importancia relativa de cada puerto de la región. Los datos provienen de CEPAL (CEPAL, 2019).

### *Nivel del mar*

Los incrementos en el nivel medio del mar a nivel global se explican principalmente por la expansión térmica del océano y el derretimiento de hielo terrestre y marítimo, fenómenos que se han acelerado en las últimas décadas como consecuencia del CC. Es así como la tasa anual de incremento en el nivel medio del mar pasó de 2,3mm/año en el periodo 1971-2018 a 3,7mm/año en el periodo 2006-2018 (Fox-Kemper et al., 2021).

Diversos fenómenos, incluyendo las dinámicas de circulación del océano y los patrones locales de derretimiento de hielo, hacen que los incrementos en el nivel del mar no sean uniformes a lo largo de todas las costas, por lo cual se habla de nivel regional del mar para referirse al nivel del mar en una ubicación determinada del planeta, en contraste con el nivel medio del mar a nivel global. Adicionalmente, es importante analizar el nivel regional del mar en relación con el nivel del terreno, teniendo en cuenta que los activos ubicados a menores elevaciones sufrirán mayores impactos frente a los incrementos proyectados en el nivel del mar. Es por esto que el nivel del mar medido con respecto al nivel del terreno en una ubicación determinada se conoce como nivel relativo del mar.

El análisis de exposición de aeropuertos costeros y puertos marítimos a incrementos futuros en el nivel del mar se basó en proyecciones futuras de incrementos en el nivel regional del mar (ver más detalle sobre modelos y escenarios empleados en las secciones 2.2 y 2.3). Con el fin de obtener estimaciones del nivel relativo del mar con respecto a los activos de infraestructura, se combinaron las proyecciones de incrementos en el nivel regional del mar con datos de elevación actual del terreno. Estos últimos fueron obtenidos de una base de datos global de elevación para zonas costeras bajas (Vernimmen & Hooijer, 2022), la cual fue generada usando datos LiDAR producidos por el satélite ICESAT2 de la NASA y ha sido validada para el análisis de inundaciones costeras (Hooijer & Vernimmen, 2021; Vernimmen & Hooijer, 2023).

### *Temperatura*

Desde 1970, la temperatura promedio a nivel de la superficie del planeta ha aumentado más rápidamente que durante cualquier otro periodo histórico de 50 años, alcanzando un incremento de 1,1°C al comparar el periodo 1850-1900 con el periodo 2011-2020 (IPCC, 2023). Este incremento de temperatura, causado principalmente por la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI) derivados de la actividad humana, genera impactos en diversas variables climáticas y afecta negativamente a los ecosistemas, las comunidades y la infraestructura.

Aunque la temperatura promedio a nivel de la superficie terrestre es un indicador muy importante para monitorear el CC a nivel global y estimar sus efectos en otras variables climáticas de interés, para lograr identificar posibles impactos y necesidades de adaptación a nivel local resulta fundamental contar con indicadores adicionales que brinden información sobre las variaciones espaciales y temporales de la temperatura. Dentro de estos, los indicadores que reportan el número de días al año con temperaturas extremas son relevantes por el impacto que pueden llegar a tener en la salud humana, la infraestructura, los ecosistemas y la agricultura. En particular, el número de días al año con temperaturas máximas superiores a 35°C (TX35) es ampliamente usado en diversas aplicaciones, ya que este límite de temperatura es crítico para la polinización y producción del maíz y adicionalmente representa un umbral crítico asociado con amenazas para la salud humana (IPCC, 2021).

Las temperaturas extremas tienen un impacto negativo en la infraestructura carretera, ya que aceleran el deterioro de los pavimentos, reduciendo su vida útil. Los incrementos de temperatura reducen la rigidez y resistencia de los pavimentos flexibles, resultando en diferentes tipos de falla que incluyen ruteo, agrietamiento térmico y endurecimiento por envejecimiento (Qiao et al., 2013). Por otro lado, mayores amplitudes térmicas resultan en un gradiente no uniforme de esfuerzos sobre las losas de pavimentos rígidos, induciendo daños por fatiga (Sen et al., 2022). Aunque la temperatura del pavimento depende de múltiples variables y es superior a la temperatura del aire, se ha estimado que el deterioro se acelera en pavimentos expuestos a temperaturas del aire superiores a 38°C (Chen et al., 2010). En este contexto y teniendo en cuenta la amplia disponibilidad del indicador TX35 dentro de las proyecciones climáticas realizadas por la comunidad científica, el análisis de exposición de carreteras a temperaturas extremas estuvo basado en este indicador.

### *Precipitación*

El aumento en la temperatura promedio de la tierra incrementa la capacidad máxima de retención de agua de la atmósfera a nivel global, haciendo que los eventos de precipitación extrema ocurran cada vez con mayor magnitud y frecuencia como consecuencia del CC (Seneviratne et al., 2021). Adicional a estos cambios termodinámicos a nivel global, existen diversos fenómenos que ocasionan cambios dinámicos

en los patrones de precipitación a nivel regional, incluyendo la Oscilación del Sur - El Niño (ENSO, por sus siglas en inglés), los vientos monzones, los ciclones tropicales, entre otros.

A pesar de la gran variabilidad en los patrones de precipitación a nivel regional, existe evidencia histórica de los incrementos en precipitaciones en la región. En Suramérica, la precipitación máxima acumulada durante un día del año (RX1) aumentó en un número mayor estaciones de medición que en las que disminuyó, al comparar los valores de 1950 con los de 2018 (Sun et al., 2021). De forma similar, la precipitación máxima acumulada durante cinco días consecutivos del año (RX5) ha aumentado en regiones extensas de Suramérica, con el mayor incremento ocurriendo sobre la zona suroriental de Suramérica (Skansi et al., 2013).

Las precipitaciones extremas están directamente relacionadas con los deslizamientos de tierra que afectan cada vez más a las carreteras de la región. La ocurrencia de precipitaciones extremas durante varios días consecutivos resulta en la saturación del suelo e incremento del nivel freático, reduciendo la capacidad portante de las estructuras de pavimento y resultando en deslizamientos y derrumbes. Teniendo en cuenta la relevancia de RX5 en relación con la probabilidad de saturación del suelo y deslizamiento, así como su amplia disponibilidad dentro de las proyecciones climáticas generadas por la comunidad científica, el análisis de exposición de carreteras a precipitaciones extremas se basó en este indicador.

#### *Infraestructura*

La infraestructura fue caracterizada usando las mismas fuentes de información para todos los países de la región. En el caso de la infraestructura aérea, se obtuvo la ubicación de aeropuertos costeros a partir de la base global de aeropuertos del Banco Mundial (Banco Mundial, 2020). En el caso del transporte marítimo, se obtuvo la ubicación de los puertos a partir de la publicación World Port Index 2019 (National Geospatial Intelligence Agency, 2019). En ambos casos, las bases de datos fueron inspeccionadas visualmente y comparadas con OpenStreetMap y Google Maps, para corregir cualquier inconsistencia en la ubicación de aeropuertos y puertos marítimos. En el caso del modo carretero, el trazado de la malla vial primaria, secundaria y terciaria de cada país se obtuvo a partir de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023).

#### *Demanda de Transporte*

Los indicadores relacionados con la demanda de transporte fueron utilizados para representar la importancia relativa de cada aeropuerto costero y puerto marítimo de la región, con el objetivo de identificar aquellos activos donde se generarían mayores impactos negativos si ocurrieran inundaciones por los incrementos proyectados en el nivel del mar. En el caso de aeropuertos, no fue posible conseguir información comparable sobre los pasajeros transportados, por lo que se empleó información de las sillas totales en vuelos de salida por aeropuerto por año proveniente de OAG (2019). En el caso de los puertos marítimos, se emplearon datos de movimiento de contenedores por puerto provenientes de CEPAL (CEPAL, 2019). Las evaluaciones para carreteras no incluyeron datos relacionados con la demanda de transporte, ya que se centraron en calcular los porcentajes de exposición a incrementos muy elevados en la variable TX35 para cada país.

## 2.2 Modelos Climáticos

Para evaluar los posibles impactos futuros del CC, la comunidad científica emplea modelos climáticos denominados Modelos de Circulación General (MCG), los cuales permiten representar los fenómenos

físicos que ocurren en el sistema climático mediante ecuaciones matemáticas y obtener proyecciones futuras de variables asociadas a un escenario determinado. Existen decenas de MCG generados por diferentes grupos de investigación alrededor del mundo usando diferentes supuestos y generando diferentes resultados, por lo cual se ha creado el Proyecto de Inter Comparación de Modelos Acoplados (CMIP, por sus siglas en inglés), como una iniciativa que busca coordinar los esfuerzos de modelación a nivel mundial, centralizar los modelos existentes, compararlos entre sí y mejorarlos con el tiempo. Las últimas dos fases de la iniciativa (CMIP5 y CMIP6) produjeron proyecciones climáticas que fueron incluidas en los últimos dos reportes de evaluación del IPCC, correspondientes al quinto reporte de evaluación en 2013 (AR5) y el sexto reporte de evaluación en 2021 (AR6). Los resultados de estas simulaciones son comúnmente empleados en la evaluación de posibles impactos futuros del CC sobre diferentes sectores, incluyendo el sector transporte.

Dada la complejidad asociada a los MCG y la gran capacidad de cómputo necesaria para resolver las ecuaciones matemáticas que representan al sistema climático, las proyecciones generadas por los MCG vienen dadas en resoluciones horizontales que varían entre 100 y 200 km, las cuales generalmente no son lo suficientemente detalladas para identificar posibles impactos sobre los sistemas de transporte. Es por esto que los resultados de los MCG deben ser desagregados espacialmente para obtener proyecciones regionales que permitan analizar los posibles impactos sobre una zona determinada, obteniendo mayores resoluciones que puedan ser más comparables con la escala de la infraestructura de transporte. Existen dos métodos principales de desagregación espacial o downscaling: la desagregación dinámica y la desagregación estadística. El primer método resuelve las mismas ecuaciones matemáticas de los MCG para un área más pequeña, lo cual hace computacionalmente posible obtener resultados mucho más detallados. El segundo método toma las proyecciones generadas por los MCG como valores de frontera y aplica un procesamiento estadístico empleando observaciones locales históricas para obtener resultados con mayor resolución. Existen proyecciones desagregadas de libre acceso para diferentes territorios alrededor del mundo empleando las dos metodologías.

Elegir los modelos climáticos más apropiados para evaluar posibles impactos en una región determinada no es una tarea trivial. Cuando se está evaluando un país único, es posible que el gobierno ya haya identificado los MCG que mejor representen las dinámicas propias del territorio, haya combinado las proyecciones de estos MCG empleando un ensamble de modelos y haya generado proyecciones desagregadas espacialmente. La dificultad en este caso radica en que, si bien las proyecciones de los MCG individuales suelen ser de libre acceso, las proyecciones finales derivadas de los ensambles multi-modelo generados por cada gobierno no suelen estar disponibles para ser descargadas y procesadas dentro de análisis nuevos. Los resultados generales usualmente son presentados dentro de las comunicaciones nacionales de cambio climático de cada país en formato de imagen, pero generalmente no es fácil acceder a las proyecciones en formato editable. Por otro lado, cuando se busca evaluar una región más grande, los modelos que mejor representan las condiciones históricas pueden variar entre países. En este caso, resulta útil basarse en proyecciones a nivel regional que busquen replicar los patrones espaciales históricos de las variables climáticas en la región como un todo y no en cada país individualmente. Un ejemplo ampliamente citado en la literatura para análisis regionales (Feron et al., 2019; Masson-Delmotte et al., 2021) corresponde a las proyecciones CORDEX de temperatura y precipitación las cuales provienen de un proceso de desagregación dinámica y están disponibles para varios dominios a una resolución horizontal de 50 km, incluyendo Norteamérica, Centroamérica y

Suramérica. No obstante, estas proyecciones regionales no se encuentran disponibles para algunas variables más complejas, como es el caso de los incrementos proyectados en el nivel del mar.

Dada la naturaleza regional de este estudio y el valor agregado de contar con proyecciones de mayor resolución espacial, se optó por emplear proyecciones de un ensamble CORDEX para las variables de interés que se encontraran disponibles bajo dicha iniciativa (temperatura y precipitación). Se emplearon las proyecciones CORDEX más recientes disponibles, las cuales fueron descargadas del Atlas Interactivo del AR6 del IPCC y provienen de un ensamble de MCG de la iniciativa CMIP5 (los procesos computacionales asociados a la desagregación espacial dinámica toman tiempo, por lo cual a la fecha aún no se han publicado proyecciones CORDEX para CMIP6). Por otro lado, al no existir proyecciones CORDEX para el nivel medio del mar, para esta última variable fue necesario emplear las proyecciones presentadas dentro del AR6 del IPCC, asociadas a la iniciativa CMIP6.

### 2.3 Escenarios Climáticos

Teniendo en cuenta que existe incertidumbre sobre la magnitud de los posibles cambios futuros en las variables climáticas, es necesario considerar múltiples escenarios climáticos para poder evaluar los posibles impactos del CC sobre la infraestructura de transporte. La comunidad científica ha desarrollado múltiples conjuntos de escenarios para este fin durante los últimos años, dentro de los cuales se destacan las Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés) y las Trayectorias Socioeconómicas Compartidas (SSP, por sus siglas en inglés). Los escenarios RCP, empleados en el quinto reporte de evaluación del IPCC, resumen una serie de posibles futuros de concentración de GEI en la atmósfera y niveles de forzamiento radiativo asociados a diferentes incrementos en la temperatura promedio de la tierra con respecto a niveles preindustriales (IPCC, 2014). Los escenarios SSP, introducidos en el sexto informe de evaluación del IPCC, son generados a partir de diferentes trayectorias socioeconómicas, permitiendo asociar los posibles futuros de concentración de GEI a la aplicación de políticas para la reducción de emisiones.

En la evaluación de posibles impactos negativos del CC se utiliza frecuentemente el escenario pesimista de muy altas concentraciones de GEI denominado RCP8.5, en el que la temperatura promedio en la superficie podría alcanzar un incremento de hasta 5 grados centígrados hacia 2100 con respecto a niveles preindustriales. Por otro lado, dada su reciente introducción, los escenarios SSP han sido empleados en menor medida en la literatura sobre impactos del CC en el sector transporte. No obstante, existen equivalencias entre los escenarios SSP y los RCP, de tal manera que el escenario SSP5-8.5 corresponde a un escenario de alta dependencia en los combustibles fósiles que generaría concentraciones de GEI en la atmósfera equivalentes a las que se asumen en el escenario pesimista RCP8.5 de altas emisiones.

Teniendo en cuenta la disponibilidad más reciente de proyecciones climáticas para cada una de las variables requeridas, este estudio emplea una combinación de escenarios RCP y SSP. En el caso de temperaturas y precipitaciones extremas es necesario emplear escenarios RCP, puesto que las proyecciones CORDEX más recientes están asociadas a la iniciativa CMIP5 (previa al desarrollo de los escenarios SSP). Por otro lado, para las proyecciones de incremento en el nivel del mar es posible usar escenarios SSP, ya que para esta variable no se cuenta con proyecciones CORDEX y por lo tanto se emplearán proyecciones derivadas de la iniciativa CMIP6. Para todas las variables de interés, se evaluaron los escenarios pesimistas asociados a las mayores concentraciones de GEI en la atmósfera

(RCP8.5 y SSP5-8.5), los cuales representan la señal más extrema de daño sobre la infraestructura. Adicionalmente se evaluaron los escenarios intermedios RCP4.5 y SSP2-4.5, correspondientes a un incremento en la temperatura promedio de 2,7 grados centígrados hacia 2100 con respecto a niveles preindustriales.

## 2.4 Procesamiento de datos

### *Análisis relacionados con el nivel del mar*

Las capas de aeropuertos costeros y puertos marítimos fueron cruzadas espacialmente con la capa de elevación actual del terreno, para determinar la elevación actual de los activos. Posteriormente, estas capas fueron cruzadas con las proyecciones de incrementos en el nivel del mar hacia fin de siglo bajo los escenarios pesimista e intermedio. De esta manera, fue posible identificar aquellos aeropuertos y puertos de la región que podrían experimentar incrementos de un metro o más en el nivel del mar, así como aquellos aeropuertos y puertos que podrían tener una elevación relativa igual o menor a cero bajo los escenarios analizados.

### *Análisis relacionados con temperaturas extremas*

La capa de carreteras primarias, secundarias y terciarias de la región se cruzó con la capa de incrementos proyectados en el número de días por año con temperaturas extremas bajo los escenarios pesimista e intermedio. Dada la menor vida útil de las carreteras en comparación con los aeropuertos y puertos, el análisis de temperaturas extremas empleó proyecciones para el mediano plazo (intervalo 2041-2060). Se definieron los *incrementos elevados* en la variable TX35 como aquellos por encima del 30% más alto de las proyecciones para la región bajo el escenario pesimista. Usando esta definición, para cada escenario se calculó el porcentaje de red vial de cada país que estaría expuesto a incrementos elevados en la frecuencia de ocurrencia de temperaturas extremas.

### *Análisis relacionados con precipitaciones extremas*

El procedimiento empleado para el análisis de precipitaciones extremas fue análogo al descrito para el análisis de temperaturas extremas, pero empleando proyecciones de incremento en la precipitación máxima acumulada durante cinco días consecutivos en lugar de proyecciones de incremento en la ocurrencia de temperaturas extremas. Se evaluaron los mismos escenarios y el mismo horizonte temporal empleados en el análisis de temperaturas. El análisis permitió identificar aquellos países donde una mayor proporción de las carreteras estará expuesta a incrementos elevados (superiores al 30% más alto de los incrementos proyectados para la región bajo el escenario pesimista) en la precipitación máxima acumulada durante 5 días consecutivos del año.

## 3. Resultados

### 3.1. Exposición de aeropuertos a incrementos en el nivel del mar

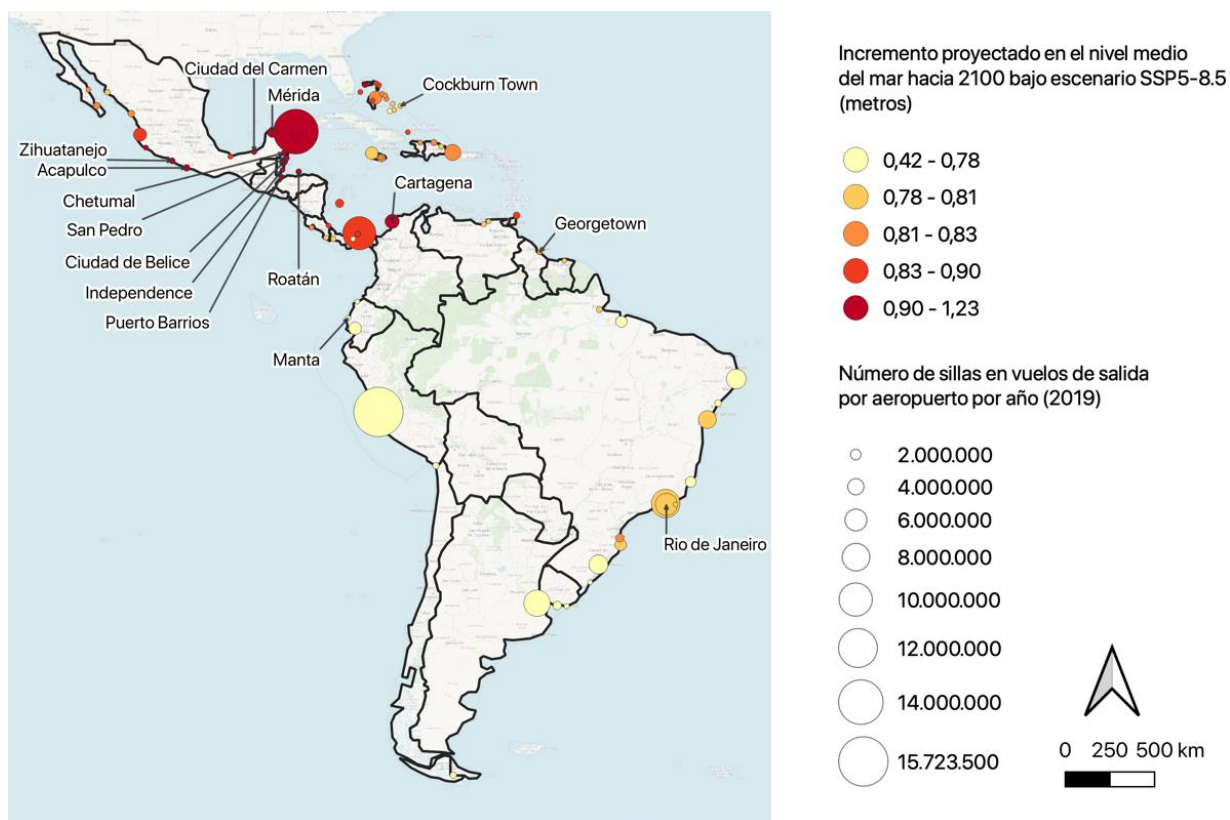
Se espera que los impactos de incrementos en el nivel del mar sean más drásticos para aquellos aeropuertos que cuentan con una menor elevación actual, ya que su elevación relativa será menor, aumentando el riesgo de inundaciones temporales o permanentes. Adicionalmente, este fenómeno podría empeorar en función del hundimiento local del terreno y la ocurrencia de eventos extremos. En este sentido, se evaluaron únicamente aquellos aeropuertos que actualmente se encuentran ubicados a una elevación de 10 msnm o menos. Dentro de estos, el análisis consistió en identificar tanto los aeropuertos que estarían expuestos a los mayores incrementos en cada escenario, como los

aeropuertos que podrían llegar a tener una elevación relativa igual o menor a cero hacia fin de siglo dados los cambios proyectados en cada escenario y la elevación actual.

Las Figuras 1 y 2 presentan los resultados para los escenarios pesimista e intermedio. En las figuras, cada círculo representa a un aeropuerto. El color de los círculos muestra el incremento proyectado en el nivel del mar hacia 2100 en comparación con el nivel del mar para el periodo 1995-2014, mientras que el tamaño de los círculos indica el número de sillas ofrecidas en vuelos de salida desde cada aeropuerto durante 2019. Adicionalmente, se incluyen etiquetas con los nombres de los aeropuertos que experimentarían las mayores afectaciones (aquellos que experimentarían incrementos superiores a un metro hacia 2100 y aquellos que pasarían a tener elevaciones relativas menores o iguales a cero).

Bajo el escenario pesimista (Figura 1), varios aeropuertos de la región experimentarían incrementos en el nivel del mar superiores a un metro o llegarían a tener elevaciones relativas menores o iguales a cero, especialmente en Centroamérica y el Caribe. Dentro de los aeropuertos con mayores afectaciones proyectadas, los aeropuertos que manejan mayores volúmenes de pasajeros son los aeropuertos de Santos Dumont en Río de Janeiro y Cartagena en Colombia.

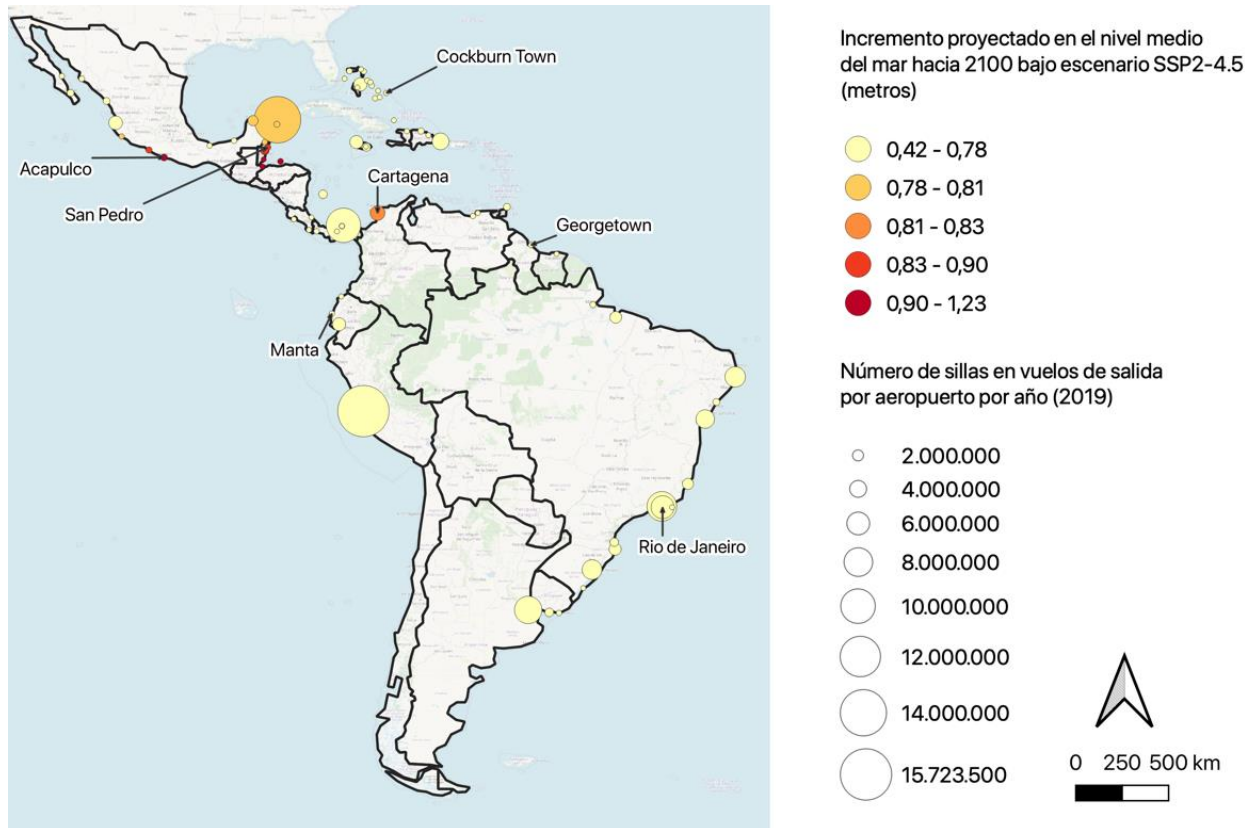
**Figura 1.** Incremento proyectado en el nivel medio del mar hacia 2100 bajo escenario pesimista para los aeropuertos costeros de la región ubicados a 10 metros o menos sobre el nivel del mar



Fuente: Elaboración propia con datos de la base global de aeropuertos del Banco Mundial para la ubicación de aeropuertos del Banco Mundial (2020), datos del satélite ICE-SAT2 para el cálculo de elevación de aeropuertos (Vernimmen & Hooijer, 2022), proyecciones del nivel del mar del sexto reporte de evaluación del IPCC (Fox-Kemper et al., 2021; Garner et al., 2021; Kopp et al., 2023) y número de sillas en vuelos de salida por aeropuerto por año para 2019 obtenidas de OAG (OAG, 2019).

Bajo el escenario intermedio (Figura 2), los incrementos proyectados en el nivel del mar son menos drásticos que los obtenidos al analizar el escenario pesimista. Un menor número de aeropuertos experimentarían incrementos superiores a un metro y elevaciones relativas menores o iguales a cero, en comparación con el escenario pesimista.

**Figura 2.** Incremento proyectado en el nivel medio del mar hacia 2100 bajo escenario intermedio para los aeropuertos costeros de la región ubicados a 10 metros o menos sobre el nivel del mar



Fuente: Elaboración propia con datos de la base global de aeropuertos del Banco Mundial para la ubicación de aeropuertos del Banco Mundial (2020), datos del satélite ICE-SAT2 para el cálculo de elevación de aeropuertos (Vernimmen & Hooijer, 2022), proyecciones del nivel del mar del sexto reporte de evaluación del IPCC (Fox-Kemper et al., 2021; Garner et al., 2021; Kopp et al., 2023) y número de sillas en vuelos de salida por aeropuerto por año para 2019 obtenidas de OAG (OAG, 2019).

La Tabla 2 resume los resultados de los aeropuertos más afectados en los dos escenarios. Bajo el escenario pesimista, 11 aeropuertos de la región podrían experimentar incrementos en el nivel medio del mar superiores a un metro hacia 2100, mientras que 8 aeropuertos de la región tendrían elevaciones relativas menores o iguales a cero hacia 2100. Bajo el escenario intermedio, un aeropuerto experimentarían incrementos superiores a un metro y 6 aeropuertos tendrían elevaciones relativas menores o iguales a cero hacia 2100.

**Tabla 2.** Aeropuertos con mayores afectaciones proyectadas hacia 2100 bajo escenarios pesimista e intermedio

Aeropuerto	País	Escenario pesimista		Escenario intermedio	
		Incremento >1m	Elevación relativa<0	Incremento >1m	Elevación relativa<0
Cartagena	Colombia	Si	Si	-	Si
Cockburn Town	Las Bahamas	-	Si	-	Si
Isla de Roatán	Honduras	Si	-	-	-
Puerto Barrios	Guatemala	Si	-	-	-
Independence	Belice	Si	-	-	-
Ciudad de Belice (aeropuerto municipal)	Belice	Si	Si	-	-
Ciudad de Belice / Ladyville (aeropuerto internacional de Belice)	Belice	Si	-	-	-
San Pedro	Belice	Si	Si	-	Si
Chetumal	México	Si	-	-	-
Mérida	México	Si	-	-	-
Ciudad del Carmen	México	-	Si	-	-
Zihuatanejo	México	Si	-	-	-
Acapulco	México	Si	-	Si	-
Manta	Ecuador	-	Si	-	Si
Río de Janeiro (Santos Dumont)	Brasil	-	Si	-	Si
Georgetown	Guyana	-	Si	-	Si

Fuente: Elaboración propia

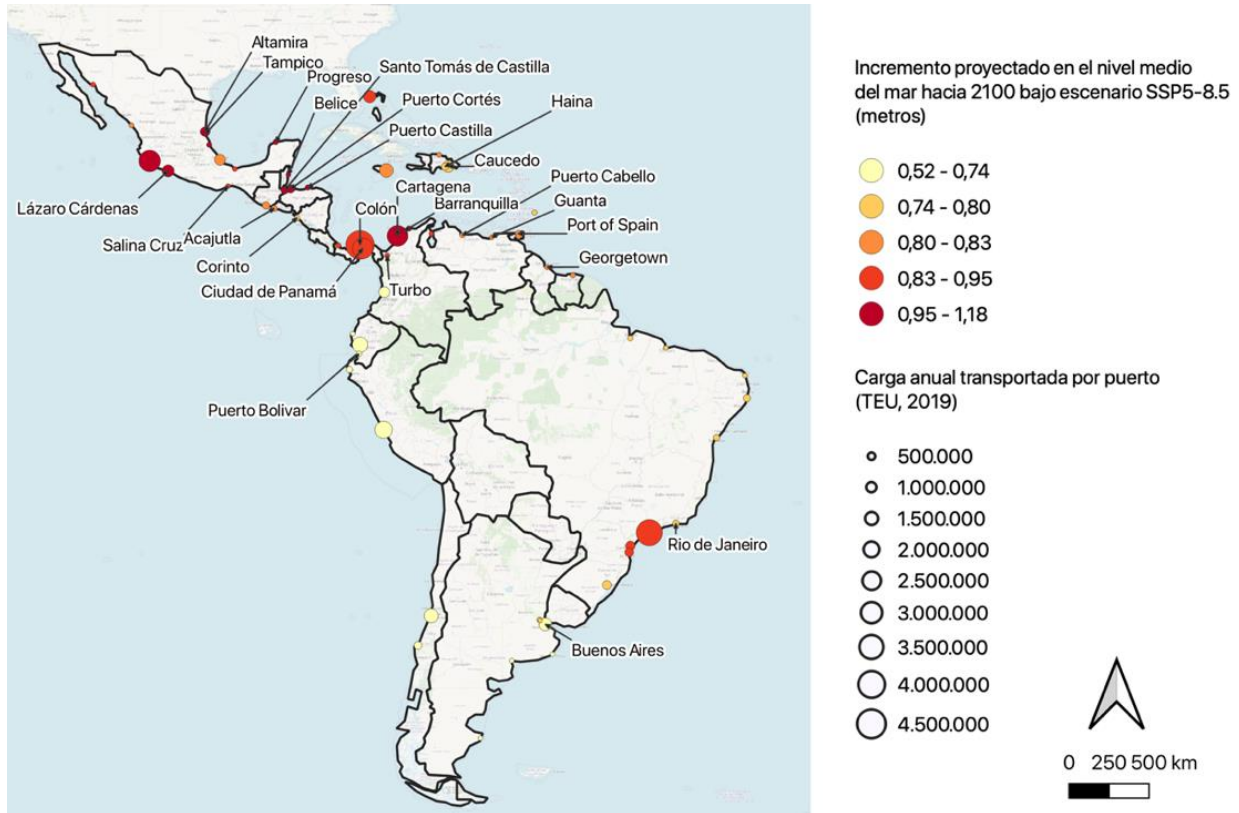
### 3.2. Exposición de puertos marítimos a incrementos en el nivel del mar

Al igual que en el caso de los aeropuertos, se evaluaron los puertos que actualmente se encuentran ubicados a una elevación de 10 msnm o menos. El análisis permitió identificar los puertos marítimos expuestos a los mayores incrementos en el nivel del mar, así como aquellos que podrían tener elevaciones relativas iguales o menores a cero.

Las Figuras 3 y 4 presentan las proyecciones hacia fin de siglo bajo los escenarios pesimista e intermedio. El color de los círculos muestra el incremento proyectado en el nivel del mar hacia 2100 en comparación con el nivel para el periodo 1995-2014, mientras que el tamaño de los círculos indica la carga transportada por cada puerto. Adicionalmente, se incluyen los nombres de los puertos que experimentarían las mayores afectaciones (aquellos que presentarían incrementos en el nivel del mar superiores a un metro hacia 2100 y aquellos que pasarían a tener elevaciones relativas menores o iguales a cero).

Bajo el escenario pesimista, un gran número de puertos marítimos podrían sufrir afectaciones hacia final de siglo. Los puertos que pasarían a tener elevaciones relativas iguales o menores a cero movilizaron más de 12 millones de TEU en 2019.

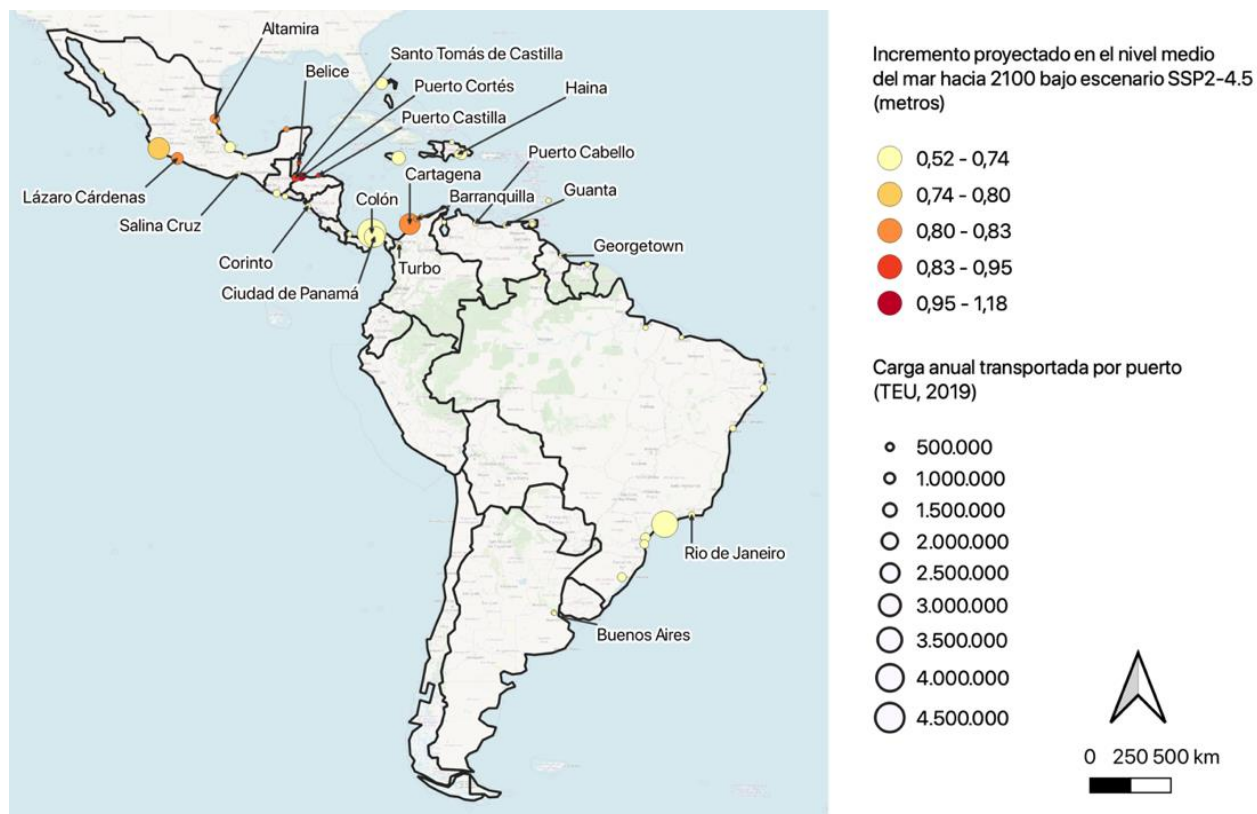
**Figura 3.** Incremento proyectado en el nivel medio del mar hacia 2100 bajo escenario pesimista para los puertos marítimos de la región ubicados a 10 metros o menos sobre el nivel del mar



Fuente: Elaboración propia con datos de World Port Index para la ubicación de puertos (National Geospatial Intelligence Agency, 2019), datos del satélite ICE-SAT2 para el cálculo de elevación de puertos (Vernimmen & Hooijer, 2022), proyecciones del nivel del mar del sexto reporte de evaluación del IPCC (Fox-Kemper et al., 2021; Garner et al., 2021; Kopp et al., 2023) y datos de movimiento de contenedores por puerto provenientes de CEPAL (CEPAL, 2019).

Bajo el escenario intermedio, se proyectan incrementos menos drásticos en el nivel del mar (Figura 4). No obstante, muchos de los puertos que tendrían elevaciones relativas menores a cero en el escenario pesimista también experimentarían esta situación en el escenario intermedio. Los puertos que pasarían a tener elevaciones relativas iguales o menores a cero en el escenario intermedio movilizaron más de 11 millones de TEU en 2019.

**Figura 4.** Incremento proyectado en el nivel medio del mar hacia 2100 bajo escenario intermedio para los puertos marítimos de la región ubicados a 10 metros o menos sobre el nivel del mar



Fuente: Elaboración propia con datos de World Port Index para la ubicación de puertos (National Geospatial Intelligence Agency, 2019), datos del satélite ICE-SAT2 para el cálculo de elevación de puertos (Vernimmen & Hooijer, 2022), proyecciones del nivel del mar del sexto reporte de evaluación del IPCC (Fox-Kemper et al., 2021; Garner et al., 2021; Kopp et al., 2023) y datos de movimiento de contenedores por puerto provenientes de CEPAL (CEPAL, 2019).

La Tabla 3 resume los resultados de los puertos más afectados para los dos escenarios. Bajo el escenario pesimista, 19 puertos de la región pasarían a tener elevaciones relativas iguales o menores a cero y 10 puertos experimentarían incrementos superiores a un metro. Bajo el escenario intermedio, un total de 16 puertos pasarían a tener elevaciones relativas iguales o menores a cero hacia 2100, mientras que los incrementos más altos en el nivel del mar serían de 90cm y se presentarían en tres puertos.

**Tabla 3.** Puertos con mayores afectaciones proyectadas hacia 2100 bajo escenarios pesimista e intermedio

Puerto	País	Escenario pesimista, 2100		Escenario intermedio, 2100	
		Incremento >1m	Elevación relativa <0	Incremento >90 cm	Elevación relativa <0
Cartagena	Colombia	Si	-	-	-
Barranquilla	Colombia	Si	-	-	-
Turbo	Colombia	-	Si	-	Si
Colón	Panamá	-	Si	-	Si
Balboa	Panamá	-	Si	-	Si

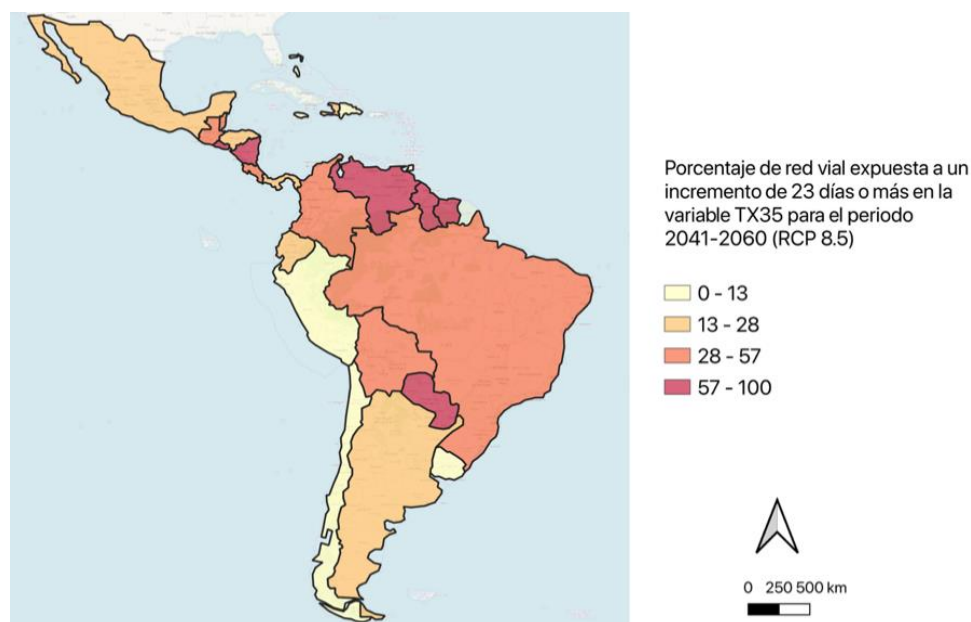
Puerto	País	Escenario pesimista, 2100		Escenario intermedio, 2100	
		Incremento >1m	Elevación relativa<0	Incremento >90 cm	Elevación relativa<0
Caucedo	República Dominicana	-	Si	-	-
Haina	República Dominicana	-	Si	-	Si
Puerto Castilla	Honduras	Si	Si	-	Si
Puerto Cortés	Honduras	Si	-	Si	-
Santo Tomás de Castilla	Guatemala	Si	Si	Si	Si
Ciudad de Belice	Belice	Si	Si	Si	Si
Progreso	México	Si	-	-	-
Tampico	México	Si	Si	-	Si
Altamira	México	Si	-	-	-
Lázaro Cárdenas	México	Si	-	-	-
Salina Cruz	México	-	Si	-	Si
Acajutla	El Salvador	-	Si	-	Si
Corinto	Nicaragua	-	Si	-	Si
Puerto Bolívar	Ecuador	-	Si	-	-
Buenos Aires	Argentina	-	Si	-	Si
Río de Janeiro	Brasil	-	Si	-	Si
Georgetown	Guyana	-	Si	-	Si
Port of Spain	Trinidad y Tobago	-	Si	-	-
Guanta	Venezuela	-	Si	-	Si
Puerto Cabello	Venezuela	-	Si	-	Si

Fuente: Elaboración propia

### 3.3. Exposición de carreteras a temperaturas extremas

De acuerdo con lo descrito en la sección 2.4, los incrementos elevados en la variable de temperatura se definieron como aquellos que se encontraran dentro del 30% más alto de las proyecciones para la región bajo el escenario pesimista. Esto corresponde a incrementos de por lo menos 23 días adicionales en el número de días por año con temperaturas iguales o superiores a 35°C. Los resultados para el escenario pesimista indican que más del 57% de la red vial de El Salvador, Nicaragua, Venezuela, Guyana, Surinam y Paraguay experimentarían incrementos elevados en el número de días por año con temperaturas extremas (Color rojo en la Figura 5).

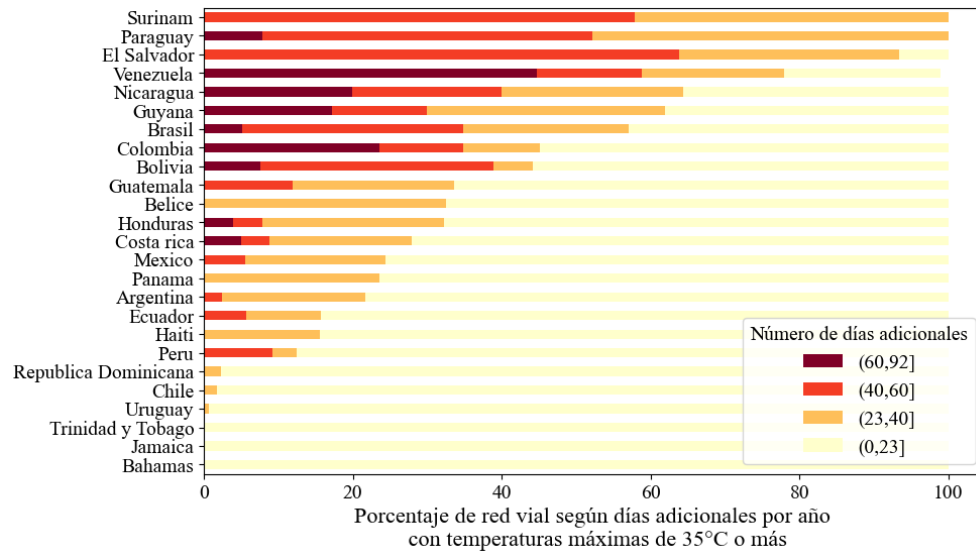
**Figura 5.** Países de la región según porcentaje de red vial expuesta a incrementos elevados en el número de días al año con temperaturas iguales o superiores a 35°C hacia 2050 bajo el escenario pesimista



Fuente: Elaboración propia con datos de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023) para caracterizar la red vial y proyecciones CORDEX para TX35 del Atlas Interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

La Figura 6 proporciona mayor nivel de detalle sobre la distribución de estas proyecciones. Para cada país, cada segmento de la red vial fue clasificado en una de cuatro categorías, en función del incremento proyectado en el número de días por año bajo temperaturas extremas. La primera categoría (color amarillo claro) corresponde a los segmentos que no experimentarían incrementos elevados en la variable de interés (segmentos que se encuentran por debajo del 30% de los incrementos más altos para la región). Por su parte, los segmentos que sí experimentarían incrementos elevados en el número de días con temperaturas extremas fueron subdivididos en tres categorías adicionales dependiendo de la intensidad del cambio proyectado (colores amarillo oscuro, rojo y vinotinto). La figura indica que cerca del 100% de la red vial de Surinam y Paraguay estaría expuesta a incrementos elevados (23 días o más) en la variable de interés. Más del 50% de la red vial de Surinam, Paraguay, El Salvador y Venezuela estaría expuesta a incrementos de más de 40 días por año con temperaturas extremas. Venezuela enfrentaría los incrementos más drásticos de la región, ya que cerca del 45% de su red vial experimentarían temperaturas extremas durante más de 60 días adicionales por año.

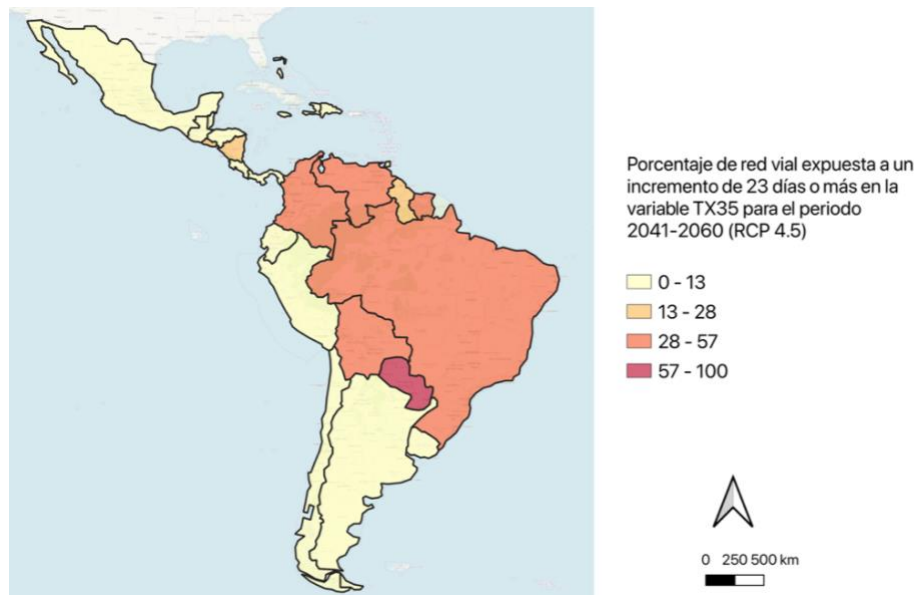
**Figura 6.** Distribución de la red vial de cada país según rangos de cambio proyectado en el número de días por año con temperaturas superiores a 35°C hacia 2050 bajo el escenario pesimista



Fuente: Elaboración propia con datos de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023) para caracterizar la red vial y proyecciones CORDEX para TX35 del Atlas Interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

La Figura 7 indica que, bajo el escenario intermedio, más del 57% de la red vial de Paraguay experimentarían incrementos elevados (de 23 días adicionales o más) en el número de días por año con temperaturas extremas. En Colombia, Venezuela, Brasil, Bolivia y Guyana, más del 28% de la red vial estaría expuesta a incrementos elevados en el número de días por año con temperaturas extremas.

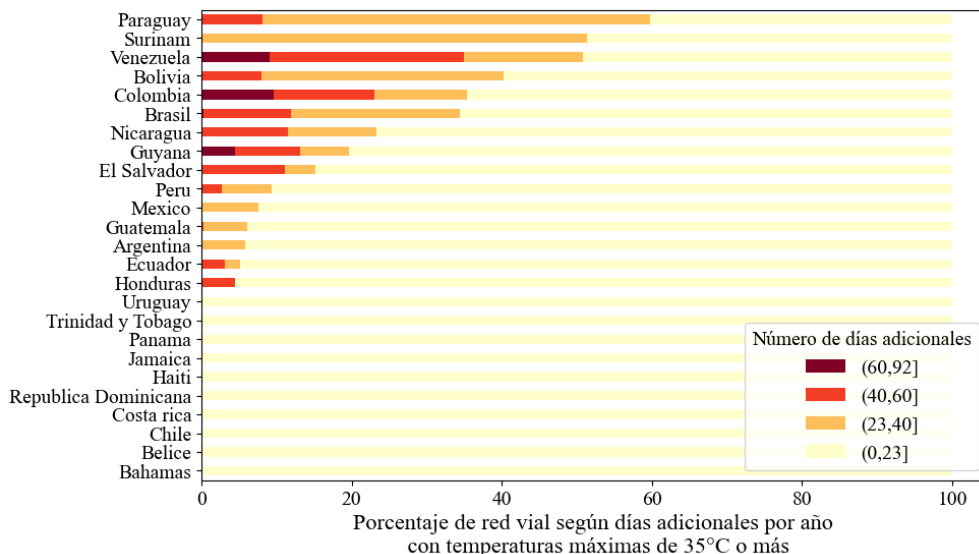
**Figura 7.** Países de la región según porcentaje de red vial expuesta a incrementos elevados en el número de días al año con temperaturas superiores a 35°C hacia 2050 bajo el escenario intermedio



Fuente: Elaboración propia con datos de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023) para caracterizar la red vial y proyecciones CORDEX para TX35 del Atlas Interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

Por su parte, la Figura 8 indica que en el escenario intermedio la infraestructura carretera de Venezuela nuevamente estaría expuesta a los incrementos más drásticos, ya que más del 25% de su red vial experimentaría un incremento de más de 40 días adicionales con temperaturas máximas iguales o superiores a 35°C.

**Figura 8.** Distribución de la red vial de cada país según rangos de cambio proyectado en el número de días con temperaturas superiores a 35°C hacia 2050 bajo el escenario intermedio



Fuente: Elaboración propia con datos de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023) para caracterizar la red vial y proyecciones CORDEX para TX35 del Atlas Interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

### 3.4. Exposición de carreteras a precipitaciones extremas

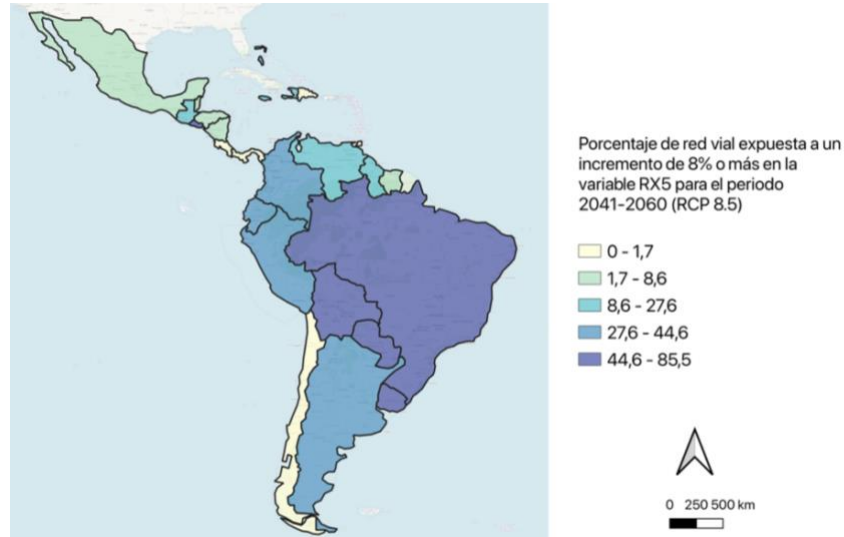
De forma análoga a la metodología empleada para el análisis de temperaturas, los incrementos elevados en la variable de precipitación se definieron como aquellos que se encontraban dentro del 30% más alto de las proyecciones para la región bajo el escenario pesimista. Esto corresponde a incrementos de por lo menos 8% en la precipitación máxima acumulada durante 5 días consecutivos.

La Figura 9 indica que más del 45% de la red vial de El Salvador, Brasil, Bolivia, Paraguay y Uruguay podría experimentar incrementos elevados (de 8% o más) en la precipitación máxima acumulada durante 5 días consecutivos hacia mitad de siglo y bajo el escenario pesimista.

La Figura 10 presenta mayor nivel de detalle sobre la distribución de las proyecciones para el escenario pesimista, empleando un análisis similar al desarrollado para temperaturas. Para cada país, cada segmento de la red vial fue clasificado en una de cuatro categorías, en función del incremento proyectado en la precipitación máxima acumulada. La primera categoría corresponde a aquellos segmentos en donde la precipitación acumulada podría disminuir (valores negativos de la variable evaluada, en el tono más claro). La segunda categoría corresponde a los segmentos en los que se proyecta un cambio positivo pero moderado en la precipitación acumulada (valores positivos pero menores a 8%). Las dos categorías restantes (en los tonos más oscuros de azul) corresponden a los segmentos donde se proyectan incrementos elevados en la precipitación máxima acumulada. Estos segmentos fueron subdivididos en dos categorías adicionales dependiendo de la intensidad del cambio

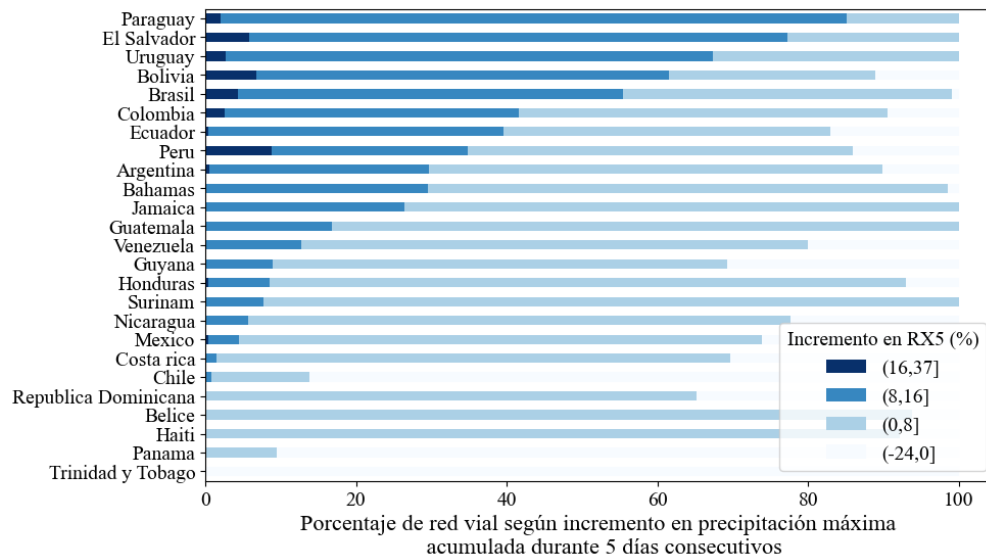
proyectado. La figura permite ver que más del 85% de la red de Paraguay estaría expuesta a incrementos elevados en la variable de análisis, seguido por El Salvador con 77%.

**Figura 9.** Países de la región según porcentaje de red vial expuesta a incrementos elevados en la precipitación máxima acumulada durante 5 días consecutivos hacia 2050 bajo el escenario pesimista



Fuente: Elaboración propia con datos de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023) para caracterizar la red vial y proyecciones CORDEX para RX5 del Atlas Interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

**Figura 10.** Distribución de la red vial de cada país según rangos de cambio proyectado en la precipitación máxima acumulada durante 5 días consecutivos hacia 2050 bajo el escenario pesimista

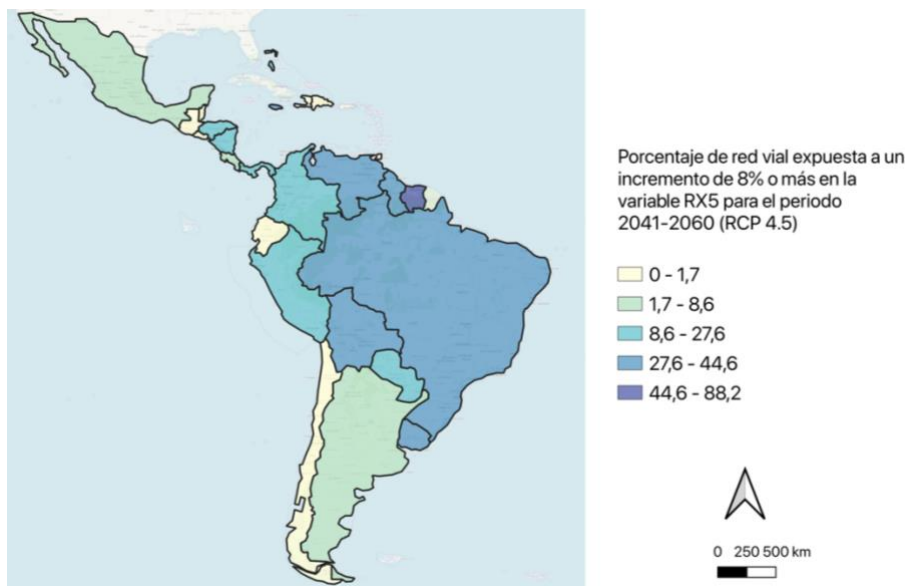


Fuente: Elaboración propia con datos de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023) para caracterizar la red vial y proyecciones CORDEX para RX5 del Atlas Interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

La Figura 11 indica que, bajo el escenario intermedio, Surinam sería el único país dentro del rango más alto de exposición a precipitaciones extremas empleado al analizar el escenario pesimista. Cabe resaltar que este país estaba dentro de los rangos más bajos de exposición al evaluar el escenario pesimista

(Comparación entre Figura 9 y Figura 11). Por otro lado, más del 28% de la red vial de Venezuela, Guyana, Brasil, Bolivia y Uruguay estaría expuesta a incrementos elevados (superiores a 8%) en la precipitación máxima acumulada bajo el escenario intermedio (Figura 11).

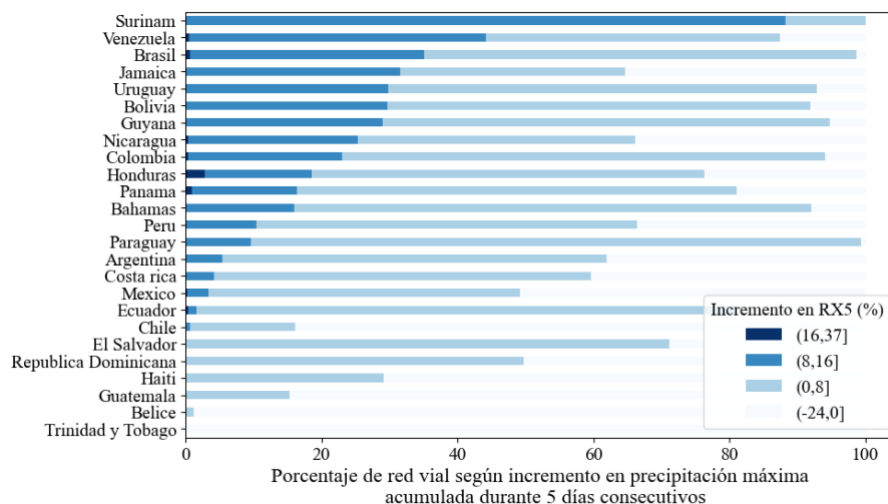
**Figura 11.** Países de la región según porcentaje de red vial expuesta a incrementos elevados en la precipitación máxima acumulada durante 5 días consecutivos hacia 2050 bajo el escenario intermedio



Fuente: Elaboración propia con datos de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023) para caracterizar la red vial y proyecciones CORDEX para RX5 del Atlas Interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

Más específicamente, la Figura 12 indica que más del 88% de la red vial de Surinam experimentaría un incremento de 8% o más en la precipitación máxima acumulada durante 5 días consecutivos (Figura 12).

**Figura 12.** Distribución de la red vial de cada país según cambio proyectado en la precipitación máxima acumulada durante 5 días consecutivos hacia 2050 bajo el escenario intermedio



Fuente: Elaboración propia con datos de OpenStreetMap (Geofabrik, 2023) para caracterizar la red vial y proyecciones CORDEX para RX5 del Atlas Interactivo del IPCC (J. M. Gutiérrez et al., 2021; Iturbide et al., 2021).

#### 4. Discusión de Resultados

Los resultados indican que diversos aeropuertos costeros y puertos marítimos de la región podrían experimentar incrementos en el nivel del mar superiores a un metro hacia finales de siglo, tanto bajo el escenario pesimista como bajo el escenario intermedio. Como resultado, estos activos podrían sufrir inundaciones permanentes en los casos donde el incremento proyectado en el nivel del mar supere su elevación actual. Adicionalmente, aún en los casos en donde el incremento proyectado no supere la elevación actual, se espera que los incrementos en el nivel del mar, sumados a los patrones locales de hundimiento del terreno, aumenten la vulnerabilidad de aeropuertos y puertos frente a la ocurrencia de eventos extremos.

Se destaca la necesidad de evaluar potenciales medidas de adaptación sobre aeropuertos clave para el turismo y la conectividad, en los que se proyectan las mayores afectaciones hacia fines de siglo bajo los escenarios pesimista e intermedio. Este es el caso de los aeropuertos ubicados en Cartagena, Belice y Las Bahamas. El aeropuerto internacional Rafael Núñez de Cartagena absorbe el 6% de los pasajeros internacionales y el 8% de los pasajeros nacionales que se mueven anualmente por vía aérea en Colombia (Aeronáutica Civil, 2021), siendo un activo clave para el turismo. Adicionalmente, las interrupciones en la operación de este aeropuerto también tendrían consecuencias significativas en el mercado laboral y productivo de Cartagena, ya que el sector turístico genera el 10,4% de empleos de la ciudad y el 4,4% del PIB del departamento de Bolívar (DANE, 2021; ICULTUR, 2020). En el caso de Belice, las posibles interrupciones en aeropuertos tendrían impactos significativos sobre el turismo y la conectividad, ya que el 33% del PIB de este país está relacionado con el transporte aéreo y el ingreso de turistas y que este país concentra alrededor del 13% del tráfico aéreo doméstico del Caribe (Briceño-Garmendia et al., 2015). En el caso de las Bahamas, el turismo genera un 27% del total de empleos directos y un 25% adicional en empleos indirectos (Granda et al., 2022). Alrededor del 20% de los ingresos de turistas internacionales llegan al país por vía aérea (Ministerio de Turismo de Las Bahamas, 2022). Se proyecta que 11 aeropuertos de este país podrían experimentar incrementos en el nivel del mar superiores a 80cm hacia 2100 bajo el escenario pesimista, generando implicaciones sobre rutas nacionales e internacionales fundamentales para el turismo y el transporte de pasajeros y mercancías entre islas.

Dentro de los puertos marítimos donde se proyectan las mayores afectaciones hacia fines de siglo en los escenarios pesimista e intermedio, se resalta la importancia de desarrollar medidas de adaptación en aquellos puertos con mayor participación en el transporte marítimo de la región. Algunos ejemplos incluyen el puerto de Cartagena en Colombia, Puerto Cortés en Honduras, Lázaro Cárdenas en México y los puertos de Colón y Balboa en Panamá. El puerto de Cartagena es uno de los principales puertos en materia de transbordos en ALC, absorbiendo el 5,8% del transporte de carga en TEU de la región (Calatayud & Montes, 2021). Puerto Cortés es el puerto más importante de Honduras, que participa en más del 15% de rutas de transporte marítimo de Centroamérica (Matiz et al., 2022). Lázaro Cárdenas es uno de los principales puertos mexicanos y el principal competidor del puerto de Manzanillo (Connell et al., 2015).

Por su parte, los puertos de Colón y Balboa tienen un rol preponderante en la región y en la red marítima internacional. Los puertos panameños concentran el 14,3% del movimiento total de contenedores en ALC, siendo superados en la región únicamente por los puertos de Brasil (Calatayud & Montes, 2021). El puerto de Colón es el puerto con la mayor actividad marítima de toda la región,

transportando aproximadamente 4,4 millones de TEU en el 2019 (CEPAL, 2020). Al estar ubicados a ambos márgenes del Canal de Panamá, los puertos de Colón y Balboa representan nodos clave para el transbordo de contenedores entre rutas marítimas globales Este-Oeste y Norte-Sur, con los trasbordos representando más del 87% de los movimientos en ambos puertos (Calatayud & Montes, 2021). Adicionalmente, las disrupciones en la operación de estos dos puertos generarían impactos significativos para la economía panameña, ya que el sector de transporte por puertos marítimos representa el 32% del PIB de este país (Autoridad Marítima de Panamá, 2020).

En cuanto las proyecciones de temperatura para mitad de siglo, ambos escenarios indican que Surinam, Paraguay y Venezuela serían los países con mayores niveles de exposición a incrementos elevados en el número de días por año con temperaturas extremas. El Salvador también estaría dentro de este grupo, pero únicamente bajo el escenario pesimista. La red vial de Venezuela experimentaría los incrementos más drásticos dentro de estos países, con más del 45% de su red expuesta a 60 días adicionales por año bajo temperaturas extremas en el escenario pesimista y más del 25% de su red vial expuesta a 40 días adicionales por año bajo temperaturas extremas en el escenario intermedio. Se espera que los incrementos en la frecuencia de temperaturas extremas aceleren el deterioro de las estructuras de pavimento y generen mayores necesidades de inversión en mantenimiento de carreteras, especialmente para los países con mayores niveles de exposición.

Los incrementos en precipitación máxima acumulada durante varios días consecutivos también podrían resultar en mayores necesidades de inversión sobre la infraestructura vial de la región, ya que la saturación del suelo resultante de mayores niveles de precipitación acumulada favorece la ocurrencia de deslizamientos. Sin embargo, los resultados obtenidos para la variable analizada no presentan una tendencia consistente hacia mitad de siglo al comparar los escenarios pesimista e intermedio. Bajo el escenario pesimista, más del 50% de la red vial de Paraguay, El Salvador, Uruguay, Bolivia y Brasil experimentarían los mayores incrementos en la precipitación máxima acumulada durante cinco días consecutivos. En contraste, bajo el escenario intermedio, Surinam sería el único país que cumpliría con estos niveles de exposición, con más del 88% de su red vial expuesta a los mayores incrementos en precipitación máxima acumulada. Adicionalmente, algunos de los países que presentan los mayores niveles de exposición bajo el escenario pesimista, tendrían valores muy bajos de exposición bajo el escenario intermedio, incluyendo a Paraguay y El Salvador.

Exceptuando las proyecciones de precipitación, la mayoría de los resultados obtenidos para las diversas variables climáticas y modos de transporte analizados presentaron una tendencia consistente entre los escenarios pesimista e intermedio. Así, los activos y países con mayores niveles de exposición a cambios en el nivel del mar e incrementos en la frecuencia de temperaturas extremas generalmente fueron los mismos bajo ambos escenarios, con cambios más drásticos pero en la misma dirección en el caso del escenario pesimista. En los casos donde se obtuvo una tendencia consistente entre los dos escenarios analizados, este estudio sirve como un punto de partida para identificar y priorizar aquellos países y activos que podrían requerir medidas de adaptación.

Las posibles medidas de adaptación a implementar en el caso de aeropuertos costeros y puertos marítimos con las mayores afectaciones proyectadas incluyen la construcción o modificación de estructuras de defensa (diques, murallones, compuertas, sistemas de drenaje, soluciones basadas en la naturaleza), la elevación de la infraestructura existente para hacerla menos vulnerable, o la reubicación de estos activos en zonas de menor exposición a esta amenaza. En el caso de carreteras, se recomienda

evaluar la posibilidad de emplear materiales más resistentes a temperaturas extremas y al mismo tiempo incrementar la periodicidad de actividades de mantenimiento rutinario en aquellos países donde se presentarán los mayores niveles de exposición a temperaturas extremas. Frente a la mayor ocurrencia de precipitaciones extremas, las posibles estrategias de adaptación para carreteras incluirían la estabilización de taludes para reducir la probabilidad de deslizamientos de tierra por saturación del suelo, el refuerzo de pilas y estribos de puentes para evitar su erosión, el aumento en la capacidad de los sistemas de drenaje o el uso de pavimentos permeables que reducen la carga sobre los sistemas de drenaje al permitir infiltración de agua en el suelo. Sin embargo, no es posible identificar qué países podrían requerir alguna de estas medidas de adaptación a precipitaciones extremas a partir del presente estudio, dado que las proyecciones regionales de precipitación no presentan una tendencia consistente para los escenarios evaluados.

La identificación de medidas de adaptación concretas a implementar en cada caso requerirá un análisis más detallado por parte de expertos, el cual deberá involucrar información climática y de contexto más detallada y modelos que representen apropiadamente las particularidades de las dinámicas locales (BID, 2019). Lo anterior, teniendo en cuenta que el presente estudio tuvo un carácter regional y por lo tanto se basó en fuentes de datos globales y regionales según la disponibilidad de información. Por otro lado, las diferencias en tendencias obtenidas al analizar las proyecciones de cambio en RX5 para los escenarios pesimista e intermedio reflejan la dificultad asociada a modelar las variables relacionadas con precipitación. Con el fin de afinar estas proyecciones, se requieren estudios más detallados que involucren los modelos más apropiados para representar los patrones históricos de precipitación de cada país.

## 5. Recomendaciones de Política Pública

El análisis de escenarios presentado en esta nota técnica permitió identificar activos de infraestructura y países específicos de la región en donde se proyectan los cambios más drásticos en las variables climáticas más relevantes para la infraestructura de transporte. Si bien esta información constituye un paso inicial en la identificación de necesidades de adaptación de la infraestructura existente, garantizar la resiliencia de los sistemas de transporte de la región requiere la implementación de un conjunto mucho más amplio de medidas de política pública que permitan identificar y priorizar las necesidades puntuales de adaptación de los sistemas de transporte existentes, a la vez que establezcan un marco regulatorio e institucional adecuado para la construcción y operación de nueva infraestructura teniendo en cuenta criterios de CC. Adicionalmente, será necesario abordar la descarbonización y adaptación del sector transporte de manera conjunta, con el fin de minimizar no solo los impactos finales del CC sobre los sistemas de transporte, sino también la contribución del sector a las emisiones.

En este contexto, esta sección presenta una serie de recomendaciones de política pública para la adaptación del sector transporte de ALC al CC, tomadas del reporte insignia del BID sobre transporte y CC (Calatayud et al., 2023). Las recomendaciones se agrupan en cuatro líneas de acción principales: i) priorizar la descarbonización y adaptación del sector, ii) desarrollar instrumentos de política que permitan materializar esta priorización, iii) adecuar las instituciones para poder implementar los cambios requeridos y iv) desarrollar alianzas estratégicas con el sector privado, la academia y la sociedad civil. A continuación se describe cada línea de acción, haciendo énfasis en las recomendaciones relacionadas con adaptación. Las recomendaciones detalladas de descarbonización y adaptación por modo de transporte se pueden encontrar en el reporte original.

### *Línea de acción 1: Priorizar la adaptación del sector*

Se recomienda introducir cambios en los planes sectoriales y subsectoriales de transporte, que reflejen la importancia de la adaptación del sector y establezcan metas específicas sobre esta temática. Para definir estas metas, es necesario llevar a cabo una serie de acciones complementarias. En primer lugar, se requiere contar con mayor información sobre las necesidades de adaptación de la infraestructura existente. En ese sentido, se recomienda elaborar mapas de riesgo, vulnerabilidad y criticidad de la infraestructura de transporte de cada país, a una escala adecuada que permita priorizar las necesidades de adaptación. A partir de esta información, se deberán identificar las inversiones públicas requeridas y los ajustes de funcionalidad organizativa a realizar para la implementación de acciones de adaptación de los sistemas de transporte existentes. Las inversiones a realizar no solo incluyen la construcción de nueva infraestructura para proteger, elevar o reubicar la infraestructura existente, sino que también deberán considerar la necesidad de incrementar la frecuencia de mantenimiento de la infraestructura en función de su vida útil y los cambios proyectados de CC para cada región.

### *Línea de acción 2: Desarrollar instrumentos de política*

Con el fin de materializar las metas de adaptación establecidas en los planes de transporte, será necesario generar diversos instrumentos de política. Estos se pueden clasificar en cinco grupos principales: regulaciones, procesos de adquisición, instrumentos de precios, incentivos no económicos, e inversiones.

Algunos ejemplos de recomendaciones a nivel regulatorio incluyen revisar el ordenamiento territorial para limitar desarrollos en zonas de riesgo, actualizar los estándares de diseño y construcción para tener en cuenta el CC, o establecer disposiciones de inspección de la infraestructura existente en función de los cambios graduales proyectados por el CC. Por su parte, las recomendaciones sobre procesos de adquisición incluyen la incorporación de requisitos de adaptación en nuevos contratos, por ejemplo exigiendo el desarrollo de análisis de riesgos y planes de adaptación en procesos de licitación, aumentando la periodicidad de mantenimiento para nuevos contratos de concesión, o empleando contratos basados en desempeño con objetivos e indicadores de resiliencia climática. También se recomienda requerir la participación de expertos en adaptación al CC dentro de los contratos de diseño y construcción de infraestructura de transporte, así como establecer claramente la distribución de riesgos entre el sector público y privado ante condiciones climáticas extremas.

En cuanto a los instrumentos de precios, las recomendaciones de adaptación incluyen otorgar subsidios o rebajas de impuestos para promover la implementación medidas de adaptación. Los seguros también se pueden emplear para generar incentivos orientados a garantizar los objetivos de adaptación, por ejemplo al hacer que el valor de las primas de los seguros estén sujetas al mantenimiento regular de la infraestructura existente. Los incentivos no económicos incluyen el fomento de la investigación e intercambio de conocimientos sobre adaptación, así como los programas de capacitación sobre gestión y prevención de riesgos de desastres, o el desarrollo de sistemas de monitoreo y alerta temprana que brinden mayor información a los usuarios y agencias de transporte sobre posibles interrupciones en los servicios.

Finalmente, se recomienda realizar las inversiones y contrataciones requeridas para adaptar la infraestructura existente, especialmente de infraestructura crítica como puertos, aeropuertos, túneles, puentes y aquella asociada a sistemas de transporte urbano. Se enfatiza la necesidad de desarrollar mecanismos innovadores de fondeo y financiamiento que permitan garantizar los recursos necesarios

para implementar las medidas de adaptación. Los instrumentos financieros asociados al CC y la sostenibilidad representan una oportunidad a aprovechar en este sentido, adicional a la necesidad de aumentar significativamente el volumen y mejorar la eficiencia de los mecanismos tradicionales de financiamiento y fondeo disponibles en el sector.

#### *Línea de acción 3: Adecuar las instituciones*

Es necesario contar con un marco institucional apropiado para poder implementar los instrumentos de política descritos anteriormente. Las instituciones deberán tener la capacidad para diseñar, implementar, monitorear y evaluar la efectividad de las políticas de mitigación y adaptación del transporte al CC. En este sentido, se recomienda fortalecer el conocimiento sobre adaptación mediante la capacitación y la incorporación de expertos en el tema dentro de los equipos humanos de las instituciones del sector transporte. También es muy importante que las acciones a nivel local estén alineadas con los objetivos establecidos a nivel país, para lo cual se recomienda desarrollar mecanismos de coordinación vertical y horizontal. Por ejemplo, es importante desarrollar mecanismos de cooperación entre las diferentes agencias responsables de la planificación y toma de decisiones sobre el manejo de riesgos asociados al clima, incluyendo la coordinación y cooperación entre los entes gubernamentales que generan datos e información climática y los ministerios de línea que usan esa información para la planificación de las intervenciones y la toma de decisiones. En relación con la capacidad de atención a emergencias, las instituciones deberán aprovechar los sistemas de monitoreo y alerta temprana de riesgos climáticos y desarrollar la capacidad legal y operativa para movilizar los recursos requeridos de forma oportuna en situaciones de emergencia.

#### *Línea de acción 4: Desarrollar alianzas*

El desarrollo de alianzas estratégicas con el sector privado, la academia y la sociedad civil permitirá garantizar la inclusión de las perspectivas de estos actores en el diseño e implementación de las políticas, así como fomentar la innovación y el desarrollo tecnológico. En este sentido, se recomienda la creación de alianzas con cooperación internacional para financiar programas y fomentar el intercambio de experiencias internacionales en adaptación al CC. También se sugiere desarrollar alianzas con la academia orientadas a fomentar la investigación sobre adaptación del transporte al CC, incluyendo Soluciones Basadas en la Naturaleza y nuevos materiales.

#### *Reflexiones finales y próximos pasos*

El análisis de exposición de la infraestructura de ALC presentado en esta nota técnica se enmarca dentro de la primera línea de acción, ya que contribuye en la identificación de necesidades de adaptación de la infraestructura existente. El estudio constituye un punto de partida para caracterizar la vulnerabilidad de la infraestructura de la región frente al CC, realizando una identificación inicial de países y activos que estarían expuestos a los cambios más drásticos en variables climáticas relevantes. Los resultados de este análisis permiten entender en dónde enfocar esfuerzos futuros de inversión e investigación.

Partiendo del panorama regional de exposición de la infraestructura de transporte presentado en este estudio, se recomienda llevar a cabo análisis adicionales con mayor nivel de detalle sobre activos específicos de infraestructura, orientados a identificar las necesidades de adaptación a nivel de proyecto. Dichos estudios deberán incorporar información de contexto detallada, involucrar la participación de expertos en adaptación al CC y emplear las proyecciones climáticas que mejor se ajusten a las dinámicas históricas de las variables climáticas en cada país, con el fin de entender las necesidades concretas de adaptación a implementar para minimizar los posibles impactos negativos sobre la infraestructura y servicios de transporte existentes en la región.

Las recomendaciones de política pública presentadas en esta sección son indicativas de la gran magnitud de los desafíos existentes para la adaptación del transporte al CC en ALC. Garantizar la resiliencia de los sistemas de transporte de la región y minimizar los daños y pérdidas asociados al CC requerirá la implementación de un cambio sistémico en el sector transporte con efectos sobre las instituciones, los instrumentos de planificación, las regulaciones, las inversiones, los procesos de contratación, entre otros. Las estimaciones sobre niveles de exposición de la infraestructura de transporte presentadas en esta nota técnica constituyen un punto de partida para entender y priorizar las necesidades de adaptación. Este esfuerzo deberá ser complementado con un conjunto más amplio de acciones en las cuatro líneas de acción propuestas.

## Referencias

- AECOM. (2019). Estudio de Resiliencia para la Red Vial Estatal del Ecuador. Producto 4: Estrategia de Resiliencia Vial.
- Aeronáutica Civil. (2021). Aeropuertos - Análisis anual de tráfico 2004-2021. <https://www.aerocivil.gov.co/atencion/estadisticas-de-las-actividades-aeronauticas/Paginas/estadisticas-operacionales.aspx>
- Andrey, J., Mills, B. N., & Vandermolen, J. (2003). Climate change and the Canadian transportation system: vulnerabilities and adaptations. *University of Waterloo. Department of Geography, Faculty of Environmental Studies*, 55, 11–65.
- Autoridad Marítima de Panamá (2020). Panamá respalda la decisión de la OMI al designar a la gente de mar como trabajadores clave “Key Workers”. <https://www.amp.gob.pa/noticias/notas-de-prensa/panama-respalda-la-decision-de-la-omi-al-designar-a-la-gente-de-mar-como-trabajadores-clave-key-workers>
- Black, D., & Pyatt, N. (2021). Adapting Urban Transport to Climate Change. *Deutsche Gesellschaft Für Technische Zusammenarbeit (GIZ) GmbH*. <http://www.sutp.org>
- Banco Mundial. (2020). Global Airports Database. <https://datacatalog.worldbank.org/search/dataset/0038117/Global-Airports>
- BID. (2019). Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID. <https://publications.iadb.org/es/metodologia-de-evaluacion-del-riesgo-de-desastres-y-cambio-climatico-para-proyectos-del-bid>
- BID. (2021). Evaluación de los efectos e impactos de la tormenta tropical Eta y el huracán Iota en Honduras. <https://publications.iadb.org/es/evaluacion-de-los-efectos-e-impactos-de-la-tormenta-tropical-eta-y-el-huracan-iota-en-honduras>
- BID. (2022). Prospectiva: tendencias y escenarios de la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca hidrográfica del Canal de Panamá (CHCP) <https://publications.iadb.org/es/prospectiva-tendencias-y-escenarios-de-la-disponibilidad-de-recursos-hidricos-en-la-cuenca>
- Bowyer, P., Hänsel, S., Smalley, E., Velegrakis, A., Dagan, M., & Wyrowski, L. (2020). *Climate Change Impacts and Adaptation for Transport Networks and Nodes*. 199.
- Briceño-Garmendia, C., Bofinger, H. C., Cubas, D., & Millan-Placci, M. F. (2015). Connectivity for Caribbean Countries An Initial Assessment.

- Calatayud, A., & Montes, L. (2021). Logística en América Latina y el Caribe: Oportunidades, desafíos y líneas de acción. *Logística En América Latina y El Caribe: Oportunidades, Desafíos y Líneas de Acción*. <https://doi.org/10.18235/0003278>
- CEPAL. (2019). Movimiento Portuario 2019. [https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/movimiento\\_portuario\\_lac\\_2019\\_vers20julio2020.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/movimiento_portuario_lac_2019_vers20julio2020.pdf)
- CEPAL. (2020). La calma antes de la tormenta: comportamiento del movimiento de contenedores en los puertos de América Latina y el Caribe en 2019 y de los principales puertos durante los primeros meses de 2020. [https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/2020\\_informe\\_portuario\\_2019\\_v.pdf](https://www.cepal.org/sites/default/files/news/files/2020_informe_portuario_2019_v.pdf)
- Chen, M., Xu, G., Wu, S., & Zheng, S. (2010). High-temperature hazards and prevention measurements for asphalt pavement. In *2010 International Conference on Mechanic Automation and Control Engineering* (pp. 1341-1344). IEEE. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5536275>
- Christodoulou, A., Christidis, P., & Demirel, H. (2019). Sea-level rise in ports: a wider focus on impacts. *Maritime Economics and Logistics*, 21(4), 482–496. <https://doi.org/10.1057/S41278-018-0114-Z/FIGURES/5>
- Connell, R., Canevari, L., Coleby, C., Wright, S., Robertson, J. N., Morgan, W., Cerezo, A., Rivero, A., Ugarte, G., Larson, R., Carr, C., Washington, R., Saucedo, E., Ramírez, E., Olivera, M., Becker, A., Pascual, J., Barandiarán, M., Ramírez, G.
- DANE. (2021). La información del DANE en la toma de decisiones regionales Cartagena-Bolívar.
- Deltares. (2020). Infraestructura de Transporte Resiliente - DR-T1173-P002. Entregable 5.
- Deopersad, C., Persaud, C., Chakalall, Y., Bello, O., Masson, M., Perroni, A., Carrera-Marquis, D., Fontes de Meira, L., Gonzales, C., Peralta, L., Skerette, N., Marcano, B., Pantin, M., Vivas, G., Espiga, C., Allen, E., Ruiz, E., Ibarra, F., Espiga, F., ... Nelson, M. (2020). Assessment of the Effects and Impacts of Hurricane Dorian in the Bahamas. <https://publications.iadb.org/en/assessment-of-the-effects-and-impacts-of-hurricane-dorian-in-the-bahamas>
- Ebinger, J. O., & Vandycke, N. (2015). *Moving Toward Climate-Resilient Transport*. <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/23685>
- Eichhorst, U., Bongardt, D., & Miramontes, M. (2011). Climate-Proof Urban Transport Planning: Opportunities and Challenges in Developing Cities. In *Resilient Cities* (pp. 91–105). Springer Netherlands. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-0785-6\\_9](https://doi.org/10.1007/978-94-007-0785-6_9)

Eisenack, K., Stecker, R., Reckien, D., & Hoffmann, E. (2012). Adaptation to climate change in the transport sector: a review of actions and actors. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 17(5), 451–469. <https://doi.org/10.1007/s11027-011-9336-4>

EM-DAT. (2023). *International Disasters Database*. <https://public.emdat.be/>

Feron, S., Cordero, R. R., Damiani, A., Llanillo, P. J., Jorquera, J., Sepulveda, E., Asencio, V., Laroze, D., Labbe, F., Carrasco, J & Torres, G. (2019). Observations and projections of heat waves in South America. <https://www.nature.com/articles/s41598-019-44614-4>

Fox-Kemper, B., H.T. Hewitt, C. Xiao, G. Aðalgeirsdóttir, S.S. Drijfhout, T.L. Edwards, N.R. Golledge, M. Hemer, R.E. Kopp, G. Krinner, A. Mix, D. Notz, S. Nowicki, I.S. Nurhati, L. Ruiz, J.-B. Sallée, A.B.A. Slangen, and Y. Yu, 2021: Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1211–1362, [doi:10.1017/9781009157896.011](https://doi.org/10.1017/9781009157896.011).

Garner, G. G., Hermans, T., Kopp, R. E., Slangen, A. B. A., Edwards, T. L., Levermann, A., Nowicki, S., Palmer, M. D., Smith, C., Fox-Kemper, B., Hewitt, H. T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S. S., Golledge, N. R., Hemer, M., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., ... Pearson, B. (2021).

IPCC AR6 Sea Level Projections. <https://zenodo.org/record/6382554#.ZFvF3-zMJo4>

Geofabrik. (2023). OpenStreetMap Data Extracts. <https://download.geofabrik.de/>

Granda, I., Landaverde, O., Pinto Ayala, A. M., & Peña, M. (2022). Atlas de infraestructuras de integración de América Latina y el Caribe: mapeando infraestructuras de transporte y logística de alto impacto en las cadenas de valor regionales. <https://publications.iadb.org/es/node/32830>

Hooijer, A., & Vernimmen, R. (2021). Global LiDAR land elevation data reveal greatest sea-level rise vulnerability in the tropics. *Nature Communications*, 12(1), 3592. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-23810-9>

ICULTUR. (2020). Plan estratégico de reactivación del sector turístico de Bolívar.

IEA. (2022). IEA CO2 Emissions from Fuel Combustion Statistics: Greenhouse Gas Emissions from Energy. Dataset: GHG Emissions from fuel combustion (summary)

- IPCC. (2014). *Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*.
- IPCC. (2021). Annex VI: Climatic Impact-driver and Extreme Indices [Gutiérrez J.M., R. Ranasinghe, A.C. Ruane, R. Vautard (eds.)]. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 2205–2214, doi:10.1017/9781009157896.020.
- IPCC. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)].
- IPCC. (2023). Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001
- Lempert, R. J., Miro, M. E., Prosdocimi, D., Lefevre, B., & Monter, E. (2021). *A DMDU Guidebook for Transportation Planning Under a Changing Climate*.  
<https://publications.iadb.org/en/dmdu-guidebook-transportation-planning-under-changing-climate>
- Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pirani, A., Connors, S. L., Péan, C., Berger, S., ... & Zhou, B. (2021). *Climate change 2021: the physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, 2.
- Matiz, J. P., Landaverde, O., Granada, I., & Martínez Rivas, M. (2022). *Infraestructura regional para el desarrollo económico y logístico de Centroamérica y República Dominicana*.
- Ministerio de Transporte. (2014). *Plan Vías-CC: vías compatibles con el clima. Plan de Adaptación de la Red Vial Primaria de Colombia*.
- Ministerio de Turismo de Las Bahamas (2023). *Foreign Arrivals to The Bahamas by Air & Sea 1971-2023*. <https://www.tourismtoday.com/statistics/foreign-arrivals-air-sea-data>
- National Geospatial Intelligence Agency. (2019). *World Port Index*.  
<https://msi.nga.mil/Publications/WPI>

- Nemry, F., & Demirel, H. (2012). Impacts of Climate Change on transport: a focus on road and rail transport infrastructures. *Publications Office of the European Union*, .  
<https://doi.org/10.2791/15504>
- OAG. (2019). Flight Seats Data. <https://www.oag.com/flight-data-seats>
- Olaya González, J. C., Suardí Gómez, A., Lefevre, B., & Rodriguez Porcel, M. (2022). Transporte resiliente al cambio climático: ¿cómo priorizar la inversión?: caso de República Dominicana. <https://doi.org/10.18235/0004576>
- OpenStreetMap contributors. (2023). Copyrighted OpenStreetMap Data.  
<https://www.openstreetmap.org/copyright/en>
- Oxford Economics. (2018). Economic Benefits of Air Transport in Belize.
- Qiao, Y., Flintsch, G. W., Dawson, A. R., & Parry, T. (2013). Examining effects of climatic factors on flexible pavement performance and service life. *Transportation research record*, 2349(1), 100-107. <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/2349-12>
- Sen, S., Li, H., & Khazanovich, L. (2022). Effect of climate change and urban heat islands on the deterioration of concrete roads. *Results in Engineering*, 16, 100736.  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123022004066>
- Skansi, M.M. et al., 2013: Warming and wetting signals emerging from analysis of changes in climate extreme indices over South America. *Global and Planetary Change*, 100, 295–307, [doi:10.1016/j.gloplacha.2012.11.004](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.11.004).
- Sun, Q., X. Zhang, F. Zwiers, S. Westra, and L. Alexander, 2021: A Global, Continental, and Regional Analysis of Changes in Extreme Precipitation. *Journal of Climate*, 34(1), 243–258, [doi:10.1175/jcli-d-19-0892.1](https://doi.org/10.1175/jcli-d-19-0892.1).
- Seneviratne, S.I., X. Zhang, M. Adnan, W. Badi, C. Dereczynski, A. Di Luca, S. Ghosh, I. Iskandar, J. Kossin, S. Lewis, F. Otto, I. Pinto, M. Satoh, S.M. Vicente-Serrano, M. Wehner, and B. Zhou, 2021: Weather and Climate Extreme Events in a Changing Climate. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1513–1766, [doi:10.1017/9781009157896.013](https://doi.org/10.1017/9781009157896.013)
- Vernimmen, R., & Hooijer, A. (2022). *Global Lowland Dataset V2 (GLL\_DTM\_v2)*.  
<https://zenodo.org/record/7228643#.ZFuoZ-zMJo7>

Vernimmen, R., & Hooijer, A. (2023). New LiDAR-Based Elevation Model Shows Greatest Increase in Global Coastal Exposure to Flooding to Be Caused by Early-Stage Sea-Level Rise. *Earth's Future*, 11(1). <https://doi.org/10.1029/2022EF002880>

Wang, T., Qu, Z., Yang, Z., Nichol, T., Clarke, G., & Ge, Y.-E. (2020). Climate change research on transportation systems: Climate risks, adaptation and planning. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 88, 102553. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102553>