

Una guía de DMDU para la planificación del transporte en un escenario de cambio climático

Autores:

Robert J. Lempert
Michelle E. Miro
Diogo Prosdocimi

Editores:

Benoit Lefevre
Ernesto Monter

División de Transporte
División de Cambio Climático

NOTA TÉCNICA N°
IDB-TN-02114

Febrero 2021

Una guía de DMDU para la planificación del transporte en un escenario de cambio climático

Autores:

Robert J. Lempert

Michelle E. Miro

Diogo Prosdocimi

Editores:

Benoit Lefevre

Ernesto Monter

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

Lempert, Robert J.

Una guía de DMDU para la planificación del transporte en un escenario de cambio climático / Robert J. Lempert, Michelle E. Miro, Diogo Prosdocim; editores, Benoit Lefevre, Ernesto Monter Flores.
p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2114)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Transportation-Latin America-Planning. 2. Transportation-Climatic factors-Latin America. 3. Transportation-Environmental aspects-Latin America. 4. Climatic changes-Risk management-Latin America. I. Miro, Michelle E. II. Prosdocim, Diogo. III. Lefevre, Benoit, editor. IV. Monter Flores, Ernesto, editor. V. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Cambio Climático. VI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Transporte. VII. Título. VIII. Serie.
IDB-TN-2114

Códigos JEL: R42, Q54

Palabras clave: Cambio Climático, Transporte, Planeamiento, Red de Transporte, Riesgo de Desastre, Incertidumbre Profunda, Toma de decisiones, Adaptación, Resiliencia

<http://www.iadb.org>

Copyright © 2021 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

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 CNUDMI (UNCITRAL). 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 CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Una Guía de DMDU para la Planificación del Transporte en un Escenario de Cambio Climático

>> **Autores:**

Robert Lempert, Michelle E. Miro & Diogo Prosdocimi

>> **RAND Social and Economic Wellbeing**

>> **Supervisión:**

Benoit Lefevre & Ernesto Monter

Copyright © 2021 Banco Interamericano de Desarrollo. Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons IGO 3.0 Reconocimiento-NoComercial-SinObrasDerivadas (CC-IGO 3.0 BY-NC-ND) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/igo/legalcode>) y puede ser reproducida para cualquier uso no-comercial otorgando el reconocimiento respectivo al BID. No se permiten obras derivadas.

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 CNUDMI (UNCITRAL). 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 CC-IGO y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones adicionales de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta publicación son de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del Banco Interamericano de Desarrollo, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



NO SE AUTORIZA SU PUBLICACIÓN

Este documento no ha sido revisado, editado ni autorizado formalmente para su publicación. No debe citarse sin el permiso de RAND Corporation. Las publicaciones de RAND no reflejan necesariamente las opiniones de sus clientes de investigación y patrocinadores. es una marca registrada.





Prefacio



En 2007, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) formuló la *Política de Gestión del Riesgo de Desastres* (BID 2007) en el contexto de un aumento en la frecuencia y gravedad de los desastres en América Latina y el Caribe, además de una mayor conciencia de la efectos de los desastres en el desarrollo económico y social de los países de la región. Asimismo, los *Lineamientos de la Política de Gestión del Riesgo de Desastres* del BID (BID 2008) establecieron un procedimiento específico para la evaluación del riesgo de desastres para las operaciones financiadas por el BID. Estos lineamientos incluyen dos etapas principales: i. proyección y clasificación de proyectos, y ii. una evaluación del riesgo de desastres y un plan de Gestión del Riesgo de desastres. Además, a través de la Resolución de Bahamas en 2016, la Junta de Gobernadores del BID comprometió formalmente al BID a mejorar la evaluación del riesgo climático e identificar oportunidades para medidas de resiliencia y Adaptación en la etapa de concepción del proyecto (BID 2016).

Posteriormente, como un recurso para implementar tanto los *Lineamientos de la Política de Gestión del Riesgo de Desastres* como la Resolución de Bahamas en 2016, el BID desarrolló la *Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastres y Cambio Climático para proyectos del BID* (BID 2018). Esta metodología establece un proceso de screening y proporciona orientación para que los equipos del proyecto realicen evaluaciones de riesgo de desastres y cambio climático en cada etapa del ciclo del proyecto. Ofrece una variedad de métodos para realizar evaluaciones de riesgo, los cuales abarcan desde cualitativos hasta cuantitativos y de simples a complejos (por ejemplo, incluye enfoques tanto deterministas como probabilísticos). La metodología también contiene metodologías para la Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda (DMDU por sus siglas en inglés), que es un enfoque más reciente para evaluar y tomar decisiones en un contexto de gestión de riesgos.

Esta guía está alineada con la *Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastres y Cambio Climático para proyectos del BID* e introduce y brinda orientación sobre la aplicación de métodos de DMDU para la planificación del transporte. Presenta los pasos metodológicos que son necesarios para la implementación de metodologías de DMDU y revisa varios de estos métodos, incluyendo la Planificación de Escenarios, las Vías Adaptativas y Toma de Decisiones Robustas (RDM por sus siglas en inglés). Esta revisión está orientada a apoyar la incorporación de métodos de DMDU en los procesos de planificación y financiamiento del sector transporte del BID. Esta guía fue preparada para, y financiada por, el BID y está destinada a ayudar a los líderes de equipo del BID, así como a sus expertos técnicos, agencias de planificación y ejecución y consultores a realizar un análisis de DMDU.

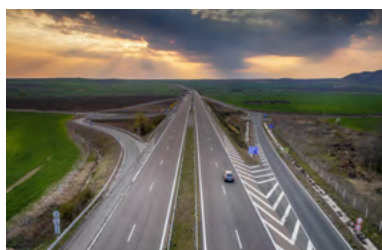
Table of contents

01.



Introducción 14

02.



Gestión de Riesgos Iterativa e Implicaciones Generales en el Análisis de Riesgos de Transporte 17

Gestión de Riesgos Iterativa..... 18

Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastres y Cambio Climático para Proyectos del BID..... 20

Gestión de Riesgos y DMDU en Transporte..... 22

03.



¿Qué Hay de Nuevo con el Cambio Climático? 24

Información sobre el Clima Actual y Futuro..... 25

Lo que Sabemos Sobre el Clima de la Tierra 25

Cómo Afectará el Cambio Climático al Transporte 27

Fuentes de Información sobre el Clima Actual y Futuro..... 34

Conclusiones Clave 36

04.



Métodos de DMDU
Aplicados al Transporte 37

“Predecir y luego actuar” y DMDU 38

Enfoques Alternativos de DMDU 40

Principios Básicos de DMDU..... 41

Marco de Decisiones - Primer Paso de Todo Análisis de DMDU 41

Método 1: Planificación de Escenarios..... 44

Método 2: Vías Adaptativas..... 49

Método 3: Decisiones Robustas (RDM) 51

05.



Implicaciones y Recomendaciones 72

Cuándo usar qué método 73

Lista de consultores y herramientas..... 78

Referencias..... 77

Figuras

Figura 2.1	Componentes de riesgo.....	22
Figura 2.2	Ciclo de Gestión de Riesgos Iterativa	32
Figura 2.3	Metodología de Riesgo del BID	33
Figura 2.4	Calcular el riesgo de la red en el contexto de DMDU.....	41
Figura 3.1	Cambios en Variables Climáticas Medias y Extremas.....	48
Figura 4.1	“Predecir y Luego Actuar” en comparación con los Enfoques de DMDU.....	49
Figura 4.2	Proceso de Planificación de Escenarios	49
Figura 4.3	Escenario de Nueva Zelanda/Matriz Futura con Narrativas	49
Figura 4.4	Los escenarios pueden apoyar el desarrollo de estrategias robustas y flexibles	56
Figura 4.5	Vías Adaptativas.....	65
Figura 4.6	El Proceso de RDM	65
Figura 4.7	Corredor Mediterráneo de los Balcanes Occidentales (MED) y Corredor de Oriente/Mediterráneo Oriental (OEM)	78
Figura 4.8	Conexiones entre factores en el análisis de los Balcanes	79
Figura 4.8	Mapas del proyecto que muestran datos sobre peligros de inundaciones, terremotos y derrumbes	85
Figura 4.9	El modelo de transporte tiene un impacto en los resultados	86
Figura 4.10	Ejemplo de Herramienta de Selección de Enlaces que Muestra los Resultados de la Clasificación de Riesgo	102
Figura 4.11	Reducción del riesgo lograda mediante asignaciones robustas.....	116
Figura 4.12	Distribución de los costos de equilibrio	116
Figura 5.1	Cuándo Utilizar Enfoques de DMDU.....	116

Tablas

Tabla 3.1	Cambio Climático en América Latina	28
Tabla 4.1	Matriz XLRM Utilizada para Organizar el Marco de Decisiones	34
Tabla 4.2	Ejemplo de Matriz de XLRM Completa para la Ruta Nacional	39
Tabla 4.3	Factores de XLRM para el Análisis de Resiliencia del Transporte de los Balcanes	40
Tabla 4.4	Asignaciones robustas sobre 14 enlaces generadores de alto riesgo para tres restricciones presupuestarias alternativas	46
Tabla 5.1	Ejemplos de Aplicaciones de Gestión y Planificación del Transporte	47
Tabla 5.2	Comparación de métodos de DMDU	47

Abreviaturas

MPG	Mejores Prácticas de Gestión.....	50
DMDU	Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda	56
GEI	Gases de Efecto Invernadero.....	59
BID	Banco Interamericano de Desarrollo.....	63
IPCC	Panel Intergubernamental de Cambio Climático	66
ALC	América Latina y el Caribe.....	70
RDM	Decisiones Robustas.....	76
TMDL	Carga Total Máxima Diaria.....	82
XLRM	Factores Inciertos, Palancas de Políticas, Relaciones, Métricas de Desempeño	96

Glosario

Adaptación es el proceso de ajuste al clima real o esperado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación busca moderar o evitar daños o aprovechar oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima esperado y sus efectos (IPCC 2014).

Vías Adaptativas, también llamadas vías de política adaptativa dinámica, son una estrategia de toma de decisiones que consta de una secuencia de pasos o puntos de decisión manejables a lo largo del tiempo.

Marco de Decisiones es la forma en que se redacta y estructura una elección o un desafío.

Incertidumbre Profunda se presenta cuando los expertos o los grupos de interés no saben o no pueden ponerse de acuerdo sobre: (1) modelos conceptuales apropiados que describan las relaciones entre las fuerzas impulsoras clave en un sistema; (2) las distribuciones de probabilidad utilizadas para representar la incertidumbre sobre las variables y parámetros clave, y/o (3) cómo sopesar y valorar los resultados alternativos deseables (Lempert et al. 2003).

DMDU (Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda) es un conjunto de conceptos, métodos y herramientas para informar decisiones en condiciones de incertidumbre profunda.

Modelación Exploratoria es un enfoque de investigación que utiliza experimentos computacionales para analizar sistemas complejos e inciertos (Bankes 1993). La Modelación Exploratoria generalmente emplea un conjunto de modelos para explorar muchos futuros posibles. Un enfoque de Modelación Exploratoria generalmente ve los modelos como herramientas para explorar los resultados de supuestos alternativos sobre el futuro, así como de las opciones de interés sobre políticas (Lempert et al. 2008).

Exposición es la presencia de personas; medios de vida; especies o ecosistemas; funciones ambientales; servicios y recursos; infraestructura o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC 2014).

Flexible se utiliza para indicar una estrategia que se puede ajustar con el tiempo a nueva información.

Peligro es la ocurrencia potencial de un evento o tendencia física natural o inducida por el hombre que pueda causar la pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como daños y pérdidas a la propiedad, infraestructura, medios de vida, prestación de servicios, ecosistemas y recursos ambientales. (IPCC 2014).

Mitigación es una intervención humana para reducir las fuentes o mejorar los sumideros de gases de efecto invernadero.

RDM (Toma de Decisiones Robustas) es un marco analítico de decisiones iterativo que ayuda a identificar posibles estrategias robustas y flexibles, caracterizar las vulnerabilidades de dichas estrategias y evaluar las compensaciones entre las mismas.

Resiliencia es la capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de hacer frente a un evento, tendencia o perturbación peligrosa, respondiendo o reorganizándose de manera que mantengan su función, identidad y estructura esenciales, así como su capacidad de Adaptación, aprendizaje y transformación (IPCC 2014).

Riesgo es el potencial de consecuencias donde está en juego algo de valor y donde el resultado es incierto, reconociendo la diversidad de valores (IPCC 2014).

Gestión de Riesgos son los planes, acciones o políticas para reducir la probabilidad y/o las consecuencias de los riesgos o para responder a las consecuencias (IPCC 2014).

Robusto es un criterio de decisión que busca estrategias que funcionen bien en comparación con las alternativas en una amplia gama de futuros plausibles.

Planificación de Escenarios es un método de planificación en el que los participantes desarrollan un conjunto de escenarios que pueden ayudar a ampliar la comprensión de los participantes sobre las formas en que podría desarrollarse el futuro y ayudar a los participantes a desarrollar estrategias que sean robustas en estos futuros.

Vulnerabilidad es la propensión o predisposición a que algo se vea afectado negativamente. La Vulnerabilidad abarca una variedad de conceptos y elementos, incluyendo sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad para hacer frente y adaptarse (IPCC 2014).

XLRM es un marco que se utiliza para el Marco de Decisiones que se emplea a menudo en los análisis de DMDU. Las letras X, L, R y M se refieren a cuatro categorías de factores importantes: las métricas (M) son los estándares de desempeño que se utilizan para evaluar si una elección de palancas de políticas logra o no los objetivos de los encargados de la toma de decisiones; las palancas de política (L) son acciones a corto plazo que los encargados de la toma de decisiones pueden querer considerar para lograr esos objetivos y las incertidumbres exógenas (X) son factores fuera del control de los encargados de la toma de decisiones que pueden afectar la capacidad de las acciones a corto plazo para lograr los objetivos de los encargados de la toma de decisiones, y las relaciones (R), generalmente representadas por modelos de simulación, describen cómo funcionan las palancas de políticas, según lo medido por las métricas, bajo las diversas incertidumbres.





01.

Introducción



Los efectos de los peligros naturales relacionados con el clima representan una amenaza significativa para el desarrollo sostenible en la región de América Latina y el Caribe (ALC) (Barandiarán, Esquivel et al. 2018) y, en particular, para su sector de transporte. La Gestión de Riesgos proporciona un marco apropiado para evaluar y mitigar los impactos del cambio climático y otros peligros naturales relacionados con el clima en el transporte y otros sistemas y para elegir acciones a fin de mejorar su resiliencia (Jones, Patwardhan et al. 2014; Lempert, Arnold et al. 2018). La Gestión de Riesgos también constituye la base de la *Política de Gestión de Riesgos de Desastres* del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) (BID 2007), el compromiso de Bahamas (BID 2016) y la *Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastres y Cambio Climático para Proyectos del BID* (Barandiarán, Esquivel et al. 2018).

Sin embargo, los analistas y formuladores de políticas involucrados en la planificación, las políticas y la inversión del transporte se enfrentan a desafíos importantes en la gestión de los riesgos provocados por los efectos del cambio climático. El cambio climático afecta la vida útil de carreteras, aeropuertos y ferrocarriles, ya que tienen horizontes de tiempo que superan los 40 años, haciendo que sea más difícil (si no imposible) pronosticar con seguridad todos los eventos futuros relevantes que afectarán dicha infraestructura. Además, el clima ya ha cambiado, por lo que la frecuencia de retorno de las tormentas, por ejemplo, y otros eventos extremos ahora puede ser diferente a lo sugerido por el registro histórico en formas que no siempre se comprenden bien en la actualidad. Implementar la Gestión de Riesgos en condiciones de tal incertidumbre puede resultar difícil (Lempert, Arnold et al. 2018).

El clima pasado ya no es un predictor fiable del clima futuro y existe un alto nivel de incertidumbre sobre cómo el clima ha cambiado y cambiará en el futuro. Sin embargo, esperar a que se resuelvan estas incertidumbres no ofrece un camino a seguir

para los planificadores de transporte, quienes aún deben considerar el clima futuro y otras condiciones al desarrollar planes de infraestructura a largo plazo. Para respaldar la planificación a largo plazo, los modelos climáticos, aunque están lejos de ser perfectos, pueden ofrecer información útil sobre el clima futuro y son útiles cuando se utilizan de manera adecuada. Las consideraciones sobre el clima futuro también deben sopesar múltiples objetivos (por ejemplo, fiabilidad, rentabilidad y equidad) y otras condiciones socioeconómicas o sobre políticas, ya que muchas decisiones resultarán efectivas o brindarán beneficios en múltiples condiciones futuras.

Al desarrollar planes, sopesar los beneficios y considerar las condiciones futuras, los planificadores no deben confundir un riesgo bien caracterizado con condiciones de Incertidumbre Profunda. Existe un riesgo bien caracterizado cuando los planificadores e ingenieros pueden usar con seguridad distribuciones de probabilidad conjunta únicas (es decir, predicciones) para describir el peligro, la exposición y la vulnerabilidad que contribuyen al riesgo. Por el contrario, definimos la Incertidumbre Profunda (Lempert, Popper et al. 2003) como:

La Incertidumbre Profunda ocurre cuando las partes de una decisión no conocen o no están de acuerdo sobre la probabilidad de futuros alternativos o cómo las decisiones o acciones se relacionan con las consecuencias.

Como se describe a continuación, la Incertidumbre Profunda ocurre cuando las partes de una decisión no conocen o no están de acuerdo sobre la probabilidad de futuros alternativos o cómo la decisión o acciones se relacionan con las consecuencias. La DMDU permite la Gestión de Riesgos en tales condiciones. La Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda (DMDU) permite la Gestión de Riesgos en condiciones de Incertidumbre Profunda, es decir, cuando los riesgos no se pueden cuantificar con seguridad.

Esta guía fue preparada para, y financiado por, el BID y está destinada a ayudar a los líderes de equipo del BID, así como a sus expertos técnicos, agencias de planificación y ejecución y consultores a realizar un análisis de DMDU, el cual es un enfoque del proceso de pensamiento de evaluación y toma de decisiones bajo un contexto de Gestión de Riesgos. Por lo tanto, este enfoque y documento están alineados con la *Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastres y Cambio Climático para proyectos del BID* (BID 2018) como un enfoque que se aplica a los análisis de sistemas o portafolios.

Específicamente, esta guía presenta y brinda orientación sobre la aplicación de métodos de DMDU para la planificación del transporte y revisa varios de esos métodos, incluyendo la Planificación de Escenarios, Vías Adaptativas y Toma de Decisiones Robustas (RDM). Esta revisión está orientada a apoyar la incorporación de métodos de DMDU en los procesos de planificación y financiamiento del sector transporte del BID. En el cálculo del riesgo, en lugar de un “acuerdo sobre supuestos”, los métodos de DMDU buscan un “acuerdo sobre posibles acciones”. Es decir, los métodos de DMDU se abstienen de hacer predicciones explícitas sobre qué futuro ocurrirá en el cál-

culo del riesgo y, en cambio, se centran en evaluar las posibles acciones viables para los riesgos y beneficios asociados. El foco de este enfoque aborda la incertidumbre no mediante una cuantificación numérica explícita, sino mediante la selección de acciones robustas que maximizarán los beneficios en el rango probable de posibles condiciones futuras.

La Sección 2 ofrece un breve resumen del riesgo y de la Gestión de Riesgos iterativa, su aplicación actual al transporte, cómo la *Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastres y Cambio Climático para Proyectos del BID* (Barandiarán, Esquivel et al. 2018) implementa estas ideas y cómo esta guía respalda esta metodología del BID para el sector de transporte. La Sección 3 analiza los nuevos desafíos generados por el cambio climático y resume la información sobre el cambio climático actual y futuro y los impactos climáticos en el transporte en la región de ALC. La Sección 4 presenta la Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda (DMDU) aplicada al transporte y revisa varios de estos métodos, incluyendo la Planificación de Escenarios, Vías Adaptativas y Toma de Decisiones Robustas (RDM). La sección final ofrece implicaciones y recomendaciones para el BID.



An aerial photograph of a multi-lane highway stretching into the distance under a dramatic, cloudy sky at dusk or dawn. The road is flanked by green fields and some distant hills. A blue decorative line runs horizontally across the bottom of the image, with a stylized, wavy pattern on the right side.

02.

Gestión de Riesgos Iterativa e Implicaciones Generales en el Análisis de Riesgos de Transporte

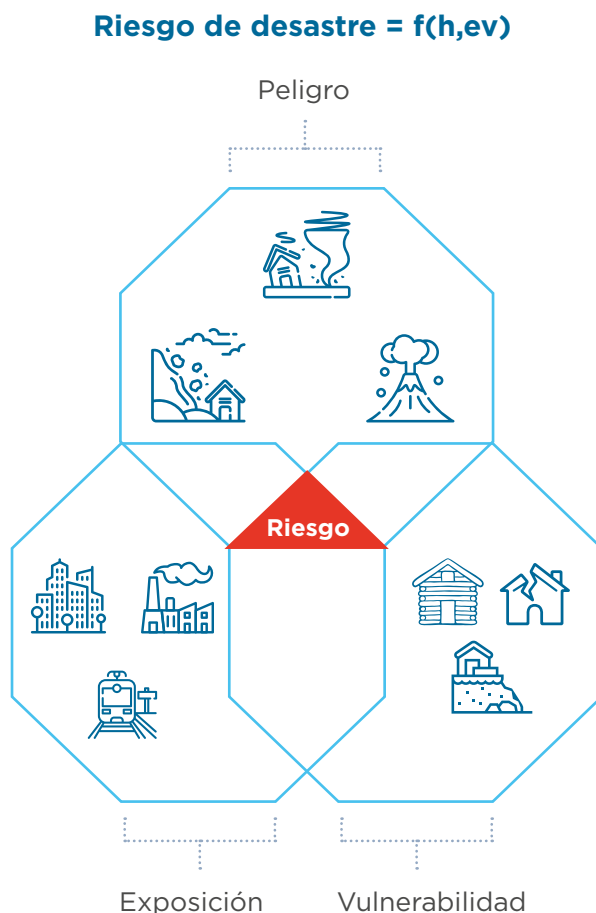
Un creciente cuerpo de literatura y experiencia sugiere que cuando se generaliza adecuadamente, la Gestión de Riesgos proporciona un marco inclusivo que permite la evaluación y respuesta a los desafíos y oportunidades generados por el cambio climático y otros peligros naturales para el transporte y una amplia variedad de otros sistemas (Jones, Patwardhan et al. 2014; Lempert, Arnold et al. 2018).

Gestión de Riesgos Iterativa

El riesgo se define como el producto de la probabilidad de que un evento o fenómeno afecte a un individuo, comunidad,

población o lugar y la consecuencia de la ocurrencia de ese evento o fenómeno. Un evento muy raro con consecuencias considerables puede tener un riesgo similar al de un evento mucho más frecuente con consecuencias moderadas. Sin embargo, en muchos casos relevantes para la resiliencia del transporte, resulta útil definir el riesgo de manera más amplia como el potencial de consecuencias adversas cuando algo de valor está en juego y el resultado es incierto (Jones, Patwardhan et al. 2014). Esta amplia definición ayuda a incluir factores difíciles de cuantificar, pero no obstante importantes, en la evaluación y gestión del riesgo.

>> **Figura 2.1** | Componentes de riesgo

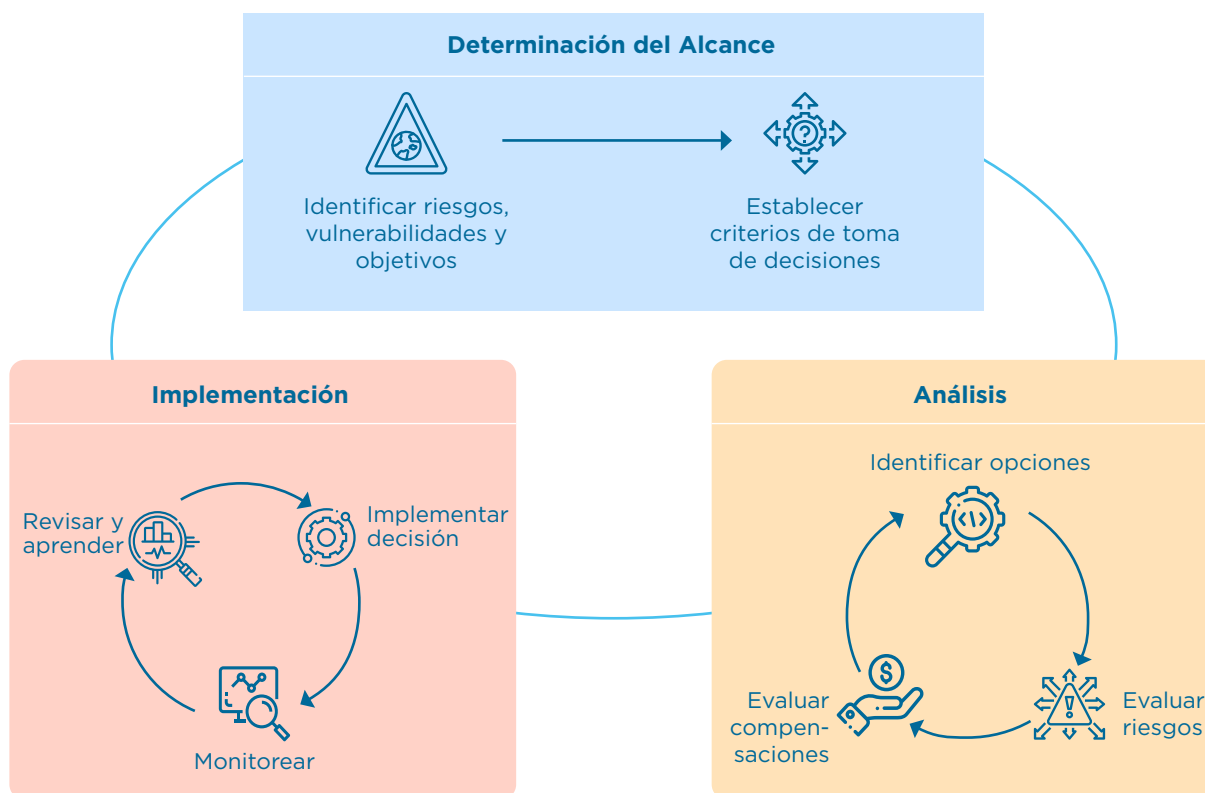


Fuente: (Barandiaran et al. 2018)

La literatura identifica tres factores principales que contribuyen al riesgo, como se muestra en la Figura 2.1: *peligro*, que es la ocurrencia potencial de un evento físico que pueda causar lesiones o daños; *exposición*, que es la presencia de personas y los materiales que importan en lugares que podrían verse afectados negativamente, y *vulnerabilidad*, que es la propensión a verse afectados negativamente por el peligro. Por ejemplo, el potencial de una inundación representaría un peligro, cualquier infraestructura de transporte en el área de inundación representaría una exposición, y la probabilidad de daño y disrupción de esa infraestructura en el caso de una inundación representaría una vulnerabilidad.

Juntos, peligro, exposición y vulnerabilidad conducen a las consecuencias que constituyen un riesgo. Distinguir entre estos tres factores contribuyentes es útil dado que las consecuencias humanas que surgen de cualquier peligro físico están fuertemente mediadas por factores sociales, como el lugar donde vive la gente y las capacidades disponibles para reducir la exposición y los niveles de vulnerabilidad. La Gestión de Riesgos implica la asignación eficiente de recursos entre acciones para reducir el peligro, la exposición y la vulnerabilidad; por lo tanto, ofrece un conjunto abundante de opciones para reducir el riesgo (Knopman and Lempert2016).

>> **Figura 2.2 |** Ciclo de Gestión de Riesgos Iterativa



Fuente: (Jones et al. 2014)

Idealmente, una evaluación de riesgos y una evaluación de las respuestas deberían integrarse en un proceso más amplio, a menudo denominado Gestión de Riesgos iterativa. La Gestión de Riesgos iterativa es un proceso continuo de determinación del alcance (*scoping*), análisis, implementación y revisión, como se muestra en la Figura 2.2. Implica (1) identificar riesgos, vulnerabilidades y objetivos para establecer un criterio de toma de decisiones (*scoping*); (2) identificar opciones, evaluar riesgos y evaluar compensaciones en un ciclo de retroalimentación, e (3) implementar decisiones, monitorear resultados y aprender de la experiencia para implementar mejor en el futuro.

Como se describe a continuación y en la Sección 4, la representación del riesgo y sus componentes de peligro, exposición y vulnerabilidad varía con las diferentes tomas de decisiones bajo metodologías de

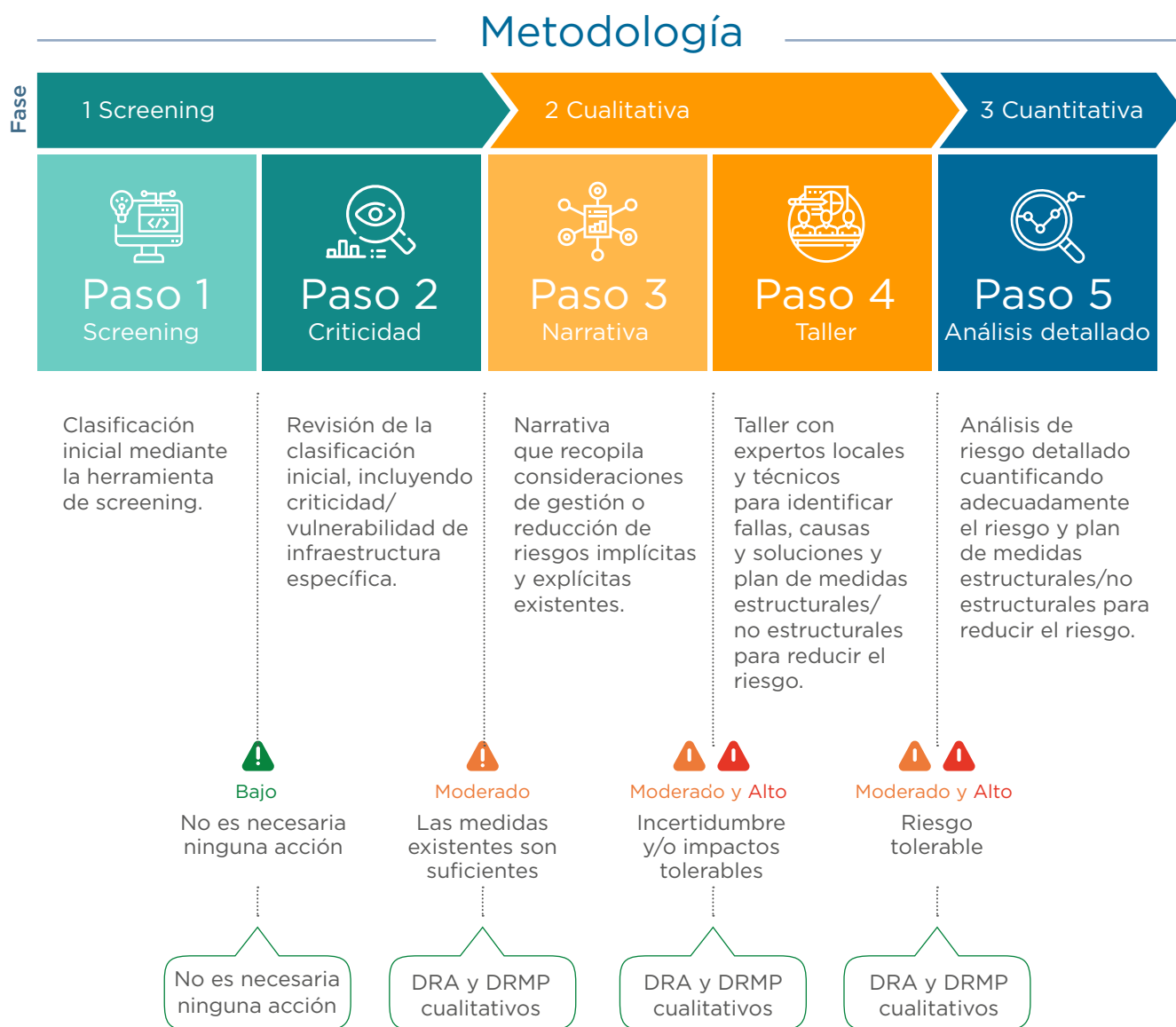
incertidumbre. Por ejemplo, algunas representaciones de riesgo incluyen probabilidades, mientras que otras no, pero el concepto de riesgo y sus componentes permanece constante en todo momento.

Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastres y Cambio Climático para Proyectos del BID

Para ayudar a los líderes de equipo del BID, así como a sus expertos técnicos, agencias asociadas y consultores a realizar dicha Gestión de Riesgos, el BID ha desarrollado una Metodología de Evaluación de Riesgos de Desastres y Cambio Climático (Barandiarán, Esquivel et al. 2018). La Figura 2.3 resume los pasos de esta metodología.



>> **Figura 2.3 | Metodología de Riesgo del BID**



Identificación >> Preparación >>

CICLO DEL PROYECTO

Fuente: (Barandiaran et al.2018)

Implementación

Dado que no existen restricciones de ciclo de vida, estos pasos pueden completarse después de la aprobación

Esta metodología es un ejemplo de Gestión de Riesgos iterativa. La sección de Screening en la Figura 2.3 corresponde al Scoping en la Figura 2.2 y las secciones Cualitativa y Cuantitativa en la Figura 2.3 corresponden al Análisis en la Figura 2.2.

La fase 1 de la metodología del BID, el *Screening*, consta de dos pasos. El primer paso implica una clasificación de riesgos basada en los peligros potenciales que podrían afectar el proyecto que se está considerando. Esta clasificación se basa en las respuestas a un cuestionario y se asocia con un sistema de información geográfica, lo que permite la identificación de peligros en el espacio. El segundo paso consiste en identificar la criticidad y el nivel de vulnerabilidad del proyecto. La criticidad y la vulnerabilidad se clasifican utilizando tres dimensiones principales que representan el impacto negativo potencial sobre las características físicas, la población y los servicios.

La Fase 2, la Evaluación Cualitativa, consiste en construir una narrativa de riesgo y crear una evaluación de riesgo basada en información proporcionada por expertos. La narrativa de riesgo se basa en una revisión de datos, documentos y diseño de proyectos para documentar cómo y en qué medida se dispone de conocimientos e inteligencia sobre la Gestión de Riesgos y desastres. La elaboración de una evaluación de riesgos basada en información proporcionada por expertos requiere recopilar información cualitativa sobre posibles fallas del proyecto y sus consecuencias socioeconómicas. Esto podría llevarse a cabo mediante un taller entre expertos en peligros naturales y el equipo técnico del proyecto.

La fase final, la Evaluación Cuantitativa, consiste en modelar los efectos de los peligros naturales en el sistema físico del proyecto. Esta fase investiga científicamente y matemáticamente cómo funcionaría el proyecto que se evalúa si se expone a una serie de peligros naturales.

Como se indica en Barandiarán, Esquivel et al. (2018), los métodos de DMDU, como la

Toma Decisiones Robustas (RDM), pueden ayudar al BID a implementar su marco de riesgo de desastres, incluyendo la consideración del riesgo derivado del cambio climático. Este informe explica cómo hacerlo.

Gestión de Riesgos y DMDU en Transporte

Los ingenieros de transporte utilizan actualmente la Gestión de Riesgos para planificar la infraestructura y las redes de carreteras. La Gestión de Riesgos ayuda a los ingenieros y planificadores a considerar las incertidumbres inherentes al ciclo de vida de la carretera en sus procesos de diseño, construcción, operaciones y mantenimiento. El objetivo es evitar el deterioro de las estructuras, prepararse para los cambios en la demanda de carga y protegerse contra eventos extremos que puedan conducir a fallas o interrupciones en la infraestructura con impactos económicos locales, nacionales o regionales más grandes.

Dentro del contexto de la Gestión de Riesgos, las herramientas de apoyo a la toma de decisiones para la infraestructura incluyen modelos probabilísticos, sistemas de calificación y screening de riesgos. Tradicionalmente, estos métodos se implementan asumiendo que cualquier incertidumbre sobre el futuro está bien caracterizada, es decir, que los ingenieros y planificadores pueden asignar con seguridad un pronóstico puntual o una mejor estimación de distribución de probabilidad única a eventos futuros, como las inundaciones o el calor extremo, que causarían una interrupción en un activo de infraestructura determinado. Por ejemplo, los planificadores que estén considerando una nueva carretera podrían usar un pronóstico puntual único de la demanda futura que la carretera necesita atender y una distribución de probabilidad única para describir la frecuencia de inundaciones de varios tamaños que podrían interrumpir el tráfico en la carretera.

Hasta hace poco, los planificadores estimaban la probabilidad de futuras inundaciones y otros peligros naturales relacionados

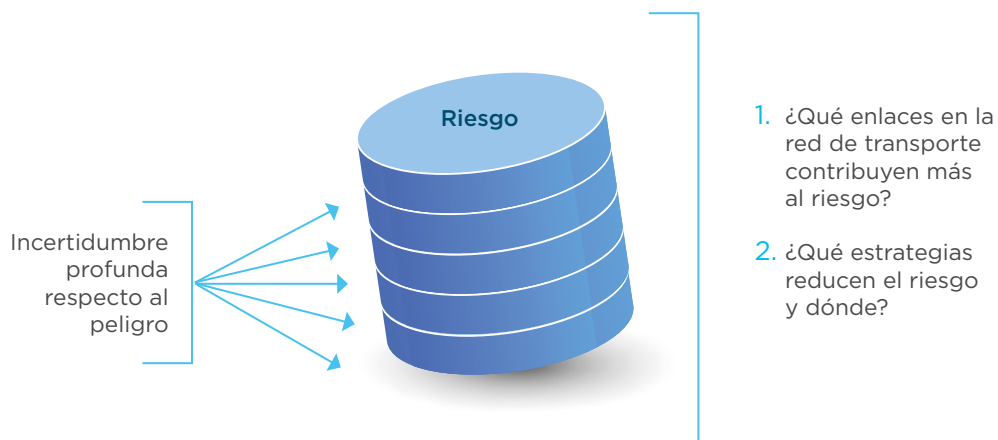
con el clima asumiendo que el clima futuro sería similar al clima pasado. Los planificadores e ingenieros estimarían la probabilidad de tormentas futuras al buscar datos históricos sobre la frecuencia pasada de ocurrencia de tales tormentas. El tamaño de una tormenta que hubiera ocurrido una vez en el último siglo proporcionaría la mejor estimación de una tormenta futura que ocurra una vez cada cien años.

En los últimos años, los planificadores han utilizado cada vez más las proyecciones generadas por modelos climáticos para estimar la probabilidad de diversos peligros relacionados con el clima, pero en general, los planificadores e ingenieros continúan considerando la incertidumbre en dichos pronósticos como bien caracterizada, ya sea mediante el uso de una mejor estimación de modelo climático único o empleando una mejor estimación de distribución de probabilidad única sobre un conjunto de resultados del modelo. Esto a menudo ha llevado a un enfoque indebido en la identificación de los mejores pronósticos climáticos para cualquier aplicación en particu-

lar como medio para lograr la resiliencia climática.

Los métodos de DMDU se basan en la Gestión de Riesgos tradicional, pero consideran que la incertidumbre es profunda, es decir, consideran que los riesgos no están bien caracterizados. En la práctica, esto significa calcular los riesgos para un rango de pronósticos y/o un rango de distribuciones de probabilidad. Como se muestra en la Figura 2.4, un análisis de riesgo de DMDU puede repetir un análisis tradicional varias veces para cada uno de los supuestos dentro de una amplia gama con respecto a la probabilidad de eventos futuros. El análisis de DMDU luego formula preguntas como: “¿qué enlaces en la red de transporte contribuyen más al riesgo en una amplia gama de supuestos sobre los factores que podrían contribuir a este riesgo?” y “¿qué estrategias podrían implementarse para reducir mejor este riesgo dada una amplia gama de supuestos sobre la frecuencia del peligro?” La Sección 4 describe los métodos de DMDU con más detalle.

>> **Figura 2.4** | Calcular el riesgo de la red en el contexto de DMDU





03.

**¿Qué Hay de
Nuevo con
el Cambio
Climático?**



Como se señaló en la Sección 2, los ingenieros y planificadores de transporte comúnmente practican la Gestión de Riesgos para evaluar y gestionar las posibles consecuencias de los peligros naturales, pero el cambio climático presenta nuevos desafíos. El cambio climático requiere nuevas fuentes de información sobre las condiciones climáticas y los peligros naturales relacionados con el clima. Anteriormente, los ingenieros y planificadores asumían que el clima actual y futuro en una ubicación particular sería similar al clima pasado, por lo que podían usar el registro histórico para diseñar y planificar proyectos y sistemas de transporte. Sin embargo, la evidencia abrumadora ahora sugiere que el clima cambiará y ya ha cambiado de manera significativa. (Marengo, Ambrizzi et al. 2010). Diseñar y planificar según condiciones históricas ya no es un enfoque fiable. Además, el clima actual y futuro ha cambiado y cambiará en cantidades que a menudo son difíciles de estimar con certeza. Por tanto, los diseñadores y planificadores deben evaluar y gestionar el riesgo en condiciones de gran incertidumbre. Finalmente, dado que el clima y los peligros naturales pueden cambiar significativamente durante la vida útil de los proyectos y sistemas de transporte, el cambio climático hace que sea más importante para los ingenieros y planificadores considerar de manera más explícita múltiples escalas de tiempo.

Información sobre el Clima Actual y Futuro

Lo que Sabemos Sobre el Clima de la Tierra

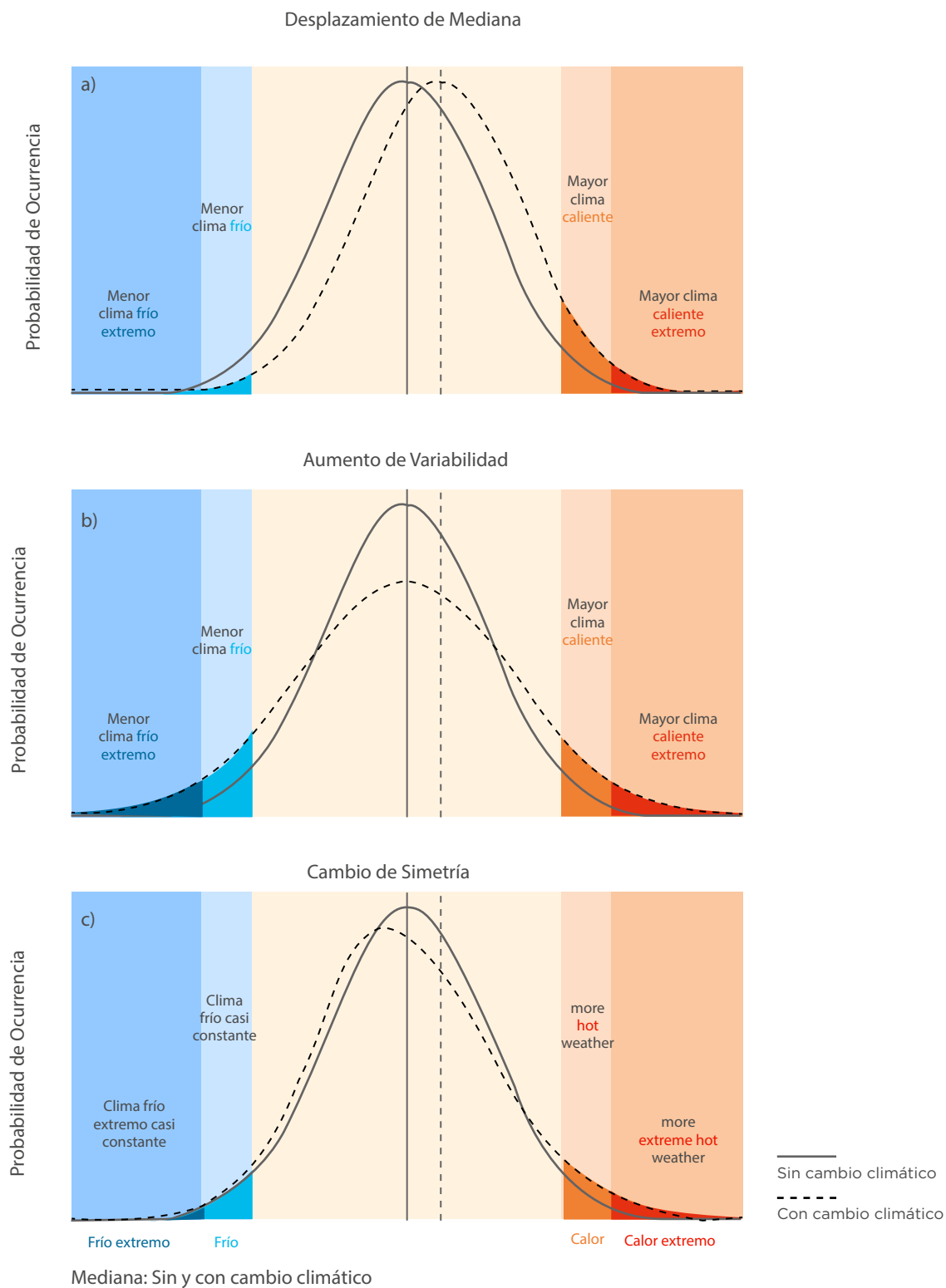
Los científicos saben mucho sobre los cambios actuales y futuros en el clima (IPCC 2014). El dióxido de carbono atmosférico y otros Gases de Efecto Invernadero (GEI) se encuentran en sus niveles más altos en casi un millón de años debido a las actividades humanas, incluyendo combustión de combustibles fósiles, deforestación, cambios de uso de la tierra, producción ganadera e intensificación del uso de ferti-

lizantes, entre otros. Estos niveles elevados de GEI han alterado el clima, contribuyendo a un número creciente de días de calor extremo, patrones cambiantes de tormentas y mareas, aumento del nivel del mar y el derretimiento de las capas de hielo y glaciares. Además, debido a que las emisiones de GEI están aumentando a nivel mundial, es probable que estos cambios climáticos continúen y aumenten. Por lo tanto, ya no es apropiado asumir que el clima actual y futuro en un lugar en particular será como el del pasado.

Qué Cambiará: Variables Climáticas Medias y Extremas

Los científicos esperan cambios en las variables climáticas medias y extremas, como se muestra en la Figura 3.1. Los cambios en los valores promedio incluyen cambios en la temperatura promedio, cambios en los patrones de precipitación y cambios en la humedad, aumento del nivel del mar y derretimiento del permahielo. Los cambios en la intensidad y la gravedad de los fenómenos meteorológicos incluyen tormentas severas, marejadas ciclónicas, precipitaciones extremas, inundaciones, sequías, huracanes y olas de calor.



>> **Figura 3.1 | Cambios en Variables Climáticas Medias y Extremas**

Fuente: IPCC 2012

Los científicos confían en predecir algunos cambios, pero menos en predecir otros. Los científicos están seguros de ciertas predicciones de cambios como aumentos de temperatura, aumento del nivel del mar, deshielo temprano y precipitaciones más intensas. Sin embargo, los científicos están menos seguros de las predicciones sobre cambios en la variabilidad climática y cambios en los patrones de precipitación.

En resumen, la evidencia sugiere que las temperaturas están aumentando, el clima está cambiando y esperamos un mayor calentamiento en el futuro. Sin embargo, el momento y la magnitud de ese cambio aún son inciertos.

Cómo Afectará el Cambio Climático al Transporte

Como se señaló anteriormente, el clima cambia en términos de valores climáticos promedio y extremos. Los impactos de estos cambios incluirán veranos más cálidos, inviernos más cálidos, cambios en la humedad del suelo y del aire, aumento de las precipitaciones (promedio y extremas), vientos extremos más fuertes y frecuentes, aumento del nivel del mar y marejadas ciclónicas, cambios en la frecuencia de tormentas invernales y rayos. De estos cambios, los científicos se sienten seguros de las predicciones de aumentos de temperatura, aumento del nivel del mar, deshielo temprano y precipitaciones más intensas, pero tienen menos seguridad de otras predicciones, como cambios en la variabilidad climática y patrones de precipitación. Cada uno de estos cambios climáticos, a su vez, tendrá su efecto sobre el transporte en la región de ALC como se resume a continuación y en la Tabla 3.1. Sin embargo, si bien la dirección de algunos cambios se puede predecir razonablemente, el momento y la magnitud aún son inciertos.

Veranos e Inviernos más Cálidos

En América Latina, ya se han observado en la región aumentos de temperatura del orden de 1°C desde la década de 1970. La

evidencia también sugiere con gran certeza que los veranos cálidos son una tendencia significativa en América Central y del Sur. Además de las temperaturas promedio más altas, los científicos también han medido aumentos, en número y amplitud, de eventos extremos como días cálidos y olas de calor. Las observaciones indican un aumento en la temperatura máxima anual por década que ha alcanzado hasta 1,1°C por década en el sur de Chile (Vicuña, Gironás et al. 2013), 0,6°C en el sur de Brasil (Sansigolo and Kayano 2010), 0,8°C en Argentina y Uruguay y 0,6°C en los Andes, entre otros.

Las predicciones del modelo climático sugieren que los aumentos de temperatura continuarán y se acelerarán con el tiempo. Estas proyecciones muestran aumentos de temperatura de 0,6°C a 5,2°C en escenarios de emisiones más conservadores y de 2,2°C a 7°C en escenarios de emisiones menos conservadores. También se proyecta que aumentarán las olas de calor, las noches más cálidas y los grados-día de refrigeración. Por ejemplo, se proyecta que los grados-día de refrigeración aumentarán entre 5 y 20 en promedio por año en América Central y el norte de América del Sur para fines de siglo (Kamiguchi, Kitoh et al. 2006; Marengo, Jones et al. 2009; Marengo, Ambrizzi et al. 2010), y es probable que las noches cálidas aumenten del 12% al 24% en Brasil (Marengo, Jones et al. 2009).

Con la llegada de veranos más cálidos, se pudieron ver los siguientes impactos en el transporte:

- » Deterioro de materiales relacionado con el calor, formación de surcos en el asfalto y pandeo de los rieles;
- » Necesidad de requisitos de pista de aeropuerto más larga;
- » Pérdida de capacidad de navegación en el interior debido a los bajos niveles de agua;
- » Expansión térmica de puentes y juntas;

- » Daños a maquinaria y sobrecalentamiento de motores; daño por calor de los sistemas de transporte inteligentes;
- » Mayor riesgo de incendios forestales y humo;
- » Reducción de las horas de trabajo de construcción y mantenimiento;
- » Hundimiento del suelo debido a la sequía;
- » Derretimiento acelerado o levantamiento del permahielo en suelos.

Los inviernos más cálidos podrían tener los siguientes efectos en el transporte, algunos de los cuales contrarrestan los impactos de los veranos más cálidos:

- » Costos reducidos de remoción de hielo y nieve;
- » Más oportunidades para el mantenimiento y la construcción durante el invierno;
- » Aumento potencial de la niebla;
- » Deterioro de activos debido a ciclos de congelación-descongelación más frecuentes;

- » Vías navegables interiores más accesibles;
- » Pérdida del uso de caminos de nieve y hielo y aumento del levantamiento del permahielo;
- » Mayor riesgo de inundaciones debido al aumento de las lluvias invernales.

Cambios en la Precipitación

Los últimos sesenta años de observaciones revelan que las precipitaciones se han vuelto irregulares en términos de espacio y tiempo, particularmente en el verano, donde se presentan más tarde. Ya se han observado cambios en las precipitaciones, el momento en que comienzan las lluvias y la intensidad y magnitud de las precipitaciones extremas en toda América Central y del Sur. Se han observado incrementos en las precipitaciones de aproximadamente 0,94 mm/día en América Central (Engelhart and Douglas 2006) y de 1,5 mm/día en Brasil (Dai, Qian et al. 2009). Se observaron disminuciones en las precipitaciones en la región de los Andes (44 mm menos por década) (SENAMHI 2009) y el noreste de Brasil (una disminución de 0,3 mm/día en 50 años)(Dai, Qian et al. 2009; Dai 2011).

El número y la intensidad de los eventos de fuertes precipitaciones es un cambio



importante en la región de ALC. Las precipitaciones extremas aumentaron en un 1,3% por década en los últimos 50 años (Cavazos, Turrent et al. 2008). São Paulo experimentó de 5 a 8 días adicionales de lluvias extremas por año (Silva Dias, Dias et al. 2012) y también experimentó aumentos en la magnitud de las precipitaciones de entre 50 y 75 mm durante 40 años (Dufek and Ambrizzi 2008). Si bien las precipitaciones aumentan en algunas regiones, se reducen en otras. El norte y centro de Chile enfrentaron una reducción de las precipitaciones de entre 45 y 105 mm en 31 años (Dufek, Ambrizzi et al. 2008).

En muchos lugares de América Latina se han producido cambios en el tiempo de ocurrencia de las fuertes lluvias estacionales y la duración de la estación seca. El inicio de este período se ha vuelto cada vez más temprano en el Amazonas durante los últimos 60 años, con un desplazamiento total de unos 170 días hacia atrás (Carvalho, Jones et al. 2011). El número de meses secos, con escasas precipitaciones, en el sur de Brasil, Uruguay y Argentina aumentó de 1 a 2 meses entre 1980 y 2000 (Barrucand, Vargas et al. 2007).

Las proyecciones climáticas indican que las desviaciones del promedio histórico de precipitaciones (tanto positivas como negativas) serán mayores en la región en el futuro. Las proyecciones también sugieren que aumentará la variabilidad espacial de la precipitación. Según un estudio (Kitoh, Endo et al. 2013), América Central, Colombia y Venezuela enfrentarán un cambio en los promedios históricos de precipitación de aproximadamente -10%/+10%, y en otros estudios, utilizando otros modelos y variables, los investigadores proyectan cambios significativos que van desde -20% a +50%. Es probable que las fuertes precipitaciones también cambien con una reducción de hasta cinco días de fuertes precipitaciones por año en algunas regiones de ALC y un aumento de 105 días en otras regiones (Marengo, Jones et al. 2009). El aumento de las precipitaciones también afectará el transporte:

- » Aumento de accidentes relacionados con el clima, interrupciones del tráfico y retrasos;
- » Inundación de la infraestructura de transporte terrestre, daño hidráulico de estribos y zapatas de puentes, daños prolongados por agua estancada en sustratos geotécnicos, fallas de alcantarillas y derrumbes de carreteras y ferrovías, colapso de terraplenes y aludes, derrumbes y fallas de pendientes;
- » Inundación del metro y las instalaciones de transporte público (p. ej., estaciones de autobuses);
- » Incapacidad de los trabajadores del transporte para llegar a su trabajo, y
- » Mayor incidencia de avalanchas de flujo de aguanieve.

Cambios en la humedad del suelo y la humedad del aire

Los cambios de temperatura y precipitación tienen efectos directos sobre la humedad del suelo y del aire. El número de días lluviosos ha aumentado en un 0,37% en Chile desde la década de 1970 (Quintana and Aceituno 2012). Muchos lugares en América Central y del Sur han enfrentado una mayor sequía como Chile y Ecuador (Dai 2011) y la región de las Pampas (Barrucand, Vargas et al. 2007).

Las proyecciones del modelo climático sugieren que los cambios en la humedad del suelo y del aire continuarán en las próximas décadas. En América Central y del Sur, la combinación de la disminución de la precipitación y el aumento de la evaporación producirá una disminución significativa de la humedad del suelo (Nakaegawa, Kitoh et al. 2013). Los investigadores señalan que:

- » La disminución de la humedad del suelo puede provocar el hundimiento de los sustratos geotécnicos.

- » Los aumentos en la humedad del suelo pueden conducir a un aumento de la escorrentía debido a la saturación, pérdida de cohesión provocando la inestabilidad estructural de puentes, sub-bases, cortes de pendiente y terraplenes, o un mayor riesgo de derrumbe.
- » El aumento de la humedad del aire, junto con el calor, puede reducir las horas de trabajo disponibles para la construcción, las operaciones y el mantenimiento.

Vientos Extremos Más Fuertes y Frecuentes

Los cambios en la intensidad del viento y la frecuencia de los vientos extremos ya se han observado en América Latina en muchas regiones, como la costa de Chile (Garreaud and Falvey 2009). Los modelos climáticos predicen que los vientos de superficie futuros en la costa oeste de América del Sur aumentarán en promedio en 1,5 m/s durante el próximo siglo (Garreaud and Falvey 2009). Los vientos extremos más fuertes y frecuentes provocarán los siguientes efectos en los sistemas de transporte:

- » Daños a la superestructura técnica de carreteras, ferrocarriles, puertos y aeropuertos;
- » Daños a las redes de iluminación, energía y comunicaciones;
- » Disrupción del tráfico y cierres por árboles talados;
- » Cierres temporales de puertos y aeropuertos y operaciones atrasadas posteriores;
- » Despeje de escombros de tormenta.

Aumento del Nivel del Mar y Marejada Ciclónica

Ya se ha observado un aumento del nivel del mar en la región de ALC, que varía de

incrementos de 2-7 mm/año desde 1950, pero la tasa se está acelerando con el tiempo. Tal tasa de aumento del nivel del mar contribuye a una mayor ocurrencia y magnitud de inundaciones y erosión costeras. Los efectos en los sistemas de transporte por el aumento del nivel del mar y la marejada ciclónica son los siguientes:

- » Erosión de carreteras costeras e infraestructura ferroviaria; disrupción de las redes de transporte y actividades situadas en zonas bajas;
 - » Mareas más altas para las instalaciones portuarias y posibles disrupciones del acceso por carretera/ferrocarril a puertos;
 - » Potencial de inundaciones, exacerbado por instalaciones de drenaje de dimensiones inadecuadas;
 - » Exposición de aeropuertos costeros ubicados en zonas bajas a daños por marejadas ciclónicas e inundaciones;
- Inundaciones más frecuentes y/o permanentes de instalaciones de transporte en zonas bajas;
- » Corrosión de materiales de acero y hormigón, y
 - » Mayor socavación de estructuras defensivas y puentes.

Otros Cambios

Los cambios en la frecuencia de las tormentas invernales afectarán el tiempo de ocurrencia y magnitud de las nevadas y modificarán sus efectos en el sistema de transporte. Las proyecciones sugieren aumentos en la intensidad de las tormentas y, posteriormente, rayos, lo que podría provocar la disrupción del suministro de energía y afectar las catenarias aéreas, las luces, las TIC y la infraestructura relacionada.

>> **Tabla 3.1** Cambio Climático en América Latina

Cambios Climáticos	Cambios Observados	Cambios Previstos	Impactos en el Transporte
Veranos e Inviernos más Cálidos (alta certeza)	<p>Aumento de temperatura media</p> <ul style="list-style-type: none"> » La temperatura aumentó en 1°C desde la década de 1970 en América Central y del Sur. » Aumento de temperatura máxima anual » La temperatura máxima anual aumentó hasta 1,1°C por década en el sur de Chile, 0,6°C en el sur de Brasil, 0,8°C en Argentina y Uruguay y 0,6°C en los Andes. » Eventos de calor más extremos » El número y la magnitud de los eventos de calor extremo, como los días cálidos y las olas de calor, aumentaron. 	<p>Aumentos de temperatura media</p> <ul style="list-style-type: none"> » Se proyecta que las temperaturas aumentarán de 0,6°C a 5,2°C en escenarios de emisiones más conservadores y de 2,2°C a 7°C en escenarios de emisiones menos conservadores. » Aumento de las olas de calor, noches más cálidas y grados-día de refrigeración » Se pronostica que los grados-día de refrigeración aumentarán de 5 a 20 días por año en promedio en América Central y el norte de América del Sur para fines de siglo. » Es probable que las noches cálidas aumenten del 12% al 24% de días cada año en Brasil. 	<p>Veranos más Cálidos</p> <ul style="list-style-type: none"> » Deterioro de materiales relacionado con el calor, formación de surcos en el asfalto y pandeo de los rieles; » Necesidad de requisitos de pista de aeropuerto más larga; » Pérdida de capacidad de navegación en el interior debido a los bajos niveles de agua; » Expansión térmica de puentes y juntas; » Daños a maquinaria y sobrecalentamiento de motores, así como daños por calor de los sistemas de transporte inteligentes; » Mayor riesgo de incendios forestales y humo; » Reducción de las horas de trabajo de construcción y mantenimiento; » Hundimiento del suelo debido a la sequía; » Elevación acelerada y/o pérdida de cohesión de los suelos de permafrost. <p>Inviernos más Cálidos</p> <ul style="list-style-type: none"> » Costos reducidos de remoción de hielo y nieve; » Más oportunidades para el mantenimiento y la construcción durante el invierno; » Aumento potencial de la niebla; » Deterioro de activos debido a ciclos de congelación-descongelación más frecuentes; » Vías navegables interiores más accesibles; » Pérdida del uso de carreteras de nieve y hielo y aumento del levantamiento del permafrost, y » Mayor riesgo de inundaciones debido al aumento de las lluvias invernales.

Cambios Climáticos	Cambios Observados	Cambios Previstos	Impactos en el Transporte
Cambios en la Precipitación	<p>Aumento de precipitación media</p> <ul style="list-style-type: none"> » Se ha observado un aumento de la precipitación de aproximadamente 0,94 mm/día en América Central y de 1,5 mm/día en Brasil. <p>Disminución de precipitación media</p> <ul style="list-style-type: none"> » Se ha observado un aumento de la precipitación de aproximadamente 0,94 mm/día en América Central y de 1,5 mm/día en Brasil. » Se observó una disminución de la precipitación en la región de los Andes (44 mm menos por década) y el noreste de Brasil (0,3 mm/día menos precipitación en 50 años). » El norte y centro de Chile enfrentaron una reducción en las precipitaciones de entre 45-105 mm en 31 años. <p>Aumento de precipitaciones extremas</p> <ul style="list-style-type: none"> » Se ha observado un aumento de la precipitación de aproximadamente 0,94 mm/día en América Central y de 1,5 mm/día en Brasil. » Los eventos de precipitación extrema aumentaron en un 1,3% por década en los últimos 50 años. » São Paulo experimentó de 5 a 8 días adicionales de lluvia extrema por año, así como aumentos en la magnitud de las precipitaciones de 50 a 75 mm durante 40 años. <p>Temporada de Lluvias más Temprana</p> <ul style="list-style-type: none"> » El inicio de la temporada de lluvias se ha vuelto cada vez más temprano en el Amazonas durante los últimos 60 años, con un desplazamiento total de unos 170 días hacia atrás. <p>Temporada Seca más Larga</p> <ul style="list-style-type: none"> » El número de meses secos, con escasas precipitaciones, en el sur de Brasil, Uruguay y Argentina aumentó de 1 a 2 meses entre 1980 y 2000. 	<p>Aumento de precipitaciones extremas</p> <ul style="list-style-type: none"> » Es probable que las fuertes precipitaciones cambien con una reducción de hasta cinco días de fuertes precipitaciones en algunas regiones de ALC y un aumento de 105 días en otras regiones. <p>Aumento de variabilidad de precipitaciones</p> <ul style="list-style-type: none"> » América Central y Venezuela enfrentarán un cambio en los promedios históricos de precipitación de aproximadamente -10%/+10% o -20% a +50%, según el estudio. 	<ul style="list-style-type: none"> » Aumento de accidentes relacionados con el clima, interrupciones del tráfico y retrasos; » Inundación de la infraestructura de transporte terrestre, daño hidráulico de estribos y zapatas de puentes, daños prolongados por agua estancada en sustratos geotécnicos, fallas de alcantarillas y derrumbes de carreteras y ferrovías, colapso de terraplenes y aludes, derrumbes y fallas de pendientes; » Inundación del metro y las instalaciones de transporte público (p. ej., estaciones de autobuses); » Incapacidad de los trabajadores del transporte para llegar a su trabajo, y » Mayor incidencia de avalanchas de flujo de aguanieve.

Cambios Climáticos	Cambios Observados	Cambios Previstos	Impactos en el Transporte
<i>Cambios en la humedad del suelo y la humedad del aire.</i>	<p>Mayor número de días lluviosos</p> <p>» El número de días lluviosos ha aumentado en un 0,37% en Chile desde la década de 1970.</p> <p>Mayor sequedad</p> <p>» Se ha producido un aumento de la sequedad en Chile y Ecuador y la región de las Pampas.</p>	<p>Disminución de humedad del suelo.</p> <p>» En América Central y del Sur, la combinación de la disminución de la precipitación y el aumento de la evaporación producirá una disminución drástica de la humedad del suelo.</p>	<p>» La disminución de la humedad del suelo puede provocar el hundimiento de los sustratos geotécnicos.</p> <p>» Los aumentos en la humedad del suelo pueden conducir a un aumento de la escorrentía debido a la saturación, pérdida de cohesión provocando la inestabilidad estructural de puentes, sub-bases, cortes de pendiente y terraplenes, o un mayor riesgo de derrumbe.</p> <p>» El aumento de la humedad del aire, junto con el calor, puede reducir las horas de trabajo disponibles para la construcción, las operaciones y el mantenimiento.</p>
<i>Vientos Extremos</i>	<p>Vientos extremos más fuertes y frecuentes</p> <p>» Los cambios en la intensidad del viento y la frecuencia de los vientos extremos ya se observan en América Latina en muchas regiones como la costa de Chile.</p>	<p>Aumento de velocidad del viento</p> <p>» Los modelos climáticos predicen que los vientos de superficie en la costa oeste de América del Sur aumentarán en 1,5 m/s en el próximo siglo.</p>	<p>» Daños a la superestructura técnica de carreteras, ferrocarriles, puertos y aeropuertos;</p> <p>» Daños a las redes de iluminación, energía y comunicaciones;</p> <p>» Disrupción del tráfico y cierres por árboles talados;</p> <p>» Cierres temporales de puertos y aeropuertos y operaciones atrasadas posteriores;</p> <p>» Despeje de escombros de tormenta.</p>
<i>Aumento del Nivel del Mar y Marejada Ciclónica</i>	<p>Aumento del nivel del mar</p> <p>» Se ha observado un aumento del nivel del mar que varía de 2 a 7 mm/año desde 1950, pero la tasa se está acelerando con el tiempo.</p>		<p>» Erosión de carreteras costeras e infraestructura ferroviaria; disrupción de las redes de transporte y actividades situadas en zonas bajas;</p> <p>» Mareas más altas para las instalaciones portuarias y posibles disrupciones del acceso por carretera/ferrocarril a puertos;</p> <p>» Potencial de inundaciones, exacerbado por instalaciones de drenaje de dimensiones inadecuadas;</p> <p>» Exposición de aeropuertos costeros ubicados en zonas bajas a daños por marejadas ciclónicas e inundaciones;</p> <p>» Inundaciones más frecuentes y/o permanentes de instalaciones de transporte en zonas bajas;</p> <p>» Corrosión de materiales de acero y hormigón;</p> <p>» Mayor socavación de estructuras defensivas y puentes.</p>



Fuentes de Información sobre el Clima Actual y Futuro

Al llevar a cabo la planificación del transporte resiliente al clima, los planificadores y los formuladores de políticas deberán basarse en la información derivada de los modelos climáticos. Si bien estos modelos son la mejor fuente de información sobre el clima futuro, tienen muchas limitaciones importantes. Los modelos climáticos pueden proyectar cambios potenciales en el clima, pero no pueden predecirlos. Hay muchas fuentes de incertidumbre, incluyendo la incertidumbre sobre las emisiones futuras y los cambios climáticos exactos. Algunas de estas fuentes de incertidumbre no disminuirán con el tiempo. Esta sección proporciona una descripción general de los modelos climáticos para ayudar a los lectores a comprender sus fortalezas y limitaciones y la información que brindan.

Proyecciones y Predicciones del Cambio Climático

¿Qué es una “proyección”? Una proyección es una condición futura plausible que

puede estar condicionada a eventos predefinidos (es decir, proyecciones basadas en una Vía de Concentración Representativa específica, RCP por sus siglas en inglés). Las estimaciones de modelos individuales de las condiciones climáticas futuras se consideran proyecciones. Las proyecciones no tienen asignadas probabilidades de ocurrencia.

¿Qué es una “predicción” o “pronóstico”? Una predicción o pronóstico es el resultado “más probable”. Es una declaración precisa sobre el futuro, como “hay un 70 por ciento de probabilidad de que llueva mañana” o “la temperatura media global aumentará de 4 a 11 °F para el año 2100 con respecto al año 1990”.

La Importancia de los Modelos Climáticos

Los modelos climáticos son una fuente importante de información sobre el clima actual y futuro y son la única forma de proyectar los cambios en el clima debido a las actividades humanas. Hay tres razones para esto. Primero, el clima es un sistema muy complejo y los modelos climáticos

representan la mejor comprensión actual del sistema. En segundo lugar, no existe un análogo para el calentamiento inducido por el hombre. En tercer lugar, es imposible realizar experimentos controlados deliberadamente.

Sin embargo, los modelos no son bolas de cristal; son simplificaciones de la realidad. Pueden estar equivocados, incluso si todos o la mayoría de los científicos están de acuerdo con ellos. Sin embargo, siguen siendo la mejor fuente de información disponible sobre el cambio climático y están mejorando continuamente en términos de resolución y los procesos que simulan. Al comparar modelos, algunas comparaciones se basan en qué tan bien un modelo determinado simula los procesos climáticos, respecto al modelo actual (los más nuevos tienden a ser mejores) y qué tan bien simula el clima histórico observado. Cualquiera de estos sugiere que un modelo podría representar el futuro mejor que otros modelos.

Los modelos climáticos simulan muchos procesos en cuadrículas globales. Dichos modelos incluyen Modelos de Circulación General (MCG) y modelos de sistemas terrestres. Estos modelos son simulaciones matemáticas de muchas partes del sistema terrestre, como la dinámica atmosférica, los procesos de la superficie terrestre y oceánica (incluyendo vegetación) y la criosfera (aquellas partes de la superficie terrestre donde el agua está en estado sólido). Los modelos globales generalmente dividen estos sistemas en cuadrículas. Las cuadrículas típicas en los MCG tienen aproximadamente dos por tres grados de latitud y longitud (~140 millas por ~200 millas o 28.000 millas cuadradas). El tamaño de las cuadrículas determina la resolución espacial, entonces cuanto más grandes sean las cuadrículas, menor será la resolución.

La resolución importa, pero es más importante cómo los modelos manejan los pro-

cesos climáticos y biofísicos. La resolución es importante porque todas las proyecciones utilizadas para el cambio climático están representadas, en parte, por la resolución espacial del modelo. Además, todas las proyecciones son uniformes dentro de una cuadrícula determinada y es posible que no tengan en cuenta completamente los procesos de escala de sub-cuadrícula (p. ej., tormentas eléctricas convectivas). La resolución de las cuadrículas de los modelos climáticos es particularmente problemática a lo largo de las costas y en las montañas, donde la dinámica del sistema terrestre varía ampliamente entre regiones pequeñas.

Otro conjunto de proyecciones climáticas está disponible en resoluciones espaciales más altas. Para lograr resoluciones más altas, estas proyecciones se reducen espacialmente utilizando una variedad de métodos estadísticos y dinámicos. Los investigadores crean datos de modelos climáticos a escala reducida dado que cierta información climática es más útil a una resolución más alta. Sin embargo, reducir la escala a una resolución más alta no significa que los MCG sean más exactos.

La pregunta clave es si la reducción de escala mejora los resultados. La reducción de escala plantea muchas preguntas, como:

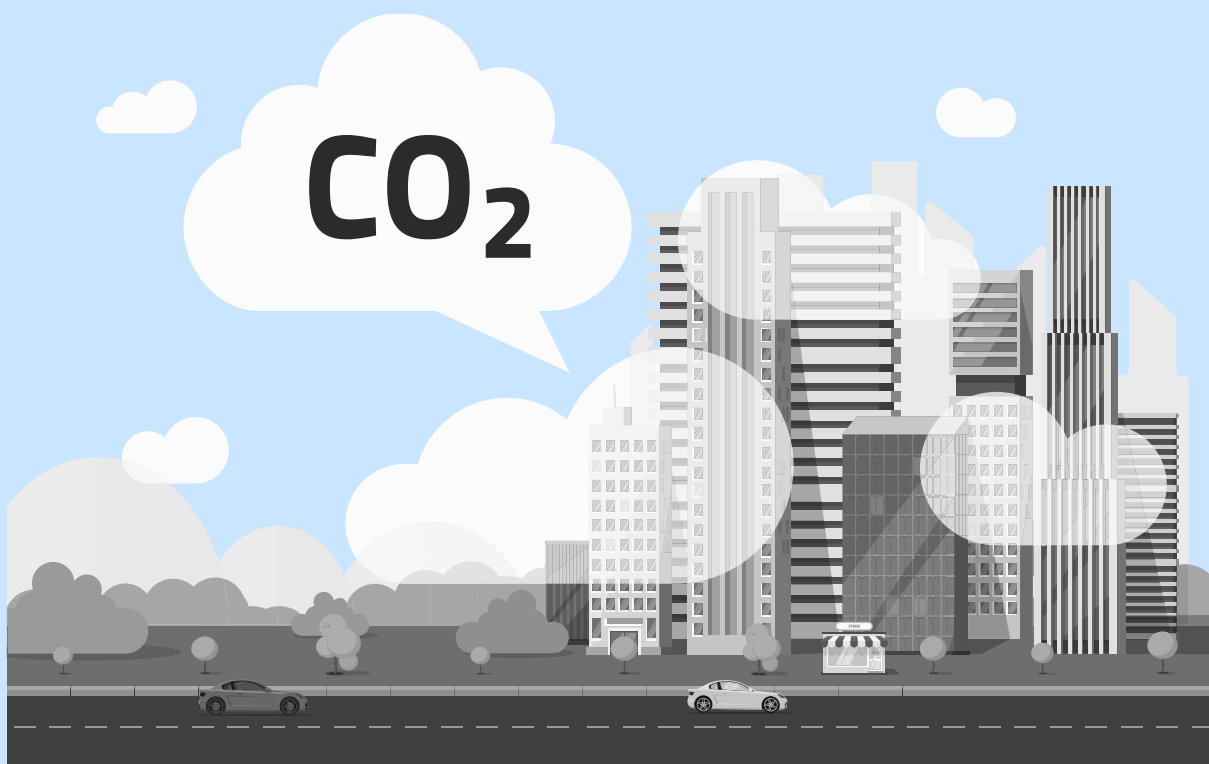
- » ¿Los resultados tienen sentido físico?
- » ¿Existe una mejor comprensión de la dirección del cambio en alta resolución?
- » ¿Proyectan los modelos cómo varía el cambio dentro de la cuadrícula de MCG?
- » ¿La reducción de escala proporciona más exactitud o simplemente más precisión?
- » ¿La reducción de escala proporciona información sobre los procesos de escala de sub-cuadrícula?



Conclusiones Clave

Las conclusiones clave de esta sección son las siguientes:

- Las temperaturas están subiendo; el clima está cambiando.
- Se espera más calentamiento en el futuro, pero el momento y la magnitud de ese calentamiento son inciertos.
- Los planificadores pueden proyectar cambios potenciales en el clima, pero no pueden predecirlos.
- Hay muchas fuentes de incertidumbre, incluyendo la incertidumbre sobre las emisiones futuras y exactamente cómo cambiará el clima.
- No se espera que terminen ciertas fuentes de incertidumbre.
- Los modelos climáticos son la mejor fuente de información sobre el clima futuro, pero tienen limitaciones importantes y sus resultados son proyecciones, no predicciones.





04.

Métodos de DMDU Aplicados al Transporte

Los capítulos anteriores han demostrado que el clima pasado ya no es un predictor fiable del clima futuro y que existe un alto nivel de incertidumbre sobre cómo el clima ha cambiado y cómo cambiará en el futuro. Sin embargo, esperar a que se resuelvan estas incertidumbres no ofrece a los planificadores de transporte un camino a seguir, ya que aún deben considerar el clima futuro y otras condiciones al desarrollar planes de infraestructura a largo plazo. Para respaldar la planificación a largo plazo, los modelos climáticos, aunque están lejos de ser perfectos, pueden ofrecer información útil sobre el clima futuro y son útiles cuando se utilizan de manera adecuada. Las consideraciones sobre el clima futuro también deben sopesar múltiples objetivos (por ejemplo, fiabilidad, rentabilidad y equidad) y otras condiciones socioeconómicas o sobre políticas, ya que muchas decisiones resultarán efectivas o brindarán beneficios en múltiples condiciones futuras.

Al desarrollar planes, sopesar los beneficios y considerar las condiciones futuras, los planificadores no deben confundir un riesgo bien caracterizado con condiciones de Incertidumbre Profunda. Existe un riesgo bien caracterizado cuando los planificadores e ingenieros pueden usar con seguridad distribuciones de probabilidad conjunta únicas (es decir, predicciones) para describir el peligro, la exposición y la vulnerabilidad que contribuyen al riesgo. Por el contrario, la Incertidumbre Profunda se define (Lempert, Popper et al. 2003) como:

La Incertidumbre Profunda ocurre cuando las partes de una decisión no conocen o no están de acuerdo sobre la probabilidad de futuros alternativos o cómo las decisiones o acciones se relacionan con las consecuencias.

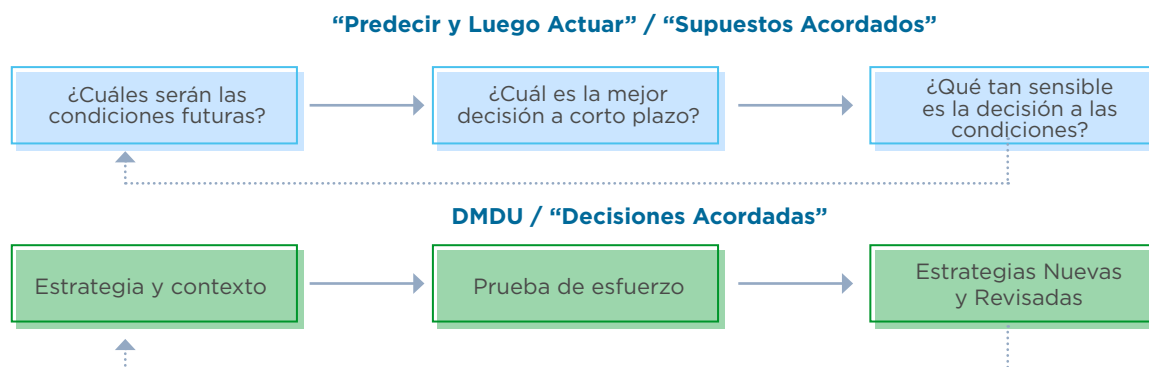
La Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda (DMDU) permite la Gestión de Riesgos en condiciones de Incertidumbre Profunda, es decir, cuando los riesgos no se pueden cuantificar con seguridad. Esta sección proporciona una descripción gene-

ral de los métodos y herramientas de DMDU, comenzando con los principios básicos de DMDU.

“Predecir y luego actuar” y DMDU

La evaluación del cambio climático presenta un desafío en términos de Gestión de Riesgos. La Gestión de Riesgos es un proceso continuo de evaluación, acción, reevaluación, aprendizaje y respuesta. Como se discutió en la Sección 2, a menudo es útil tener una visión más amplia del riesgo al evaluar el cambio climático y planificar las respuestas adecuadas. Para ilustrar esta visión general, aquí se describen los enfoques tradicionales de “predecir y luego actuar” para la Gestión de Riesgos y se presenta un marco alternativo de “decisiones acordadas” que caracteriza a los métodos de DMDU (Walker, Robert J. Lempert et al. 2013; Marchau, Walker et al. 2019).

Los planificadores de transporte a menudo asumen que los riesgos están bien caracterizados. Como resultado, los planificadores utilizan con frecuencia registros históricos de precipitación, como una tormenta de diseño a 100 años, para evaluar la fiabilidad de los activos en su red frente a tales eventos. De manera similar, al proyectar el tráfico que fluye a través de la red, los planificadores a menudo usan la mejor estimación de pronósticos de demanda.

>> **Figura 4.1** | “Predecir y Luego Actuar” en comparación con los Enfoques de DMDU

El panel superior de la Figura 4.1 sugiere cómo dicha Gestión de Riesgos tradicional puede caracterizarse por un proceso de “predecir y luego actuar”. El enfoque de “predecir y luego actuar” comienza con una comprensión consensuada y bien caracterizada del futuro y la incertidumbre que lo rodea. Este entendimiento se representa más formalmente como distribuciones de probabilidad conjunta sobre estados futuros del mundo completamente enumerados, aunque en la práctica a menudo se representa como una mejor estimación de pronóstico que luego se usa para clasificar la conveniencia de decisiones a corto plazo. Por último, el análisis de sensibilidad puede sugerir cuán sensible es la clasificación de opciones a varios supuestos.

Considere, por ejemplo, el diseño y la ubicación de un nuevo puente. En el enfoque de “predecir y luego actuar”, un ingeniero de transporte podría usar un pronóstico de demanda como valor de entrada para determinar el tamaño y la ubicación de un nuevo puente. El ingeniero también podría usar una tormenta a 50 años, estimada con base en la precipitación histórica, como criterio de diseño. Luego, el puente se diseñaría para adaptarse a la demanda futura prevista y para brindar fiabilidad contra la tormenta de diseño. También se puede agregar un factor de seguridad para tener en cuenta una pequeña cantidad de incertidumbre futura.

Los procesos de predecir y luego actuar se denominan de manera útil “decisiones acordadas” debido a que requieren que las partes de la decisión acuerden la mejor estimación de caracterización de los estados futuros del mundo antes de que puedan continuar con las etapas posteriores del análisis y tener seguridad de sus recomendaciones de políticas.

El enfoque de predecir y luego actuar funciona bien cuando la incertidumbre está bien caracterizada, pero puede fallar cuando las incertidumbres son profundas. En tales condiciones, las incertidumbres a menudo se subestiman, los análisis competitivos y las predicciones de las condiciones futuras pueden contribuir al estancamiento, y la certeza fuera de lugar en condiciones futuras puede volver a los encargados de la toma de decisiones ciegos ante la sorpresa (Lempert 2019).

En estas condiciones profundamente inciertas, a menudo es útil emplear un análisis de DMDU. Como se muestra en el panel inferior de la Figura 4.1, dicho análisis invierte el proceso de “predecir y luego actuar”. El análisis comienza con una de las estrategias o diseños de ingeniería más propuestos. Luego, los modelos y los datos se utilizan para poner a prueba estas estrategias en muchos futuros, buscando comprender las condiciones en las que las estrategias cumplirán o no sus objetivos.



Con esta información, el analista puede identificar estrategias nuevas y revisadas que son más robustas, es decir, aquellas que funcionan bien en una amplia gama de futuros plausibles.

Este proceso de DMDU puede denominarse de manera útil “decisiones acordadas” en contraste con los enfoques de “supuestos acordados”. Este último tipo de análisis puede resultar polémico en situaciones en las que las partes de una decisión tienen diferentes expectativas con respecto al futuro, por ejemplo, con respecto a la gravedad del cambio climático en su región. Las partes de una decisión a menudo tienen grupos auto-consistentes de preferencias sobre políticas y expectativas sobre el futuro. Entienden que aceptar ciertos supuestos podría conducir un análisis hacia recomendaciones de políticas en contra de sus preferencias y, por lo tanto, cuestionarán esos supuestos. En condiciones de Incertidumbre Profunda, los planificadores que están de acuerdo con los métodos de los supuestos pueden tener dificultades para reunir pruebas suficientes para generar la caracterización de consenso necesi-

ria del futuro. Por el contrario, el proceso de DMDU permite a las partes de una decisión que no están de acuerdo con las expectativas, no obstante, estar de acuerdo con la naturaleza (aunque quizás no con la magnitud) de los riesgos que enfrentan y con las estrategias adecuadas para reducir dichos riesgos (Kalra et al. 2014).

Enfoques Alternativos de DMDU

Existen muchos enfoques de DMDU (Marchau, Walker et al. 2019). Esta sección se centrará en los tres métodos de DMDU más relevantes para desarrollar estrategias de transporte robustas. Estos son:

1. **Planificación de Escenarios**, que desarrolla estrategias robustas a partir de escenarios que crean las personas;
2. **Vías Adaptativas y diseño flexible**, que proporciona un marco para desarrollar estrategias que se ajustan con el tiempo; y

3. **Toma de Decisiones Robustas (RDM)**, que ejecuta modelos de simulación sobre muchos futuros para poner a prueba las estrategias propuestas, identificar escenarios futuros que iluminen las vulnerabilidades de las estrategias y desarrollar nuevas estrategias que mitiguen dichas vulnerabilidades.

Principios Básicos de DMDU

Si bien estos métodos difieren en su implementación, son apropiados en diferentes casos y requieren diferentes niveles de esfuerzo y datos; todos comparten principios y propósitos comunes. Los principios básicos que subyacen a la DMDU son los siguientes (Lempert, Popper et al. 2003; Lempert 2019):

- » Considerar múltiples futuros, no un solo futuro, en la planificación. Elegir estos futuros para poner a prueba los planes de la organización;
- » Buscar planes robustos que funcionen bien en muchos futuros, no planes óptimos diseñados para una mejor estimación de futuro único, y que funcionen bien en un conjunto integral de métricas que sea multi-objetivo;
- » Realizar planes flexibles y adaptables que serán más robustos;
- » Utilizar la analítica para explorar muchos futuros y opciones, no para decir qué hacer.

Ejemplos de estos principios en la práctica incluyen:

- » Consideración de un rango plausible de crecimiento demográfico futuro, en lugar de una sola estimación, al dimensionar, diseñar e invertir en proyectos de transporte público.

- » Desarrollo de un plan de transporte para toda la ciudad con inversiones que mejoren las condiciones de transporte, la accesibilidad para peatones y la flexibilidad del sistema, así como la habitabilidad, la equidad, la salud y la seguridad en un rango de crecimiento demográfico futuro, cambios de temperatura y niveles de precipitación.
- » Identificación de umbrales climáticos, de población o de pasajeros clave que, si se superan, sugerirían la necesidad de reorientar los planes de inversión, redimensionar los proyectos de infraestructura o ajustar las operaciones.

Los enfoques de DMDU pueden ayudar a los planificadores a enfocarse en preguntas importantes sobre la toma de decisiones bajo Incertidumbre Profunda y considerando múltiples futuros. Estas preguntas pueden resultar útiles:

- » ¿Puede una estrategia robusta y flexible funcionar bien en una amplia gama de futuros?
- » ¿Qué incertidumbres son más importantes para determinar el éxito o el fracaso de los planes?
- » ¿Qué acciones deben tomarse ahora para mantener abiertas las opciones futuras?
- » ¿Qué acciones se pueden posponer?

Marco de Decisiones - Primer Paso de Todo Análisis de DMDU

El primer paso en el “enfoque de decisiones acordadas” implica el Marco de Decisiones, como se muestra en la Tabla 4.1. El Marco de Decisiones es un componente clave de la Planificación de Escenarios (Ta-

reas 1-3) y la “deliberación” respaldada por RMD. Se utiliza para resolver un problema, construir un entendimiento compartido, hacer que las elecciones sobre el análisis sean explícitas y hacer que las decisiones sean transparentes. El Marco de Decisio-

nes produce la información necesaria para construir los escenarios en la Planificación de Escenarios y organizar la modelación y análisis de Vías Adaptativas y ejercicios de RDM.

>> Tabla 4.1 | Matriz XLRM Utilizada para Organizar el Marco de Decisiones

La Matriz XLRM organiza los factores clave así:

X: Incertidumbres	L: Estrategias de Gestión (palancas)
Factores inciertos que pueden afectar la capacidad para alcanzar metas	Estrategias inciertas (palancas) consideradas para alcanzar metas
R: Relaciones (modelos)	M: Métricas de Desempeño
Relaciones entre métricas, palancas e incertidumbres	Métricas que reflejan los objetivos de los responsables de la toma de decisiones
$X, L \xrightarrow{R} M$	

Fuente: (Lempert et al. 2003)

Este componente de los métodos de DMDU a menudo se logra trabajando con los grupos de interés en un taller. A menudo resulta útil organizar las discusiones en dichos talleres en cuatro conjuntos clave de factores, denominados “XLRM”. Como se muestra en la Tabla 4.1 las “M”, métricas de desempeño, preguntan “¿Qué estamos tratando de lograr?” Las “L”, palancas de políticas, preguntan “¿Qué acciones podríamos tomar para lograr estos objetivos?” Las “X” son los factores inciertos fuera del control de los encargados de la toma de decisiones que afectan su capacidad para perseguir sus objetivos. Las “R” son modelos que conectan los otros factores en la matriz.

Para ilustrar el resultado y el contenido del Marco de Decisiones, detallamos el ejemplo de la Ruta Nacional 5, una carretera en

Argentina que conecta las provincias de La Pampa y Buenos Aires. La Ruta Nacional 5 es una ruta importante para el Mercosur, dado que la carretera conecta a Paraguay, Argentina, Bolivia y Brasil. La carretera se ha cerrado de forma recurrente debido a las inundaciones; por lo tanto, los segmentos clave se han visto obligados a cerrar requiriendo un desvío de 165 kilómetros (km) de más de 4.000 vehículos al día.

La Tabla 4.2 muestra los factores de XLRM para la Ruta Nacional 5. Estos factores se eligieron utilizando la pregunta focal: “¿Cómo puede la Dirección Nacional de Vialidad (DNV), preparar mejor la Ruta Nacional 5 para fomentar la resiliencia del flujo del tráfico durante los próximos 75 años?” El contenido de esta matriz se utiliza en las metodologías de DMDU detalladas en esta sección.

>> **Tabla 4.2 | Ejemplo de Matriz de XLRM Completa para la Ruta Nacional 5**

Factores de Incertidumbre (x)	Palancas de Políticas (L)
<ul style="list-style-type: none"> » Variabilidad de temperatura y lluvia » Número de intensidad de tormentas » Crecimiento económico y demanda de tráfico » Regulación ambiental » Costos de construcción y mantenimiento » Financiamiento (local, estatal, privado, condiciones económicas) » Clima político (disputas provinciales) » Entorno de políticas (provincial, nacional) 	<ul style="list-style-type: none"> » Diseño de puentes » Redundancia (aumento de la red de carreteras para reducir los desvíos en caso de una eventual inundación)
Relaciones (R)	Métricas de Desempeño (M)
<ul style="list-style-type: none"> » Cambio en costos logísticos -> cambio en el tráfico y en las variables socioeconómicas (GCD, trabajo, pobreza, desigualdad) » Cambio en la fiabilidad de la red -> cambio en las variables socioeconómicas (GCD, trabajo, pobreza, desigualdad) » Cambio en la oferta de carreteras -> cambio en la demanda de carreteras 	<ul style="list-style-type: none"> » Costos operativos promedio (logística) » Costo operativo (logística) » Velocidad media » Número de días sin interrupción del tráfico » Conexión con Provincias y Mercosur » Empleos creados para obra pública » Creación de empleo a largo plazo » Reducción de desigualdad regional » Competitividad internacional de provincias » Crecimiento del PIB

Una vez que se desarrolla una matriz de XLRM, esta se puede utilizar en los métodos de DMDU de varias formas: i) para construir escenarios futuros, ya sea cualitativa o cuantitativamente, utilizando los factores identificados como “X”; ii) probar cómo funcionan las distintas palancas de política “L” en estos escenarios; iii) medir el

desempeño de “L” con la lista de métricas relevantes “M”, y iv) modelar cualitativa o cuantitativamente (usando “R”) el sistema de transporte, activo o red que se está considerando bajo los escenarios futuros, con base en “X”, y con o sin las distintas palancas de política “L”.



Método 1 | Planificación de Escenarios

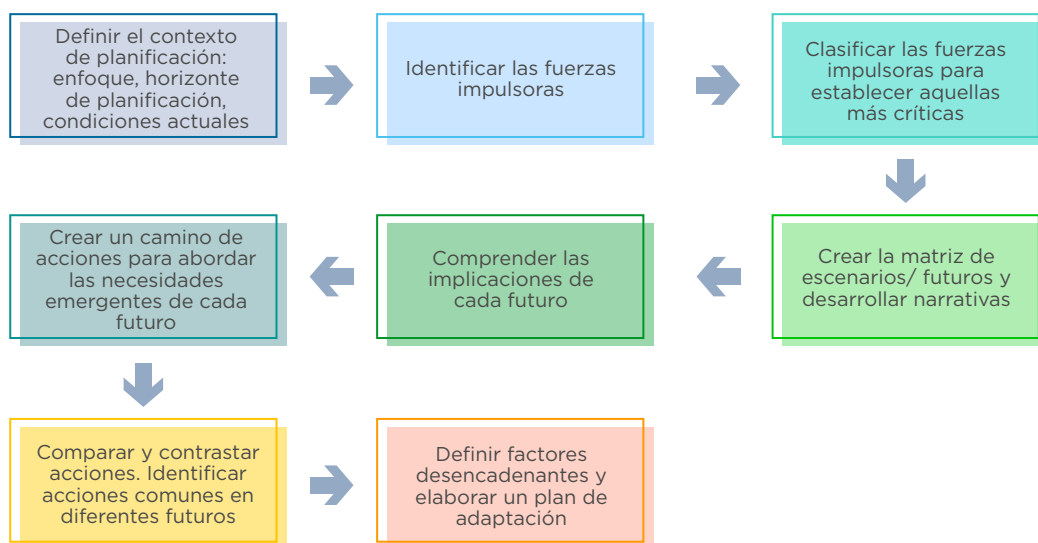
Los seres humanos son ávidos constructores de escenarios. Cuentan historias, imaginan las experiencias de los demás, contemplan posibles explicaciones y reflexionan sobre dilemas morales. Estos escenarios benefician a los humanos y les ayudan a reducir el exceso de confianza en la planificación. La Planificación de Escenarios como método de planificación se trata de estar preparado para lo que suceda en el futuro. Sin embargo, la Planificación de Escenarios no se trata de imaginar lo que la gente quiere que suceda en el futuro o de predecir lo que sucederá en el futuro.

Existen muchos procesos de Planificación de Escenarios (Schwartz 1996). Los planificadores de transporte pueden emplear de manera útil el proceso de planificación de

escenarios de ocho pasos, como se muestra en la Figura 4.2 (Lyons, Davidson et al. 2014).

La Planificación de Escenarios comienza con un proceso de enmarcado. El analista primero determina el contexto de planificación, en particular el enfoque, el horizonte de planificación y las condiciones actuales. En segundo lugar, el analista identifica las fuerzas impulsoras y los desafíos de decisión. El proceso de escenarios continúa con el tercer paso, en el que el analista clasifica las fuerzas impulsoras para establecer cuáles son las más críticas. El cuarto paso es utilizar estos impulsores para crear una matriz de escenarios futuros y desarrollar narrativas que describan esos escenarios.

>> **Figura 4.2 | Proceso de Planificación de Escenarios**



Fuente: (Lyons et al. 2014)

Los escenarios ahora se pueden utilizar para ampliar y enriquecer la comprensión del futuro (Wack 1985) y para poner a prueba los planes propuestos. El quinto paso que se muestra en la Figura 4.2, es comprender las implicaciones de cada futuro, donde se utilizó el análisis cuantitativo para enriquecer cada escenario. Los últimos pasos en el proceso de Planificación de Escenarios desarrollan una ruta de acciones para abordar las necesidades emergentes de cada futuro, comparar y contrastar acciones, identificar acciones comunes en varios futuros, definir factores desencadenantes y construir un plan de adaptación.

Para ilustrar el proceso de planificación de escenarios, se utilizó la planificación de escenarios de Nueva Zelanda que se llevó a cabo para explorar la demanda futura de viajes, como se muestra en la (Lyons, Davidson et al. 2014) Figura 4.3. Su planificación se centró en el lento crecimiento del uso del automóvil en los países desarrollados, particularmente entre los jóvenes, en parte debido al rápido crecimiento de tecnologías alternativas que están generando muchas nuevas opciones de movilidad. Sin embargo, durante más de un siglo, los automóviles privados han proporcionado una movilidad cada vez mayor. Como resultado de esta dinámica cambiante, los planificadores de Nueva Zelanda se preguntaron: ¿Cuáles son las implicaciones en la demanda de movilidad y los medios para abastecerla a mediados del siglo XXI?

A lo largo de estas etapas del proceso de Planificación de Escenarios de Nueva Zelanda, los participantes en una serie de talleres sugirieron 16 impulsores del cambio. Luego, agruparon y clasificaron estos impulsores en función de la importancia y la incertidumbre. Por ejemplo, la urbanización, el envejecimiento de la población, la descentralización de las compras, la sociedad conectada digitalmente, la respuesta

al cambio ambiental y el auge de Asia se caracterizaron como cambios conocidos que ocurrieron en su región. En contraste, los participantes del taller caracterizaron los valores, comunidad e identidad, el fundamentalismo, la infraestructura inteligente y nanotecnología, la seguridad personal y estatal y la propiedad de Internet como dinámicas inciertas que podrían afectar el sistema de transporte. Un tercer grupo de impulsores también surgió de este proceso, que representaba a aquellos con opiniones más mixtas sobre su probabilidad y resultado. Este grupo incluyó: resiliencia al cambio climático, presiones sobre la gestión de materias primas y recursos, tecnologías que impulsan nuevas industrias y modelos de negocio, riqueza y acceso al empleo, y gobernanza, regulación y política.

El cuarto paso es utilizar estos impulsores para crear una matriz de escenarios futuros y desarrollar narrativas que describan esos escenarios. En el ejemplo de Nueva Zelanda, se utilizaron diferentes costos de energía (bajo y alto) y preferencia de accesibilidad (física o virtual) para construir cuatro escenarios con narrativas correspondientes: cooperativo y cercano, locales globales, paraíso de viajeros y decadencia digital (Figura 4.3, que también muestra descripciones de cada escenario). Estos escenarios se basaron en los impulsores identificados y clasificados en los pasos uno al tres (p. ej., urbanización, sociedad conectada digitalmente). El costo relativo de la energía fue un impulsor clave para el futuro utilizado para organizar los cuatro escenarios. Es decir, en relación con otros costos de vida, la asequibilidad de la energía influye en lo que las personas podrán hacer. La segunda dimensión de la matriz de escenarios futuros—la preferencia de accesibilidad—enmarca lo que los miembros de la sociedad querrán hacer. Es decir, si bien es tecnológicamente posible conectarse físicamente (transporte) o virtualmente (telecomunicaciones), una

incertidumbre crítica es cómo las personas querrán acceder a otras personas, bienes, servicios y oportunidades en el futuro.

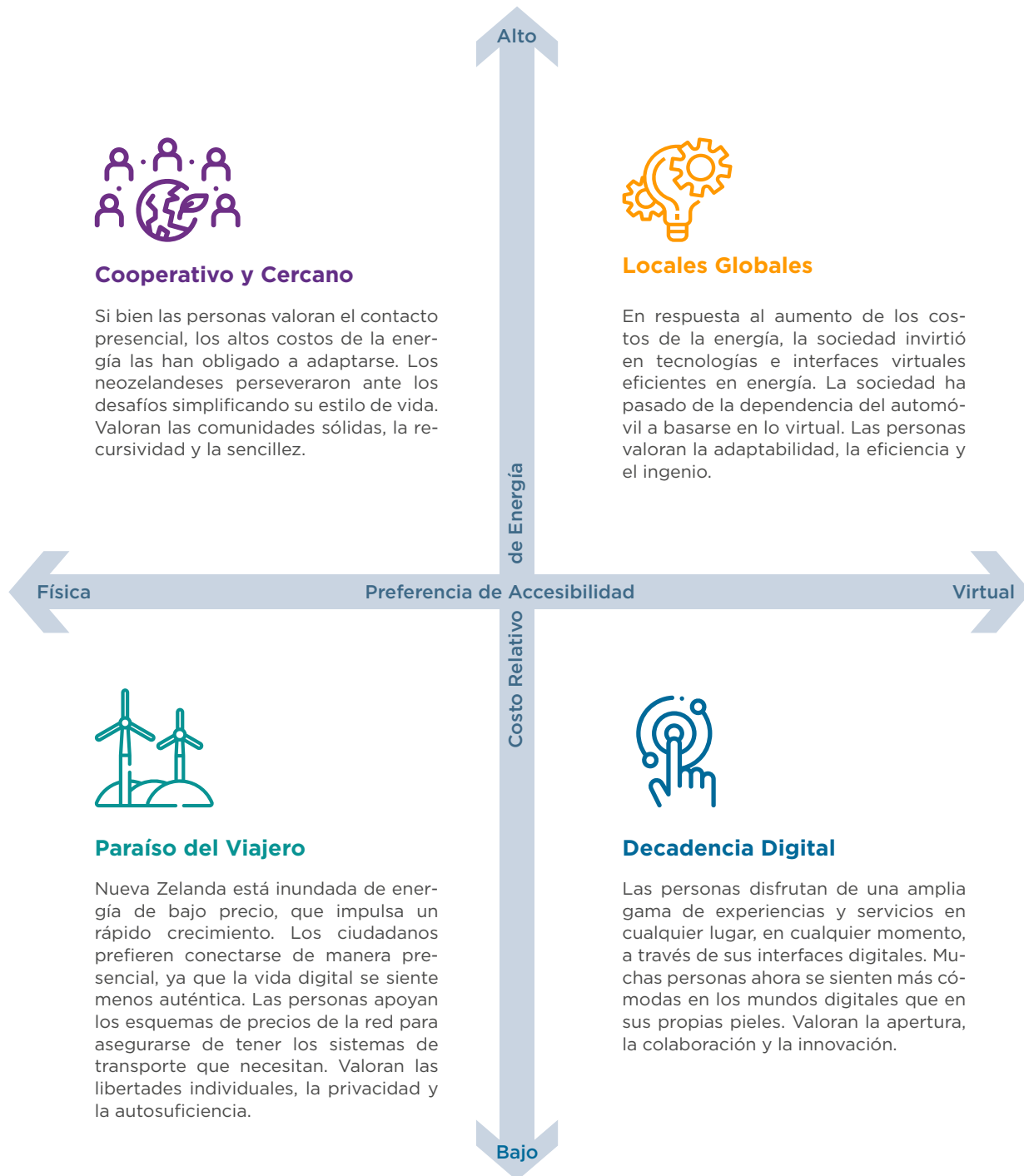
Dentro de los cuatro escenarios que definieron futuros plausibles para Nueva Zelanda, los planificadores también podrían haber incorporado variables relacionadas con el cambio climático. Por ejemplo, los planificadores podrían haber agregado un futuro muy húmedo y caluroso como parte del escenario “Cooperativo y Cercano”, lo que podría exacerbar las demandas

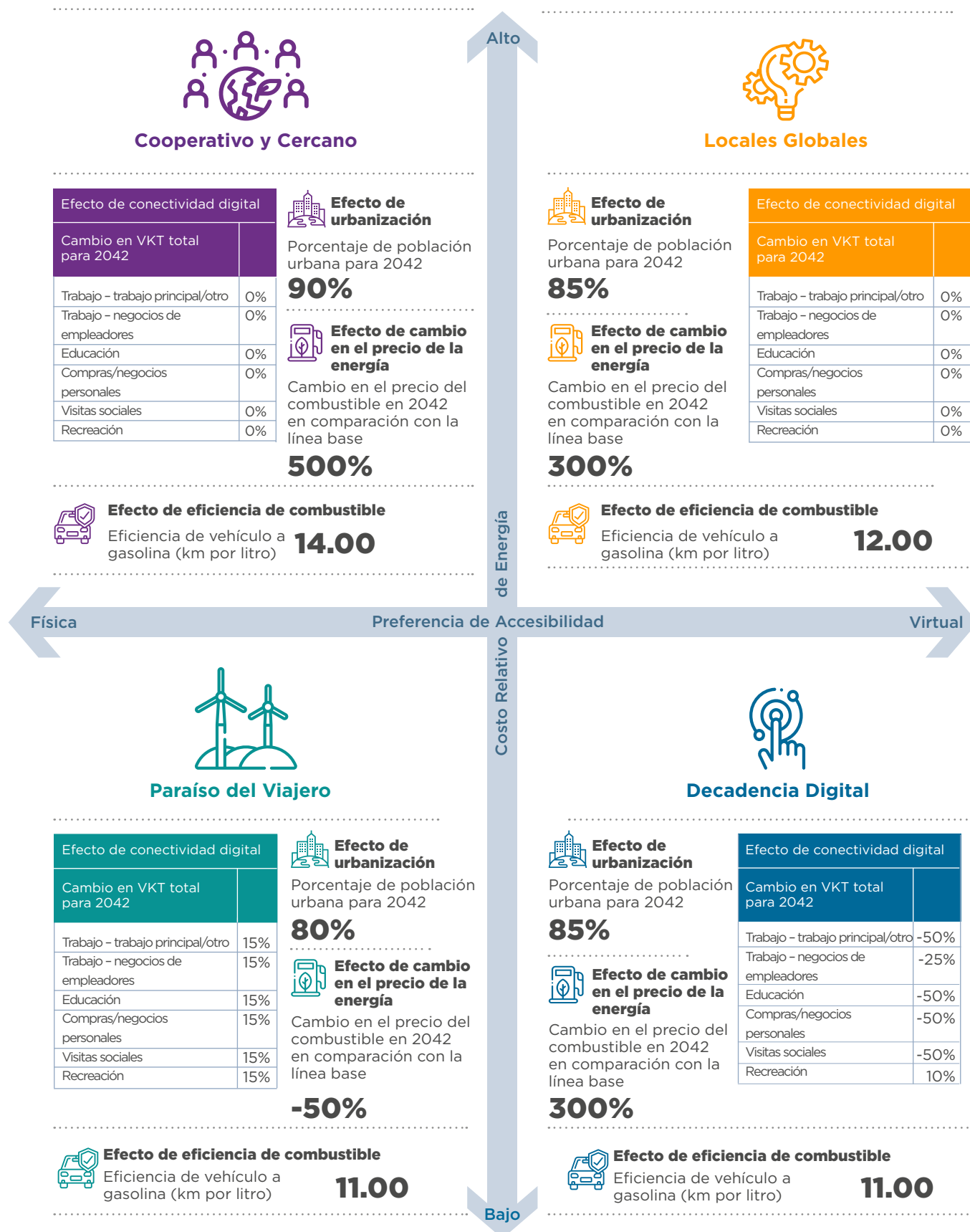
de alto costo y complicar las preferencias de la sociedad para mantener el acceso al transporte (en lugar del acceso virtual). Los planificadores también podrían considerar los efectos de la descarbonización en las tecnologías de transporte en todos los escenarios.

El análisis de escenarios de Nueva Zelanda no se centró en los pasos finales que se muestran en la Figura 4.2. Los abordaremos en la próxima sección en Vías Adaptativas.



>> **Figura 4.3 |** Escenario de Nueva Zelanda/Matriz Futura con Narrativas





Fuente: (Lyons et al. 2014)



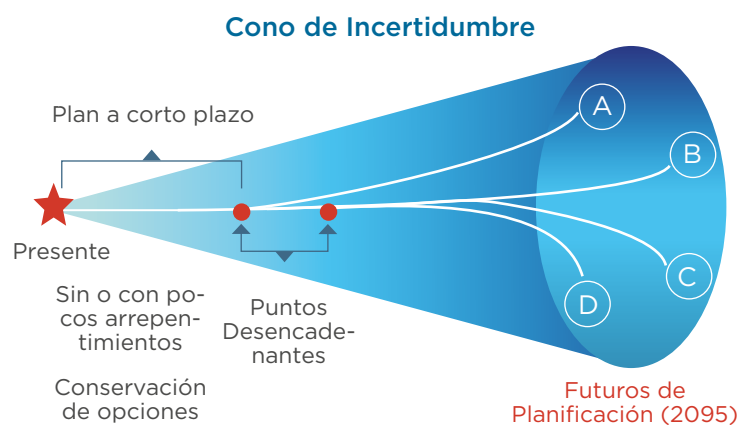
Método 2 | Vías Adaptativas

Los escenarios se han utilizado durante mucho tiempo para ayudar a identificar estrategias robustas que pueden funcionar bien en una amplia gama de futuros (van der Heijden 1996). Después de desarrollar un conjunto de escenarios, los analistas y los encargados de la toma de decisiones pueden poner a prueba las estrategias propuestas contra ellos. Una estrategia robusta funcionará relativamente bien en todos los escenarios.

Estas estrategias robustas suelen ser adaptables, es decir, están diseñadas para ajustarse con el tiempo en res-

puesta a nueva información. La Figura 4.4 muestra el concepto básico (Kaatz 2015). Una estrategia o diseño comienza con un componente a corto plazo. Estas son acciones que se llevarán a cabo en el presente y, según el contexto, en los próximos meses o años. La estrategia también monitoreará las tendencias clave que podrían sugerir la necesidad de modificar o actualizar estas acciones a corto plazo. El plan también incluye acciones de contingencia que podrían tomarse si se observan tendencias específicas. Estas a menudo se denominan puntos de inflexión, puntos desencadenantes o umbrales.

>> **Figura 4.4** | Los escenarios pueden apoyar el desarrollo de estrategias robustas y flexibles



Fuente: IPCC 2012

En los últimos años, las Vías Adaptativas dinámicas han surgido como un enfoque poderoso para desarrollar y visualizar planes robustos y adaptables (Haasnoot, Kwakkel et al. 2013; Haasnoot, Warren et al. 2019). Las Vías Adaptativas proporcionan un marco para desarrollar planes de con-

tingencia. El enfoque de Vías Adaptativas tiene varios pasos clave. El paso de Marco de Decisiones identifica medidas de desempeño importantes para el proyecto o sistema en cuestión, escenarios que pueden impedir la capacidad para lograr los niveles de desempeño deseados y opciones

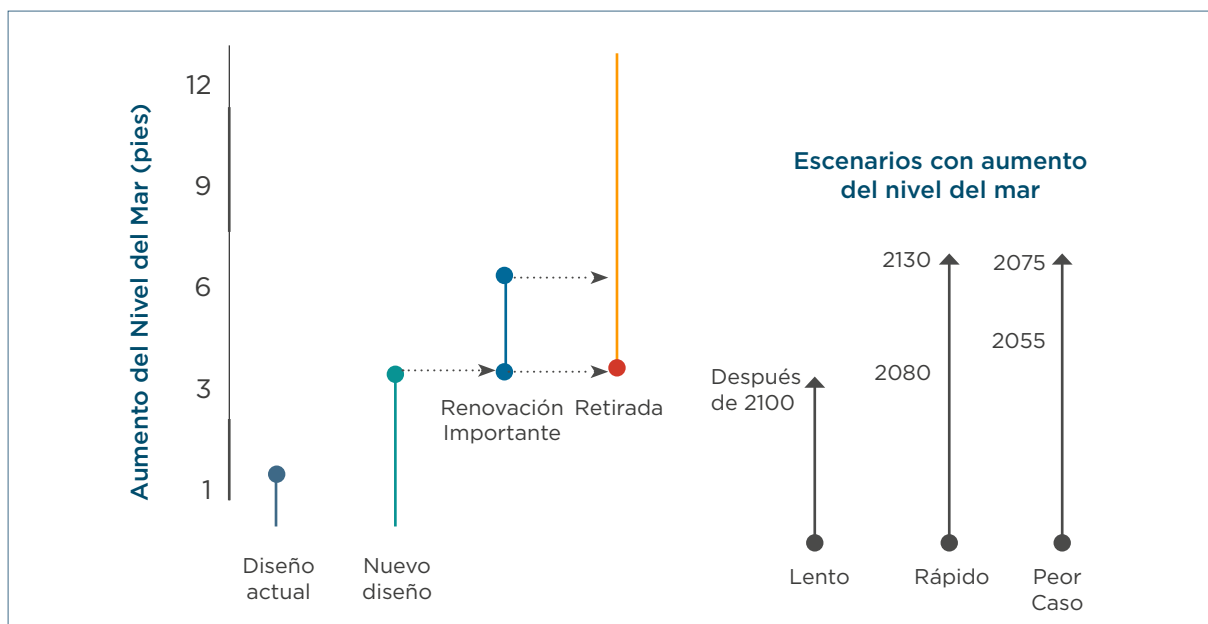
de decisión alternativas que podrían usarse para aumentar la resiliencia. Los pasos de prueba de esfuerzo y de nuevas estrategias organizan las opciones en vías que consisten en acciones iniciales y acciones de contingencia posteriores que pueden cumplir con las medidas de desempeño con niveles de peligro crecientes. Los pasos del enfoque de Vías Adaptativas son los siguientes:

- » Identificar el nivel de peligro para cada opción de decisión alternativa en el que la opción ya no proporcionaría un desempeño adecuado de acuerdo con las medidas. Estos se denominan puntos de inflexión de la Adaptación.
- » Identificar un rango de escenarios para el peligro y anotar la fecha en la que se podrían alcanzar los puntos de inflexión de Adaptación en cada escenario.
- » Hacer seguimiento de cómo se avanzaría en la secuencia de opciones en cada escenario.
- » Identificar señales que indiquen qué escenario está ocurriendo.

Las Vías Adaptativas ayudan a identificar qué opciones implementar primero, qué opciones implementar después y cómo hacer que las elecciones sean menos vulnerables a las incertidumbres del escenario. La Figura 4.5 resume el enfoque con un ejemplo teórico.

Imagine una carretera cerca de la costa. La carretera está destinada a alcanzar un cierto nivel de fiabilidad, por ejemplo, permitiendo que el tráfico pase por ella el 99 por ciento del tiempo. Los ingenieros determinan que la carretera puede mantener esa fiabilidad con hasta un pie de aumento del nivel del mar. Dado que el aumento del nivel del mar podría superar este nivel, los operadores de la carretera consideran un nuevo diseño. Como se muestra por la línea púrpura en el lado izquierdo de la Figura 4.5, podrían considerar un diseño que pueda mantener la fiabilidad con hasta tres pies de aumento del nivel del mar. El diseño es tal que con una renovación importante en el futuro, la carretera podría mantener la fiabilidad con hasta seis pies de aumento del nivel del mar.

>> **Figura 4.5 | Vías Adaptativas**



Fuente: (Lyons et al. 2014)

Las Vías Adaptativas se están volviendo cada vez más populares. Recientemente, las guías *Coastal Hazards and Climate Change: Guidance for Local Government* de Nueva Zelanda y *State of California Sea-Level Rise Guidance* recomendaron el

enfoque, siendo utilizado recientemente para examinar las inundaciones urbanas en Miami (Consejo de Protección del Océano de California 2018, Bouwer et al. 2018; Ministerio de Medio Ambiente 2017).



Método 3 | Toma de Decisiones Robustas (RDM)

RMD es una evaluación de DMDU analítica e iterativa diseñada para informar decisiones en condiciones de Incertidumbre Profunda (Lempert, Popper et al. 2003; Lempert, Groves et al. 2006; Groves and Lempert 2007; Groves, Molina Perez et al. 2019; Lempert 2019). RMD usa modelos y datos para poner a prueba las estrategias en muchos caminos plausibles hacia el futuro, usa la base de datos resultante para identificar las condiciones en las que las estrategias fallan y usa esta información para identificar más estrategias que funcionan mejor en futuros más plausibles.

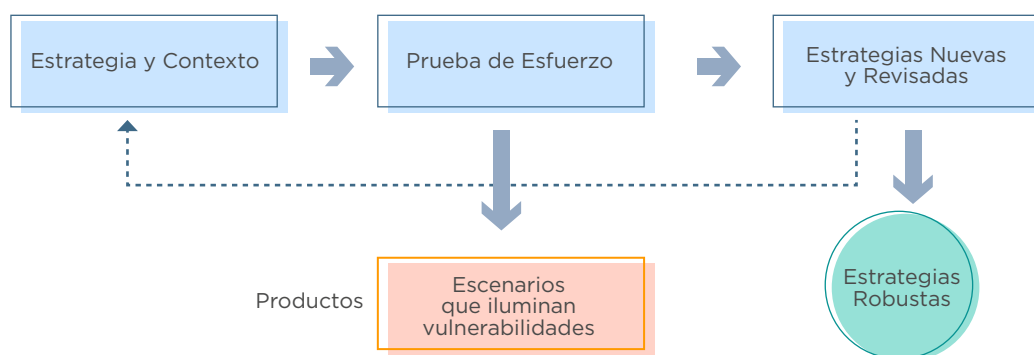
Como se muestra en la Figura 4.6, RMD sigue el proceso de DMDU y produce dos productos clave: escenarios que iluminan las vulnerabilidades de las estrategias propuestas y 2) estrategias más robustas que reducen estas vulnerabilidades.

RMD comienza con el ejercicio del Marco de Decisiones, como se describió anteriormente en esta sección. En este ejercicio, los grupos de interés definen los factores clave del análisis: los objetivos y criterios del encargado de la toma de decisiones; las acciones que pueden tomar para

perseguir esos objetivos; las incertidumbres que pueden afectar la conexión entre acciones y consecuencias, y las relaciones, a menudo ejemplificadas en modelos de simulación por computadora, entre acciones, incertidumbres y objetivos. Un producto importante de este Marco de Decisiones es a menudo una de las estrategias más propuestas a considerar.

A continuación, RMD utiliza modelos de simulación para evaluar las estrategias propuestas en cada uno de los muchos caminos posibles hacia el futuro. Estos cálculos generan una gran base de datos de resultados del modelo de simulación. Cada registro de la base de datos muestra el desempeño de una estrategia en un futuro.

Esta base de datos se puede utilizar para probar cada estrategia propuesta. Los analistas y los encargados de la toma de decisiones utilizan la visualización y la analítica de datos para explorar y caracterizar las condiciones futuras que mejor distinguen cuando una estrategia propuesta alcanza o no sus objetivos. La comprensión de estas condiciones ilumina las vulnerabilidades de cada estrategia propuesta y las compensaciones entre las estrategias.

>> **Figura 4.6 | El Proceso de RDM**

A continuación, los analistas y los encargados de la toma de decisiones utilizan esta información para identificar y evaluar estrategias potencialmente más robustas que ofrecen mejores compensaciones que las opciones existentes. Estas nuevas opciones generalmente incorporan palancas de política adicionales y, a menudo, incluyen los componentes clave de la planificación adaptativa: un conjunto de acciones a corto plazo, señales definidas que indican cuándo y bajo qué condiciones pueden ser necesarias estrategias adicionales, y acciones contingentes que deben tomarse si se observan las señales designadas previamente. Este proceso se describe en detalle en el siguiente ejemplo.

En cada uno de los pasos de RDM, la información producida puede sugerir un nuevo enmarcado del desafío de decisión. El proceso produce entregables clave, incluyendo (1) los escenarios que iluminan

las vulnerabilidades de las estrategias y (2) estrategias potenciales robustas y las compensaciones entre las mismas. Como se discutió en el texto que rodea a la Figura 4.1, la DMDU sigue un proceso de “decisiones acordadas” diseñado para permitir que las partes de una decisión que no están de acuerdo con las expectativas del futuro acuerden, no obstante, acciones para reducir el riesgo. En consecuencia, estos dos productos de RDM representan información de alta seguridad en un mundo de Incertidumbre Profunda. Las partes de una decisión pueden acordar las condiciones bajo las cuales una estrategia propuesta alcanzaría o no sus objetivos sin llegar a un acuerdo sobre la probabilidad de esas condiciones. Las partes de una decisión también pueden estar de acuerdo en que algunas estrategias son más robustas que otras, es decir, más capaces de tener éxito en una amplia gama de futuros.

Recuadro 4.1

RDM y Análisis de Monte Carlo

El análisis de riesgo tradicional a menudo emplea métodos de Monte Carlo. RMD y Monte Carlo comparten similitudes y diferencias importantes. Puede resultar importante dejar esto en claro.

Un análisis de Monte Carlo implica ejecutar un modelo de simulación muchas veces con diferentes valores de entrada. Estos valores de entrada generalmente se eligen tomando muestras de una mejor estimación de distribución de probabilidad sobre esos valores. Los valores de salida del modelo resultante se interpretan luego como una distribución de probabilidad y se resumen con la media y los momentos de esa distribución (es decir, desviación estándar).

Tanto el análisis de Monte Carlo como RMD implican ejecutar un modelo muchas veces con diferentes supuestos respecto a los valores de entrada del modelo, sin embargo RMD y el análisis de Monte Carlo difieren de dos maneras importantes. Primero, RMD considera que el análisis de Monte Carlo combina dos conceptos distintos: a) elegir un conjunto de parámetros de entrada del modelo diferentes para tomar muestras de manera eficiente y luego comprender el comportamiento del modelo sobre esos valores, y b) elegir una distribución de probabilidad sobre los valores de entrada del modelo que reflejan una comprensión de la probabilidad de futuros alternativos en el mundo real. En segundo lugar, RMD considera las medias y los momentos de las distribuciones de probabilidad como solo una de las diversas formas en que los analistas pueden resumir de manera útil la información en una gran base de datos de ejecuciones de modelos.

Por lo tanto, RMD separa los dos conceptos distintos combinados por el análisis de Monte Carlo. RMD a menudo utilizará un análisis de Monte Carlo o un tipo similar de diseño experimental estocástico sobre los valores de entrada del modelo para tomar muestras del comportamiento del modelo de manera eficiente. Luego, RMD usa métodos como la visualización interactiva por computadora y la clasificación estadística para extraer información relevante sobre políticas de la base de datos resultante de ejecuciones de modelos, sin asumir que la distribución utilizada para generar la muestra de ejecuciones del modelo es la misma que la distribución de probabilidad de futuros en el mundo real. En situaciones con una incertidumbre tanto bien caracterizada como Incertidumbre Profunda, los análisis de RMD a menudo ejecutarán un modelo de riesgo utilizando el análisis estándar de Monte Carlo sobre las incertidumbres bien caracterizadas, a la vez explorando las incertidumbres profundas.

RMD también comparte similitudes y diferencias con el análisis de sensibilidad estándar, como aquel mencionado en el panel superior de la Figura 4.1. De manera similar al análisis de sensibilidad, RMD busca comprender cómo los valores de salida de un modelo varían con respecto a sus valores de entrada, sin embargo, RMD invierte las preguntas estándar del análisis de sensibilidad. En lugar de preguntar “¿qué tan sensibles son nuestros resultados a las incertidumbres en nuestros supuestos?” RMD pregunta “¿Qué acciones podemos emprender cuyo éxito sea insensible a aquellos aspectos del futuro que siguen siendo profundamente inciertos?”

Ejemplo 1: Análisis de RDM: Diagnóstico de Vulnerabilidad y Resiliencia Económica de los Sistemas de Transporte, Infraestructura y Operaciones en los Balcanes Occidentales (DIVERSION)

Ahora presentaremos estos pasos de RDM con más detalle, utilizando como ejemplo el proyecto de *Diagnóstico de Vulnerabilidad y Resiliencia Económica de los Sistemas de Transporte, Infraestructura y Operaciones en los Balcanes Occidentales* (DIVERSION) del Banco Mundial. Este esfuerzo tiene como objetivo: i) utilizar el análisis espacial para determinar las carreteras prioritarias potencialmente de alto riesgo a lo largo de los corredores de transporte vitales, ii) evaluar los impactos económicos y sociales de las interrupciones en estas carreteras prioritarias, e iii) identificar las intervenciones prioritarias para reducir el riesgo de la manera más rentable y aumentar la resiliencia de la red de transporte. Debido a que las incertidumbres profundas giran en torno a los peligros, el proyecto emplea RMD tanto para realizar una evaluación de riesgos como para identificar un portafolio robusto de respuestas a dichos riesgos. Para comprometerse con las prioridades de los grupos de interés locales, el proyecto también creó dos herramientas de apoyo a la toma de decisiones, una que muestra los datos de peligros y de la red de transporte, y otra que ayuda a los encargados de la toma de decisiones a identificar las carreteras prioritarias de alto riesgo de acuerdo con sus propios criterios.

Este análisis de RDM muestra que:

- » Los Balcanes Occidentales están expuestos a una amplia gama de peligros naturales.
- » La red de carreteras de la región es relativamente resiliente porque tiene mucha conectividad.
- » La mayor parte del riesgo relacionado con los peligros naturales para la red se debe a algunos enlaces de alto impacto.

- » Las inversiones relativamente pequeñas, debidamente orientadas, pueden reducir significativamente este riesgo.

Ahora describimos el análisis que genera estos resultados de alto nivel.

Lista de Verificación de RDM

La Figura 4.6 sugiere una lista de verificación útil de pasos para cualquier análisis de RDM. Estos pasos son:

1. Enmarcar el desafío de la decisión
2. Poner a prueba las estrategias propuestas en una amplia gama de futuros
3. Identificar estrategias nuevas o revisadas que cumplan los objetivos de planificación en una gama más amplia de futuros.

El ejemplo de la red de transporte de los Balcanes implementa cada uno de estos pasos.

Paso 1: Marco de Decisiones

La red de carreteras estratégicas de los Balcanes Occidentales—Albania; Bosnia y Herzegovina; Kosovo; Macedonia del Norte; Montenegro; y Serbia—incluye el corredor mediterráneo (MED) y los corredores de Oriente/Mediterráneo Oriental (OEM por sus siglas en inglés) como se muestra en la Figura 4.7. Esta red es vital para la economía y el bienestar social de la región, pero está amenazada por peligros naturales, como terremotos, derrumbes, inundaciones, precipitaciones y temperaturas extremas, ventiscas y vientos extremos. Todos estos peligros, excepto los terremotos, se ven afectados por el cambio climático.

El Banco Mundial y los seis gobiernos nacionales a lo largo de ambos corredores tienen inversiones actuales y propuestas en esta red de carreteras de los Balcanes. El análisis del proyecto DIVERSION tiene como objetivo mejorar la resiliencia de tales inversiones al cambio climático y otros peligros natu-

rales planteando las siguientes preguntas: “¿Qué enlaces de la red generan el mayor riesgo relacionado con peligros naturales para la red en su conjunto?” y “¿Qué intervenciones reducirían de manera más rentable esos riesgos?” La primera pregunta se enfoca en identificar vulnerabilidades y la segunda se enfoca en identificar respuestas a esas vulnerabilidades.

RMD fue útil para responder a estas preguntas porque implican muchas incertidumbres profundas, en particular la frecuencia y magnitud de los peligros naturales afectados por el cambio climático.

>> **Figura 4.7 | Corredor Mediterráneo de los Balcanes Occidentales (MED) y Corredor de Oriente/Mediterráneo Oriental (OEM)**



Fuente: DIVERSION Report

El equipo del proyecto llevó a cabo el Marco de Decisiones en estrecha consulta con el director de proyectos del Banco Mundial. Las discusiones también incluyeron varias sesiones con encargados de la toma de decisiones sobre transporte en los Balcanes Occidentales. Como es típico en los análisis de RDM, los resultados de estas discusiones se organizaron utilizando el marco “XLRM”, como se muestra en la Tabla 4.3.

Los objetivos de los encargados de la toma de decisiones están representados por tres tipos de medidas de desempeño: riesgo, medido por aumentos potenciales en el tiempo de viaje y la distancia de viaje para automóviles de pasajeros y para carga; impactos económicos medidos por el valor de las pérdidas, los costos de reparación y recuperación, y los costos de las interrupciones, y el costo de las intervenciones de

políticas. Todos estos resultados se evalúan en el año 2030.

Para la prueba de esfuerzo, el análisis considera la red de carreteras existente en los Balcanes Occidentales. Para el análisis de opciones de estrategias robustas, el análisis considera una amplia variedad de interven-

ciones potenciales que incluyen construcción, monitoreo y mantenimiento, y reporte de incidentes de operación, como se muestra en la Tabla 4.3. Estas intervenciones afectan la susceptibilidad de los enlaces a las interrupciones y, hasta cierto punto, el impacto de la interrupción.

>> **Tabla 4.3 | Factores de XLRM para el Análisis de Resiliencia del Transporte de los Balcanes**

Factores Inciertos (X)	Palancas de Política (L)
<ul style="list-style-type: none"> • Peligros naturales: Frecuencia y magnitud de: <ul style="list-style-type: none"> » Terremotos » Derrumbes » Inundación » Incendios forestales » Viento » Calor y frío extremos » Precipitación extrema 	<ul style="list-style-type: none"> • Construcción <ul style="list-style-type: none"> » Puentes y cruces » Drenaje » Erosión y estabilización » Protección contra inundaciones » Paisajismo » Planificación, diseño y construcción » Superficie y estructura de carretera • Otros <ul style="list-style-type: none"> » Monitoreo y mantenimiento » Reporte de incidentes de operación
Relaciones (R)	Medidas de Desempeño
<ul style="list-style-type: none"> • Riesgo calculado a partir de: <ul style="list-style-type: none"> » Peligro » Exposición » Vulnerabilidad • Superposiciones de SIG para calcular la exposición • Modelo REBIS VISUM para impactos de interrupción • Análisis económico de costos de retraso y pérdida de accesibilidad 	<p>En el año 2030:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Riesgo, medido por el aumento potencial de: <ul style="list-style-type: none"> » Tiempo de viaje para automóviles y carga » Distancia de viaje para automóviles y carga • Impactos económicos <ul style="list-style-type: none"> » Valor de pérdidas » Costos de reparación, recuperación » Costo de las interrupciones • Costo de intervenciones de política

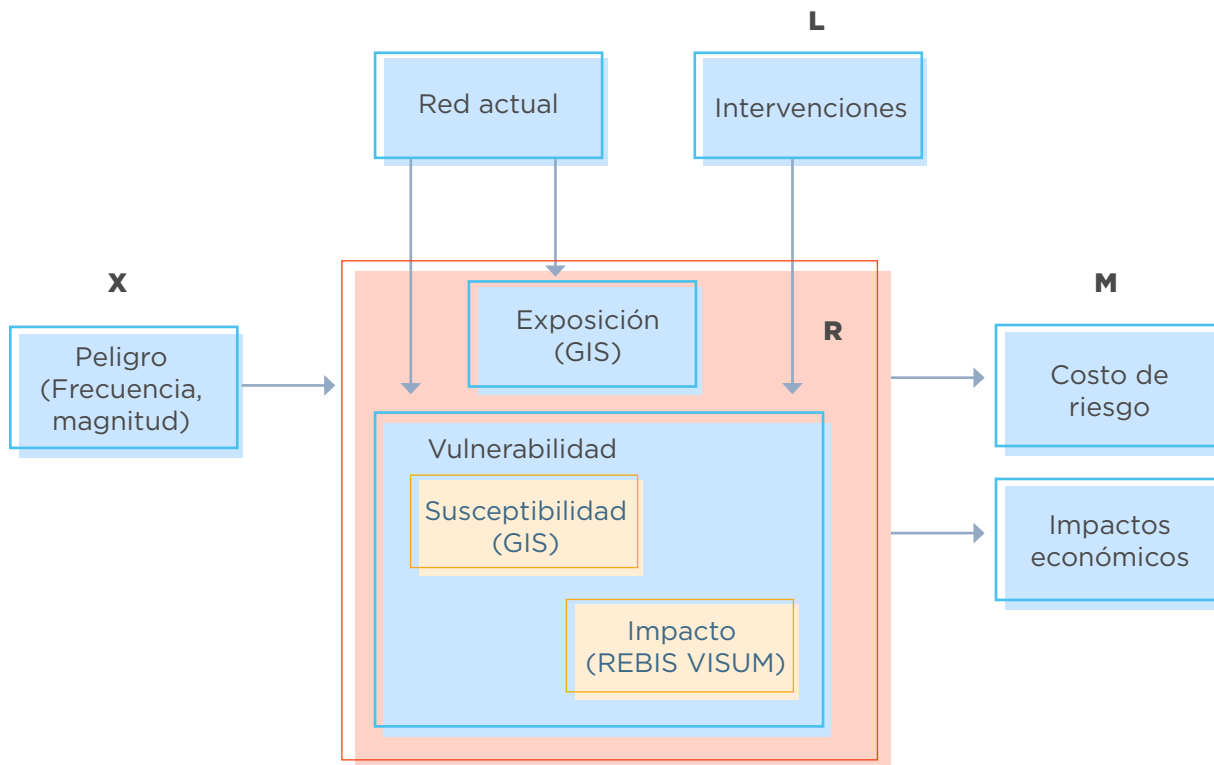
Fuente: DIVERSION REPORT Table 2.1



Este estudio se centra en la Incertidumbre Profunda en los peligros naturales, en particular en la magnitud y el período de retorno. Con base en consultas con el Banco Mundial y las representaciones de los países, y conforme a las bases de datos que se analizan a continuación, el estudio considera ocho peligros que pueden afectar los enlaces en la red de transporte: terremotos, derrumbes, incendios forestales, inundaciones, viento, calor extremo, frío extremo y precipitación. Los terremotos, derrumbes e inundaciones pueden reducir la capacidad de la carretera y dañarla. Los incendios forestales y las precipitaciones pueden reducir la capacidad. El frío y el calor extremos pueden dañar la carretera. Como se describe con más detalle a continuación, el estudio representa una Incertidumbre Pro-

funda al considerar un rango de períodos de retorno para cada uno de los peligros.

Estos factores están conectados por las relaciones esbozadas en la Figura 4.8. Como se describe en la siguiente sección, esto nos permite estimar la exposición y la susceptibilidad para cada enlace de la red. Usamos el modelo REBIS VISUM para calcular los impactos de una interrupción en cualquier enlace de la red. Como se explica en la siguiente sección, usamos esta información en un análisis de RDM para identificar los conjuntos de enlaces individuales y pares de enlaces cuya interrupción potencial genera el mayor riesgo para la red. Luego, estimamos los impactos económicos que resultarían de la interrupción de estos enlaces de alto riesgo.

>> **Figura 4.8 |** Conexiones entre factores en el análisis de los Balcanes**Paso 2: Pruebas de Esfuerzo**

La prueba de esfuerzo tiene como objetivo identificar los enlaces que generan el mayor riesgo relacionado con peligros naturales para la red en su conjunto. En particular, para ayudar a simplificar y enfocar el análisis de opciones posteriores, nuestro objetivo es identificar una pequeña cantidad de enlaces que generen el mayor riesgo para la red. El proyecto emplea un marco de riesgo para organizar este cálculo y RMD para identificar los enlaces que generan mayor riesgo frente a una Incertidumbre Profunda sobre los peligros.

Marco de riesgo

El proyecto define el riesgo como:

$$R_{hs} = H_h \times E_{hs} \times V_{hs}$$

donde H es el peligro h, E es la exposición del enlace s a ese peligro y V es la vulnerabilidad del enlace s a ese peligro.

El peligro, la exposición y la vulnerabilidad se calculan superponiendo varios conjuntos de datos, incluyendo sobre:

- » Unidades administrativas—incluyendo los límites específicos a cada país y administración de la NUTS de la Unión Europea;
- » Rutas estratégicas—corredores viales OEM y MED;
- » Red de carreteras estratégicas de OSM—Datos detallados de la red de carreteras que cubren los seis países cubiertos por el estudio;
- » Datos de población de ERI—Datos de población y demográficos de 2017 descargados de ESRI ArcGIS Online;
- » Mapas de peligro de inundaciones de la UE—Mapas de peligro de inundaciones para períodos de retorno de 1 en cada 10 a 1 en cada 500 años. Peligro como profundidad de la inundación en metros;

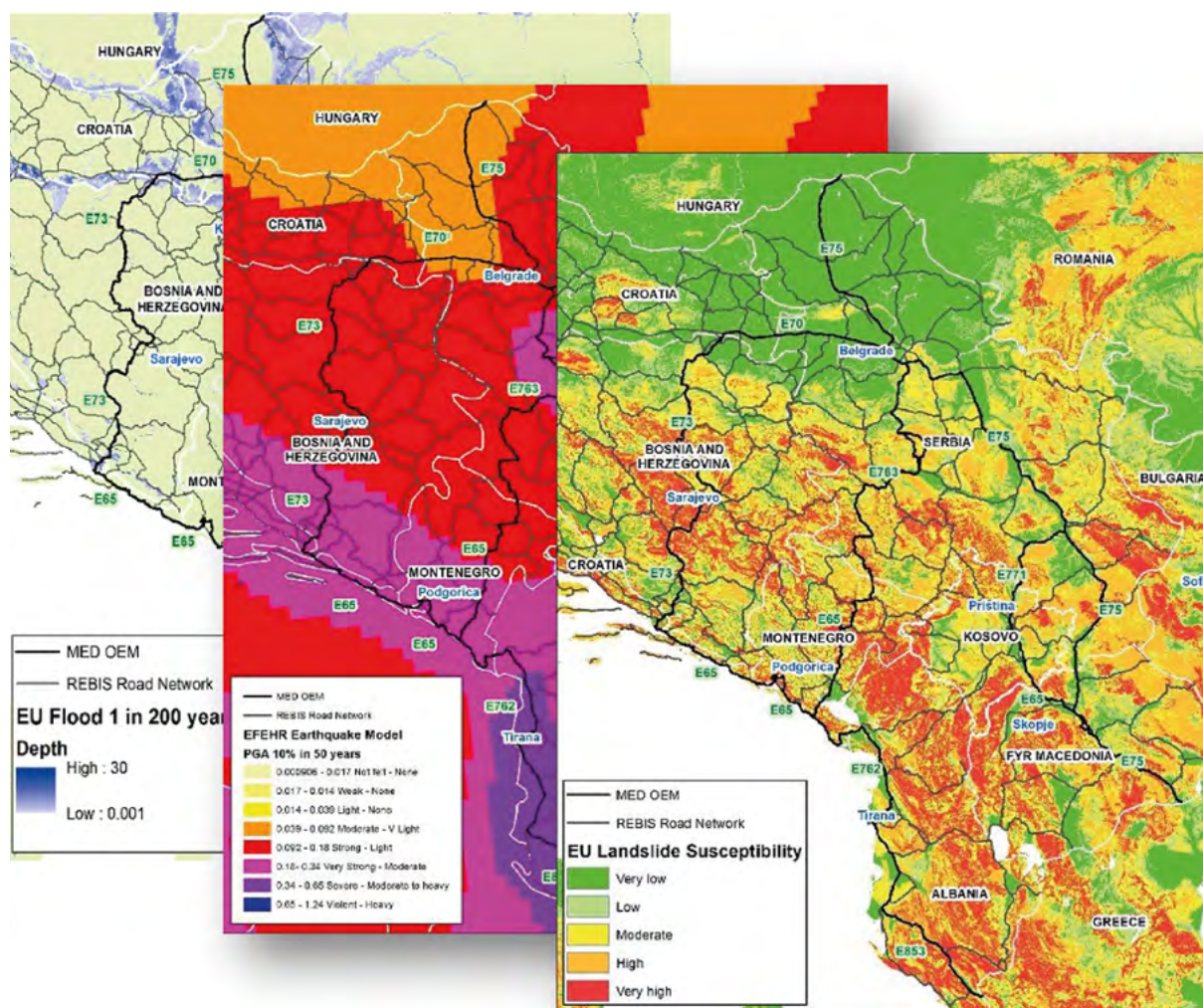
- » Drenaje hídrico de la UE—Capas del sistema fluvial y de drenaje desarrolladas por el programa Copernicus de la UE;
- » Mapa de susceptibilidad a derrumbes de la UE—Mapa detallado de susceptibilidad a derrumbes que cubre el área de estudio;
- » Mapa de peligro de terremotos de EFEHR—Mapa de potencial sísmico para una aceleración máxima del suelo del 10% en 50 años;
- » Uso del Suelo Corine de la UE 2012—Mapeo de cobertura terrestre que

cubre Europa desarrollado por el programa Copernicus de la UE, y

- » Modelo de Elevación DEM de la UE—Modelo de elevación detallado que cubre Europa desarrollado por el programa Copernicus de la UE.

Luego, los usuarios pueden ver y superponer estos conjuntos de datos de SIG. La Figura 4.8 muestra un ejemplo de los datos, en particular mapas para datos de peligros de inundaciones, terremotos y derrumbes.

>> **Figure 4.8 |** Mapas del proyecto que muestran datos sobre peligros de inundaciones, terremotos y deslizamientos de tierra



Fuente: DIVERSION REPORT Tabla 2.1

Cada *peligro* tiene tres niveles de magnitud: bajo, medio y alto, lo que puede causar niveles crecientes de daño y reducción de la capacidad. Se diferencian los peligros infrecuentes de los frecuentes. Los peligros poco frecuentes, como terremotos, deslizamientos de tierra, incendios forestales e inundaciones, ocurren con menos frecuencia, pero pueden causar una interrupción significativa en la red de carreteras. Los peligros frecuentes, como el viento, las temperaturas extremas y las fuertes precipitaciones ocurren con más frecuencia, pero la interrupción se disipa después de un período de tiempo relativamente corto (p. ej., de horas a días).

Cada peligro en cada magnitud tiene un período de retorno profundamente incierto, caracterizado por una amplia gama de valores potenciales. La exposición y la vulnerabilidad se tratan como si fueran conocidas.

Cada enlace de la red está expuesto en mayor o menor grado a cada peligro. Esta exposición se caracteriza por un número entre 0 y 1, que se determinó superponiendo la red de carreteras con un mapa de SIG de cada peligro.

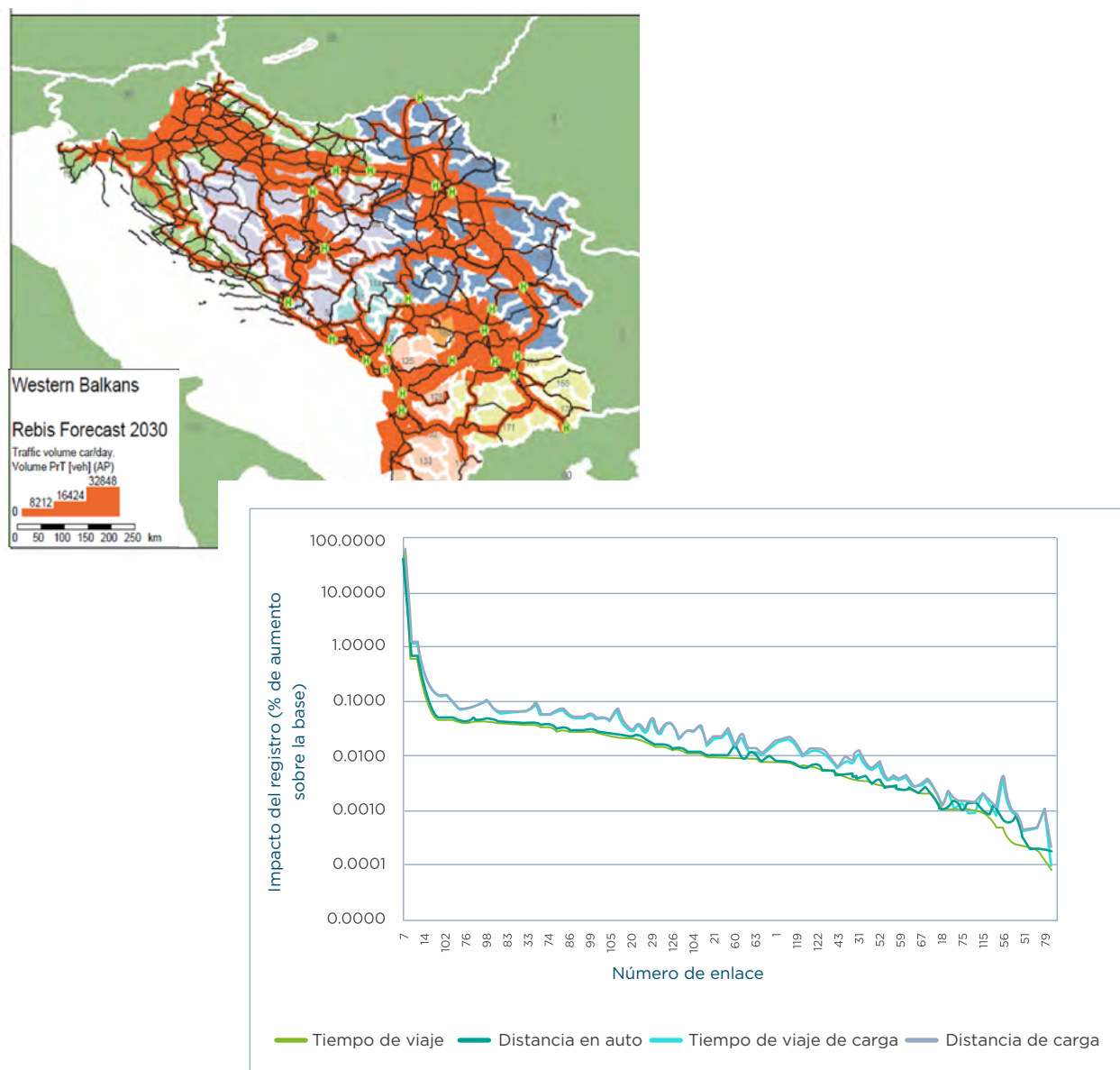
La *vulnerabilidad* de cada enlace en este estudio viene dada por la susceptibilidad de interrupción por exposición a un peligro multiplicada por el impacto en la red de ese enlace que se interrumpe. La susceptibilidad se mide en una escala de 0 a 1. Para algunos enlaces, un equipo de encuesta derivó valores de susceptibilidad basados en la observación directa de los enlaces, pero para muchos enlaces, el estudio asume una susceptibilidad de 1, lo que refleja el mal estado de muchas de las carreteras dentro de la región de los Balcanes Occidentales.

En general, la prueba de esfuerzo de RMD se realiza calculando el riesgo de peligro natural para la red, dado por la Ec. 3.1, varias veces, cada vez usando un conjunto alternativo de supuestos sobre el período de retorno de cada uno de las ocho peligros.

Modelación de transporte: El impacto de la interrupción de cada enlace fue dado por ejecuciones del modelo REMIS VISUM. VISUM es un modelo de optimización de viajes. El modelo se da como valores de entrada de una red de enlaces viales y la capacidad de cada enlace, junto con datos que describen el volumen de tráfico de vehículos de pasajeros y carga que necesita moverse de cada origen a cada destino. Luego, el modelo calcula el flujo de tráfico a lo largo de cada enlace que minimiza el tiempo o duración del viaje. Para calcular los impactos de una interrupción, los analistas luego reducen o eliminan la capacidad en un solo enlace o en un par de enlaces, reflejando los efectos de un evento de peligro natural. Luego, el modelo redirige el tráfico encontrando el nuevo mínimo de tiempo y duración de viaje dada la capacidad reducida de los enlaces. El impacto de la interrupción viene dado por el aumento resultante en el tiempo o duración total del tráfico, calculado de forma independiente para vehículos de pasajeros y de carga, como se muestra en la Figura 4.9.



>> Figura 4.9 | El modelo de transporte tiene un impacto en los resultados



Clasificación de riesgo de RDM: El proyecto emplea este marco de riesgo y RMD para identificar los enlaces que causan el mayor riesgo a la red de carreteras. El proyecto consideró tanto las interrupciones de un solo enlace como aquellas que afectan a pares de enlaces. Por simplicidad, esta discusión se centra en la primera opción.

Para las interrupciones de un solo enlace, el proyecto busca identificar los 15 enlaces que generan mayor riesgo. Estos enlaces son entonces el foco de un análisis más detallado de los impactos económicos de la interrupción y de las posibles medidas de mitigación de riesgos. Dado que los encargados de la toma de decisiones pueden

Impactos económicos: Una vez identificados los enlaces que generan el mayor riesgo, el análisis puede estimar con más detalle las consecuencias económicas de su disrupción. El análisis se centra en cuantificar los impactos diarios de posibles desastres naturales en el sistema de transporte y en proporcionar información sobre la priorización de inversiones en resiliencia potencial. Los resultados mostraron una variabilidad considerable entre los escenarios, dependiendo en gran medida del patrón de uso de la red que resulta de la disrupción, incluyendo aumentos en la distancia y tiempo de viaje debido a cambios de ruta y congestión. Este resultado, junto con la información sobre las probabilidades de peligros, sugiere que los beneficios de las inversiones en resiliencia variarán en el espacio, y que una estrategia de inversión específica centrada en áreas vulnerables de alto impacto proporcionaría el mayor retorno de la inversión.

Las pérdidas económicas por disrupciones del sistema de transporte generalmente se dividen en tres categorías: costos de usuario, costos indirectos (daño económico más amplio inducido por cambios en la estructura de la red) y costos de daño físico. Las métricas para las dos primeras categorías se desarrollaron y analizaron como una lista priorizada de disrupciones diarias

de enlace individual y enlace múltiple. Los costos de usuario se estimaron monetariamente, mientras que los costos indirectos se calcularon mediante cambios en la accesibilidad, que deberían estar relacionados con el daño económico general. Los costos de los daños físicos no se calcularon ya que dependen de las consecuencias físicas de disrupciones específicas.

Los resultados basados en las ejecuciones del modelo de transporte mostraron la variabilidad de los impactos económicos potenciales entre escenarios. Dentro de los escenarios de enlace individual, los cambios en los costos de los usuarios variaron de alrededor del uno por ciento (una disrupción de alrededor de €0,14 millones por día, en 2019) al 2,302% (una disrupción de alrededor de €339 millones por día) de los costos de usuario de referencia, con el escenario más grande siendo un claro valor atípico. Los cambios en la accesibilidad promedio por zona de tráfico para estos escenarios oscilaron entre disminuciones del 0,6% al 7,1%, aunque la variación dentro de la zona fue considerable. Por ejemplo, en algunos casos, los resultados mostraron disminuciones de accesibilidad del orden del 90% para algunas zonas, mientras que otras mostraron impactos locales limitados sobre la accesibilidad.



Recuadro 4.2

Combinación de incertidumbre profunda y bien caracterizada

Los enfoques de “supuestos acordados” funcionan mejor cuando las incertidumbres están bien caracterizadas. Los enfoques de DMDU de “decisiones acordadas” funcionan mejor cuando las incertidumbres son profundas. Los enfoques de DMDU también se pueden utilizar para situaciones con una combinación de incertidumbre profunda y bien caracterizada.

En tales situaciones, un análisis de RDM dividiría las incertidumbres en estas dos categorías: profunda y bien caracterizada. El análisis luego realizaría la prueba de esfuerzo solo sobre las incertidumbres profundas, pero cada futuro examinado en la prueba de esfuerzo se analizaría de manera estocástica utilizando las incertidumbres probabilísticas bien caracterizadas. Las medidas (M) utilizadas en un análisis de RDM de este tipo se convertirían típicamente en medias y momentos de los resultados del modelo estocástico.

Por ejemplo, el análisis de DIVERSION del transporte de los Balcanes considera solo incertidumbres profundas. En particular, considera una Incertidumbre Profunda en la frecuencia de los peligros naturales como se muestra en la Tabla 4.3. La Figura 4.10 muestra los resultados de la prueba de esfuerzo. En cada futuro considerado en la figura, el riesgo aportado por cada enlace (calculado por la Ecuación 3.1) es determinista, es decir, un solo número. Este número único puede variar en los futuros, junto con los valores de las incertidumbres profundas.

Supongamos que el análisis de DIVERSION también consideró incertidumbres bien caracterizadas, quizás representando la susceptibilidad de cada enlace a la interrupción de cada peligro como distribución normal. En tal análisis, el riesgo aportado por cada enlace también sería una distribución normal. Esta distribución variaría en general a lo largo de los futuros. La Figura 4.10 podría mostrar uno o dos números que resumen la distribución en cada futuro, quizás su media y el valor del percentil 95. La elección de qué media y qué momentos utilizar para resumir las distribuciones sería parte del proceso de Marco de Decisiones.

Herramientas de Apoyo a la Toma de Decisiones: El proyecto emplea dos herramientas de apoyo a la toma de decisiones para facilitar el análisis y ponerlo a disposición de los encargados de la toma de decisiones. La primera herramienta de apoyo a la toma de decisiones permite a los usuarios ver y superponer los conjuntos de datos de peligros, exposición y de la red de transporte de SIG. La Figura 4.8 muestra imágenes de esta herramienta.

La segunda herramienta de apoyo a la toma de decisiones, la Herramienta de Selección de Enlaces de Tableau, permite a los usuarios ver los enlaces de alto riesgo clasificados por el algoritmo. La herramienta también permite a los usuarios ajustar los criterios utilizados por el algoritmo, así como sustituir enlaces de su propia elección por aquellos seleccionados por el algoritmo.

La Figura 4.10 muestra un resultado típico de esta Herramienta de Selección de Enlaces de Tableau. El mapa de la esquina superior izquierda muestra los enlaces de alto riesgo seleccionados por el usuario y/o el algoritmo. El panel de la parte inferior izquierda permite al usuario ajustar los criterios utilizados por el algoritmo para seleccionar enlaces. El panel de la parte superior derecha resume el riesgo general para la red de carreteras generado por los enlaces que se muestran en el mapa utilizando cada uno de los criterios multi-objetivo. El panel de la parte inferior derecha permite al usuario seleccionar los enlaces que se mostrarán en el mapa.

Como un propósito importante, esta Herramienta de Selección de Enlaces de Tableau permite a los usuarios participar en el análisis de RDM, tanto al ver los resultados del análisis como al explorar las implicaciones de usar diferentes criterios y de sustituir enlaces en el conjunto de alto riesgo según criterios no considerados en el análisis.

Paso 3: Análisis de Opciones

El análisis de opciones utiliza RMD para identificar la mejor combinación de intervenciones para reducir el riesgo de peligros naturales para la red de carreteras de los Balcanes. El análisis se centra en los enlaces generadores de alto riesgo identificados por la prueba de esfuerzo.

El análisis de opciones primero identifica y categoriza las intervenciones de ingeniería que pueden reducir la vulnerabilidad de varios enlaces a los peligros naturales. Luego, el análisis estima los costos incurridos de cada intervención y el grado en que reducen la sensibilidad a cada peligro natural. Se dispuso de evaluaciones in situ basadas en ingeniería del estado de algunos enlaces de alto riesgo. En la mayoría de los casos, sin embargo, una revisión sistemática de la literatura ayudó a identificar el conjunto de intervenciones apropiadas y a estimar su costo y efectividad.

Cada opción podría afectar los cálculos de riesgo al reducir la sensibilidad del enlace a uno o más peligros. Por ejemplo, eliminar la vegetación alrededor de una carretera reduciría su sensibilidad a los incendios forestales, es decir, la capacidad de un incendio forestal para disrumpir el tráfico en ese enlace. No se consideraron las intervenciones que afectarían la exposición, por ejemplo, redireccionando carreteras a lo largo de rutas menos expuestas a peligros naturales.

Esta encuesta identificó 70 intervenciones discretas que organizamos en nueve conjuntos de opciones. Estos conjuntos y sus correspondientes costos y la eficacia por la que reducen la sensibilidad son:

1. Intervenciones en **puentes y cruces**, con un costo medio ponderado de 127.380 EUR/km y una eficacia del 51,96%.

2. Intervenciones de **drenaje**, con un costo medio ponderado de 64.078 EUR/km y una eficacia del 58,16%.
3. Intervenciones de **erosión y estabilización**, con un costo medio ponderado de 119.420 EUR/km y una eficacia del 66,69%.
4. **Protección contra inundaciones**, con un costo medio ponderado de 395.836 EUR/km y una eficacia del 87,87%.
5. **Paisajismo**, con un costo medio ponderado de 204.256 EUR/km y una eficacia del 25,32%.
6. **Monitoreo y mantenimiento**, con un costo medio ponderado de 18.421 EUR/km y una eficacia del 30,73%.
7. **Reporte de incidentes operativos**, con un costo medio ponderado de 65.090 EUR/km y una eficacia del 28,30%.
8. **Planificación, diseño y construcción**, con un costo medio ponderado de 85.988 EUR/km y una eficacia del 35,52%.
9. **Superficie y estructura de la carretera**, con un costo medio ponderado de 39.886 EUR/km y una eficacia del 31,73%.

Luego, el proyecto emplea RMD para ayudar a informar decisiones sobre cómo asignar mejor estas intervenciones entre los

enlaces de alto riesgo, dada la Incertidumbre Profunda con respecto a la frecuencia de retorno de los peligros.

Este análisis de opciones de RDM considera siete restricciones presupuestarias alternativas; \$15 millones; \$30 millones; \$40 millones; \$50 millones; \$80 millones; \$120 millones y \$160 millones. Para cada presupuesto, el análisis considera 100 conjuntos alternativos de supuestos con respecto a la frecuencia de retorno de los peligros según su uso en la prueba de esfuerzo. Para cada asignación de presupuesto, el análisis de RDM aplica repetidamente un algoritmo de “mochila”, el cual es muy usado en el campo de la investigación de operaciones. Cada aplicación de los algoritmos de mochila determina el conjunto de intervenciones más rentables para reducir el riesgo, dependiendo de la restricción presupuestaria, y un conjunto de supuestos sobre las frecuencias de retorno de los peligros. Para cada asignación presupuestaria, el análisis identifica las intervenciones que siempre aparecen en el conjunto de intervenciones más rentables, que nunca aparecen en el conjunto más rentable y aquellas que a veces aparecen.

La Tabla 4.4 muestra los resultados del análisis de opciones para 14 enlaces críticos para tres presupuestos: \$15 millones, \$50 millones y \$160 millones. Los números en las celdas indican el número de futuros en los que aparece una opción particular para un enlace particular en el conjunto de intervenciones de reducción de riesgos más rentables.

>> **Tabla 4.4 | Asignaciones robustas sobre 14 enlaces generadores de alto riesgo para tres restricciones presupuestarias alternativas.**

a) \$15Mil			Puente y cruces	Drenaje	Erosión y estabilización	Inundación y protección	Paisajismo y vegetación	Monitoreo y mantenimiento	Operación y respuesta a incidentes	Planificación, diseño y construcción	Superficie y estructura de carretera
2	788210	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	788211	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	1663042	Albania	0	100	0	0	0	2	0	0	0
5	158308	Albania	0	100	100	0	0	100	0	0	100
6	788159	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	788160	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1661229	Serbia	0	100	100	0	0	100	100	98	100
9	788200	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	420742	Serbia	0	0	0	0	0	98	0	0	0
11	352838	Kosovo	0	100	100	0	0	100	0	0	100
12	784983	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	256855	Macedonia	0	98	0	0	0	0	0	0	0
14	11661597	Montenegro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	11661486	Kosovo	0	0	0	0	0	0	0	0	0

b) \$50Mil			Puente y cruces	Drenaje	Erosión y estabilización	Inundación y protección	Paisajismo y vegetación	Monitoreo y mantenimiento	Operación y respuesta a incidentes	Planificación, diseño y construcción	Superficie y estructura de carretera
2	788210	Serbia	0	100	0	0	0	3	0	0	0
3	788211	Serbia	0	100	100	0	0	97	0	0	100
4	1663042	Albania	0	100	100	0	0	100	0	0	100
5	158308	Albania	100	100	100	0	0	100	100	86	100
6	788159	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	788160	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	1661229	Serbia	100	100	100	100	0	100	100	100	100
9	788200	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	420742	Serbia	0	100	100	0	0	100	0	0	100
11	352838	Kosovo	100	100	100	0	0	100	100	86	100
12	784983	Serbia	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	256855	Macedonia	0	100	14	0	0	17	0	0	86
14	11661597	Montenegro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	11661486	Kosovo	0	97	0	0	0	14	0	0	0

c) \$160Mil			Puente y cruces	Drenaje	Erosión y estabilización	Inundación y protección	Paisajismo y vegetación	Monitoreo y mantenimiento	Operación y respuesta a incidentes	Planificación, diseño y construcción	Superficie y estructura de carretera
2	788210	Serbia	100	100	100	0	0	100	100	95	100
3	788211	Serbia	100	100	100	9	0	100	100	100	100
4	1663042	Albania	100	100	100	100	0	100	100	5	100
5	158308	Albania	100	100	100	100	0	100	100	100	100
6	788159	Serbia	0	100	6	0	0	100	0	0	100
7	788160	Serbia	0	100	0	0	0	78	0	0	7
8	1661229	Serbia	100	100	100	100	0	100	100	100	100
9	788200	Serbia	0	100	0	0	0	65	0	0	0
10	420742	Serbia	100	100	100	84	0	100	100	36	100
11	352838	Kosovo	100	100	100	100	0	100	100	100	100
12	784983	Serbia	0	100	0	0	0	90	0	0	79
13	256855	Macedonia	100	100	100	8	0	100	100	100	100
14	11661597	Montenegro	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	11661486	Kosovo	100	100	100	0	0	100	1	1	100

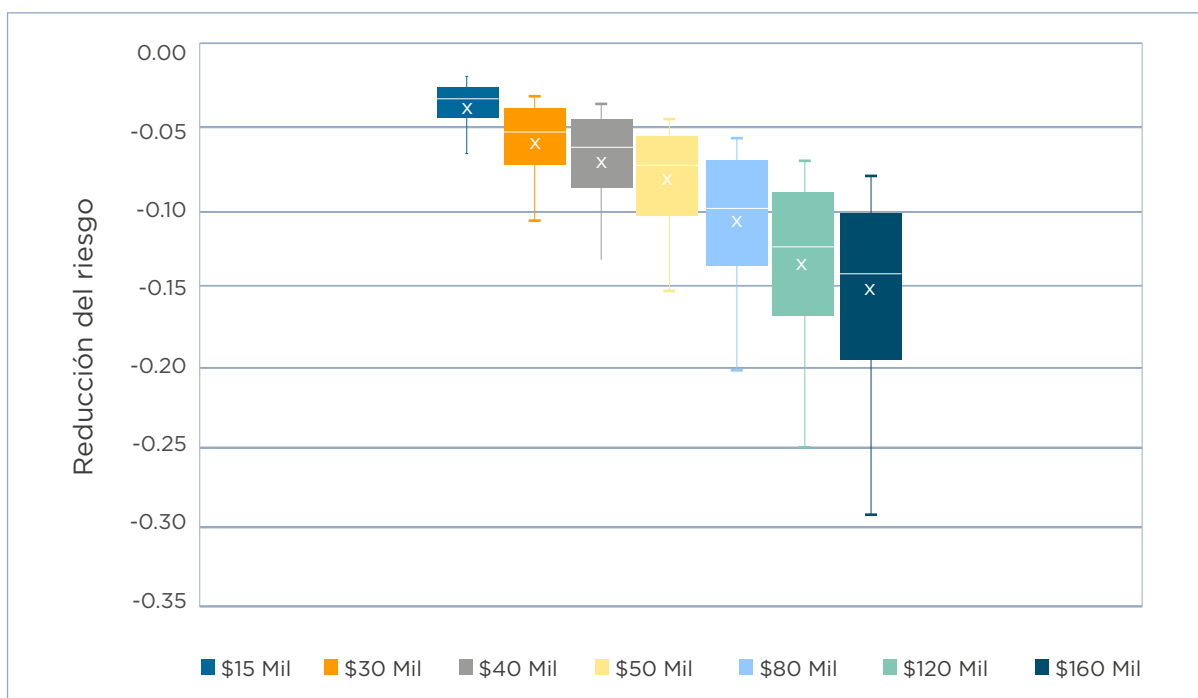
Como se muestra en el Tabla 4.4, la asignación robusta de una inversión limitada de \$15 millones se produce en siete categorías de opciones distribuidas en cuatro enlaces: dos en Albania, uno en Serbia y uno en Kosovo. Estas opciones se encuentran en el conjunto más rentable, independientemente de los supuestos sobre el período de retorno de los peligros naturales. Además, en casi todos los futuros (98 de 100), la inversión óptima también incluye invertir en planificación, diseño y construcción para un enlace en Serbia, en monitoreo y mantenimiento para un enlace en Serbia y en drenaje para un enlace en Macedonia. Sin embargo, en dos futuros es preferible invertir en monitoreo y mantenimiento para un quinto enlace en Albania.

Si el presupuesto disponible es de \$160 millones, la Tabla 4.4 muestra que la asignación robusta incluye opciones en ocho categorías distribuidas en 13 enlaces. Todas las opciones se emplean en al menos un enlace a excepción de Paisajismo y vegetación. Las asignaciones robustas de

inversiones para presupuestos entre \$15 millones y \$160 millones casi siempre se encuentran entre estos dos casos.

La Figura 4.11 muestra la reducción del riesgo lograda en función del presupuesto por cada una de las asignaciones robustas de inversión. Los diagramas de caja y bigotes muestran la variación sobre los 100 futuros alternativos que representan diferentes supuestos con respecto a las frecuencias de retorno de los peligros. Si bien el rango de reducción del riesgo es grande, como se señaló anteriormente, este rango amplio tiene solo un efecto pequeño en la clasificación de las mejores opciones para reducir el riesgo. En general, el presupuesto de \$15 millones para los 14 enlaces que se muestran en la Tabla 4.4 logra aproximadamente el 25% de la reducción de riesgo que se logra con el presupuesto de \$160 millones. Este presupuesto de \$160 millones sobre los 14 enlaces logra un 1,5% más de reducción de riesgos que el presupuesto de \$80 millones.

>> **Figura 4.11** | Reducción del riesgo lograda mediante asignaciones robustas de intervenciones en función del presupuesto.



Como se señaló anteriormente, para todos los niveles presupuestarios, el análisis de opciones sugiere muchas opciones robustas independientemente del valor de las incertidumbres. Sin embargo, en algunos casos, la mejor opción depende del valor de las incertidumbres. Por ejemplo, para el presupuesto de \$15 millones, el análisis de opciones sugiere invertir en las opciones de Monitoreo y Mantenimiento para un enlace en particular en Albania si los períodos de retorno para terremotos y derrumbes de baja intensidad están en el límite superior de su rango. Por otro lado, el análisis de opciones sugiere invertir en Planificación, Diseño y Construcción, así como en Monitoreo y Mantenimiento en Serbia, y en Drenaje para un enlace en Macedonia.

Los encargados de la toma de decisiones pueden utilizar los resultados del análisis de estas opciones para informar las decisiones sobre las inversiones que más aumentan la resiliencia de la red de carreteras de los Balcanes a los peligros naturales. Con algunas excepciones, la clasificación de las opciones de alta prioridad es robusta sobre las incertidumbres, es decir, son recomendadas por el análisis de opciones para los 100 futuros alternativos. La clasificación también es monótona con el presupuesto en casi todos los casos; es decir, los encargados de la toma de decisiones pueden elegir un conjunto de opciones para un presupuesto, y estas opciones siguen siendo apropiadas incluso si el presupuesto aumenta posteriormente. En aquellos casos en los que una opción no tenga una clasificación alta en los 100 futuros, los encargados de la toma de decisiones pueden: 1) omitir esa opción a favor de una opción más abajo en la lista que tenga una clasificación alta en los 100 futuros, 2) elegir cualquier opción que tenga una clasificación alta en 50 o más futuros, o 3) profundizar en la base de datos de resultados para determinar qué combinaciones de incertidumbres determinan si la opción está altamente clasificada o no.

Ejemplo 2 Análisis de RDM: Resiliencia del Transporte en África

Estos métodos de RDM también se han aplicado a la resiliencia de la infraestructura de transporte en África.

Las carreteras son un activo clave para los países africanos y necesarias para el desarrollo. Por lo tanto, se lanzó el Programa para el Desarrollo de la Infraestructura en África (PIDA por sus siglas en inglés) para proporcionar un marco común para que los grupos de interés en África construyan las carreteras y otras infraestructuras necesarias. Sin embargo, los análisis iniciales de PIDA no incluyeron los impactos potenciales del cambio climático, por lo que el Banco Mundial realizó el Mejoramiento de la Resiliencia Climática de la Infraestructura en África (ECRAI por sus siglas en inglés): El estudio del Sector de Carreteras y Puentes (Cervigni, Losos et al. 2017) para determinar cómo el cambio climático podría afectar las inversiones propuestas de PIDA. Debido a que el cambio climático y otros factores que afectan estas inversiones son profundamente inciertos, el Banco Mundial utilizó la Toma de Decisiones Robustas (RDM) para ayudar a orientar las inversiones para mejorar la resiliencia climática de las redes de transporte en África.

Marco de Decisiones

El estudio de resiliencia del transporte de ECRAI preguntó cómo el cambio climático podría afectar las inversiones propuestas de PIDA. Estos efectos incluyen cambios en los costos de mantenimiento dependiendo del estrés causado por el cambio climático y los impactos de las interrupciones en las redes de transporte. El informe de ECRAI utilizó más de 100 proyecciones de modelos climáticos globales re-escalados a la región para reflejar el rango de condiciones climáticas plausibles para carreteras pavimentadas y sin pavimentar en toda África.

El estudio utilizó el Sistema de Apoyo a la Planificación de la Infraestructura (IPSS por sus siglas en inglés) (<http://clicslab.org/ipss.html>) para estimar: (1) el aumento en los costos de mantenimiento causado por aumentos en la temperatura, patrones de precipitación e inundaciones, y (2) el número de días de interrupción debido al cambio climático en toda la red de carreteras de África.

Marco de Decisiones

El estudio de resiliencia del transporte de ECRAI preguntó cómo el cambio climático podría afectar las inversiones propuestas de PIDA. Estos efectos incluyen cambios en los costos de mantenimiento dependiendo del estrés causado por el cambio climático y los impactos de las interrupciones en las redes de transporte. El informe de ECRAI utilizó más de 100 proyecciones de modelos climáticos globales re-escalados a la región para reflejar el rango de condiciones climáticas plausibles para carreteras pavimentadas y sin pavimentar en toda África. El estudio utilizó el Sistema de Apoyo a la Planificación de la Infraestructura (IPSS por sus siglas en inglés) (<http://clicslab.org/ipss.html>) para estimar: (1) el aumento en los costos de mantenimiento causado por aumentos en la temperatura, patrones de precipitación e inundaciones, y (2) el número de días de interrupción debido al cambio climático en toda la red de carreteras de África.

Prueba de esfuerzo

El estudio de ECRAI demostró una amplia y diversa gama de implicaciones en torno al conjunto de proyecciones climáticas consideradas. El estudio consideró los costos directos del cambio climático en las carreteras. También consideró los costos económicos de la interrupción de los viajes a lo largo de la red de carreteras. Debido a que los costos de estas interrupciones son

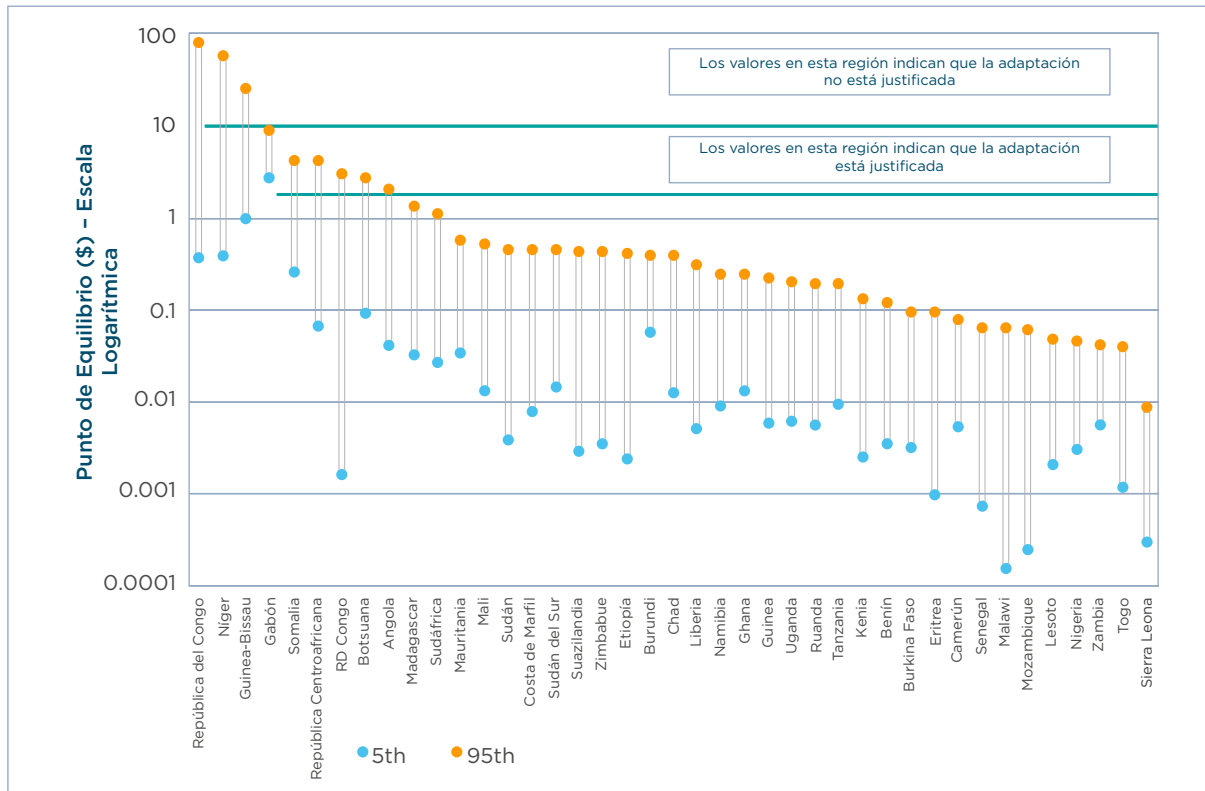
inciertos, y debido a que el estudio carecía de los datos para siquiera estimar estos costos en varios países, se decidió en cambio tratar los costos de las interrupciones como profundamente inciertos. El análisis exploró una amplia gama de posibles costos de interrupción.

Identificar estrategias nuevas y revisadas

Las inversiones propuestas de PIDA consideradas en este estudio fueron recomendadas por análisis que no consideraron el cambio climático. Es decir, el análisis subyacente asumió que el diseño de los proyectos de PIDA se basó en las condiciones climáticas históricas en la ubicación de cada proyecto en cada país. El estudio de ECRAI comparó estas opciones de caso base propuestas con estrategias proactivas, en las que los proyectos de PIDA se construirían de acuerdo con las condiciones climáticas proyectadas en cada ubicación de cada país. Estas estrategias proactivas luego se compararon con las estrategias del caso base. Estas estrategias de caso base se denominaron reactivas debido a que el estudio asumió que se ajustarían en el futuro si el clima había cambiado lo suficiente.

El estudio comparó la relación costo-beneficio de las estrategias proactivas frente a las reactivas en una amplia gama de supuestos con respecto al clima futuro y el costo futuro de la interrupción debido al cambio climático. Como se muestra en la Figura 4.12, en todos menos en un pequeño número de países en un número relativamente pequeño de futuros, las estrategias proactivas para inversiones en superficies de carreteras (p. ej., tipo de pavimento) tenían relaciones de costo-beneficio más altas que las estrategias reactivas en una amplia gama de tales incertidumbres. Las estrategias proactivas fueron aún más favorecidas para las inversiones en puentes y otra infraestructura con mayor vida útil.

>> **Figure 4.12 |** Distribución de los costos de equilibrio para inversiones proactivas en resiliencia climática en Carreteras de África



Fuente: (Cervigni et al. 2017)



05.

Implicaciones y Recomendaciones

Esta sección ofrece algunos consejos prácticos para usar la DMDU a fin de respaldar la Gestión de Riesgos iterativa para proyectos y sistemas de transporte.

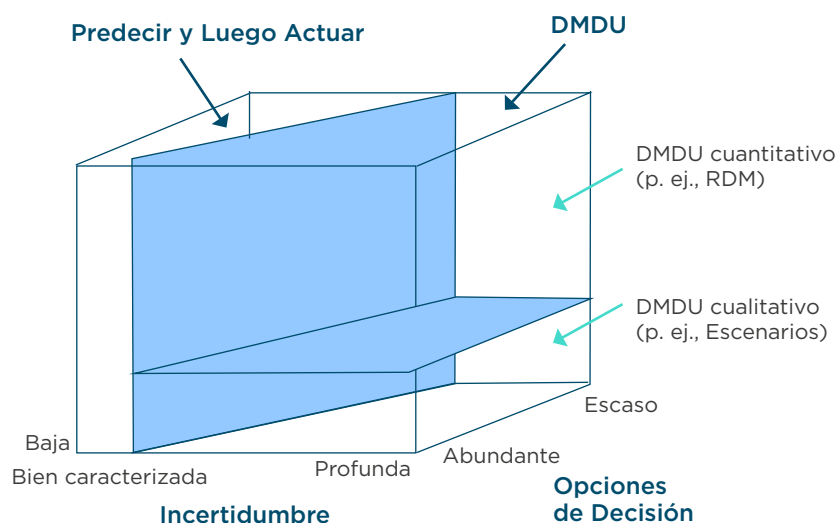
Cuándo usar qué método

¿Cuándo deberían los ingenieros y planificadores de transporte utilizar los métodos de DMDU y cuándo deberían utilizar los métodos tradicionales de predecir y luego actuar?

Los métodos de DMDU brindan muchos beneficios, pero también imponen costos. La Figura 5.1 resume los principales factores que determinan cuándo es probable que los beneficios de la Planificación de

Escenarios y los métodos de DMDU más cuantitativos superen los costos. Más claramente, la DMDU es más útil cuanto más profundas son las incertidumbres, en lugar de bien caracterizadas. Además, RMD puede resultar más útil cuando el conjunto de opciones de decisión tiene más, en lugar de menos, grados de libertad. Cuando las incertidumbres están bien caracterizadas y/o existen pocos grados de libertad de decisión, la DMDU produce menos beneficios sobre los enfoques tradicionales de predecir y luego actuar, pero la DMDU puede resultar valiosa cuando no se dispone de pronósticos probabilísticos de alta seguridad y cuando existen oportunidades para construir estrategias robustas ante tal incertidumbre.

>> **Figura 5.1 | Cuándo Utilizar Enfoques de DMDU**



Fuente: (Marchau et al. 2019 muestran una variante de esta figura en su Recuadro 1.1)

En las aplicaciones de planificación y gestión del transporte, la Figura 5.1 se puede utilizar para guiar cómo y cuándo la DMDU, la Planificación de Escenarios o el enfoque de predecir y actuar pueden ser relevantes para la planificación estratégica de servicios, planes de mejora de capital o planificación, diseño y operaciones a nivel de proyecto. Utilizando las dimensiones de la Figura 5.1, los planificadores y administradores deberán considerar la complejidad, el espacio de decisión y la magnitud de la incertidumbre de una aplicación determinada. Los estudios de la red de carreteras de los Balcanes y África utilizaron métodos de DMDU debido a la Incertidumbre Profunda en el peligro climático. El ejemplo de los Balcanes también consideró una amplia gama de opciones de deci-

sión, creando oportunidades para estrategias robustas. El estudio de resiliencia del transporte en África consideró una gama más estrecha de opciones de decisión, la Adaptación proactiva frente a la reactiva al cambio climático, pero examinó las condiciones que favorecerían una opción sobre la otra. La DMDU es útil en este último caso porque las estrategias de Adaptación proactiva predominan en la mayoría de los casos.

La Tabla 5.1 a continuación destaca algunos ejemplos de aplicaciones y qué método es probablemente relevante en cada caso. La Incertidumbre Profunda es el atributo más importante, pero en algunos casos la riqueza de las opciones de decisión también es importante.

>> **Tabla 5.1 | Ejemplos de Aplicaciones de Gestión y Planificación del Transporte**

		Ejemplo	Atributos	Método
Planificación	Mejora de capital (infraestructura)	Un plan de mejora de capital a largo plazo para un sistema ferroviario regional expuesto a inundaciones; en una región con crecimiento estable de población y económico	<ul style="list-style-type: none"> • Horizonte temporal de mediano a largo plazo • Algunas incertidumbres profundas • Conjunto abundante de opciones de decisión 	DMDU
	Servicios	Un plan estratégico de servicios de transporte urbano que considera múltiples modos en un área de rápido crecimiento propensa a diversos peligros climáticos	<ul style="list-style-type: none"> • Horizonte temporal de mediano a largo plazo • Muchas incertidumbres profundas • Conjunto abundante de opciones de decisión 	DMDU
Proyecto	Planificación y Diseño	Un proyecto de planificación y diseño de carreteras con vulnerabilidad limitada al cambio climático y opciones limitadas en tamaño, material y ruta	<ul style="list-style-type: none"> • Horizonte temporal a corto plazo • Incertidumbre bien caracterizada • Conjunto escaso de opciones de decisión 	Predecir y luego Actuar
	Planificación y Diseño	Un proyecto de planificación y diseño de puentes, vulnerable al cambio climático y con muchas opciones de decisión y potencial para un diseño flexible	<ul style="list-style-type: none"> • Horizonte de tiempo a largo plazo • Muchas incertidumbres profundas • Conjunto abundante de opciones de decisión 	DMDU
	Operaciones	Ajustes operativos a una línea de metrobús en toda la ciudad durante el próximo mes según una demanda conocida	<ul style="list-style-type: none"> • Horizonte temporal a corto plazo • Algunas incertidumbres profundas • Conjunto escaso de opciones de decisión 	Predecir y luego Actuar
	Operaciones	Cambio en tarifa de autobuses	<ul style="list-style-type: none"> • Horizonte temporal a corto plazo • Algunas incertidumbres profundas • Conjunto escaso de opciones de decisión 	Predecir y luego Actuar

Cuando un método de DMDU parece apropiado, ¿qué método deben usar los ingenieros y planificadores de transporte? Al abordar esta pregunta, primero es importante tener en cuenta que los métodos de DMDU no son distintivos, sino que representan variaciones sobre el mismo tema. La Planificación de Escenarios, las Vías Adaptativas y RDM incorporan los principios básicos discutidos en la Sección 4:

- » Considerar múltiples futuros, no un solo futuro, en la planificación. Elegir estos futuros para poner a prueba los planes de la organización;
- » Buscar planes robustos que funcionen bien en muchos futuros, no planes óptimos diseñados para una mejor estimación de futuro único, y que funcionen bien en un conjunto completo de métricas (es decir, sean multi-objetivo);
- » Hacer planes flexibles y adaptables, lo que a menudo los hace más robustos;
- » Utilizar la analítica disponible para explorar muchos futuros y opciones, no decir qué hacer.

La Figura 5.1 también utiliza una tercera condición, la complejidad, para distinguir entre situaciones en las que los métodos de DMDU cualitativos, como los escenarios, y los métodos DMDU cuantitativos, como RMD, resultan más útiles. La complejidad se usa aquí como heurística de qué tan bien los expertos apropiados pueden intuir que un conjunto apropiado de escenarios son respuestas robustas. Cuando la intuición experta es lo suficientemente buena como para identificar las combinaciones más importantes de incertidumbres que afectan una decisión y vincular las acciones potenciales con todas las consecuencias relevantes, entonces la planifica-

ción de escenarios cualitativos puede ser suficiente. Sin embargo, cuando los modelos de simulación tienen el potencial de sorprender, entonces un análisis de RDM cuantitativo puede resultar valioso.

La Tabla 5.2 proporciona una comparación más rica de las condiciones bajo las cuales los ingenieros y planificadores pueden encontrar más útiles los diversos métodos de DMDU. La Planificación de Escenarios puede manejar situaciones en las que las vulnerabilidades surgen de múltiples incertidumbres y no requiere un modelo de simulación que vincule las acciones con las consecuencias. Sin embargo, la Planificación de Escenarios es menos valiosa para evaluar estrategias alternativas y depende más de la intuición y el juicio de los expertos que de los otros métodos. Las Vías Adaptativas se destacan por ayudar a los ingenieros y planificadores a desarrollar planes que sean robustos en muchos escenarios al adaptarse con el tiempo en respuesta a nueva información. Si bien muchos análisis de Vías Adaptativas utilizan modelos de simulación, el enfoque también se puede combinar de manera útil con la planificación de escenarios cualitativos. Cabe señalar que las Vías Adaptativas se vuelven difíciles de implementar si las vulnerabilidades surgen de más de unas cuantas incertidumbres. El método RDM es el más general de los tres métodos e incorpora conceptos de la Planificación de Escenarios y las Vías Adaptativas. El RDM es particularmente útil cuando la vulnerabilidad puede surgir de combinaciones de más de unas cuantas incertidumbres y/o cuando los ingenieros y planificadores desean complementar el juicio de expertos con evidencia de analítica para determinar qué incertidumbres son más importantes y qué estrategias son más robustas. Además, el método RDM generalmente requiere un modelo de simulación que relacione acciones con consecuencias.

>> **Tabla 5.2** | Comparación de métodos de DMDU

	Se espera que las vulnerabilidades surjan de múltiples incertidumbres	Necesidad de evaluar estrategias robustas	Se requiere un modelo de simulación
Planificación de Escenarios	Sí	No	No
Vías Adaptativas	No	Sí	No
RDM	Sí	Sí	Sí

Lista de consultores y herramientas

Un número creciente de consultores, investigadores, gobiernos y organizaciones no gubernamentales están utilizando métodos y herramientas de DMDU. La Sociedad para la Toma de Decisiones Bajo Incertidumbre Profunda proporciona una de las mejores fuentes de información sobre estos grupos, así como una serie de herramientas de software de código abierto. El sitio web de la Sociedad es www.deepuncertainty.org. Aquí hay una breve descripción de estos recursos.

RAND Corporation en los Estados Unidos y TU Delft en los Países Bajos se encuentran entre los líderes en la aplicación de métodos de DMDU al transporte.

Las herramientas de software disponibles para realizar análisis de DMDU incluyen:

- » Mesa de trabajo de análisis y Modelación Exploratoria (EMA por sus siglas en inglés), una plataforma de código abierto que se ha desarrollado en TU Delft para respaldar una amplia gama de funciones de DMDU: <https://emaworkbench.readthedocs.io/en/latest/index.html>
- » Rhodium, una plataforma de código abierto que se ha desarrollado en Penn

State, Cornell y RAND para respaldar RMD y una amplia gama de funciones de DMDU: <https://github.com/RAND-Corporation/Rhodium>

- » Kit de herramientas de descubrimiento de escenarios, un paquete basado en R desarrollado por RAND para respaldar el descubrimiento de escenarios: <https://cran.r-project.org/web/packages/sd-toolkit/index.html>
- » TMIP-EMAT, un paquete de Modelación Exploratoria desarrollado por el Programa de Mejora de Modelación de Transporte de EE.UU. (TMIP por sus siglas en inglés) de la Administración Federal de Carreteras de EE.UU., <https://tmip.org/content/tmip-exploratory-modeling-and-analysis-tool-tmip-emat>
- » Tableau, un paquete de visualización comercial ampliamente utilizado para respaldar el análisis de DMDU: <https://www.tableau.com>

El mejor estudio de los métodos de DMDU se puede encontrar en el libro reciente, *Decision Making Under Deep Uncertainty: From Theory to Practice*, editado por Marchau, Walker, Bloemen y Popper (2019). La Sociedad de DMDU, RAND, TU Delft y otras organizaciones también brindan capacitación en el uso de métodos de DMDU.

Referencias

- Barandiarán, M., M. Esquivel, S. Lacambra Ayuso, G. Suarez and D. Zuloaga (2018). *Executive Summary of the Disaster and Climate Risk Assessment Methodology for IDB Projects: A Technical Reference for IDB Project Teams*, IDB.
- Barrucand, M., W. Vargas and M. Rusticucci (2007). “Dry conditions over Argentina and the related monthly circulation patterns.” *Meteorology and Atmospheric Physics* 98(1-2): 99–114.
- Berg, N. and A. Hall (2015). “Increased Interannual Precipitation Extremes over California under Climate Change.” *Journal of Climate* 28: 6324-6334.
- Bouwer, L., Haasnoot, M., Obeysekara, J., Konyha, K., Hagemann, K., Vazquez, A., ... & Jeuken, C. (2018, April). Dynamic adaptive planning for urban coastal flooding in the city of Miami, Florida. In *EGU General Assembly Conference Abstracts* (Vol. 20, p. 7942).
- Bryant, B. P. and R. J. Lempert (2010). “Thinking inside the box: A Participatory, computer-assisted approach to scenario discovery.” *Technological Forecasting and Social Change* 77: 34-49.
- California Ocean Protection Council (2018). “State of California Sea-Level Rise Guidance”. California Natural Resources Agency. http://www.opc.ca.gov/webmaster/ftp/pdf/agenda_items/20180314/Item3_Exhibit-A_OPC_SLR_Guidance-rd3.pdf
- Carvalho, L. M. V., C. Jones, A. E. Silva, B. Liebmann and P. L. Silva Dias (2011). “The South American Monsoon System and the 1970s climate transition.” 31(8): 1248-1256.
- Cavazos, T., C. Turrent and D. P. Lettenmaier (2008). “Extreme precipitation trends associated with tropical cyclones in the core of the North American monsoon.” *Geophysical Research Letters* 35(21).
- Cervigni, R., A. Losos, P. Chinowsky and J. E. Neumann (2017). “Enhancing the Climate Resilience of Africa’s Infrastructure: The Roads and Bridges Sector.” 136 pp.
- Dai, A. (2011). “Drought under global warming: a review.” 2(1): 45-65.
- Dai, A., T. Qian, K. E. Trenberth and J. D. Milliman (2009). “Changes in Continental Freshwater Discharge from 1948 to 2004.” 22(10): 2773-2792.
- Dufek, A. and T. Ambrizzi (2008). *Precipitation variability in São Paulo State, Brazil*.
- Dufek, A. S., T. Ambrizzi and R. P. da Rocha (2008). “Are reanalysis data useful for calculating climate indices over South America?” *Ann N Y Acad Sci* 1146: 87-104.
- Englehart, P. J. and A. V. Douglas (2006). “Defining Intraseasonal Rainfall Variability within the North American Monsoon.” 19(17): 4243-4253.
- Garreaud, R. and M. Falvey (2009). *The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios*.
- Groves, D. G. and R. J. Lempert (2007). “A New Analytic Method for Finding Policy-Relevant Scenarios.” *Global Environmental Change* 17: 73-85.
- Groves, D. G., E. Molina Perez, E. Bloom and J. R. Fischbach (2019). Robust Decision Making (RDM): Application to Water Planning and Climate Policy. *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice*. V. A. W. J. Marchau, W. E. Walker, P. J. T. M. Bloemen and S. W. E. Popper, Springer: 329.
- Haasnoot, M., J. H. Kwakkel, W. E. Walker and J. ter Maat (2013). “Dynamic Adaptive Policy Pathways: A New Method for Crafting Robust Decisions for a Deeply Uncertain World.” *Global Environmental Change* 23(2): 485-498.
- Haasnoot, M., A. Warren and J. H. Kwakkel (2019). Dynamic Adaptive Policy Pathways (DAPP). *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice*. V. A. W. J. Marchau, W. E. Walker, P. J. T. M. Bloemen and S. W. E. Popper, Springer.
- Inter-American Development Bank (2008). Disaster Risk Management Policy Guidelines. Retrieved from. <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getdocument.aspx?docnum=360026>.
- Inter-American Development Bank (2007). Disaster Risk Management Policy. Retrieved from <http://idbdocs.iadb.org/wsdocs/getDocument.aspx?DOCNUM=35004515>

- Inter-American Development Bank. (2016). Resolution AG-6/16 AND CII/AG-2/16. Retrieved from: <http://www.iadb.org/document.cfm?id=EZSHARE-1983553961-1676>
- IPCC (2014). Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R. K. Pachauri and L. A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC (2012). Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Field, C.B., V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK, and New York, NY, USA, 582 pp.
- Jones, R. N., A. Patwardhan, S. Cohen, S. Dessai, A. Lammel, R. Lempert, M. M. Qader Mirza and H. von Storch (2014). Foundations for Decision Making. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability*. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).
- Kaatz, L. (2015). "Embracing Uncertainty: A Case Study Examination of How Climate Change is Shifting Water Utility Planning." *Prepared for the Water Utility Climate Alliance (WUCA), American Water Works Association (AWWA), Water Research Foundation (WRF) and Association of Metropolitan Water Agencies (AMWA)*: 92 pp.
- Kalra, N., S. Hallegatte, R. Lempert, C. Brown, A. Fozzard, S. Gill and A. Shah (2014). Agreeing on Robust Decisions: A New Process for Decision Making Under Deep Uncertainty. *Policy Research Working Paper*. W. Bank, World Bank.
- Kamiguchi, K., A. Kitoh, T. Uchiyama, R. Mizuta and A. Noda (2006). *Changes in Precipitation-based Extremes Indices Due to Global Warming Projected by a Global 20-km-mesh Atmospheric Model*.
- Kitoh, A., H. Endo, K. Krishna Kumar, I. Cavalcanti, P. Goswami and T. Zhou (2013). *Monsoons in a changing world: A regional perspective in a global context*.
- Knopman, D. and R. Lempert (2016). Urban Responses to Climate Change: Framework for Decisionmaking and Supporting Indicators., RAND: 156.
- Lempert, R. (2013). "Scenarios that illuminate vulnerabilities and robust responses." *Climatic Change* 117: 627-646.
- Lempert, R. (2019). Robust Decision Making (RDM). *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice*. V. A. W. J. Marchau, W. E. Walker, P. J. T. M. Bloemen and S. W. E. Popper, Springer: 329.
- Lempert, R., J. G. Arnold, R. Pulwarty, K. Gordon, C. Greig, C. Hawkins Hoofman, D. Sands and C. Werrell (2018). Reducing Risks Through Adaptation Actions. *Impacts, Risks, and Adaptation in the United States: Fourth National Climate Assessment*, Vol II. D. R. Reidmiller, C. W. Avery, K. E. Easterling et al. Washington, DC, U.S. Global Change Research Program.
- Lempert, R. J., Bryant, B. P., & Bankes, S. C. (2008). Comparing algorithms for scenario discovery. *RAND*, Santa Monica, CA.
- Lempert, R. J., D. G. Groves, S. W. Popper and S. C. Bankes (2006). "A General, Analytic Method for Generating Robust Strategies and Narrative Scenarios." *Management Science* 52(4): 514-528.
- Lempert, R. J., S. W. Popper and S. C. Bankes (2003). *Shaping the Next One Hundred Years : New Methods for Quantitative, Long-term Policy Analysis*. Santa Monica, CA, RAND Corporation.
- Lyons, G., C. Davidson, T. Forster, I. Sage, J. McSaveney, E. MacDonald, A. Morgan and A. Kole (2014). Future demand: How could or should our transport system evolve in order to support mobility in the future? Wellington, New Zealand, Ministry of Transport.
- Marchau, V. A. W. J., W. E. Walker, P. J. T. M. Bloemen and S. W. E. Popper (2019). *Decision Making under Deep Uncertainty: From Theory to Practice*, Springer.
- Marengo, J., T. Ambrizzi, R. P. Rocha, L. Alves, S. Cuadra, V. Ramírez, S. Ferraz, R. Rodrigues Torres and D. Santos (2010). *Future change of climate in South America in the late XXI century: intercomparison of scenarios from three regional climate models*, Climate Dynamics.
- Marengo, J. A., R. Jones, L. M. Alves and M. C. Valverde (2009). "Future change of temperature and precipitation extremes in South America as derived from the PRECIS regional climate modeling system." *International Journal of Climatology* 29(15): 2241-2255.

- Ministry for the Environment (2017.) Coastal Hazards and Climate Change: Guidance for Local Government. Ministry for the Environment Publication ME-1341. Ministry for the Environment, Wellington. <https://www.mfe.govt.nz/sites/default/files/media/Climate%20Change/coastal-hazards-summary.pdf>
- Nakaegawa, T., A. Kitoh, H. Murakami and S. Kusunoki (2013). *Annual maximum 5-day rainfall total and maximum number of consecutive dry days over Central America and the Caribbean in the late twenty-first century projected by an atmospheric general circulation model with three different horizontal resolutions.*
- OECD (2015). Adapting to the Impacts of Climate Change - Policy Perspectives. <http://www.oecd.org/env/cc/Adapting-to-the-impacts-of-climate-change-2015-Policy-Perspectives-27.10.15%20WEB.pdf>
- Parker, A. M., S. Srinivasan, R. J. Lempert and S. Berry (2015). "Evaluating Simulation-Derived Scenarios for Effective Decision Support." *Technological Forecasting & Social Change* 91: 64-77.
- Quintana, J. and P. Aceituno (2012). Changes in the rainfall regime along the extratropical west coast of South America (Chile): 30-43° S.
- Sansigolo, C. A. and M. T. Kayano (2010). "Trends of seasonal maximum and minimum temperatures and precipitation in southern Brazil for the 1913-2006 period." *Theoretical and Applied Climatology* 101((1-2)): 209-216.
- Schwartz, P. (1996). *The Art of the Long View - Planning for the Future in an Uncertain World*. New York, NY, Currency-Doubleday.
- SENAMHI (2009). "Escenarios de Cambio Climático en la Cuenca del Río Mantaro para 2100: Resumen Técnico [Climate Change Scenarios in the Mantaro river Basin by 2100: Technical Summary][Avalos, G., A. Díaz, C. Oria, L. Metzger, and D. Acuña (eds.)]. Parte de la fase de preparación del Proyecto de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares en los Andes Tropicales (PRAA), el cual es implementado en Bolivia, Ecuador y Perú con financiamiento el Fondo Mundial del Medio Ambiente (GEF) a través del Banco Mundial, coordinado por la Secretaría General de la Comunidad Andina e implementado en el Perú por el Ministerio del Ambiente (MINAM), Centro de Predicción Numérica (CPN), Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Lima, Peru." 56.
- Silva Dias, M. A. F., J. Dias, L. Carvalho, E. Freitas and P. L. Silva Dias (2012). "Changes in extreme daily rainfall for São Paulo, Brazil." *Climatic Change* 116((3-4)): 705-722.
- Suddendorf, T. (2013). *The Gap: The Science of What Separates Us from Other Animals*, Basic Books.
- Tariq, A., R. J. Lempert, J. Riverson, M. Schwartz and N. Berg (2017). "A climate stress test of Los Angeles' water quality plans." *Climatic Change* 144(4): 625-639.
- van der Heijden, K. (1996). "Scenarios: The Art of Strategic Conversation."
- Vicuña, S., J. Gironás, F. J. Meza, M. L. Cruzat, M. Jelinek, E. Bustos, D. Poblete and N. Bambach (2013). "Exploring possible connections between hydrological extreme events and climate change in central south Chile." *Hydrological Sciences Journal* 58(8): 1598-1619.
- Wack, P. (1985). "Scenarios: Uncharted Waters Ahead." *Harvard Business Review* No. 85516.
- Walker, W. E., Robert J. Lempert and J. H. Kwakkel (2013). Deep Uncertainty. *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*, Springer US.: 395-402.

