

# Integración de riesgo y resiliencia en la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana

Tomás Echaveguren · Alondra Chamorro



Integración de riesgo y resiliencia en la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana

© Centro de Investigación para la Gestión Integrada de Desastres (CIGIDEN, Proyecto 1523A0009 FONDAP 2023).

Derechos reservados.

Primera edición, octubre 2025.

#### Autores

Tomás Echaveguren <sup>1,2</sup> | [techaveg@udec.cl](mailto:techaveg@udec.cl)

Alondra Chamorro <sup>1,3</sup> | [achamorro@uc.cl](mailto:achamorro@uc.cl)

<sup>1</sup> CIGIDEN.

<sup>2</sup> Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil

<sup>3</sup> Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería, Departamento de Ingeniería y Gestión de la Construcción

Editora General Serie Policy Papers CIGIDEN

Leila Juzam | [leila.juzam@cigiden.cl](mailto:leila.juzam@cigiden.cl)

Edición y coordinación Serie Policy Papers CIGIDEN

Katherine Campos | [katherine.campos@cigiden.cl](mailto:katherine.campos@cigiden.cl)

#### Diseño

Sebastián Saldaña A. | [hola@sebastiansaldana.cl](mailto:hola@sebastiansaldana.cl)

Foto de portada

Foto de Thomas Griggs en Unsplash

Esta publicación forma parte de la Serie Policy Papers CIGIDEN.

SERIE POLICY PAPERS CIGIDEN

---

**Integración de riesgo y  
resiliencia en la evaluación  
social de proyectos de vialidad  
interurbana**



SERIE POLICY PAPERS CIGIDEN

---

**Integración de riesgo y  
resiliencia en la evaluación  
social de proyectos de vialidad  
interurbana**



# Integración de riesgo y resiliencia en la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana

Tomás Echaveguren  
Alondra Chamorro

## RESUMEN EJECUTIVO

Chile posee una extensa red vial interurbana, esencial para la conectividad del territorio y el desarrollo económico. Esta infraestructura está altamente expuesta a amenazas de origen natural como aluviones, sismos, inundaciones y precipitaciones, cuyos efectos provocan daños recurrentes, interrupciones prolongadas del servicio y altos costos de recuperación. Estas disrupciones no solo afectan la infraestructura física, sino que también impactan negativamente la productividad, las cadenas logísticas y el acceso de las comunidades a servicios básicos. Pese a esta realidad, la metodología de evaluación social de proyectos de infraestructura vial interurbana vigente en el Sistema Nacional de Inversiones (SNI) no contempla de manera explícita los riesgos asociados a estas amenazas ni los beneficios sociales que genera invertir en infraestructura vial más resiliente. En este marco, el propósito de este policy paper es analizar cómo incorporar en la metodología de evaluación social de proyectos de vialidad interurbana, la valoración de los beneficios asociados a la inversión en reducción del riesgo y aumento de la resiliencia.

Para lograr integrar la reducción del riesgo y el aumento de la resiliencia en la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana, sin modificar la estructura metodológica actual, este documento propone cinco recomendaciones articuladas de manera complementaria: a) la amplificación del análisis costo-beneficio tradicional, incorporando el valor económico de las pérdidas evitadas por interrupciones, la continuidad del servicio y la vida útil extendida de la infraestructura vial;

b) la introducción de indicadores explícitos de resiliencia, como la robustez estructural, la redundancia de la red —medida por la disponibilidad de rutas alternativas— y la velocidad de recuperación del servicio ante desastres; c) el desarrollo de una base de datos nacional, estandarizada y georreferenciada, sobre daños y costos asociados a amenazas de origen natural, lo que permitiría parametrizar el riesgo y anticipar impactos; d) la adaptación de herramientas computacionales ya utilizadas por la Dirección de Vialidad, como el sistema SIGER-RV, complementándolas con modelos de tráfico y plataformas como MERIT, que permiten traducir las interrupciones en términos económicos; por último, la estrategia de implementación gradual en el SNI de incorporación de riesgo y resiliencia, a través de módulos complementarios, proyectos piloto y capacitación técnica, de modo que la resiliencia se convierta en un criterio formal de priorización de inversiones en infraestructura vial. En su conjunto, estas recomendaciones no solo contribuyen a optimizar el gasto público y priorizar inversiones más sostenibles, sino que también a alinear la evaluación social de proyectos viales con las obligaciones del país en relación con la gestión del riesgo y cambio climático, incorporando la continuidad operativa como beneficio.

Hernán de Solminihaç

Profesor titular Pontificia  
Universidad Católica de Chile,  
Departamento de Ingeniería y  
Gestión de la Construcción,

Exministro de Obras Públicas y  
Minería.

## PRÓLOGO

Chile es un país que se desarrolla en una desafiante geografía. Nuestra red vial interurbana sostiene la integración territorial, la cohesión social y el funcionamiento económico, habilitando desde la conectividad básica de comunidades rurales hasta las cadenas logísticas estratégicas de exportación. Sin embargo, esta infraestructura convive cotidianamente con amenazas naturales recurrentes —aluviones, sismos, inundaciones, remociones en masa, erupciones volcánicas, maremotos y eventos climáticos extremos— cuya frecuencia e intensidad en general se han incrementado en el contexto del cambio climático. Los impactos no son meramente físicos: cada interrupción en la conectividad genera pérdidas sociales, económicas y logísticas que afectan familias, empresas, regiones y al país en su conjunto.

A pesar de esta realidad, la metodología vigente de evaluación social de proyectos viales en Chile —pilar del Sistema Nacional de Inversiones— fue concebida en una época donde la resiliencia no era aún una condición estratégica para la infraestructura pública. Hoy, esta brecha se traduce en dificultades para reconocer formalmente los beneficios de invertir en prevención, robustez y redundancia de la red vial a lo largo del territorio. En este contexto, invertir en resiliencia es más eficiente, equitativo y sostenible que reconstruir, particularmente en territorios altamente expuestos como es nuestro país.

La propuesta de este policy paper busca aportar en este aspecto, proponiendo una ruta técnica e institucional para integrar la reducción del riesgo y el aumento de la resiliencia en la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana, sin alterar la estructura metodológica fundamental, sino que ampliándola y modernizándola para capturar beneficios sociales actualmente invisibles o subvalorados.

La propuesta reconoce y articula cinco elementos centrales:

- ampliar el análisis costo-beneficio incorporando pérdidas evitadas y vida útil extendida;
- incluir indicadores explícitos de resiliencia —robustez, redundancia y velocidad de recuperación;
- desarrollar una base de datos estandarizada y georreferenciada sobre daños y costos asociados a amenazas;
- adaptar herramientas técnicas existentes, como SIGER-RV y modelos de tráfico, complementándolas con plataformas internacionales como MERIT; y
- avanzar con una implementación gradual en el SNI, mediante pilotos, módulos complementarios y fortalecimiento de capacidades.

Su mérito está en proponer una evolución técnica que reconoce las capacidades ya instaladas en el Estado; en fortalecer el vínculo entre evaluación económica, gestión del riesgos y resiliencia y continuidad de servicios; y en alinear nuestras políticas con los marcos legales vigentes.

Construir infraestructura resiliente es construir futuro. Esta propuesta es un paso concreto hacia un Estado que invierte no solo para conectar mejor, sino que también para mantener esa conexión y ofrecer infraestructura con un mejor nivel de servicio, anticipando riesgos, protegiendo vidas y asegurando el desarrollo sostenible del país.

SERIE POLICY PAPERS CIGIDEN

---

## Integración de riesgo y resiliencia en la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana

## I. INTRODUCCIÓN

La red vial chilena está expuesta a una diversidad de amenazas de origen natural cuyo impacto sobre la red vial varía según el tipo de amenaza, su intensidad y frecuencia. En el norte, los aluviones y crecidas súbitas afectan quebradas y valles; en la zona central, las crecidas fluviales interrumpen rutas estratégicas; en la cordillera, los deslizamientos y nevadas restringen la operación de pasos fronterizos; y en el sur austral, los temporales e inundaciones impactan la conectividad de territorios aislados. La actividad sísmica y vulcanológica frecuentemente afecta la vialidad, provocando daños físicos, y pérdidas económicas debido a la necesidad de mantener permanentemente la conectividad.

Desde los primeros registros sistemáticos de daños en la red vial por amenazas de origen natural en 1990 hasta el 2021, aproximadamente 1200 tramos de la red vial han experimentado cortes debido a eventos hidrometeorológicos, totalizando más de 36 mil kilómetros de caminos afectados por eventos de este tipo (MOP, 2011; Echaveguren et al., 2023). Esto implica extraer fondos de partidas presupuestarias sectoriales, en este caso de la Dirección de Vialidad, hacia la ejecución de obras de reposición total o parcial de la infraestructura, provocando una contracción en la disponibilidad de recursos originalmente destinados a la inversión en mantenimiento, reposición, mejoramientos o construcción de infraestructura vial nueva. Por ejemplo, el sistema frontal de junio del 2023, que afectó la zona centro sur del país significó un costo de reposición de obligó al MOP a destinar cerca de US\$ 400 millones a la recuperación de caminos y puentes (Ministerio de Hacienda, 2023). El terremoto del Maule del 2010, significó un costo de recuperación del orden de US\$ 523 millones (Gobierno de Chile, 2010).

En este escenario, la inversión en reducción del riesgo y de aumento de la resiliencia de la infraestructura vial resulta indispensable. Invertir en la reducción del riesgo significa anticipar inversión para reducir la vulnerabilidad de la infraestructura, reducir el daño probable y las pérdidas económicas asociadas. Invertir en resiliencia significa robustecer la red y otorgarle redundancia para reducir la pérdida de servicio y reducir los tiempos de recuperación de conectividad. Por ello, estas medidas permiten reducir no solo los costos directos de reparación, sino también las pérdidas económicas, que afectan la productividad, cadena logística y los tiempos de viaje. Por ello resulta necesario, desde el punto de vista de la eficiencia del gasto público, justificar adecuadamente el beneficio social de la inversión en reducción de riesgo e incremento de resiliencia de la infraestructura vial.

Las metodologías vigentes de Evaluación Social de Proyectos – que forma parte del Sistema Nacional de Inversiones (SNI), administrado por el Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDSF) –, no incorporan explícitamente los beneficios de reducir el riesgo ni de aumentar la resiliencia. Integrarlos formalmente permitiría justificar de manera robusta la inversión pública, al tiempo que mejoraría la eficiencia social y económica de las decisiones de inversión. Incluir el enfoque de resiliencia y reducción de riesgos en el SNI, permitiría capturar beneficios de largo plazo y optimizar la asignación de recursos públicos, favoreciendo la continuidad operacional de los servicios de infraestructura crítica, como la vialidad interurbana.

El propósito de este documento es analizar cómo incorporar en la metodología de evaluación social de proyectos de vialidad interurbana, la valoración de los beneficios asociados a la inversión en reducción del riesgo y aumento de la resiliencia. La discusión se centra en criterios generales de carácter metodológico, más que en aspectos analíticos, con el fin de establecer una base de conocimiento sobre la cual el MDSF, en virtud de las atribuciones que le confiere la Ley N°20.530, pueda determinar la forma de incluir estos conceptos en coherencia con las necesidades de la Dirección de Vialidad.

## II. ANTECEDENTES NORMATIVOS

Desde el año 2021, Chile cuenta con un nuevo marco legal para la gestión del riesgo de desastres, establecido por la Ley N°21.364 (Ministerio del Interior, 2021). Esta normativa creó el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED), coordinado por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED). El objetivo principal de esta reforma fue fortalecer la coordinación entre instituciones y enfocar el sistema hacia la prevención, además de mejorar los mecanismos de respuesta post desastre. Para implementar esta ley, en el año 2023 se dictaron dos reglamentos clave: el Decreto N°234, que regula el funcionamiento de los Comités de Gestión del Riesgo de Desastres (COGRID), y el Decreto N°86, que establece las funciones de los Organismos Técnicos para el Monitoreo de Amenazas (OTMAS) y de los Organismos Técnicos de Monitoreo Sectorial.

El Decreto N°86 (Ministerio del Interior, 2023) identifica al Ministerio de Obras Públicas (MOP) como uno de estos organismos técnicos de monitoreo sectorial. En concreto, el MOP es responsable de vigilar el estado de la infraestructura de conectividad nacional, incluyendo carreteras, aeropuertos y vías marítimas, fluviales y lacustres. Esto significa que el MOP debe monitorear cualquier alteración en estas infraestructuras, evaluar sus posibles impactos y reportar la información a SENAPRED para activar respuestas oportunas. En términos prácticos, esto implica contar con sistemas de monitoreo activos, protocolos de evaluación de daños y de comunicación directa con el SENAPRED.

Dentro de la organización interna del MOP, la planificación y desarrollo vial de Chile está a cargo de la Dirección de Vialidad y de la Dirección General de Concesiones. En particular, la Dirección de Vialidad está encargada de proyectar, desarrollar y mantener la infraestructura vial en las zonas rurales del país, que se ejecuta con fondos fiscales, siempre que no esté bajo la tuición de otros servicios del MOP. Su labor abarca desde los estudios y diseños hasta la construcción, conservación y señalización de caminos y puentes, así como sus obras complementarias. Su misión institucional es garantizar una red vial que mejore la calidad de vida de las personas y promueva la seguridad, la integración territorial y la sostenibilidad, con criterios de eficiencia, inclusión, equidad y participación ciudadana.

Para este propósito, la Dirección de Vialidad cuenta con un cuerpo normativo denominado Manual de Carreteras, que en sus 9 volúmenes proporciona herramientas técnicas para el desarrollo vial, desde la planificación (Volumen N°1<sup>1</sup>), diseño (Volúmenes N°2<sup>2</sup>, N°3<sup>3</sup> y N°4<sup>4</sup>), construcción (Volumen N°5<sup>5</sup>) y la operación (Volúmenes N°7<sup>6</sup> y N°8<sup>7</sup>), incluyendo además aspectos transversales a todo el ciclo de vida del desarrollo vial como son la seguridad vial (Volumen N°6<sup>8</sup>) y la sostenibilidad (Volumen N°9<sup>9</sup>). El Manual de Carreteras es un instrumento que le permite a la Dirección de Vialidad cumplir con la misión de asegurar la conectividad, seguridad y sustentabilidad de la infraestructura vial del país. Esto implica desarrollar proyectos viales con un enfoque integral que incluya aspectos económicos, sociales, ambientales, adaptación y mitigación al cambio climático, y la gestión del riesgo y resiliencia en la red vial.

En particular, el Volumen N°1 del Manual de Carreteras describe la forma en que se evalúan socialmente los proyectos viales, considerando los procesos de formulación, estudios de base, simulación y modelación y la evaluación social propiamente tal, en coherencia con la metodología de evaluación social de proyectos de vialidad interurbana del Ministerio de Desarrollo Social y Familia.

En Chile, la evaluación social de proyectos de infraestructura pública forma parte del SNI, administrado por el MDSF. Este organismo, en virtud de la Ley N°20.530, tiene la facultad de establecer metodologías de evaluación social de proyectos, revisar las iniciativas y asegurar que los recursos públicos se asignen a proyectos con rentabilidad social demostrada. La función central del SNI es garantizar que la inversión pública responda tanto a la eficiencia económica como a objetivos de equidad y desarrollo territorial.

El proceso de evaluación se rige por las Normas, Instrucciones y Procedimientos para el proceso de Inversión Pública (NIP) emitidas por los Ministerios de Hacienda y de Desarrollo Social y Familia. Las NIP del SNI, regulan el ciclo de vida completo de las iniciativas de inversión pública. Definen requisitos, fases y contenidos mínimos de estudios y criterios de análisis técnico-económico, procedimientos de reevaluación y metodologías sectoriales aplicables a los proyectos de inversión pública. En definitiva, estas normas establecen los contenidos mínimos de los estudios en las etapas de perfil, prefactibilidad, factibilidad y diseño, además de regular los procedimientos de reevaluación de proyectos en ejecución.

[1] Planificación, Evaluación y Desarrollo Vial

[2] Procedimientos de Estudios Viales

[3] Instrucciones y Criterios de Diseño

[4] Planos de Obras Tipo

[5] Especificaciones Técnicas Generales de Construcción

[6] Mantenimiento Vial

[7] Especificaciones y Métodos de Muestreo, Ensaye y Control

[8] Seguridad Vial

[9] Estudios y Criterios Ambientales en Proyectos Viales

Para el sector transporte, las metodologías sectoriales del SNI consideran específicamente los proyectos camineros interurbanos, que abarcan construcción de nuevas rutas o variantes, ampliaciones y mejoramientos de estándar, reposiciones, iniciativas de seguridad vial y, en ciertos casos, conservaciones mayores formuladas como proyectos de inversión. La formulación y evaluación de estos proyectos la realiza la Dirección de Vialidad y las somete a revisión y autorización de inversión mediante un instrumento denominado iniciativas de inversión (IDI). En caso de que la IDI sea aprobada, el MDSF emite un pronunciamiento que, en caso de ser favorable, dicha iniciativa se considera aprobada y apta para su ejecución<sup>10</sup>.

La evaluación social de proyectos de inversión pública tiene por objetivo determinar si un proyecto es socialmente conveniente – es decir, su rentabilidad social, de manera de: maximizar el bienestar social, orientar la inversión pública, identificar la alternativa de proyecto más eficiente, promover el desarrollo social y mejorar la gestión de proyectos. En el caso de los proyectos viales, los principales criterios de determinación de rentabilidad social son el análisis costo-beneficio (CBA) y análisis costo-eficiencia (CEA), que responden a la naturaleza del proyecto y a la posibilidad de monetizar sus beneficios y costos. El CBA se aplica de manera preferente en los proyectos interurbanos con impactos medibles en tiempo de viaje, costos vehiculares, reducción de accidentes y operación de la red, entregando indicadores como valor actual neto, tasa interna de retorno social o relación costo-beneficio. El CEA, en cambio, se utiliza cuando no es factible valorar monetariamente los beneficios, como ocurre en segmentos de baja demanda o proyectos de conectividad básica, privilegiando la comparación de costos para alcanzar estándares mínimos de transitabilidad, seguridad o servicio.

Este sistema metodológico no solo permite comparar alternativas y asignar recursos en función de su rentabilidad social, sino que también integra criterios de equidad territorial y acceso, lo que es especialmente relevante en un país como el nuestro debido a su extensión y diversidad geográfica. De este modo, la evaluación social constituye una herramienta esencial para orientar la política de inversión vial hacia proyectos que maximizan los beneficios colectivos y aseguran conectividad sostenible a largo plazo y al buen uso de los recursos públicos.

[10] En el lenguaje del sistema nacional de inversiones dicho pronunciamiento se denomina RATE (Resultado del Análisis Técnico-Económico). Este pronunciamiento puede ser RS (Rentable socialmente), FI (Falta información), OT (Objetado técnicamente), IN (Incumplimiento de normativas), RE (reevaluación) o CF (Continuidad favorable).

[11] El VAN (Valor Actual Neto) es la diferencia entre los beneficios y los costos de un proyecto, llevados a “dinero de hoy” mediante una tasa de descuento. Si el VAN es positivo, significa que el proyecto genera más beneficios que costos y, por lo tanto, conviene realizarlo.

[12] La TIR (Tasa Interna de Retorno) es la rentabilidad porcentual que entrega un proyecto a lo largo de su vida útil. Si esta tasa supera la mínima exigida por el Estado o la sociedad (tasa social de descuento), el proyecto se considera rentable.

[13] La TRI (Tasa de Retorno Inmediato) indica en qué año es más conveniente ejecutar el proyecto, al comparar la inversión con los beneficios inmediatos que genera. Permite decidir si conviene hacerlo ahora o esperar.

[14] Los costos de operación vehicular responden a los gastos en que incurre un vehículo al circular por una vía y dependen directamente de la geometría, la calidad de la carpeta de rodado y las condiciones de tránsito. Corresponden al consumo de combustible, lubricantes y neumáticos, costos de mantenimiento y depreciación del vehículo. Actualmente se calculan usando el modelo HDM-4. Este modelo integra la geometría de la carretera, las características del tráfico y la condición del pavimento para calcular estos costos en términos de \$/vehículo-km.

## II. LA EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS VIALES EN CHILE

### II.A GENERALIDADES

La evaluación social de proyectos de vialidad interurbana en Chile se estructura en torno a cinco aspectos característicos. Primero, la formulación, que identifica el problema de conectividad y población beneficiaria, además de definir alternativas viables. Segundo, el procedimiento de evaluación, que se basa en un análisis costo-beneficio o costo-eficiencia, donde los costos se calculan a partir de la inversión inicial, conservación, mantención y eventuales expropiaciones, ajustados a precios sociales, mientras que los beneficios se estiman por ahorros de tiempo de viaje, reducción de costos de operación vehicular, cambios en consumo de combustibles y, en interurbanos, menor accidentabilidad y emisiones.

Luego, los indicadores de rentabilidad como el Valor Actual Neto<sup>11</sup> (VAN), Tasa Interna de Retorno<sup>12</sup> (TIR) y Tasa de Retorno Inmediato<sup>13</sup> (TRI) entre otros, que permiten determinar la conveniencia y el momento óptimo de ejecución. En conjunto, estos indicadores ayudan a priorizar la inversión pública en transporte, asegurando que se financien primero los proyectos que entregan mayores beneficios sociales, más rentabilidad y mejor oportunidad de ejecución. Las variables de transporte que se consideran para calcular los beneficios y costos corresponden a la demanda vehicular, las velocidades de operación, los costos de operación<sup>14</sup>, el valor social del tiempo y las externalidades.

## II.B METODOLOGÍA ACTUAL DE EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS DE VIALIDAD INTERURBANA

La metodología de evaluación social de proyectos de vialidad interurbana vigente y en uso en Chile contempla 4 pasos: formulación del proyecto, procedimiento de evaluación, indicadores de rentabilidad, y variables de transporte consideradas para el cálculo (MDSF, 2017).

En los proyectos de vialidad intermedia<sup>15</sup>, se contemplan proyectos de mejoramiento (transformación de calles sin pavimentar, de tierra o ripio) a un estándar pavimentado (asfalto, hormigón u otro), incluyendo mejoras geométricas o de pendiente; construcción, que refiere a la apertura de nuevos tramos de calles que no existían, con pavimento implícito, pudiendo requerir expropiaciones; y reposición, que implica la rehabilitación total de un tramo cuya carpeta cumplió su vida útil, cuando ya no es posible conservarlo.

En los proyectos de vialidad interurbana<sup>16</sup>, se consideran proyectos de: ampliación, referidos al aumento de la capacidad vehicular mediante construcción de segundas calzadas, terceras pistas o ampliación de anchos; mejoramiento del trazado, que incluye la corrección geométrica que eleva el estándar de la vía, como disminución de curvas, reducción de pendientes o construcción de túneles para evitar cuestas; mejoramiento de la carpeta, es decir, cambio de la carpeta de rodado a una de mayor calidad, por ejemplo, pavimentar un camino de ripio o repavimentar con hormigón; reposición de carpeta, que alude a la renovación parcial o total de la superficie de rodado cuando ha alcanzado su vida útil tales como recapados<sup>17</sup>, repavimentación, reposición de ripio; y construcción de caminos nuevos, que incluye apertura de infraestructura inexistente que resuelva problemas de accesibilidad, como caminos de penetración, costeros, pasos fronterizos o by-pass<sup>18</sup>.

La evaluación se fundamenta en un análisis costo-beneficio o costo-eficiencia. En ambas metodologías se cuantifican costos y beneficios bajo precios sociales, aplicando factores de corrección para insumos, mano de obra y divisas. Los costos incluyen la inversión inicial en obras, costos de conservación y expropiaciones, mientras que los beneficios corresponden principalmente a ahorros de tiempo de viaje, reducción de costos de operación vehicular y, en el caso interurbano, beneficios adicionales como tránsito generado, disminución de emisiones de CO<sub>2</sub> y reducción de accidentes de tránsito.

[15] La vialidad intermedia es la categoría de infraestructura vial que se ubica entre la vialidad estructurante (grandes ejes urbanos o interurbanos) y la vialidad local (calles de acceso a viviendas o barrios). Se trata principalmente de vías que conectan barrios, comunas o sectores urbanos relevantes, canalizando los flujos desde las calles locales hacia las arterias principales.

[16] La vialidad interurbana corresponde a la infraestructura de transporte que conecta ciudades, pueblos, localidades rurales, zonas productivas, turísticas o fronterizas. A diferencia de la vialidad intermedia (urbana y de servicio), la interurbana está orientada a articular territorios a mayor escala, asegurando continuidad y accesibilidad entre regiones o comunas

[17] Adición de una capa de asfalto u hormigón que mejora la resistencia del pavimento.

[18] Un bypass en una carretera se refiere a una vía de desvío o circunvalación que rodea una zona específica, como una ciudad, un pueblo o un área congestionada. Su objetivo es permitir que el tráfico que no necesita entrar en un área determinada pueda continuar su camino sin pasar por ella usando otra ruta.

[19] HDM-4 (Highway Development and Management Model – versión 4) es una herramienta computacional internacionalmente utilizada para la evaluación, gestión y análisis económico de proyectos viales. Permite simular la interacción entre vehículos, caminos y condiciones de tránsito, entregando resultados sobre costos de operación vehicular, tiempos de viaje, deterioro de pavimentos, necesidades de conservación y beneficios sociales. En Chile, HDM-4 calibrado es la referencia oficial para evaluar proyectos de transporte interurbano, ya que incorpora precios sociales, parámetros de tránsito y estándares de diseño adaptados a la realidad nacional.

[20] El valor residual corresponde al beneficio económico asignado al último año del horizonte de evaluación, que representa la parte de la inversión que aún conserva valor útil. Se calcula como la fracción no agotada de la inversión inicial, considerando la vida útil de los activos (pavimento, obras básicas, estructuras) y la depreciación lineal. En términos simples, es el remanente del valor de la infraestructura al final del período de análisis, que se reconoce como beneficio porque sigue prestando servicio más allá del horizonte evaluado.

La cuantificación requiere modelar la red vial con y sin proyecto, estimando velocidades, capacidades, tiempos de viaje y flujos por categoría vehicular. En proyectos interurbanos, se emplea actualmente el modelo HDM-4<sup>19</sup>, calibrado para la realidad nacional. Dicho modelo permite proyectar costos operacionales y diferenciales de desempeño vial. La metodología también contempla el cálculo de valor residual<sup>20</sup> de la infraestructura, que se reconoce como beneficio en el último año del horizonte de evaluación.

En la evaluación costo-beneficio, los principales indicadores utilizados son el Valor Actual Neto (VAN) la Tasa Interna de Retorno (TIR), la Tasa de Retorno Inmediata (TRI) y eventualmente el VAN Marginal cuando se requiere comparar alternativas que mejoran gradualmente un mismo corredor vial. Este tipo de análisis se aplica cuando los principales beneficios pueden medirse y valorarse en dinero, lo que permite compararlos directamente con los costos de inversión, operación y mantención (por ejemplo, ahorros de tiempo de viaje o reducción de costos de operación vehicular).

Adicionalmente, la evaluación costo-eficiencia se aplica cuando los beneficios de un proyecto no pueden cuantificarse monetariamente de manera confiable. Por ejemplo, proyectos cuyo principal objetivo es mejorar la seguridad vial, otorgar accesibilidad mínima a comunidades aisladas o cumplir con obligaciones normativas o estratégicas. En estos casos, no se puede calcular un VAN o una TIR porque los beneficios no son expresables en pesos. En estos casos se comparan los costos de inversión y operación de las distintas alternativas frente a un indicador físico o de desempeño común, como número de accidentes evitados, kilómetros habilitados, tiempo de respuesta en emergencias, o población con acceso. La alternativa más eficiente será aquella que logre el menor costo por unidad de beneficio físico, por ejemplo: costo por kilómetro de vía con estándar mínimo asegurado, o costo por accidente evitado.

La evaluación considera variables de transporte medibles y verificables. Actualmente estas variables son:

- Demanda vehicular: medida como Tránsito Medio Diario Anual (TMDA), desagregada por tipo de vehículo y horarios representativos.
- Velocidad de operación y capacidad vial: obtenidas mediante funciones flujo-capacidad (o modelos de simulación).
- Costos de operación vehicular (COV): función de la rugosidad del pavimento, consumo de combustible, lubricantes, neumáticos y depreciación.
- Valor social del tiempo (VST): aplicado a pasajeros y carga, reflejando la disposición social a pagar por reducir tiempos de viaje.
- Emisiones y accidentes: en interurbanos, se incluyen como beneficios secundarios, reconociendo impactos ambientales y de seguridad vial.

Estas variables permiten representar tanto los impactos directos (ahorro de costos y tiempos) como los indirectos (mayor accesibilidad, menor riesgo, externalidades ambientales).

En síntesis, la evaluación social de proyectos de vialidad en Chile sigue un procedimiento estructurado que combina rigor económico con criterios de eficiencia social. Mientras la vialidad intermedia enfatiza en la reducción de tiempos y costos de operación en redes urbanas locales y colectoras, los proyectos interurbanos amplían el análisis incorporando beneficios derivados de tránsito generado, seguridad vial y sostenibilidad ambiental. Ambos enfoques permiten priorizar proyectos en función de su rentabilidad social, garantizando un uso eficiente de los recursos públicos y orientando la inversión hacia iniciativas que contribuyen a mejorar la conectividad, reducir costos de transporte y fortalecer la competitividad territorial.

## II.C OPORTUNIDADES Y BRECHAS DE INTEGRACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL RIESGO Y MEJORA DE RESILIENCIA EN LA METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN SOCIAL DE PROYECTOS DE VIALIDAD INTERURBANA

La revisión general de la metodología de evaluación social de proyectos de vialidad interurbana permite detectar oportunidades e identificar brechas en su aplicación, las cuales constituyen la base para el diseño de propuestas orientadas al fortalecimiento del proceso evaluativo. Las oportunidades identificadas tienen relación con la consistencia con políticas y leyes nacionales, ampliación de beneficios y costos, prolongación de vida de servicio, uso de modelos actualmente utilizados vigentes en Chile. Siguiendo esta secuencia de ideas:

[21] La vida de servicio corresponde al período de tiempo a través del cual la infraestructura presta un servicio a la comunidad, en términos de capacidad vial, transitabilidad, no congestión, y seguridad. Generalmente se confunde con la vida de diseño y con la vida útil. La vida de diseño corresponde al período de tiempo en que la estructura alcanza las cargas máximas previstas en el diseño. La vida útil corresponde al período de tiempo en que la infraestructura alcanza la resistencia máxima real. La mantención y robustecimiento de la infraestructura, puede extender la vida útil y la vida de servicio más allá de la vida de diseño prevista, dependiendo del mantenimiento vial y de la demanda de tráfico sobre la estructura y sobre la red vial en que se inserta dicha estructura.

- De acuerdo con la Ley N°21.364, el Decreto N°86 establece que el MOP será el encargado de la supervigilancia del estado de la infraestructura de conectividad nacional, incluyendo carreteras, aeropuertos y vías marítimas, fluviales y lacustres, identificando amenazas que puedan producir alteraciones físicas y operativas de tales infraestructuras. A su vez, el país cuenta con la Ley Marco de Cambio Climático (Ley N°21.455) y planes sectoriales de adaptación, que reconocen la necesidad de incorporar resiliencia en infraestructura pública. La existencia y exigencias de ambos cuerpos legales, otorga legitimidad a la inclusión del análisis de riesgo y resiliencia en la evaluación social de proyectos viales;
- Actualmente las metodologías ya cuantifican ahorros en tiempo de viaje, costos operacionales, combustible, emisiones y, en el caso interurbano, accidentes. Sobre esa base, es posible extender los beneficios incorporando reducción de interrupciones por amenazas de origen natural (aluviones, inundaciones, deslizamientos), contabilizando los ahorros en desvíos, tiempos adicionales y costos de recuperación evitados;
- El cálculo de valor residual y los costos de mantención ya están incluidos en ambas metodologías. Esto abre espacio para estimar los beneficios de prolongar la vida de servicio<sup>21</sup> de la infraestructura mediante diseños más resilientes, reduciendo la frecuencia e intensidad de intervenciones de emergencia;

- Herramientas como HDM-4 permiten simular deterioro de pavimentos y costos de operación bajo diferentes escenarios. Estas podrían ampliarse con parámetros climáticos y de riesgo para modelar el desempeño de la infraestructura frente a amenazas de origen natural, estimar pérdidas económicas, y valorar los beneficios de obras más robustas.

En términos de brechas, ni la guía de vialidad intermedia ni la de transporte interurbano incluyen procedimientos para valorar el riesgo de interrupción de tráfico (probabilidad  $\times$  impacto económico). Esto limita la incorporación de beneficios por resiliencia, más allá de costos de conservación o mantenimiento. Por otro lado, la información sistemática sobre daños viales por desastres (frecuencia, magnitud, costos de recuperación y pérdidas de conectividad) es fragmentaria. Sin una base de datos detallada, resulta difícil construir parámetros de riesgo para la evaluación ex-ante. Aunque las metodologías sugieren mencionar beneficios no cuantificables (como seguridad o reducción de molestias), no entregan lineamientos para monetizarlos.

La reducción de vulnerabilidad social o la redundancia de la red actualmente no pueden cuantificarse en el cálculo de beneficios y costos. El horizonte estándar de evaluación de 20 años no siempre refleja los impactos acumulados del cambio climático en la vida útil de la infraestructura. Esto restringe la capacidad de capturar beneficios de proyectos resilientes que podrían tener efectos positivos a más largo plazo. Finalmente, la metodología de evaluación ex-ante, no permite el cálculo de pérdidas económicas directas e indirectas de interrupción de tráfico, lo cual limita la posibilidad de utilizar metodologías de evaluación social basadas en el costo evitado<sup>22</sup>.

En síntesis, la metodología actual ofrece una base sólida de análisis costo–beneficio y costo–eficiencia, pero se centra en variables de operación, tiempo y costos directos. Para incorporar la reducción del riesgo de desastres y mejora de la resiliencia, se requiere:

- Adaptar modelos (como HDM-4) para incluir escenarios de riesgo.
- Desarrollar bases de datos históricas de amenazas, daños y costos por eventos que interrumpen parcial o totalmente el tráfico.
- Incorporar explícitamente indicadores de reducción de riesgo e incremento de resiliencia y continuidad operativa en el flujo de beneficios.

[22] Las metodologías de evaluación social actuales utilizan el análisis beneficio-costos y costo-eficiencia.

Esto permitiría pasar de una evaluación enfocada en eficiencia operativa a una más amplia, que también considere la seguridad, sostenibilidad y robustez de la red vial frente a eventos extremos, más que al estudio de proyectos de tramos individuales de la red vial.

### **III. EXPERIENCIA NACIONAL SOBRE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE REDUCCIÓN DE RIESGO E INCREMENTO EN RESILIENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL**

En Chile desde el año 2011, se han desarrollado iniciativas para incluir en la evaluación social de proyectos de inversión el tratamiento de riesgo y resiliencia en la vialidad interurbana. Las iniciativas han sido de carácter sectorial, como la propuesta por MOP (2012), gubernamental, como la conducida por MDSF (2022) y académica, como la conducida por Cartes et al. (2021) en el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN). Las tres iniciativas reconocen la necesidad de incorporar el análisis económico-social en proyectos de infraestructura expuestos a amenazas de origen natural, considerando tanto costos de agencia vial como costos de usuarios, y la resiliencia como criterio de decisión.

La propuesta del MOP (2012) enfatiza un enfoque aplicado a nivel de proyecto con horizonte de corto plazo, centrado en comparar mitigación versus gastos de emergencia. Por su parte, la propuesta de Cartes et al. (2021) integra explícitamente el ahorro de costos de tiempos viales y variación de resiliencia para seleccionar estrategias de recuperación bajo criterios económicos. En cambio, la metodología del MDSF (2022) usa un enfoque multicriterio para cuantificar riesgo y comparar alternativas de inversión. Un aspecto común de estas iniciativas es la valoración conjunta de costos y beneficios asociados a reducir vulnerabilidad y aumentar resiliencia. Sin embargo, divergen en cuanto a escala y finalidad. La propuesta del MOP (2012) es operativa y focalizada en emergencias; la de Cartes et al. (2021) propone una métrica técnica para priorizar estrategias de mitigación de riesgo y aumento de resiliencia considerando la incertidumbre; y la metodología del MDSF (2022) se orienta a la estandarización normativa de la evaluación social en el SNI.

Examinaremos brevemente cada una de estas iniciativas para identificar sus principales contribuciones a la inclusión de riesgo y resiliencia en la evaluación social de proyectos de vialidad interurbana.

## 1. Método de evaluación social de riesgo y resiliencia propuesto por el MOP

Este método fue desarrollado por MOP (2012) para evaluar económicamente el efecto de amenazas hidrometeorológicas sobre la red vial. El método evalúa fundamentalmente las amenazas de inundaciones y remociones en masa (deslizamientos, aluviones, flujos y desprendimientos), que constituyen los fenómenos más recurrentes y dañinos en la red vial chilena. A pesar de esto, la estructura metodológica permite su extensión a otros tipos de amenazas, como terremotos o fenómenos volcánicos, mediante la incorporación de parámetros de probabilidad y vulnerabilidad específicos.

La unidad de análisis es un segmento de un camino de una longitud determinada, emplazado en una red vial. Sobre esa unidad de análisis se utilizan datos de tránsito (TMDA<sup>23</sup>, composición vehicular y crecimiento), inventarios viales (IRI<sup>24</sup>, geometría, estado y obras de arte), información territorial (usos de suelo, conectividad, actividades económicas) y del medio natural (clima, geología, pendientes, vegetación y suelos), además de precios sociales<sup>25</sup>.

El proceso metodológico sigue una secuencia organizada en siete etapas principales: (i) recopilación de antecedentes, (ii) tipificación de elementos sensibles, fenómenos y daños, (iii) diagnóstico, (iv) configuración de escenarios de evaluación, (v) evaluación de escenarios, (vi) recomendaciones de acción y (vii) plan de contingencia. Esta estructura permite integrar de manera coherente información técnica, económica y social en la evaluación de alternativas de gestión del riesgo de desastres.

La evaluación se realiza en dos escenarios: el base, que contempla soluciones provisorias anuales, y el alternativo, que incorpora medidas definitivas de mitigación o rediseño, ambos con un horizonte de 5 años. Los costos analizados incluyen los de los usuarios (tiempo de viaje, operación, demoras, accidentes), los de la Dirección de Vialidad (intervenciones, despeje, reposición) y los de la comunidad (pérdida de productividad y accesibilidad).

La evaluación económica de escenarios considera cuatro grandes categorías de costos: (i) costos de los usuarios (COP), que incluyen costos por tiempo de viaje, costos de operación de los vehículos, demoras por reducción de velocidad o regulaciones de paso, accidentes, re-ruteo<sup>26</sup> de vehículos pesados y costo de oportunidad por viajes no realizados; (ii) costos de la Dirección de Vialidad (CAV), asociados a despeje, habilitación, reposición, rediseño y reconstrucción; (iii) costos de la comunidad (CS), reflejados en pérdidas de productividad, encarecimiento de inventarios o limitación en el acceso a servicios básicos; y (iv) los costos de mitigación o intervención, en el caso del escenario alternativo. Los modelos de cálculo

[23] Tránsito Medio Diario Anual. Es un indicador del volumen promedio de tránsito en una carretera.

[24] IRI: índice de rugosidad internacional. Es un indicador utilizado para medir el estado de un pavimento. Si el IRI es mayor, el estado del pavimento es peor y viceversa.

[25] Son precios que reflejan el costo o beneficio real que un proyecto tiene para la sociedad, considerando el efecto de externalidades y distorsiones de mercado. Se utiliza para formular y evaluar proyectos de inversión pública.

[26] Corresponde al redireccionamiento del tránsito hacia una ruta alternativa.

de estos costos se apoyan en herramientas como el HDM-4 para estimar costos de operación y de tiempo de viaje.

## 2. Método de evaluación social de riesgo y resiliencia propuesto por MDSF

Este método es una herramienta complementaria al análisis técnico y económico de proyectos del SNI. Su propósito es orientar la selección de alternativas que integren medidas de reducción de riesgos de desastres, comparando la situación sin intervención con la incorporación de opciones de gestión del riesgo de desastres.

El modelo considera como principales amenazas la inundación por tsunamis, erupciones volcánicas, remociones en masa e incendios forestales; además, instruye a analizar otras amenazas relevantes como sismos, inundaciones pluviales o fluviales y marejadas, dependiendo de la localización del proyecto. Para proyectos lineales (redes viales, redes de agua), la metodología se aplica en los tramos expuestos a amenazas.

La evaluación del riesgo se basa en la estimación del Índice de Riesgo de Desastres (IRD), que integra tres dimensiones: exposición a amenazas, vulnerabilidad y resiliencia del proyecto y su entorno. Este índice se calcula mediante un modelo multicriterio con ponderadores y escalas que entrega el puntaje del IRD en condiciones originales o con medidas de gestión. El resultado permite comparar la situación sin medidas frente a aquella con medidas de reducción de riesgo y seleccionar la alternativa más conveniente.

Los escenarios de evaluación corresponden a:

- Sin medidas de gestión, donde se mantiene la condición original del proyecto.
- Con medidas de gestión, donde se incorporan alternativas de mitigación para reducir el riesgo a un nivel máximo tolerable (umbral).

Cuando el IRD supera el umbral, se deben identificar medidas de mitigación (estructurales o no estructurales) que reduzcan los factores críticos.

En el ámbito económico, el modelo utiliza el Valor Actual de los Costos (VAC) de cada alternativa y el Costo Anual Equivalente (CAE) como principales indicadores. El VAC se obtiene actualizando la inversión inicial, costos de operación y mantenimiento, más el valor residual, todo ajustado por la tasa social de descuento y el horizonte de evaluación. El CAE permite comparar alternativas en términos homogéneos anuales, seleccionando aquella con el menor valor.

Las variables de transporte que alimentan el modelo incluyen volúmenes de tránsito, composición vehicular, costos de operación, tiempos de viaje y accesibilidad. También se consideran pérdidas de productividad y efectos en la comunidad cuando se interrumpe o restringe la conectividad.

### 3. Método de evaluación social de riesgo y resiliencia propuesto por CIGIDEN

Este modelo de evaluación económica busca priorizar estrategias de recuperación del desempeño vial tras la ocurrencia de un desastre, integrando de manera explícita los costos y la resiliencia.

El modelo se fundamenta en la gestión de la resiliencia, entendida como la capacidad del sistema de transporte de recuperar sus condiciones normales de operación tras un evento disruptivo. Propone un Índice de Priorización (PI) que combina dos dimensiones: el índice de resiliencia (RI), que mide el incremento relativo de resiliencia logrado por una estrategia respecto a la base, y el índice de ahorro de costos (CS), que refleja la reducción relativa de los costos totales (usuarios y agencia) frente a la estrategia base. De esta forma, el PI permite descartar alternativas que aumentan resiliencia, pero no generan ahorros, o que reducen costos sin mejorar la resiliencia. En casos donde no existan rutas alternativas, el índice prioriza únicamente en función de la resiliencia.

Los costos considerados se dividen en dos categorías. Los costos de la agencia vial (RAC) corresponden a los desembolsos directos en obras de recuperación, estimados en función de cantidades y costos unitarios. Los costos de los usuarios (RUC) incluyen el tiempo de viaje adicional, el consumo de combustible, el control de paso en sectores dañados, el tiempo y costo de desvíos, y el impacto del re-ruteo en la operación vehicular, todo calculado con valores sociales oficiales. Con ello, el modelo integra tanto costos directos como los asociados al deterioro en la movilidad.

El procedimiento fue validado en un estudio de caso en el sur de Chile, considerando una carretera con un puente principal y una ruta alternativa. Se simularon 10.000 terremotos de subducción mediante modelos de recurrencia y aceleración sísmica calibrados para Chile, definiendo tres estados de daño (leve, moderado y total) y cuatro estrategias de recuperación (una base y tres alternativas). Los resultados mostraron que, en daños leves, la priorización es indiferente dado que los cambios en resiliencia y costos son pequeños; en daños moderados y totales, las estrategias de reconstrucción acelerada o integral alcanzan mayor prioridad al equilibrar aumentos de resiliencia con reducción del costo anual equivalente.

### III.A. UNA COMPARACIÓN DE LAS TRES PROPUESTAS

La comparación de estos tres modelos permite visualizar integradamente sus características, ventajas y limitaciones. Todos ellos consideran amenazas de origen natural que afectan directamente a la red vial, aunque con distintos alcances: MOP (2012) se concentra en inundaciones y remociones en masa; la MDSF (2022) aborda un enfoque multi amenaza que incluye tsunamis, erupciones volcánicas, remociones e incendios forestales; mientras que el modelo de Cartes et al. (2021) incorpora terremotos, lahares e inundaciones, con énfasis en la recuperación post desastre. Todos los modelos utilizan unidades de análisis similares, es decir, los tramos dañados de la red.

En relación con los escenarios de evaluación, MOP (2012) compara un escenario base de gestión reactiva con uno alternativo de mitigación definitiva; MDSF (2022) analiza la situación sin medidas y con medidas de gestión del riesgo; y Cartes et al. (2021) contrasta estrategias de recuperación después de eventos disruptivos, desde intervenciones básicas hasta reconstrucciones aceleradas o integrales. En cuanto a costos y beneficios, los tres modelos integran los impactos en usuarios, agencias y comunidades, pero con enfoques distintos: el MOP (2012) utiliza costos de operación, tiempos de viaje y productividad; MDSF (2022) inversión inicial, operación y mantenimiento con valor residual; y Cartes et al. (2021) costos de agencia vial y de usuarios, ligados al tiempo, operación y desvíos.

Los indicadores de rentabilidad social también difieren: MOP (2012) utiliza el Costo Anual Equivalente y el Valor Social Neto, MDSF (2022) utiliza el Valor Actual de Costos y el Índice de Riesgo de Desastres, y Cartes et al. (2021) combina un Índice de Resiliencia con un Índice de Ahorro de Costos para priorizar estrategias. Las variables de transporte, sin embargo, son comunes en los tres: volúmenes de tránsito, composición vehicular, tiempos de viaje y costos de operación. Finalmente, el tratamiento de la resiliencia es diferente en cada método: en MOP (2012) está implícita la continuidad operacional de la ruta; MDSF (2022) la incorpora en el IRD; y Cartes et al. (2021) la representa cuantitativamente en curvas de desempeño y de recuperación.

Las tres propuestas presentan oportunidades complementarias que permiten avanzar hacia un modelo unificado de evaluación social de reducción del riesgo de desastres y aumento de resiliencia en infraestructura vial. El modelo de MOP (2012) es práctico y contempla datos de tránsito y costos sociales que se utilizan habitualmente en la evaluación de proyectos. El

modelo de MDSF (2022) entrega un marco institucional para reconocer la reducción de riesgos y resiliencia dentro del SNI. El modelo de Cartes et al. (2021), introduce una innovación conceptual, al medir de manera explícita la resiliencia como variable de decisión junto con los costos económicos.

Sin embargo, estos tres modelos comparten una limitación. No permiten realizar análisis de riesgo y resiliencia en una red vial, puesto que, entre otros aspectos, no contemplan modelos de asignación de tráfico a la red en condiciones de operación normal y de operación restringida. Tampoco consideran el efecto de redundancia física y operacional de la red vial ni los costos adicionales por circulación restringida en lugares de la red vial dañados.

Integrando las fortalezas de estos modelos y la debilidad compartida por ellos, es posible diseñar un esquema de evaluación que cuantifique los beneficios económicos de reducir daños y tiempos de interrupción, sino que también estime el valor social de inversiones que reduzcan el riesgo e incrementen la resiliencia de la red, ya sea mediante robustecimiento de la red o acondicionamiento de caminos y puentes para incrementar la redundancia.

#### **IV. EVIDENCIA INTERNACIONAL SOBRE EVALUACIÓN ECONÓMICA DE REDUCCIÓN DE RIESGO E INCREMENTO EN RESILIENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL**

En este capítulo se revisan principalmente las iniciativas de países clave en materia de evaluación de beneficios económicos de la resiliencia en infraestructura vial. Los principales lineamientos revisados provienen de Nueva Zelanda (McWha & Tooth, 2020) y del Banco Mundial (Hallegatte et al., 2020), además de las experiencias de Australia, Estados Unidos y Reino Unido.

McWha & Tooth (2020) desarrollaron una guía que buscaba incorporar la resiliencia en el Manual de Evaluación Económica de proyectos. Sin embargo, la guía de McWha & Tooth (2020) es un manual complementario y no obligatorio. La guía identificó a la<sup>27</sup> Measuring the Economics of Resilient Infrastructure Tool (MERIT) como la principal herramienta para apoyar la evaluación de resiliencia en infraestructura vial. MERIT permite simular el impacto económico de interrupciones de transporte a nivel local, regional y nacional, considerando cómo reaccionan hogares y empresas frente a interrupciones. Esta herramienta se utiliza complementariamente con modelos de transporte, pudiendo traducir los efectos físicos de cierres viales en términos económicos, incorporando tanto los costos directos de los usuarios como las pérdidas indirectas para la economía.

[27] Herramienta de valoración económica de la resiliencia de la infraestructura.

Esta guía contempla amenazas de origen natural (incluyendo terremotos, erupciones volcánicas, deslizamientos de tierra, inundaciones, nieve, hielo, tsunamis, tormentas e incendios forestales), y amenazas climáticas de largo plazo (como el ascenso del nivel del mar y el aumento en la frecuencia e intensidad de precipitaciones extremas). También considera riesgos tecnológicos asociados a fallas en infraestructuras críticas. El beneficio de invertir en resiliencia se entiende como la reducción de los costos de interrupción esperados. Para cuantificarlo, se combinan la probabilidad de ocurrencia y la severidad de cada amenaza, siguiendo un enfoque de riesgo esperado. Se distinguen distintos tipos de beneficios: en primer lugar, los directos para usuarios, como ahorro en tiempo de viaje, menor consumo de combustible y costos reducidos por viajes cancelados o desviados. Luego, los directos para la infraestructura y el entorno, como menores costos de reparación, reducción de víctimas fatales y disminución de impactos ambientales. Finalmente, se incorporan los beneficios indirectos, vinculados a la continuidad de cadenas de suministro, el turismo y el normal funcionamiento de actividades económicas dependientes de la conectividad.

McWha & Tooth (2020) proponen como indicadores de resiliencia vial la duración y frecuencia de cierres de rutas, la distancia y tiempo de los desvíos disponibles, el número de viajes cancelados o postergados, la capacidad de la red alternativa y la velocidad de recuperación del servicio tras el impacto de una amenaza. Estos parámetros sirven como base para traducir las consecuencias físicas de las amenazas en métricas económicas valorables dentro de un análisis costo-beneficio.

La medición de la resiliencia utiliza modelos de pérdidas y modelos de tráfico. En el primer caso, estima el costo esperado de interrupción a partir de registros históricos de eventos y escenarios hipotéticos, como deslizamientos que interrumpan el tráfico en una ruta. En el segundo, MERIT se apoya en modelos de asignación de tráfico para modelar el re-ruteo del tráfico ante cierres parciales o totales. Estos modelos no solo calculan demoras y costos adicionales, sino que también capturan efectos económicos más amplios al reflejar la pérdida de accesibilidad a servicios críticos y el impacto en actividades productivas.

La guía de evaluación de Hallegatte et al. (2019) proponen el enfoque de toma de decisiones robustas para el análisis costo-beneficio (ACB) de inversiones en resiliencia ante amenazas de origen natural y amenazas derivadas de la crisis climática. Proponen que los beneficios de la resiliencia se calculen como “pérdidas económicas evitadas” o “costo evitado” debido a inversiones adicionales en diseños más robustos, distinguiéndose dos categorías:

- Reducción de daños físicos en activos viales, en términos de pérdidas anuales promedio de infraestructura por amenazas de origen natural.
- Reducción de interrupciones en el servicio (evitando costos en empresas, usuarios y hogares por demoras, pérdida de conectividad o interrupciones de transporte), en términos de costo económico por interrupción de tráfico, y de porcentaje de costo de inversión en resiliencia.

La guía utiliza modelos de pérdidas económicas globales basados en estudios previos (Koks et al., 2015), los cuales estiman exposición y daños en infraestructura vial bajo escenarios de amenazas múltiples. La guía no emplea un modelo de asignación de tráfico, para calcular los impactos de las interrupciones, sino que, a través de estimaciones económicas sobre empresas y hogares, lo que permite aproximar las pérdidas de conectividad. Se trata, por tanto, de un enfoque macroeconómico y agregado, más que basado en la simulación de flujos vehiculares.

En general, esta revisión permite indicar que, en los países que cuentan con modelos formales de evaluación costo-beneficios de inversiones en resiliencia, no desarrollan guías específicas para incluirlas en las metodologías de evaluación. Más bien, desarrollan metodologías complementarias. Los dos trabajos revisados en esta sección, representan dos enfoques uno basado en impactos sobre el tránsito y otro basado en pérdidas económicas evitadas. Ambos enfoques pueden complementarse entre sí para estimar los beneficios de inversión en riesgo y resiliencia, contribuyendo a resolver las limitaciones de los enfoques de evaluación económica nacionales revisados en la sección anterior.

## **V. RECOMENDACIONES PARA LA INTEGRACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL RIESGO DE DESASTRES Y AUMENTO DE RESILIENCIA EN LA EVALUACIÓN DE PROYECTOS VIALES INTERURBANOS**

La integración del riesgo y la resiliencia a la evaluación de proyectos de vialidad interurbana permite evaluar los beneficios bajo las siguientes premisas: (a) incrementar la robustez de la infraestructura para mejorar su desempeño en caso en que una amenaza de origen natural la afecte; (b) incrementar la redundancia de la red para mitigar el aumento de costos por re-ruteo; (c) elección de alternativas de recuperación de servicio de una vía o red vial afectada por un desastre, una vez que se produce y modifica las condiciones de operación; (d) incrementar sistemática, programada y progresivamente la robustez de la infraestructura vial para adaptarla a condiciones ambientales progresivamente adversas, derivadas por ejemplo de la crisis climática combinada con anomalías climáticas, lagunas sísmicas o efectos de cascada debido a amenazas geológicas, e) planificar las necesidades de inversión en riesgo y resiliencia para la incorporación en la formulación anual de la cartera de proyectos de la Dirección de Vialidad.

Este tipo de proyectos de mitigación y de respuesta a emergencias requieren de un marco metodológico que permita estimar los beneficios sin modificar los procedimientos actualmente vigentes en el Sistema Nacional de Inversiones. Para ello es necesario ampliar el marco del análisis coste-beneficio (CBA) orientándolo hacia la identificación y monetización de beneficios en base a pérdidas evitadas y mayor estabilidad del sistema vial en su conjunto. En base a lo anterior, a continuación, se proponen cinco recomendaciones para integrar la reducción del riesgo de desastres y la resiliencia en la evaluación social de proyectos de infraestructura vial.

## 1. AMPLIAR EL MARCO DEL ANÁLISIS COSTO-BENEFICIO

Se sugiere reconocer los costos iniciales adicionales asociados con el diseño resiliente referidos a robustecimiento de la infraestructura, aumento de redundancia, y atención de emergencias. Estos costos se contrastan con:

- Las pérdidas evitadas, es decir, el valor monetario de la infraestructura vial preservada.
- Reducción de costos por interrupciones, como los ahorros derivados de menores demoras en el tránsito, menores retrasos en cadenas logísticas y menores gastos de respuesta de emergencia.
- Aumento de la vida de servicio de la infraestructura, reflejado en menores necesidades de reposición o recuperación de infraestructura dañada.

## 2. INCORPORAR LA RESILIENCIA COMO CRITERIO EXPLÍCITO

Para integrar la resiliencia, es necesario contar con indicadores adicionales que reflejen la capacidad de la infraestructura vial y de la red en su conjunto de resistir y recuperarse de eventos adversos en los ámbitos de:

- Robustez estructural: cuantificar el grado en que el diseño, materiales y estándares constructivos permiten a la infraestructura mantener su servicio frente al impacto de amenazas de origen natural, así como su costo.
- Redundancia de la red: valorar la existencia y calidad de rutas alternativas capaces de absorber flujos de tránsito cuando una vía queda interrumpida.
- Monetizar los beneficios de esta redundancia mediante ahorros en tiempos de viaje, continuidad de cadenas logísticas y reducción de costos de emergencia.
- Velocidad de recuperación: incluir métricas que reflejen el tiempo que se tarda en restablecer el servicio en las rutas tras un evento. Este parámetro puede expresarse como “tiempo promedio de interrupción evitada” u “horas de conectividad recuperadas”.

### 3. GENERAR BASES DE DATOS SISTEMÁTICAS DE DAÑOS Y COSTOS

Una limitación importante es la falta de información consolidada y estandarizada sobre daños viales monetizados, ocasionados por amenazas de origen natural. Para superarla, se recomienda:

- Desarrollar un Catastro Nacional de Daños Viales por amenazas de origen natural, que integre registros de la Dirección de Vialidad, SENAPRED, gobiernos regionales y literatura académica y reforzar las capacidades y funcionalidades del Sistema de Información de Emergencias del MOP (SIEMOP).
- Estandarizar la clasificación de eventos, tipos de daños y costos de recuperación (directos e indirectos).
- Mantener la base de datos actualizada y georreferenciada, de manera que pueda alimentar modelos predictivos y parametrizar el riesgo en las evaluaciones ex-ante.
- Incluir variables sociales y económicas (población afectada, tiempos de desconexión, costos logísticos adicionales) que permitan estimar impactos más allá de la reparación física.

### 4. ADAPTAR Y AMPLIAR HERRAMIENTAS COMPUTACIONALES EXISTENTES

La Dirección de Vialidad cuenta con herramientas de uso interno tales como SIGER-RV para evaluar el riesgo y resiliencia en redes viales (Chamorro et al., 2022). Para integrar riesgo y resiliencia con esta herramienta, se propone:

- Ampliar la base de información y modelos de amenazas en SIGER-RV.
- Adaptar los modelos de asignación de tráfico para simular condiciones de operación bajo cierres parciales o totales, con estimación de costos adicionales en usuarios y comunidades e incorporarlos a SIGER-RV.
- Complementar SIGER-RV con herramientas tales como MERIT que junto a modelos de asignación de tráfico permitan traducir interrupciones en costos económicos a nivel regional y nacional.

## 5. INTEGRACIÓN GRADUAL Y FLEXIBLE EN EL SNI

Se recomienda que, en relación a los proyectos de infraestructura vial interurbana, el SNI integre gradualmente el análisis de riesgo y resiliencia, siguiendo, por ejemplo, los siguientes pasos:

- Iniciar con módulos complementarios de análisis de riesgo y resiliencia, que puedan adjuntarse a los estudios de perfil, prefactibilidad y factibilidad.
- Establecer un procedimiento de monetización de beneficios resilientes, basado en costos evitados y continuidad del servicio.
- Capacitar a profesionales del MDSF y Dirección de Vialidad en el uso de estos criterios, asegurando capacidad técnica institucional para su implementación.
- Evaluar la experiencia a través de proyectos piloto en corredores y luego escalar progresivamente al resto de la red.
- Diseñar indicadores comunes que permitan la comparabilidad entre proyectos, favoreciendo la priorización de aquellos con mayor aporte a la resiliencia territorial y nacional.
- Validar el uso de SIGER-RV adaptado como herramienta de apoyo a la evaluación del riesgo y resiliencia en proyectos de vialidad interurbana.

## VI. CONCLUSIONES

La gestión de infraestructura vial se ha centrado tradicionalmente en la evaluación de su desempeño en el tiempo, sobre la base de proyecciones de cargas de tránsito previamente estimadas. Este enfoque, sin embargo, ha tendido a dejar fuera la consideración explícita de las amenazas de origen natural que pueden afectar las decisiones de planificación y mantenimiento. Aunque el deterioro de los pavimentos se ha investigado durante décadas mediante modelos predictivos, la integración de los efectos de las amenazas de origen natural y de los aprendizajes de la experiencia comparada de países y agencias de transporte que han logrado integrar estos factores en distintas dimensiones de la gestión, continúa siendo un desafío pendiente para la gestión de la infraestructura vial en Chile.

La incorporación del riesgo y la resiliencia en la evaluación social de proyectos viales es una necesidad para el país, dado el alto grado de exposición a amenazas de origen natural. Incluir estos criterios en el SNI permitirá fortalecer la justificación del gasto público y garantizar la continuidad de la conectividad, alineando las decisiones de inversión con la Ley 20.530 y la Ley 21.455. El sistema actual de evaluación social ofrece un marco sólido basado en análisis costo-beneficio y costo-eficiencia, pero presenta brechas al no valorar los efectos de interrupciones provocadas por desastres. Adaptar metodologías y herramientas ya vigentes, como HDM-4, permitirá ampliar el alcance hacia una evaluación que considere tanto eficiencia operativa como resiliencia frente a eventos extremos.

Las iniciativas nacionales del MOP, MDSF y CIGIDEN muestran que es posible y pertinente integrar riesgo y resiliencia en la evaluación económica de proyectos viales. Cada modelo ofrece aprendizajes valiosos en distintos niveles —operativo, normativo y conceptual— que pueden complementarse en un esquema unificado, aunque aún se requiere avanzar en su aplicación a nivel de red y no solo de tramos. La experiencia internacional confirma que los beneficios de invertir en resiliencia se pueden estimar con metodologías complementarias que traducen disrupciones en pérdidas económicas evitadas. La adopción de estas prácticas en Chile puede mejorar la toma de decisiones, siempre que se adapten a la realidad local y se combinen con modelos de transporte y catálogos de amenazas nacionales.

La integración de riesgo y resiliencia en la evaluación social requiere ampliar el análisis costo-beneficio para incluir pérdidas evitadas, robustez estructural, redundancia de red y rapidez de recuperación. Asimismo, debe institucionalizarse una planificación programada de inversiones en resiliencia

dentro del SNI y la Dirección de Vialidad, de modo que estas variables se conviertan en criterios formales de priorización de proyectos.

Finalmente, la integración del riesgo y la resiliencia en la evaluación social de proyectos viales es posible sin alterar la estructura metodológica del SNI, pues puede realizarse mediante ajustes complementarios. Se resalta la necesidad de ampliar el análisis costo–beneficio apoyado en bases de datos sistemáticas y herramientas computacionales adaptadas. Asimismo, se enfatiza la importancia de una implementación gradual y flexible, iniciando con programas piloto y fortaleciendo capacidades institucionales, para consolidar la resiliencia como criterio formal de priorización en la inversión vial.

## VII. REFERENCIAS

- Cartes, P., Echaveguren, T., Chamorro, A. & Allen, E. (2021). A prioritization index based on resilience and cost savings to select recovery strategies of roads affected by natural disasters. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 53(2021), 102014.
- Chamorro, A., Echaveguren, T., Pattillo, C., Contreras-Jara, M., Contreras, M., Allen, E, Nieto, N., & de Solminihac, H. (2023). SIGeR-RV: A Web-Geographic Information System-Based System for Risk Management of Road Networks Exposed to Natural Hazards. *Transportation Research Record*, 2677(12), 754 – 769.
- Echaveguren, T., Fernández, M.P. & Muñoz, G. (2023). Actualización del método de evaluación rápida de riesgos hidrometeorológicos en la red vial. 14º Congreso internacional PROVIAL. 6 -10 de Octubre de 2023, Pucón, Chile.
- Gobierno de Chile. (2010). Plan de Reconstrucción Terremoto y Maremoto del 27 de Febrero de 2010. <http://www.desarrollosocialyfamilia.gob.cl/pdf/plan-reconstruccion-resumen-ejecutivo.pdf>
- Hallegatte, S., Rozenberg, J., Rentschler, J., Nicolas, C., & Fox, C. (2019). Strengthening New Infrastructure Assets. A Cost-Benefit Analysis. Policy Research Working Paper, N° 8896. Washington, DC: World Bank.
- Koks, E.E., Jongman, B., Husby, T.G., & Botzen, W.J.W. (2015). Combining hazard, exposure and social vulnerability to provide lessons for flood risk management. *Environmental Science & Policy*, 47, 42 - 52.
- McWha, T., & Tooth, J. (2020). Better measurement of the direct and indirect costs and benefits of resilience NZ Transport Agency Research Report 670, Nueva Zelanda: NZ Transport Agency.
- Ministerio de Desarrollo Social y Familia (MDSF). (2017). Metodología de evaluación social de proyectos de vialidad interurbana. Santiago: MDSF.
- Ministerio de Hacienda (2023). Informe de costos de recuperación por sistema frontal de junio 2023. Santiago: Ministerio de Hacienda.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2011). Estudio básico catastro georreferenciado de riesgos y peligros naturales en la red vial. Dirección de Vialidad, Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (MOP). (2024). Política de Sostenibilidad 2024–2030. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- República de Chile. (2022). Ley N° 21.455. Ley Marco de Cambio Climático. Santiago: Biblioteca del Congreso Nacional.
- República de Chile. (2011). Ley N° 20.530. Crea el Ministerio de Desarrollo Social y Familia y modifica cuerpos legales. Santiago: Biblioteca del Congreso Nacional.



Este documento fue elaborado por el Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres, CIGIDEN (Proyecto 1523A0009 FONDAP 2023).

## **SOBRE CIGIDEN**

CIGIDEN es un centro de excelencia FONDAP-ANID creado en 2011 e integrado por cuatro universidades de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad Andrés Bello y Universidad Católica de Norte, más la colaboración de investigadores de otras instituciones académicas y gubernamentales tanto nacionales como internacionales.

Investigadores de diferentes disciplinas –ciencias de la tierra, ingenierías, ciencias sociales, geografía, economía, diseño, arquitectura, urbanismo y comunicaciones–, trabajan en CIGIDEN para generar conocimiento que permita evitar que los eventos extremos de la naturaleza se transformen en desastres.

Esta mirada interdisciplinaria ha promovido una profunda transformación académica, avanzando desde el estudio de las amenazas naturales y la respuesta de emergencia, hacia una perspectiva integral centrada en la reducción del riesgo de desastres y la construcción de resiliencia.



CIGIDEN, es una institución de excelencia FONDAP-ANID creada en 2011 e integrada por cuatro universidades chilenas. La Serie Policy Papers CIGIDEN tiene como objetivo traducir la investigación que se realiza en el centro, en documentos cortos y direccionados estratégicamente a la política pública, para así posicionar la temática de gestión del riesgo en el mundo de los tomadores de decisiones.



[www.cigiden.cl](http://www.cigiden.cl)