

CPI
Propone



Discusiones sobre la Evaluación Social de Proyectos de Infraestructura y la Resiliencia



Comité de Financiamiento



Subcomité Evaluación Social de Proyectos

Compilador y redactor

Dr. Carlos Aguirre-Núñez,
Consejero CPI, académico Escuela de
Arquitectura Universidad San Sebastián

**Coordinador comité
de trabajo**

Paulo Muñoz



Resumen

El presente documento aborda la necesidad crítica de actualizar la Evaluación Social de Proyectos (ESP) en Chile para incorporar explícitamente criterios de resiliencia ante desastres y cambio climático. Diagnostica que, aunque América Latina posee marcos normativos avanzados, existe una brecha severa en financiamiento y ejecución: los presupuestos para reducción de riesgos son marginales y se prioriza el gasto reactivo (reconstrucción) sobre la inversión preventiva (ex ante). Se destaca que cada dólar invertido en resiliencia ahorra entre 4 y 7 dólares en daños futuros.

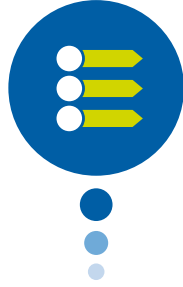
Marco Conceptual y Metodológico: El texto redefine la infraestructura no como activos aislados, sino como sistemas interdependientes. Utiliza el modelo del "Triángulo de la Resiliencia" para medir la pérdida y recuperación de funcionalidad, basándose en cuatro propiedades: robustez, redundancia, recursividad y rapidez. Se revisa el estado del arte internacional, analizando metodologías como:

Modelos de redes y teoría de grafos: Para evaluar conectividad y fallos en cascada. **Índices de Vulnerabilidad Social (SoVI):** Para identificar poblaciones con menor capacidad de recuperación. **Métodos multicriterio (MCDM):** Para ponderar decisiones técnicas y sociales. El documento enfatiza que la ESP tradicional, centrada en la eficiencia estática, es insuficiente. Propone un enfoque que integre la vulnerabilidad física y social con un análisis multiamenaza, valorando económicamente los beneficios de la resiliencia, tales como la continuidad operativa y las pérdidas evitadas.

Evidencia Empírica: Se cita un estudio de caso en la Región Metropolitana (Contreras et al., 2025) que revela la importancia de integrar la dimensión social. El estudio mostró que, aunque técnicamente ciertos enlaces viales parecían secundarios, socialmente eran críticos para el acceso al agua potable, servicio priorizado por la comunidad sobre la educación o la energía durante una emergencia. Esto subraya la necesidad de una planificación de "doble enfoque" que equilibre criterios técnicos y preferencias sociales.

El documento concluye con un marco de ocho medidas para fortalecer la infraestructura pública:

Evaluación y planificación: Incorporar escenarios de eventos concurrentes y desempeño a lo largo del tiempo. **Módulo obligatorio de riesgo:** Integrar análisis de riesgo en el Sistema Nacional de Inversiones (SNI). **Valoración económica:** Cuantificar beneficios por daños y tiempos de recuperación evitados. **Enfoque distributivo:** Priorizar la equidad territorial. **Alineamiento institucional:** Definir estándares mínimos de servicio. **Instrumentos financieros:** Adoptar seguros paramétricos y bonos catastróficos para protección fiscal. **Monitoreo y adaptación:** Uso de tecnologías predictivas y soluciones basadas en la naturaleza. **Capacitación:** Formación en análisis probabilístico y diseño resiliente.



ÍNDICE

●	Resumen	5
●	I. Introducción	8
●	II. Antecedentes generales	13
●	III. Fundamentos de la Evaluación de Proyectos de Infraestructura	23
●	IV. La Resiliencia de la Infraestructura: Un Enfoque Multidimensional	28
●	V. Metodologías para Evaluar la Resiliencia: Contexto y Propuestas	33
●	VI. Desarrollo Metodológico para la Incorporación de la Resiliencia en la Evaluación Social de Proyectos	39
●	VII. Reflexiones finales	49
●	VIII. Gestión del Riesgo para Infraestructura Pública: Marco Integral de Medidas Técnicas, Financieras y Metodológicas	53
●	Bibliografía	58
●	Anexo	61

I



INTRODUCCIÓN



1. Propósito y Alcance del Documento

El presente documento tiene como propósito desarrollar un marco conceptual y metodológico que sirva como base para la discusión y apoye de manera efectiva la incorporación de criterios de resiliencia en infraestructuras dentro de los procesos de Evaluación Social de Proyectos (ESP).

En primer lugar, el documento pretende proporcionar una guía detallada y práctica para profesionales y tomadores de decisiones, facilitando la identificación, evaluación y gestión de la robustez, redundancia y resiliencia en proyectos de infraestructura.

En segundo lugar, se aspira a fomentar un espacio de diálogo y colaboración entre las distintas partes interesadas, incluyendo entidades gubernamentales, sector privado, academia y sociedad civil.

En tercer lugar, el documento busca sentar las bases para la elaboración de políticas públicas y normativas que incorporen de manera sistemática los criterios de resiliencia en la ESP. Al ofrecer recomendaciones concretas, herramientas metodológicas y una hoja de ruta clara, se espera contribuir al desarrollo sostenible del país.

2. Metodología de Elaboración

El documento se elaboró mediante un proceso metodológico progresivo que combinó revisión documental, análisis comparado y trabajo con actores clave. Su construcción integró fuentes nacionales e internacionales, permitiendo identificar tendencias, brechas y oportunidades para el desarrollo de inversiones resilientes y sostenibles en Chile.

El análisis se organizó en cinco componentes complementarios:

2.1. Reuniones periódicas con el Comité del Consejo de Políticas de Infraestructura (CPI).

Estas sesiones permitieron definir las preguntas orientadoras, validar hallazgos y ajustar el enfoque analítico. La interacción continua con el comité aseguró coherencia entre las recomendaciones del documento y las prioridades estratégicas del CPI.

2.2. Revisión de documentos técnicos de organismos internacionales (ONU, BID, CAF, Banco Mundial, CEPAL).

Este insumo permitió comparar marcos conceptuales, instrumentos financieros y estándares de buenas prácticas aplicados en la región y a nivel global. El análisis se centró en identificar políticas efectivas de financiamiento resiliente, mecanismos de riesgo y modelos de gobernanza para proyectos verdes.

2.3. Análisis de las propuestas del Ministerio de Desarrollo Social y Familia y del Ministerio de Hacienda.

Se evaluaron los avances regulatorios y metodológicos impulsados por ambas instituciones, con especial atención a la incorporación de criterios de resiliencia, sostenibilidad y mitigación climática en la evaluación de proyectos de inversión pública. El contraste con los referentes internacionales permitió detectar alineamientos y vacíos.

2.4. Revisión del estado del arte internacional (a 2025) en bases indexadas.

La búsqueda sistemática en Scopus, Science Direct y Web of Science-Clarivate permitió identificar tendencias académicas recientes, metodologías emergentes y discusiones relevantes sobre infraestructura resiliente, financiamiento climático y planificación basada en riesgo.

2.5. Integración de los aportes del Seminario Itrend-CPI¹.

Las intervenciones de expertos nacionales e internacionales complementaron el diagnóstico con visiones prácticas, casos comparados y recomendaciones operativas, enriqueciendo la dimensión aplicada del análisis.

En conjunto, estos componentes dieron lugar a un diagnóstico integral que combina evidencia técnica, discusión académica y perspectiva estratégica, permitiendo formular recomendaciones sólidas para fortalecer la resiliencia y sostenibilidad en la inversión pública del país.

3. Hacia un diagnóstico

El informe de Evaluación sobre el Riesgo de Desastres en América Latina y el Caribe 2024 (RAR24)² revela que, en diversos países de la región, los presupuestos públicos destinan una fracción marginal a la reducción del riesgo de desastres, llegando en algunos casos a ser inferior al 0,1% del total. A esta escasa asignación se suma un problema de gestión aún más crítico: la subejecución de recursos. En ciertos países, hasta un 60% de los fondos asignados no llega a utilizarse anualmente.

En América Latina y el Caribe existe un amplio desarrollo normativo en materia de reducción del riesgo de desastres, pero persiste una brecha crítica entre las políticas y su implementación. Aunque la mayoría de los países cuenta con leyes, planes y políticas, el financiamiento destinado a la prevención y mitigación sigue siendo muy bajo: en algunos casos menos del 0,1% del presupuesto nacional, y con una ejecución deficiente donde hasta un 60% del presupuesto asignado queda sin utilizar.

¹ Seminario "Invertir en resiliencia es necesario y rentable", realizado en noviembre 2025:
https://www.infraestructurapublica.cl/wp-content/uploads/2025/12/CUADERNO-176_VF.pdf

² <https://www.undrr.org/es/RAR24ALC>

La Ayuda Oficial al Desarrollo aporta solo un 1% a la reducción del riesgo, mientras que la financiación para clima y resiliencia apenas incrementa este monto en cerca de un 5%. Esto genera un ciclo vicioso: los desastres reducen ingresos y productividad, obligando a más endeudamiento para reconstruir, lo que limita la inversión futura y mantiene la vulnerabilidad.

El gasto se concentra en respuestas post-desastre (78%), mientras que la planificación prospectiva y la reducción de riesgos existentes reciben solo 6% y 18% respectivamente, pese a que cada dólar invertido en prevención ahorra entre 4 y 7 dólares en daños futuros.

Para avanzar, se requieren nuevas estrategias de financiamiento e inversión que prioricen la resiliencia, fortaleciendo:

- la generación de conocimiento del riesgo,
- instrumentos financieros innovadores,
- infraestructura resiliente y servicios ecosistémicos,
- protección social y medios de vida vulnerables,
- sistemas de alerta temprana, y
- planificación de reconstrucción resiliente antes del desastre.

Invertir en resiliencia es una decisión estratégica que salva vidas, protege la economía y asegura un desarrollo sostenible para futuras generaciones.

El Ministerio de Hacienda de Chile, en el año 2025, impulsó una agenda de finanzas sostenibles vinculada al cumplimiento de los compromisos climáticos, la gestión de riesgos de desastres y la protección de la biodiversidad. Desde 2022, con la Ley Marco de Cambio Climático, Hacienda posee el mandato legal de elaborar una Estrategia Financiera de Cambio Climático, la cual ya está diseñada y busca cuantificar los costos de las metas climáticas del país, identificar brechas de financiamiento y alinear recursos públicos y privados hacia soluciones sostenibles.

La estrategia se organiza en tres pilares:

1. Incorporar riesgos y criterios climáticos, de biodiversidad y desastres en la gestión financiera existente, incluyendo evaluación del gasto, gestión de deuda y estándares para decisiones públicas y privadas.
2. Alinear financiamiento hacia iniciativas con impacto ambiental positivo, aprovechando instrumentos como bonos verdes, sociales, sostenibles y bonos vinculados a metas climáticas (SLB), que ya representan un 37% de la cartera de bonos soberanos.
3. Aprovechar oportunidades de coordinación público-privada para movilizar nuevos recursos, estandarizar información y generar innovación financiera.

Entre los avances destaca la creación de la Taxonomía de Actividades Medioambientalmente Sostenibles (TAS o TEMAS), que entrega criterios científicos para identificar inversiones sustentables y orientar la toma de decisiones del sector financiero, empresas y el propio Estado. Asimismo, se ha fortalecido la valoración del capital natural, mediante el Comité para la Capitalización de los Servicios Ecosistémicos, la Mesa Público-Privada de Capital Natural, y proyectos piloto para cuantificar el valor económico de ecosistemas estratégicos.

El Ministerio participa también en la Mesa Público-Privada de Finanzas Verdes desde 2019, que promueve estándares, educación financiera, gestión de riesgos climáticos e innovación en productos financieros vinculados a sostenibilidad.

A nivel internacional, Hacienda es autoridad nacional designada para el Fondo Verde para el Clima, facilitando financiamiento externo a proyectos nacionales para mitigación y adaptación.

El objetivo transversal es hacer que el sistema financiero chileno sea un motor de resiliencia climática, transición justa y protección del capital natural, reduciendo vulnerabilidades fiscales a largo plazo.

En síntesis, la región ha logrado un marco normativo avanzado, el desafío crítico persiste en la falta de financiamiento efectivo. El camino para seguir lo marca la transición hacia modelos fiscales resilientes —como el que desarrolla Chile—, que alinean las finanzas públicas con los objetivos climáticos. Es imperativo cambiar el paradigma de la política pública: invertir en la prevención antes que gastar en la reconstrucción. La resiliencia no debe verse como un costo, sino como una inversión estratégica indispensable para proteger vidas, blindar la economía y asegurar el bienestar futuro.

La normativa existe, pero sin financiamiento ejecutado es letra muerta. Debemos replicar esfuerzos de alineación fiscal y climática, como el caso chileno, para priorizar la inversión ex ante sobre la respuesta ex post. La conclusión es financiera y moralmente clara: la resiliencia es una inversión estratégica, la única capaz de transformar el gasto en desastres en garantía de desarrollo sostenible.

II



ANTECEDENTES GENERALES



Estado del arte, Marcos y Metodologías para la Evaluación de la Resiliencia ante Desastres

El creciente impacto de los desastres naturales, exacerbado por el cambio climático, ha puesto de manifiesto las limitaciones de los enfoques tradicionales de gestión de emergencias. En respuesta, ha surgido un cambio de paradigma estratégico, pasando de una gestión meramente reactiva a un enfoque proactivo centrado en la resiliencia. Esta se define como la capacidad de un sistema —incluyendo sus dimensiones sociales, ecológicas y tecnológicas— para resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de manera oportuna y eficiente de los efectos de una perturbación.

El propósito de esta revisión de literatura es sintetizar y analizar los marcos metodológicos cuantitativos y cualitativos más influyentes para la evaluación de la resiliencia. La medición rigurosa de la resiliencia es fundamental para identificar vulnerabilidades, priorizar inversiones en mitigación y desarrollar estrategias de adaptación más efectivas. Sin una evaluación clara, los esfuerzos para fortalecer la capacidad de las comunidades y sus infraestructuras críticas permanecen desinformados, reactivos y corren el riesgo de una mala asignación de recursos.

Este documento explora los fundamentos conceptuales que sustentan la medición de la resiliencia, para luego adentrarse en metodologías cuantitativas basadas en el desempeño de sistemas físicos. Posteriormente, se analizan los enfoques de indicadores compuestos que ofrecen una visión holística de la resiliencia comunitaria y se examinan las técnicas híbridas de decisión multicriterio.

Conceptualización de la Resiliencia: Fundamentos Teóricos y Modelos Clave

Para medir y gestionar la resiliencia de manera efectiva, es indispensable establecer una base conceptual sólida. Una definición clara y la diferenciación de conceptos relacionados, como la vulnerabilidad, son cruciales para evitar ambigüedades y garantizar que las métricas desarrolladas sean coherentes y comparables. Esta sección explora las definiciones fundamentales, las dimensiones clave y los modelos gráficos que han dado forma al campo de la evaluación de la resiliencia.

1. Definiciones y Dimensiones de la Resiliencia

La conceptualización de la resiliencia ha evolucionado significativamente. Originalmente arraigada en la ecología, la idea se centraba en la capacidad de un sistema para "recuperarse" (*bouncing back*) a su estado previo a la perturbación. Sin embargo, en el ámbito de la gestión de desastres, el concepto se ha ampliado para abarcar medidas de mejora y transformación, encapsuladas en la noción de "avanzar mejorando" (*bouncing forward*) (Manyena et al., 2011, citado en Cutter et al., 2014).

Un marco fundamental para desagregar este concepto es el propuesto por Bruneau et al. (2003), que evalúa la resiliencia comunitaria a través de cuatro dimensiones interrelacionadas, conocidas por el acrónimo TOSE:

- Tecnológica: El desempeño de los sistemas físicos e infraestructuras críticas.
- Organizacional: La capacidad de las instituciones y organizaciones para gestionar y coordinar la respuesta y recuperación.
- Social: Las características de la población que influyen en su capacidad para hacer frente y recuperarse de un desastre.
- Económica: La capacidad de los sistemas económicos para absorber pérdidas y reanudar la actividad productiva.

El modelo del "Triángulo de la Resiliencia", propuesto por Bruneau et al. (2003) y refinado por Cimellaro et al. (2010), ofrece una representación gráfica e intuitiva de la resiliencia. En este marco, la resiliencia se cuantifica como el área normalizada bajo la curva de funcionalidad de un sistema a lo largo del tiempo. Una mayor área bajo la curva indica una mayor resiliencia, lo que refleja una menor pérdida de funcionalidad y una recuperación más rápida.

El estudio de Zhang et al. (2022) sobre la resiliencia de una red vial ante inundaciones ilustra las cinco etapas típicas que conforman esta curva de funcionalidad durante un desastre:

1. Declive inicial: La funcionalidad del sistema comienza a disminuir a medida que el evento se desarrolla.
2. Estabilidad temporal: El sistema muestra una capacidad de adaptación inicial, manteniendo un nivel de funcionalidad estable por un corto período.
3. Declive rápido: A medida que el desastre alcanza su punto máximo, la funcionalidad del sistema cae drásticamente a su nivel más bajo.
4. Recuperación rápida: Inmediatamente después del evento, se inician las primeras acciones de respuesta, lo que conduce a una rápida recuperación inicial de la funcionalidad.
5. Recuperación lenta: La fase final implica reparaciones y reconstrucciones más complejas, lo que resulta en una recuperación gradual y más lenta hasta alcanzar un nuevo estado estable.

Aunque a menudo se usan indistintamente, la resiliencia y la vulnerabilidad social son constructos conceptualmente distintos. La vulnerabilidad social, según la definición de Cutter et al. (2003), se refiere a la susceptibilidad de una población a los impactos adversos de los desastres, moldeada por características socioeconómicas y demográficas preexistentes, como la pobreza, la edad, la raza/etnia y el tipo de vivienda. Mientras que la vulnerabilidad es una condición preexistente y de susceptibilidad, la resiliencia es un constructo proactivo y de capacidad.

Es crucial entender que la resiliencia no es simplemente el inverso de la vulnerabilidad. Un estudio de Cutter et al. (2014) demostró empíricamente esta distinción al comparar el Índice de Vulnerabilidad Social (SoVI®) con su Índice de Resiliencia de Base para Comunidades (BRIC). El análisis reveló una superposición estadística de aproximadamente el 25% entre ambos constructos, concentrada principalmente en las categorías social y económica. Este hallazgo es de suma importancia práctica, pues demuestra que las políticas enfocadas únicamente en reducir la vulnerabilidad social son insuficientes para construir resiliencia de manera integral, ya que omiten capitales institucionales y de infraestructura que son determinantes.

Estos marcos conceptuales proporcionan la base sobre la cual se construyen metodologías de evaluación más específicas. A continuación, se explorará cómo estos conceptos se traducen en enfoques cuantitativos para evaluar el desempeño de sistemas físicos.

2. Metodologías Cuantitativas Basadas en el Desempeño de Sistemas Físicos

La infraestructura crítica, como las redes de transporte, energía y agua, es la columna vertebral de la funcionalidad comunitaria. Su desempeño durante y después de un desastre es un indicador tangible y medible de la resiliencia. Por ello, una parte importante de la investigación se ha centrado en el desarrollo de métricas y modelos que cuantifican la resiliencia a través de la funcionalidad de la infraestructura física. Esta sección aborda las principales metodologías en este ámbito, con un enfoque particular en las redes de transporte.

La evaluación cuantitativa de la resiliencia de las redes viales se basa en un conjunto de métricas clave que capturan diferentes aspectos de su funcionalidad.

- **Accesibilidad a Servicios de Emergencia:** La capacidad de los servicios de emergencia para llegar a la población es una medida crítica de la resiliencia. Estudios como el de Coles et al. (2017) utilizan modelos hidrodinámicos de inundación para simular el impacto en la red vial y evaluar los cambios en los tiempos de respuesta y la cobertura del área de servicio de ambulancias y bomberos. Esto permite identificar qué áreas se vuelven inaccesibles o experimentan retrasos significativos durante un evento.
- **Indicador de Caminos Independientes Ponderados (WIPW):** Desarrollado por Zhang y Wang (2016), el indicador WIPW (por sus siglas en inglés, *Weighted Independent Pathways*) es una métrica de desempeño que integra de manera integral la topología de la red, la confiabilidad de las vías, los patrones de tráfico y la ubicación de instalaciones de emergencia. Mide la conectividad funcional entre pares de origen-destino, proporcionando una evaluación robusta del rendimiento del sistema.

- **Métricas de Robustez y Recuperación:** El análisis de curvas de resiliencia, como las descritas en el marco del "Triángulo de la Resiliencia", se utiliza para evaluar la robustez y la rapidez de la recuperación de la red. Métricas como la longitud promedio del camino más corto o la eficiencia global de la red se monitorean a lo largo del tiempo para trazar estas curvas. Esto permite comparar la efectividad de diferentes estrategias de recuperación post-desastre.
- **Costos de Mantenimiento y Vida Útil:** El impacto de las interrupciones no es solo funcional, sino también económico. El enfoque de "escaneo completo" (full-scan) propuesto por Allen et al. (2025) cuantifica la criticidad de un enlace de la red midiendo cómo su falla afecta los costos de mantenimiento y la vida útil restante del pavimento en otras partes de la red debido al desvío de tráfico. Un aumento significativo en estos costos indica una alta criticidad del enlace interrumpido.

3. Modelado de la Recuperación y la Criticidad

Más allá de la pérdida de funcionalidad, los modelos cuantitativos también se enfocan en la capacidad de recuperación y en la identificación de los componentes más críticos de una red.

El marco desarrollado por Arango et al. (2025) se centra específicamente en la etapa de recuperación post-evento. Introduce los conceptos de susceptibilidad al daño (la propensión de un segmento de la red a ser dañado) y severidad del daño (la magnitud del daño). Este enfoque utiliza curvas características para visualizar la capacidad de recuperación del sistema en función de los recursos disponibles (por ejemplo, el número de cuadrillas de reparación). Estas curvas permiten a los gestores determinar cuántos recursos son necesarios para alcanzar un nivel de recuperación aceptable dentro de un plazo determinado.

La criticidad de los enlaces individuales de la red se identifica comúnmente evaluando el impacto de su falla en el desempeño general del sistema. Métricas como el aumento en los costos totales de viaje, la reducción de la accesibilidad a servicios esenciales o la disminución de la eficiencia de la red se calculan al simular la falla de cada enlace de manera individual. Aquellos enlaces cuya falla produce el mayor impacto negativo son considerados los más críticos (Sohouenou, 2022; Allen et al., 2025).

Si bien estos modelos basados en el desempeño ofrecen una granularidad técnica incomparable, su enfoque limitado a los sistemas físicos necesita un abordaje más amplio. Para capturar las capacidades socioeconómicas e institucionales que en última instancia gobiernan la respuesta de una comunidad, el campo ha desarrollado marcos basados en indicadores, que se exploran a continuación.

4. Enfoques Basados en Indicadores Compuestos

Mientras que las metodologías basadas en el desempeño se centran en sistemas físicos específicos, los enfoques de indicadores compuestos buscan medir un fenómeno complejo y multidimensional como la resiliencia mediante la agregación de múltiples variables individuales. La lógica detrás de este método es que la resiliencia (o su concepto relacionado, la vulnerabilidad) no puede ser capturada por una única métrica. Al combinar indicadores sociales, económicos, institucionales y de infraestructura, estos marcos permiten realizar comparaciones y clasificaciones de la resiliencia entre diferentes áreas geográficas, como condados o distritos urbanos, lo que resulta invaluable para la planificación y la formulación de políticas.

5. Marcos Holísticos de Resiliencia

A partir de la base sentada por el SoVI, se han desarrollado marcos de indicadores compuestos más holísticos que buscan medir la resiliencia de manera directa e integral.

- **BRIC (*Baseline Resilience Indicators for Communities*):** El modelo BRIC, desarrollado por Cutter et al. (2014), es un marco integral que evalúa la resiliencia inherente de una comunidad a través de seis capitales o dimensiones distintas: social, económica, capital comunitario, institucional, vivienda/infraestructura y ambiental. Al igual que el SoVI, el BRIC utiliza datos disponibles públicamente para permitir evaluaciones estandarizadas y repetibles, así como comparaciones espaciales de la resiliencia a nivel de condado en los Estados Unidos.
- **S-FRESI (*Spatially-explicit Flood Resilience Index*):** El S-FRESI, propuesto por Bertilsson et al. (2018), es un ejemplo de un índice específico para un peligro. Integra aspectos infraestructurales y socioeconómicos con la amenaza de inundación para producir un mapa espacialmente explícito de la resiliencia. Una característica notable de su formulación es que los subíndices de peligro, exposición y susceptibilidad se restan de la unidad. Esta construcción asegura que valores más altos del índice S-FRESI representen una mayor resiliencia, lo que ocurre cuando las consecuencias negativas del peligro se minimizan.

Aunque los indicadores compuestos son herramientas poderosas para la evaluación comparativa y la planificación, uno de sus mayores desafíos metodológicos es la ponderación de sus componentes. Determinar la importancia relativa de cada variable o dimensión a menudo requiere la integración de juicios de expertos, un desafío que se aborda comúnmente con métodos de decisión multicriterio.

6. Metodologías Híbridas de Decisión Multicriterio (MCDM)

Las metodologías de Decisión Multicriterio (MCDM), por sus siglas en inglés, son herramientas analíticas valiosas para integrar el juicio cualitativo de expertos en marcos de evaluación cuantitativos. Esta integración es particularmente crucial en la evaluación de la resiliencia, donde la importancia relativa de diferentes indicadores (p. ej., infraestructura, capacidad económica, capital social) puede variar significativamente según el contexto local y el tipo de amenaza. Los métodos MCDM proporcionan un proceso estructurado y transparente para asignar pesos a los indicadores de resiliencia, reflejando su importancia percibida por actores locales y expertos.

7. El Método Híbrido AHP-TOPSIS

Una de las combinaciones más utilizadas en la literatura sobre resiliencia es el enfoque híbrido que une el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP) con la Técnica de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS). Como se describe en el trabajo de Moghadas et al. (2019) para evaluar la resiliencia urbana ante inundaciones, este método se desarrolla en un proceso de dos pasos:

- Proceso de Jerarquía Analítica (AHP): En la primera etapa, el AHP se utiliza para derivar los pesos de los criterios e indicadores de resiliencia. Este método se basa en una serie de comparaciones pareadas realizadas por un grupo de expertos. Los expertos evalúan la importancia relativa de cada indicador frente a todos los demás. Estas comparaciones se sintetizan matemáticamente para generar un vector de pesos que refleja el consenso del grupo de expertos.
- Técnica de Preferencia por Similitud con la Solución Ideal (TOPSIS): Una vez que se han establecido los pesos, el método TOPSIS se utiliza para clasificar las alternativas de evaluación (p. ej., diferentes distritos urbanos). TOPSIS calcula la distancia euclidiana de cada alternativa a dos puntos de referencia hipotéticos: una "solución ideal positiva" (máxima resiliencia) y una "solución ideal negativa" (mínima resiliencia). Las alternativas se clasifican en función de su proximidad relativa a la solución ideal positiva.

La combinación AHP-TOPSIS permite así una evaluación comparativa y una clasificación jerárquica de la resiliencia a nivel local, fundamentada tanto en datos cuantitativos como en el conocimiento contextual de los expertos.

8. Otras Aproximaciones Relevantes

Además del AHP-TOPSIS, en la literatura se han empleado otras técnicas MCDM y enfoques híbridos para abordar los desafíos de la ponderación y la incertidumbre:

- **Ponderación Combinada AHP-Entropía:** Este método, utilizado por Yoon et al. (2024), combina los pesos subjetivos derivados del AHP (juicio de expertos) con los pesos objetivos derivados del método de la entropía. El método de la entropía asigna mayores pesos a los indicadores que muestran mayor variabilidad entre las alternativas. La combinación de ambos enfoques equilibra la experiencia cualitativa con las propiedades estadísticas de los datos.
- **Lógica Difusa Hesitante (*Hesitant Fuzzy Logic*):** Para manejar la vaguedad, la incertidumbre y la subjetividad inherentes a las evaluaciones de los expertos, algunos estudios como el de Li et al. (2019) emplean la lógica difusa. Específicamente, la lógica difusa hesitante permite a los expertos expresar sus juicios no como un único valor, sino como un conjunto de valores posibles, capturando así su indecisión o la falta de consenso de manera más robusta.

Estos métodos híbridos, al formalizar la inclusión del conocimiento experto y la gestión de la incertidumbre, representan la frontera actual en la evaluación de la resiliencia, aunque su implementación exitosa subraya los desafíos persistentes en la validación de modelos y la integración de datos, temas que se abordan en la síntesis final.

9. Desafíos y Direcciones Futuras

Esta revisión ha explorado un espectro de marcos y metodologías para la evaluación de la resiliencia ante desastres, abarcando desde los modelos conceptuales fundamentales hasta enfoques cuantitativos y cualitativos específicos. Se han analizado los modelos conceptuales como el "Triángulo de la Resiliencia", las metodologías cuantitativas centradas en el desempeño de la infraestructura, los enfoques holísticos de indicadores compuestos como SoVI y BRIC, y los métodos híbridos de decisión multicriterio (MCDM). Cada enfoque ofrece una perspectiva única, pero también presenta limitaciones.

La siguiente tabla resume los enfoques metodológicos clave discutidos, destacando sus fortalezas y los desafíos asociados a su implementación.

Tabla 1: Resumen enfoques metodológicos

Enfoque Metodológico	Fortalezas Clave	Limitaciones y Desafíos
Triángulo de Resiliencia	Conceptualización intuitiva del impacto y la recuperación a lo largo del tiempo; cuantifica robustez y rapidez.	Requiere datos de series temporales del desempeño del sistema, que pueden ser difíciles de obtener post-desastre.
Indicadores Compuestos (SoVI, BRIC)	Visión holística y multidimensional; permite la comparación y clasificación espacial; útil para la planificación a nivel de políticas.	La selección y ponderación de variables pueden ser subjetivas; no captura la dinámica temporal del desastre, una <i>fortaleza clave del enfoque del Triángulo de Resiliencia</i> .
MCDM (AHP-TOPSIS)	Integra formalmente el conocimiento de expertos locales; transparente en la ponderación y clasificación.	Dependiente de la disponibilidad y el consenso de los expertos; puede ser computacionalmente intensivo con muchas variables/alternativas.
Modelos de Desempeño de Redes	Alta especificidad técnica; útil para el análisis de criticidad y la optimización de estrategias de recuperación de infraestructura.	A menudo no consideran las dimensiones sociales o económicas, que <i>son el foco principal de los indicadores compuestos como SoVI y BRIC</i> .

A pesar de los avances metodológicos, persisten varios desafíos fundamentales en el campo:

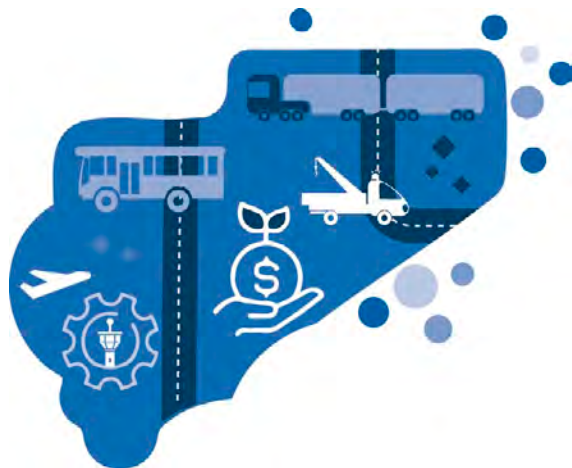
- **Validación de Modelos:** Un problema recurrente, especialmente para los modelos de indicadores compuestos, es la dificultad de validar si realmente representan un concepto abstracto como la resiliencia (Cutter et al., 2014). La falta de datos de "verdad terreno" hace que la validación empírica sea un desafío significativo.
- **Integración de Conocimientos:** Existe una necesidad crítica de integrar mejor el conocimiento técnico y experto con el conocimiento local y no experto. Como señalan Robson et al. (2025) y May et al. (2021), las perspectivas de las comunidades afectadas son vitales para una evaluación contextualizada, pero a menudo se subestiman en los modelos puramente cuantitativos.
- **Abordar las Interdependencias:** Las infraestructuras críticas no operan de forma aislada, están altamente interconectadas. La falla de un sistema puede provocar fallas en cascada en otros. Modelar estas complejas interdependencias sigue siendo un desafío técnico y de datos considerable (Evans et al., 2018).

Para avanzar en el campo de la evaluación de la resiliencia, la investigación futura debería centrarse en varias áreas clave. La investigación debería aspirar a desarrollar modelos híbridos donde los resultados de los índices compuestos, como la puntuación BRIC de una comunidad, se utilicen para parametrizar la rapidez de la recuperación dentro de una simulación del "Triángulo de la Resiliencia". Esto vincularía directamente las capacidades inherentes de la comunidad con el desempeño dinámico de su infraestructura crítica post-desastre. Adicionalmente, se necesitan metodologías que manejen explícitamente la incertidumbre inherente a los datos de desastres y a los juicios de expertos. Finalmente, la investigación debe continuar explorando formas innovadoras de incorporar el conocimiento local y participativo en los modelos formales, asegurando que las evaluaciones de resiliencia no solo sean técnicamente rigurosas, sino también socialmente relevantes y equitativas.

III



Fundamentos de la Evaluación de Proyectos de Infraestructura



1. Infraestructura y Niveles de Servicio

La infraestructura constituye el pilar sobre el cual se erige el desarrollo económico y social de una nación. Su importancia estratégica va más allá de facilitar el crecimiento económico, es la base para la provisión de servicios esenciales que sustentan el bienestar social, la equidad y la calidad de vida de los ciudadanos. Desde las redes viales que conectan mercados y comunidades hasta los sistemas energéticos que alimentan hogares e industrias, la infraestructura es el motor que impulsa la productividad y la cohesión social.

Las redes de infraestructura, como las viales y energéticas, son componentes cruciales para el funcionamiento de las actividades económicas, la movilidad de las personas y la operación de otros sistemas críticos interdependientes. Estudios han demostrado que las malas condiciones de las carreteras, por ejemplo, pueden restringir significativamente el crecimiento socioeconómico de un país (Shtayat et al., 2022). La longevidad y el estado de la infraestructura vial dependen de factores como las cargas de tráfico, el clima y la calidad de la construcción, y su deterioro progresivo puede generar un aumento de los costos para los usuarios, problemas de seguridad y efectos en cascada sobre otros sistemas (Allen et al., 2025). Por lo tanto, la inversión en el mantenimiento y la mejora de la infraestructura no es solo una cuestión de conveniencia, sino una necesidad estratégica para el desarrollo sostenible.

La relación entre los niveles de servicio de la infraestructura y el bienestar social es directa e innegable. Las interrupciones en la provisión de servicios esenciales, como los cortes de energía o las inundaciones de vías, impactan de manera desproporcionada a las comunidades, afectando su vida cotidiana y su seguridad. Por ejemplo, estudios cuantitativos han demostrado que las inundaciones pueden reducir drásticamente la accesibilidad de los servicios de emergencia. En el caso de una inundación fluvial, la cobertura de dos estaciones de bomberos se vio reducida en un 14% y un 39%, respectivamente, comprometiendo su capacidad de respuesta en situaciones críticas (Coles et al., 2017). Asimismo, los desastres pueden provocar el desplazamiento de hogares, generando profundas crisis sociales y económicas para las familias afectadas (van de Lindt et al., 2020). Las interrupciones también generan pérdidas económicas directas para los usuarios, como el aumento de los Costos de Operación de Vehículos (VOC) y del Valor del Tiempo (VoT) debido a retrasos en las reparaciones viales (Yunto et al., 2024). En este contexto, el concepto de "estándares mínimos de suministro" emerge como un elemento clave para la protección social, definiendo los niveles básicos de servicio que deben garantizarse incluso durante las crisis para proteger a la población (Garschagen & Sandholz, 2018).

Esta dependencia crítica del bienestar social respecto al rendimiento de la infraestructura exige un marco formal para evaluar los proyectos no solo en función de su eficiencia en condiciones normales, sino también de su capacidad para mantener ese rendimiento bajo tensión, el dominio de la Evaluación Social de Proyectos (ESP).

2. Evaluación Social de Proyectos de Infraestructura (ESP)

La Evaluación Social de Proyectos (ESP) es el instrumento mediante el cual los gobiernos y las agencias de planificación determinan la conveniencia de una inversión desde la perspectiva del bienestar colectivo. Tradicionalmente, este análisis se ha centrado en cuantificar los costos y beneficios directos y fácilmente medibles, como los costos de construcción frente a los ahorros en tiempo de viaje o los ingresos generados. Sin embargo, en un mundo caracterizado por riesgos sistémicos y crecientes, los enfoques modernos de la ESP deben evolucionar para capturar impactos más complejos y dinámicos, especialmente aquellos relacionados con los riesgos de desastre y la resiliencia de los sistemas.

Los enfoques tradicionales de evaluación a menudo presentan limitaciones significativas en el contexto actual. Las metodologías que se centran en evaluar componentes de infraestructura de forma aislada, en lugar de analizar su función dentro de la red completa, son insuficientes para comprender los riesgos sistémicos (Seo et al., 2022). De manera similar, los análisis que no logran capturar los efectos sociales más amplios y las cascadas de fallos que pueden propagarse a través de infraestructuras interdependientes subestiman gravemente el verdadero costo de una interrupción (Garschagen & Sandholz, 2018). Por ejemplo, la falla de una subestación eléctrica no solo interrumpe el suministro de energía, sino que también puede afectar las comunicaciones, el suministro de agua y los servicios de salud, generando impactos en cascada que los análisis convencionales no logran cuantificar.

La incorporación de criterios de resiliencia en la ESP no es una opción, sino un requisito técnico y de política pública para la gestión responsable de la inversión en infraestructura. Esta integración permite ir más allá de la simple evaluación de la eficiencia de un proyecto en condiciones normales y analizar cómo contribuye a la capacidad del sistema para resistir, adaptarse y recuperarse de perturbaciones. Al hacerlo, se pueden cuantificar beneficios indirectos que a menudo se pasan por alto. Por ejemplo, considérese un proyecto para construir una nueva carretera paralela a una ruta principal existente. Un análisis tradicional de ESP podría concluir que el proyecto no es rentable, ya que solo cuantifica los ahorros de tiempo de viaje en condiciones normales, que pueden ser marginales. En contraste, una ESP informada por la resiliencia evaluaría cómo la nueva carretera (que añade redundancia a la red) reduce los costos de mantenimiento futuros en la ruta principal al desviar el tráfico durante reparaciones (Allen et al., 2025) y, de manera crucial, cuantificaría el valor de mantener el acceso a hospitales durante una inundación que inutilice la ruta principal (Coles et al., 2017). Este segundo enfoque revela un beneficio social de enorme valor que justifica la inversión. De igual forma, un proyecto que fortalece la infraestructura crítica en una comunidad vulnerable puede mitigar el impacto social de un desastre, reduciendo la probabilidad de desplazamiento de hogares y la pérdida de acceso a servicios esenciales (van de Lindt et al., 2020).

En definitiva, la incorporación de la resiliencia no debe ser vista como un complemento opcional a la ESP, sino como una evolución necesaria de la misma. Permite una toma de decisiones más informada y robusta, asegurando que las inversiones públicas no solo generen valor económico, sino que también construyan una sociedad más segura y preparada para un futuro de creciente incertidumbre.

3. Debates y Visiones Actuales

El debate sobre la resiliencia de la infraestructura se enmarca en un contexto global de creciente conciencia sobre los riesgos sistémicos. Marcos internacionales como el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030) han sido catalizadores clave, impulsando un cambio de paradigma a nivel mundial (Cradock-Henry et al., 2025). La creciente frecuencia de eventos climáticos extremos y crisis complejas, como la pandemia de COVID-19, ha acelerado esta transición, obligando a gobiernos y planificadores a repensar cómo se diseña, construye y gestiona la infraestructura para garantizar la continuidad de los servicios esenciales en un mundo cada vez más volátil.

Las tendencias globales reflejan un consenso emergente en torno a la necesidad de enfoques más proactivos y sistémicos. Se observa un claro desplazamiento desde una lógica centrada en la supresión de desastres hacia una mayor inversión en preparación y adaptación proactiva (Arango et al., 2025). Esto implica la adopción de enfoques multiamenaza que consideran la interacción y superposición de diferentes peligros, en lugar de analizarlos de forma aislada (Nicholas et al., 2025). Asimismo, se reconoce cada vez más la importancia de integrar la vulnerabilidad social en el análisis de riesgos. Esto significa comprender cómo factores como la pobreza, la edad, el acceso a recursos y la composición étnica de una comunidad influyen en su capacidad para enfrentar y recuperarse de una interrupción de servicios, permitiendo así intervenciones más equitativas (Rouhana et al., 2025; Wang et al., 2025).

El cambio climático y los riesgos de desastres plantean desafíos sin precedentes para la infraestructura moderna. Un concepto clave es el de los peligros compuestos, donde múltiples eventos de riesgo ocurren simultáneamente o en secuencia, amplificando su impacto. Un ejemplo claro es la superposición de la temporada de huracanes con la pandemia de COVID-19, que crea complejos dilemas para la evacuación y el refugio seguro (Dargin et al., 2021). Otro desafío fundamental son los fallos en cascada a través de infraestructuras interdependientes. La falla de un sistema, como la red eléctrica, puede desencadenar una serie de fallas en otros sistemas que dependen de él. Por ejemplo, una inundación costera que inutiliza la infraestructura eléctrica no solo deja a la población sin energía, sino que también puede paralizar los sistemas de telecomunicaciones, el bombeo de agua potable, y la operación de grúas y sistemas logísticos en un puerto, magnificando el impacto inicial y generando disrupciones económicas en cascada (Theocharidou et al., 2018). Finalmente, la creciente frecuencia e intensidad de los eventos climáticos extremos exige que la infraestructura sea diseñada no solo para las condiciones históricas, sino para un futuro climático incierto y más severo (Theocharidou et al., 2018).

Este panorama global de riesgos complejos y visiones emergentes sobre la resiliencia proporciona el contexto necesario para examinar y fortalecer el marco normativo y político a nivel nacional.

4. Marco Normativo y Político Nacional

Para que la resiliencia de la infraestructura se traduzca de un concepto abstracto a una práctica de inversión tangible, es indispensable contar con un marco normativo y político sólido y coherente. Este marco actúa como la columna vertebral que guía las decisiones de inversión, define las responsabilidades de los distintos actores, establece estándares técnicos y de rendimiento, y alinea los esfuerzos de las agencias gubernamentales a nivel nacional, regional y local. Sin una guía clara desde el ámbito público, las iniciativas para construir resiliencia corren el riesgo de ser fragmentadas, ineficientes y, en última instancia, insuficientes para enfrentar los desafíos sistémicos que se avecinan.

La legislación vigente proporciona el andamiaje sobre el cual se construye la gestión de la infraestructura y la resiliencia. Por un lado, existen marcos regulatorios específicos que gobiernan el funcionamiento de las agencias sectoriales, como las agencias viales, estableciendo sus mandatos, fuentes de financiamiento y responsabilidades en cuanto al mantenimiento y la operación de los activos (Shtayat et al., 2022). Por otro lado, los marcos de gestión de desastres, a menudo alineados con principios internacionales como los del Marco de Sendai, establecen los parámetros para la rendición de cuentas, la coordinación interinstitucional y la acción conjunta antes, durante y después de una crisis (Cradock-Henry et al., 2025). La sinergia entre estas distintas piezas legislativas es crucial para garantizar que los objetivos de resiliencia se integren de manera transversal en todas las áreas de la administración pública.

Las políticas públicas y las estrategias nacionales son las herramientas clave para traducir los objetivos de resiliencia en acciones concretas y financiables. Las políticas de adaptación al cambio climático, por ejemplo, pueden orientar la selección de proyectos que reduzcan la vulnerabilidad a largo plazo, promoviendo soluciones basadas en la naturaleza o la actualización de códigos de construcción (Arango et al., 2025). Los planes de reconstrucción post-desastre ofrecen una oportunidad crítica para "reconstruir mejor" (*build back better*), incorporando lecciones aprendidas y estándares de resiliencia más altos en la nueva infraestructura para evitar la repetición de vulnerabilidades pasadas (Aydin et al., 2025). Finalmente, las estrategias de mitigación de riesgos, que pueden incluir desde la reubicación de activos críticos hasta el fortalecimiento sísmico de puentes, son fundamentales para reducir de manera proactiva la exposición y la fragilidad del sistema (van de Lindt et al., 2020).

Un marco político y normativo claro no solo legitima y orienta la inversión en resiliencia, sino que también proporciona la base para la definición técnica de qué se entiende por resiliencia y cómo se medirá su progreso, tema que se abordará en la siguiente sección.

IV



LA RESILIENCIA DE LA INFRAESTRUCTURA: Un Enfoque Multidimensional



La resiliencia de la infraestructura es un concepto multidimensional que trasciende la simple resistencia física a un evento. Se define como la capacidad de un sistema para anticipar, absorber, adaptarse y recuperarse de una perturbación, manteniendo o restaurando rápidamente sus funciones esenciales. Una forma útil de visualizar este proceso es a través del "triángulo de resiliencia" (Bruneau & Reinhorn, 2007, citado en Lu et al., 2025), que ilustra gráficamente la pérdida de rendimiento de un sistema tras un evento disruptivo y su posterior trayectoria de recuperación en el tiempo. El área de este triángulo representa la pérdida total de funcionalidad, y el objetivo de las estrategias de resiliencia es minimizar esta área, ya sea reduciendo la magnitud de la caída inicial (robustez) o acelerando la velocidad de la recuperación (rapidez). Para operacionalizar este concepto, la resiliencia se descompone en varias propiedades o dimensiones clave.

A partir de una síntesis de la literatura académica (Sohouenou, 2022; Zhang et al., 2017), se pueden identificar los siguientes componentes fundamentales de la resiliencia:

- **Robustez:** Es la capacidad inherente de un sistema o sus componentes para soportar un nivel determinado de tensión o perturbación sin sufrir una degradación significativa de su rendimiento. Se refiere a la fortaleza del sistema frente a un impacto inicial. Por ejemplo, un puente diseñado con estándares sísmicos elevados que sobrevive a un terremoto sin daños estructurales demuestra un alto grado de robustez.
- **Redundancia:** Mide la medida en que existen elementos, sistemas o capacidades sustituibles que pueden ser activados en caso de que un componente principal falle. La redundancia asegura que la falla de un solo elemento no conduzca al colapso de todo el sistema, proporcionando rutas o servicios alternativos. Una red vial con múltiples rutas para conectar dos puntos importantes es un ejemplo de un sistema con alta redundancia.
- **Recursividad:** Se refiere a la capacidad de una organización o comunidad para identificar problemas, establecer prioridades y movilizar recursos de manera eficiente cuando ocurre una perturbación. Esta dimensión, conocida en inglés como *resourcefulness*, abarca la capacidad de gestión de crisis, la planificación de contingencias y la habilidad para improvisar y encontrar soluciones bajo presión.
- **Rapidez (Capacidad de Recuperación):** Es la velocidad con la que un sistema puede recuperar su nivel de rendimiento normal o aceptable después de haber sufrido una perturbación. La rapidez depende de la eficacia de los planes de reparación, la disponibilidad de recursos y la capacidad para ejecutar las tareas de restauración de manera coordinada.
- **Adaptabilidad:** Es la capacidad de un sistema para ajustarse a nuevas condiciones y, fundamentalmente, para aprender de eventos pasados con el fin de mejorar su resiliencia futura. La adaptabilidad implica la revisión de diseños, la actualización de protocolos de operación y la modificación de estrategias de gestión basadas en las lecciones aprendidas de crisis anteriores, transformando los desafíos en oportunidades de mejora.

1. Principios de la Infraestructura Resiliente

Para guiar el diseño, la planificación y la gestión de infraestructuras que encarnen las dimensiones de la resiliencia es fundamental adherirse a un conjunto de principios rectores. Estos principios no solo informan las decisiones técnicas, sino que también promueven un enfoque holístico que considera las interacciones entre los sistemas de infraestructura, el entorno natural y las comunidades a las que sirven.

Diseño Sostenible y Adaptable

El primer principio fundamental es la adopción de un diseño que sea tanto sostenible como inherentemente adaptable. La resiliencia a largo plazo no se logra únicamente con estructuras más robustas, sino integrando un portafolio diversificado de medidas de adaptación. Estas medidas se pueden clasificar en tres categorías que deben trabajar en sinergia (Arango et al., 2025):

- **Medidas "verdes"**: Son soluciones basadas en la naturaleza que utilizan los ecosistemas y sus procesos para mitigar riesgos. Un ejemplo prominente es la creación de espacios verdes urbanos, como parques, humedales y zonas de vegetación ribereña, para la gestión de aguas pluviales. Estos espacios funcionan absorbiendo y almacenando el exceso de agua, reduciendo la escorrentía superficial y, por tanto, el riesgo de inundaciones urbanas. La efectividad de estas medidas depende de su escala, ubicación y del tipo de suelo, que influye en la capacidad de infiltración (Hinojos et al., 2023). Otros ejemplos incluyen la restauración de dunas costeras para proteger contra la erosión y las marejadas.
- **Medidas "grises"**: Comprenden las intervenciones de ingeniería tradicionales o barreras físicas diseñadas para proteger la infraestructura. Esto incluye la construcción de diques, muros de contención, barreras contra inundaciones, o el reforzamiento estructural de puentes y edificios para resistir cargas sísmicas o de viento. Si bien son efectivas para peligros específicos, las soluciones grises pueden ser costosas, rígidas y, en ocasiones, transferir el riesgo a otras áreas.
- **Medidas "blandas"**: Abarcan soluciones no estructurales que se centran en la gestión, las políticas y el comportamiento humano. Ejemplos de esto son el desarrollo de sistemas de alerta temprana, la creación de planes de evacuación, la implementación de códigos de construcción más estrictos, la zonificación del uso del suelo para evitar la construcción en zonas de alto riesgo y la educación comunitaria para aumentar la conciencia sobre los riesgos.

La combinación inteligente de estas tres tipologías de medidas permite construir una resiliencia multicapa. Por ejemplo, en una zona costera, se podría combinar la restauración de manglares (verde) con la construcción de un dique (gris) y la implementación de un sistema de alerta de marejadas (blanda), creando una defensa más robusta y adaptable que si se dependiera de una sola medida.

Enfoque Basado en Sistemas

El segundo principio clave es la adopción de un enfoque basado en sistemas. La infraestructura moderna rara vez funciona de manera aislada, por el contrario, forma una compleja red de componentes interdependientes donde el fallo de un solo elemento puede tener consecuencias de gran alcance. Un análisis de resiliencia efectivo debe, por lo tanto, evaluar la infraestructura no como una colección de activos individuales, sino como un sistema integrado. Este enfoque permite identificar vulnerabilidades críticas que surgen de las interdependencias y que podrían pasar desapercibidas en un análisis centrado en componentes.

Por ejemplo, al analizar redes de transporte, no basta con evaluar la resistencia de un puente individual. Es crucial comprender cómo la falla de ese puente afecta la topología y conectividad de toda la red, alterando los flujos de tráfico, los tiempos de viaje y la accesibilidad a servicios esenciales (Kermanshah & Derrible, 2016). Un enfoque de sistemas, a menudo utilizando la teoría de grafos, permite modelar estos efectos en cascada. Se puede cuantificar cómo la eliminación de ciertos enlaces (puentes o carreteras) impacta métricas de rendimiento de la red, como la eficiencia global o la centralidad de intermediación de otros componentes, y evaluar cómo la redundancia de la red y la disponibilidad de rutas alternativas contribuyen a su rendimiento global bajo estrés. Este análisis sistémico es indispensable para priorizar inversiones y diseñar intervenciones que fortalezcan la resiliencia del sistema en su conjunto, no solo de sus partes individuales.

2. Necesidades, Alcances e Integración en la ESP

La necesidad fundamental de incorporar la resiliencia en la planificación de la infraestructura es clara: reducir los devastadores impactos socioeconómicos de los desastres. Esto implica proteger a las poblaciones más vulnerables, que a menudo son las más afectadas por las interrupciones de servicios, y garantizar la continuidad de las funciones esenciales que sustentan la vida económica y social de una comunidad. El alcance de la resiliencia, por lo tanto, debe ser integral, abarcando desde la planificación estratégica y el diseño de proyectos hasta su operación, mantenimiento y eventual recuperación post-desastre.

Para lograr una integración efectiva en la Evaluación Social de Proyectos (ESP), se propone un enfoque que combine de manera explícita y cuantitativa los conceptos de **robustez y redundancia**. Tradicionalmente, la ESP se ha centrado en evaluar la robustez de un nuevo activo de infraestructura de forma aislada: ¿cuán resistente es este nuevo puente a un terremoto? ¿qué nivel de inundación puede soportar esta nueva carretera? Si bien esto sigue siendo crucial, un enfoque de resiliencia exige ir un paso más allá.

La ESP debe evaluar no solo la robustez del nuevo activo, sino también cómo su incorporación al sistema mejora la **redundancia** general de la red. En otras palabras, ¿cómo este nuevo proyecto ofrece rutas, capacidades o servicios alternativos que pueden ser activados en caso de que otros componentes del sistema fallen? Por ejemplo, al evaluar un nuevo proyecto vial, el análisis no debe limitarse a los beneficios de tiempo de viaje en condiciones normales. Debe cuantificar el valor de esa nueva ruta como una alternativa vital si una carretera principal existente se vuelve intransitable debido a una inundación o un deslizamiento de tierra. Este beneficio, a menudo ignorado, representa un aumento en la resiliencia de toda la red de transporte y tiene un valor social y económico tangible que debe ser capturado en la ESP.

Este enfoque integrado asegura que la ESP no solo favorezca proyectos que son eficientes en el día a día, sino también aquellos que fortalecen la capacidad del sistema en su conjunto para hacer frente a lo inesperado. A continuación, se explorarán las metodologías específicas que permiten llevar a cabo estas evaluaciones de manera rigurosa.



METODOLOGÍAS PARA EVALUAR LA RESILIENCIA: Contexto y Propuestas



1. Contexto Internacional y Nacional

La evaluación de la resiliencia de la infraestructura ha evolucionado rápidamente, convirtiéndose en un campo de investigación y práctica cada vez más sofisticado. Aunque todavía no existe un único método estandarizado universalmente aceptado, ha surgido un consenso claro en la comunidad internacional sobre los principios que deben guiar estas evaluaciones. Los enfoques más avanzados son cuantitativos, tienen un fuerte componente espacial y buscan integrar múltiples dimensiones del riesgo, incluyendo los peligros físicos, la vulnerabilidad de la infraestructura y las condiciones socioeconómicas de las comunidades.

Estándares y marcos internacionales, como los promovidos por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) a través del Marco de Sendai, han sido fundamentales para orientar este campo. Estos marcos abogan por enfoques que sean multiamenaza, es decir, que consideren la posibilidad de que múltiples peligros (como terremotos, inundaciones y tormentas) afecten a una región, y que estén centrados en las personas, poniendo el énfasis en cómo las interrupciones de la infraestructura impactan el bienestar y la seguridad de la población (Nicholas et al., 2025; Craddock-Henry et al., 2025).

En el estado del arte metodológico, han surgido diversas familias de modelos y técnicas para cuantificar y analizar la resiliencia. La siguiente tabla resume las principales aproximaciones identificadas en la literatura científica, junto con su descripción y ejemplos de aplicación extraídos de las fuentes consultadas.

Tabla 2. Sistematización de modelos

Tipo de Metodología	Descripción y Aplicación
Modelos Basados en Teoría de Grafos y Redes	Representan la infraestructura como una red de nodos (intersecciones, subestaciones) y enlaces (carreteras, líneas de transmisión). Se utilizan para analizar la conectividad, la robustez topológica y simular fallos en cascada. Por ejemplo, se emplean para evaluar cómo la eliminación de ciertos enlaces viales afecta la eficiencia global de una red de transporte (Kermanshah & Derrible, 2016; Allen et al., 2025).
Análisis Espacial con Sistemas de Información Geográfica (SIG)	Utilizan plataformas SIG para superponer capas de información geoespacial, como mapas de peligros (inundaciones, sismos), la ubicación de activos de infraestructura y datos demográficos. Son fundamentales para la evaluación de la exposición al riesgo. Por ejemplo, se utilizan para identificar carreteras y centros de atención vulnerables que quedan inaccesibles durante una inundación (Coles et al., 2017).
Índices de Vulnerabilidad Social (SoVI)	Construyen indicadores compuestos a partir de variables censales (ingresos, edad, etnia, nivel educativo) para identificar geográficamente las poblaciones con menor capacidad para enfrentar y recuperarse de un desastre. Por ejemplo, se emplean para mapear la distribución espacial de la vulnerabilidad social en áreas urbanas y rurales a lo largo del tiempo (Wang et al., 2025; Rouhana et al., 2025).
Modelos de Decisión Multicriterio (MCDM)	Ayudan a estructurar problemas complejos de toma de decisiones donde múltiples objetivos, a menudo en conflicto (costo, seguridad, impacto ambiental), deben ser considerados. Técnicas como AHP, TOPSIS y VIKOR se utilizan para ponderar y clasificar alternativas. Por ejemplo, se aplican para evaluar y clasificar la resiliencia a inundaciones de distritos urbanos, combinando la opinión de expertos con datos cuantitativos (Moghadas et al., 2019; Z. Li et al., 2019).
Modelos de Aprendizaje Automático (Machine Learning)	Utilizan algoritmos (como CatBoost, Redes Neuronales) para identificar patrones y predecir resultados a partir de grandes conjuntos de datos históricos. Por ejemplo, se entrenan para predecir el nivel de pérdidas económicas directas causadas por ciclones tropicales, basándose en variables de peligro y exposición (Zheng et al., 2025; Seo et al., 2022).
Modelos Hidrodinámicos y Geomecánicos	Simulan procesos físicos complejos para predecir la extensión y la intensidad de los peligros. Los modelos hidrodinámicos (ej. FloodMap, HEC-RAS) simulan la propagación de inundaciones (Coles et al., 2017), mientras que los modelos geomecánicos pueden simular deslizamientos de tierra (Dave, 2021).
Modelos de Evaluación Económica	Cuantifican los impactos económicos de las interrupciones. Esto incluye modelos para estimar el aumento de los Costos para los Usuarios de Carreteras (RUC), como los Costos de Operación de Vehículos (VOC) y el Valor del Tiempo (VoT), debido a daños y retrasos en la reparación (Yunto et al., 2024), o la variación en los costos de mantenimiento de la red debido al desvío de tráfico (Allen et al., 2025).

2. Propuestas Metodológicas Internacionales

La literatura internacional ofrece una variedad de marcos metodológicos que ilustran la aplicación de estos principios en la práctica. Los siguientes tres ejemplos han sido seleccionados para demostrar cómo se abordan problemas clave: el análisis integrado de peligros múltiples, la optimización operativa post-desastre y la evaluación espacialmente explícita del riesgo social.

2.1. Marco de Riesgo de Peligros Compuestos:

- **Objetivo:** Este marco busca evaluar el riesgo que surge de la interacción simultánea de múltiples peligros, un desafío cada vez más común en el contexto del cambio climático y las crisis globales. Dargin et al. (2021) proponen un enfoque para analizar el riesgo compuesto de una temporada de huracanes que ocurre en medio de la pandemia de COVID-19.
- **Componentes:** El marco integra tres dimensiones de riesgo: (1) la exposición a la pandemia, medida a través de la movilidad de la población y los patrones de visita a puntos de interés (POI), (2) la vulnerabilidad a los huracanes, evaluada mediante la interrupción del acceso a hospitales debido a inundaciones, y (3) la vulnerabilidad social de la comunidad, utilizando el Índice de Vulnerabilidad Social (SoVI).
- **Conocimiento Generado:** Al superponer estas capas de riesgo, el marco permite identificar "zonas de riesgo compuesto", es decir, áreas geográficas que enfrentan simultáneamente un alto riesgo de transmisión viral, una alta vulnerabilidad a la interrupción de servicios de salud por el huracán y una elevada vulnerabilidad social. Esta información es crucial para que las autoridades prioricen recursos, planifiquen centros de salud temporales en zonas de bajo riesgo y diseñen estrategias de evacuación más seguras.

2.2. Marco de Optimización de la Recuperación Post-desastre:

- **Objetivo:** Este enfoque se centra en la fase de recuperación y busca optimizar la programación de las actividades de restauración de la infraestructura para minimizar el impacto social y económico. Zhang et al. (2017) desarrollan un marco para optimizar los cronogramas de reparación de una red de puentes después de un terremoto.
- **Componentes:** La metodología utiliza dos métricas clave para evaluar la rapidez y eficiencia de la recuperación: (1) el Tiempo Total de Recuperación (TRT), que es el tiempo necesario para que la red vuelva a su nivel de funcionalidad pre-desastre, y (2) la Trayectoria de Recuperación (SRT), una métrica que captura la eficiencia de la recuperación en sus etapas iniciales, priorizando estrategias que restauran la mayor cantidad de funcionalidad lo más rápido posible. El marco utiliza algoritmos de optimización, como los algoritmos genéticos, para encontrar las secuencias de reparación que minimizan una combinación ponderada de TRT y SRT.

- **Conocimiento Generado:** El resultado es un conjunto de "soluciones pareto-óptimas", que representan diferentes cronogramas de restauración con distintos equilibrios entre el tiempo total y la eficiencia inicial. Esto proporciona a los tomadores de decisiones un portafolio de estrategias de recuperación, permitiéndoles seleccionar la que mejor se alinee con sus prioridades, ya sea la restauración completa más rápida o la recuperación acelerada de los servicios más críticos en la fase inicial.

2.3. Marco de Evaluación del Riesgo Social ante Inundaciones:

- **Objetivo:** Esta metodología tiene como fin identificar las áreas urbanas y los grupos de población con mayor riesgo social frente a las inundaciones, integrando las dimensiones de peligro, exposición y vulnerabilidad. Lapietra et al. (2025) aplican este marco a nivel de área de enumeración censal en ciudades italianas.
- **Componentes:** El análisis se desarrolla en cuatro pasos: (1) Evaluación del peligro de inundación, utilizando datos hidrológicos para mapear las áreas susceptibles de inundarse; (2) Cálculo de la exposición de la población, estimando el número de habitantes en las zonas de peligro; (3) Evaluación de la vulnerabilidad social, construyendo un índice a partir de variables demográficas y socioeconómicas como la edad, el nivel educativo y las condiciones de la vivienda; y (4) Integración y mapeo del riesgo social, combinando las tres capas anteriores para crear mapas de riesgo que identifican las áreas críticas.
- **Conocimiento Generado:** El marco produce mapas detallados que visualizan las "áreas críticas" donde se superponen un alto peligro de inundación, una alta densidad de población y una alta vulnerabilidad social. Estos resultados son de gran valor para las estrategias de reducción del riesgo de desastres, ya que permiten a los planificadores urbanos y a las agencias de protección civil enfocar las intervenciones (como la mejora de infraestructuras de drenaje o la implementación de sistemas de alerta temprana) en las zonas y comunidades que más lo necesitan.

Estas propuestas, aunque se enfocan en diferentes peligros y fases del ciclo del desastre, comparten un hilo conductor: la necesidad de un análisis cuantitativo, especialmente explícito e integrador para informar una toma de decisiones más eficaz y equitativa en la gestión de la resiliencia de la infraestructura.

Tabla 3. Resumen de modelos

Criterio	Marco de Riesgo de Peligros Compuestos	Marco de Optimización de Recuperación Post-Desastre	Marco de Evaluación del Riesgo Social ante Inundaciones
Objetivo principal	Evaluar riesgo por interacción de peligros simultáneos (pandemia + huracán).	Optimizar programación de reparación post-desastre.	Identificar áreas y poblaciones con mayor riesgo social frente a inundaciones.
Tipo de riesgo abordado	Riesgos compuestos y concurrentes.	Riesgo post-desastre.	Riesgo de inundación con énfasis social.
Componentes principales	Exposición a pandemia, vulnerabilidad a huracanes, vulnerabilidad social.	Tiempo total y trayectoria de recuperación, algoritmos de optimización.	Peligro, exposición y vulnerabilidad social, mapas integrados.
Unidad de análisis	Zonas geográficas.	Red de infraestructura crítica.	Áreas urbanas a nivel censal.
Método analítico	Superposición de capas de riesgo.	Optimización multiobjetivo.	Integración espacial de capas de riesgo.
Herramientas utilizadas	Datos de movilidad, SoVI, multi-hazard.	Algoritmos genéticos, simulación.	SIG, análisis hidrológico, índices sociales.
Resultado principal	Identificación de zonas de riesgo compuesto.	Soluciones Pareto-óptimas.	Mapas de riesgo social detallados.
Aplicación en política pública	Priorización de recursos y planificación sanitaria.	Selección estratégica de secuencias de reparación.	Priorización territorial de inversiones resilientes.
Valor agregado	Aborda escenarios complejos y simultáneos.	Permite decisiones estratégicas en recuperación.	Focaliza intervenciones en comunidades vulnerables.
Limitaciones	Requiere datos de movilidad en tiempo real.	Alta dependencia de modelación avanzada.	Necesita datos socioeconómicos e hidrológicos actualizados.

VI



DESARROLLO METODOLÓGICO para la Incorporación de la Resiliencia en la Evaluación Social de Proyectos



Esta sección representa la culminación del análisis presentado hasta ahora. Basándose en los fundamentos conceptuales, los debates actuales y las mejores prácticas metodológicas identificadas a nivel internacional, a continuación, se delinea un marco metodológico estructurado, paso a paso, diseñado para integrar de manera sistemática y rigurosa la evaluación de la resiliencia en el proceso de Evaluación Social de Proyectos (ESP) de infraestructura en el contexto nacional. Este marco busca transformar la resiliencia de un concepto deseable a un criterio de inversión cuantificable y operativo.

1. Identificación y Evaluación de Riesgos

El primer paso fundamental del marco metodológico es una evaluación integral de riesgos que supere los enfoques tradicionales centrados en una única amenaza. Se propone un proceso que integre un enfoque multiamenaza (Nicholas et al., 2025) con un análisis de vulnerabilidad multidimensional, reconociendo que el riesgo es una función compleja del peligro, la exposición y la vulnerabilidad. Este proceso debe constar de los siguientes componentes secuenciales:

- **Análisis de Peligros:** El punto de partida es la caracterización de los peligros a los que está expuesta el área de influencia del proyecto. Esto implica el mapeo y la cuantificación de la probabilidad y la intensidad de múltiples peligros naturales relevantes. Como ejemplo de la amplitud necesaria, un análisis para la comunidad de Squamish en Canadá consideraría flujos de detritos, peligros sísmicos, actividad volcánica, inundaciones costeras y fluviales, y avalanchas (Nicholas et al., 2025). Este análisis debe ser espacialmente explícito, generando mapas que delimiten las zonas con diferentes niveles de amenaza para cada tipo de peligro.
- **Evaluación de la Vulnerabilidad Física:** Una vez identificados los peligros, el siguiente paso es evaluar la vulnerabilidad de la infraestructura existente y propuesta. Esto implica analizar la fragilidad de los componentes físicos del sistema (puentes, carreteras, subestaciones eléctricas, etc.) frente a cada uno de los peligros identificados. Se deben utilizar curvas de fragilidad, que relacionan la intensidad de un peligro (ej. velocidad del viento, profundidad de la inundación) con la probabilidad de que un componente alcance diferentes estados de daño (leve, moderado, severo, colapso).
- **Evaluación de la Vulnerabilidad Social:** De manera paralela a la evaluación física, es crucial analizar la vulnerabilidad social de las comunidades que dependen de la infraestructura. Este análisis se realiza mediante el desarrollo o la adaptación de un Índice de Vulnerabilidad Social (SoVI). El proceso implica seleccionar variables censales relevantes (ej. porcentaje de población de edad avanzada, nivel de ingresos, dominio del idioma, tenencia de la vivienda, composición racial/étnica), normalizarlas y combinarlas utilizando técnicas estadísticas como el Análisis de Componentes Principales (PCA). El PCA agrupa las variables correlacionadas en un número menor de componentes no correlacionados que representan dimensiones subyacentes de la vulnerabilidad (ej. "Raza y Pobreza", "Dependencia por Edad", "Riqueza"), como se demuestra en los estudios de Rouhana et al. (2025) y Wang et al. (2025).

El objetivo es generar mapas que identifiquen las poblaciones y áreas geográficas con mayor susceptibilidad a sufrir impactos adversos debido a las interrupciones del servicio, permitiendo así un análisis de la equidad en la distribución del riesgo.

La superposición de estos tres análisis (peligro, vulnerabilidad física y vulnerabilidad social) permite crear mapas de riesgo integrado que identifican las áreas y componentes más críticos, orientando así la priorización de las intervenciones.

2. Herramientas y Técnicas de Evaluación

Para llevar a cabo la evaluación de riesgos y el posterior análisis de resiliencia, se recomienda la aplicación de un conjunto de herramientas y técnicas analíticas, extraídas de la revisión de las mejores prácticas internacionales. Estas herramientas, utilizadas de manera combinada, proporcionan una capacidad de análisis robusta y multidimensional.

- **Sistemas de Información Geográfica (SIG):** Los SIG son la plataforma central para este marco metodológico. Su función principal es la integración y el análisis espacial de las diversas capas de datos. Se utilizan para mapear la distribución geográfica de los peligros, la ubicación de los activos de infraestructura, la distribución de la población y los indicadores de vulnerabilidad social. La superposición espacial de estas capas en un entorno SIG es fundamental para identificar las áreas de alto riesgo donde coinciden una alta amenaza, una alta exposición y una alta vulnerabilidad.
- **Modelos de Red:** Para comprender cómo se comporta un sistema de infraestructura bajo estrés, es esencial utilizar modelos de red (basados en la teoría de grafos). Estos modelos representan la infraestructura como una red de nodos y enlaces, permitiendo simular su rendimiento funcional (ej. flujos de tráfico en una red de transporte, flujo de energía en una red eléctrica) bajo diversos escenarios de interrupción. Mediante la eliminación simulada de nodos o enlaces (representando fallas por un desastre), estos modelos permiten evaluar métricas clave de resiliencia como la robustez (cuánto cae el rendimiento) y la redundancia (la capacidad de la red para encontrar rutas o flujos alternativos).
- **Análisis Costo-Beneficio Aumentado (ACBA):** El ACBA es una extensión del análisis costo-beneficio tradicional que incorpora explícitamente los beneficios asociados a la reducción de riesgos. En el contexto de la resiliencia, esta técnica permite cuantificar no solo los costos directos de un proyecto de infraestructura (construcción, operación), sino también los beneficios indirectos que se derivan de la mejora de la resiliencia. Estos beneficios incluyen, por ejemplo, la disminución de los costos esperados para los usuarios debido a interrupciones evitadas (como ahorros en tiempo de viaje y costos de operación de vehículos) (Sextos et al., 2018) y los costos de mantenimiento futuros evitados en rutas alternativas que, de otro modo, se verían sobrecargadas durante una interrupción (Allen et al., 2025). Este enfoque permite justificar económicamente inversiones en resiliencia que podrían parecer costosas desde una perspectiva tradicional.

3. Indicadores y Métricas de Resiliencia

Para que la resiliencia sea un criterio tangible en la Evaluación Social de Proyectos, es necesario definir un conjunto de indicadores y métricas clave que puedan ser cuantificados y comparados entre diferentes alternativas de proyecto. A continuación, se propone un conjunto de indicadores, basados en la literatura técnica, que capturan las diferentes dimensiones de la resiliencia y su impacto.

3.1. Métricas de Rendimiento de la Red: Estos indicadores miden la funcionalidad del sistema de infraestructura antes, durante y después de un evento simulado. Permiten evaluar la robustez y la redundancia de la red.

- *Eficiencia global (E_glob):*
Definición: Mide la eficiencia general de la conectividad en una red, calculada como el promedio del inverso de las distancias de la ruta más corta entre todos los pares de nodos.
- *Accesibilidad a Servicios Críticos:*
Definición: Cuantifica la capacidad de la red para mantener el acceso a instalaciones esenciales como hospitales o estaciones de bomberos.

3.2. Métricas de Rapidez de Recuperación: Estos indicadores evalúan la velocidad y la eficiencia del proceso de restauración de la funcionalidad del sistema.

- *Tiempo Total de Recuperación (TRT):*
Definición: El tiempo total necesario para que la red recupere su nivel de rendimiento pre-desastre.
- *Trayectoria de Recuperación (SRT):*
Definición: El centroide del área bajo la curva de recuperación. Mide la eficiencia de la recuperación en sus etapas iniciales.

3.3. Métricas de Impacto Social: Estos indicadores cuantifican las consecuencias directas de las interrupciones del servicio en la población, especialmente en los grupos más vulnerables.

- *Población en Riesgo de Desplazamiento:*
Definición: Estima el número de hogares que podrían verse obligados a abandonar sus viviendas debido a daños en la infraestructura o a la pérdida prolongada de servicios básicos.

3.4. Métricas de Impacto Económico: Estos indicadores traducen los beneficios de la resiliencia a términos monetarios, facilitando su integración en el análisis costo-beneficio.

- *Valor Esperado de las Pérdidas Económicas Evitadas:*
Definición: Cuantifica el valor monetario de los daños directos (a la infraestructura) e indirectos (pérdidas de producción, costos para los usuarios) que se evitan gracias a la implementación de un proyecto resiliente.

4. Integración en el Ciclo de Vida del Proyecto

La resiliencia no es un atributo que se añade al final de un proyecto, sino un principio que debe ser integrado de manera transversal a lo largo de todo su ciclo de vida. La aplicación de los criterios y análisis de resiliencia varía en cada fase, asegurando que el resultado final sea un sistema de infraestructura genuinamente robusto, redundante y adaptable.

- **Fase de Planificación:** En la etapa más temprana, la evaluación de riesgos de resiliencia es fundamental para informar la selección y priorización de proyectos. Los mapas de riesgo integrado (generados en el punto uno del paso 5) deben utilizarse para identificar las áreas geográficas y los sistemas de infraestructura más críticos. Por ejemplo, al decidir entre reforzar un puente existente en una zona de baja vulnerabilidad social o construir una nueva ruta redundante que sirva a una comunidad vulnerable y aislada, el Análisis Costo-Beneficio Aumentado (ACBA) que incorpora los beneficios de la reducción del riesgo social y la mejora de la redundancia de la red guiará a los planificadores hacia la segunda opción, incluso si su costo inicial es mayor.
- **Fase de Diseño:** Una vez que un proyecto es seleccionado, los principios de resiliencia deben guiar su diseño técnico. Esto implica ir más allá de los códigos de construcción mínimos e incorporar principios de diseño robusto y redundante. Por ejemplo, en el diseño de una red de suministro de agua, esto podría significar incluir interconexiones adicionales entre diferentes sectores de la red o la instalación de fuentes de energía de respaldo para las estaciones de bombeo.
- **Fase de Operación y Mantenimiento:** La resiliencia de un sistema de infraestructura no depende solo de su diseño físico, sino también de cómo se opera y se mantiene. Durante esta fase, es crucial desarrollar y probar regularmente planes de contingencia y respuesta a emergencias. El mantenimiento debe ser proactivo y basado en el riesgo, priorizando la inspección y reparación de los componentes más críticos identificados en el análisis de resiliencia.
- **Fase de Recuperación:** En el caso de que ocurra un desastre, los análisis de resiliencia se convierten en una herramienta invaluable para guiar una recuperación eficiente y equitativa. Por ejemplo, un modelo de optimización de la recuperación, como los propuestos por Aydin et al. (2025) o Zhang et al. (2017), utilizaría datos sobre la importancia de cada componente dañado (obtenidos del análisis de red) y los recursos de reparación disponibles para generar un cronograma de restauración óptimo. Este cronograma priorizaría la reparación de los componentes que, por ejemplo, minimicen el Tiempo Total de Recuperación (TRT) o maximicen la accesibilidad a hospitales en el menor tiempo posible, asegurando una recuperación más rápida y socialmente equitativa.

5. Participación y Gobernanza

Un marco metodológico para la resiliencia, por más robusto que sea técnicamente, será incompleto si no se sustenta en una estructura de gobernanza inclusiva y participativa. Las decisiones sobre qué riesgos priorizar y qué nivel de resiliencia es aceptable no son puramente técnicas, son fundamentalmente políticas y sociales, y deben reflejar los valores y las necesidades de la sociedad en su conjunto.

La importancia de involucrar a una diversidad de partes interesadas (*stakeholders*) en el proceso de planificación y toma de decisiones es un tema recurrente en la literatura sobre resiliencia (Robson et al., 2025). Este proceso debe ir más allá de las consultas formales e incluir la participación activa de:

- **Comunidades locales:** Los residentes de las áreas afectadas poseen un conocimiento invaluable sobre las condiciones locales, las vulnerabilidades específicas y las capacidades existentes. Su participación desde las etapas iniciales asegura que las soluciones propuestas sean contextualmente apropiadas y socialmente aceptadas.
- **Expertos técnicos:** Ingenieros, geólogos, científicos sociales y otros especialistas aportan el rigor técnico necesario para la evaluación de riesgos y el diseño de soluciones efectivas.
- **Agencias gubernamentales:** La coordinación entre las diferentes agencias sectoriales (transporte, energía, agua) y los distintos niveles de gobierno (nacional, regional, local) es esencial para evitar la fragmentación de los esfuerzos y promover un enfoque de sistemas.
- **Sector privado:** Los operadores de infraestructura, las empresas y las aseguradoras son actores clave que deben ser parte de la conversación, aportando su experiencia operativa y sus perspectivas sobre el riesgo financiero.

La integración del conocimiento local y no experto es particularmente crucial. Un estudio sobre la percepción de riesgos multiamenaza en Squamish, Canadá, reveló que, si bien los expertos técnicos tenían un mayor conocimiento de los procesos físicos de los peligros, los no expertos a menudo tenían una conciencia más aguda de cómo estos peligros podrían afectar sus vidas diarias y su comunidad. La integración de estas perspectivas no solo enriquece el diagnóstico de los problemas, sino que también fomenta un sentido de apropiación y corresponsabilidad en la implementación de las soluciones, lo cual es vital para la resiliencia a largo plazo (Nicholas et al., 2025).

6. Arquitectura fiscal, indicadores de gestión y resiliencia: alineamiento institucional para la inversión preventiva en infraestructura pública

La incorporación de criterios de resiliencia en la Evaluación Social de Proyectos (ESP) de infraestructura constituye un avance sustantivo en la modernización de los instrumentos de inversión pública en Chile. Sin embargo, para que este progreso metodológico se traduzca en decisiones efectivas de política pública, resulta indispensable abordar una dimensión estructural que condiciona la materialización de cualquier estrategia preventiva: la arquitectura presupuestaria y los sistemas de evaluación de desempeño del sector público.

En la actualidad, la gestión fiscal y presupuestaria del Estado se organiza fundamentalmente sobre la base de un ciclo anual de formulación, aprobación, ejecución y control del gasto, con compromisos multianuales acotados y altamente normados. Esta lógica, aunque eficaz para el control macrofiscal y la disciplina presupuestaria, presenta limitaciones relevantes cuando se trata de incorporar inversiones preventivas basadas en riesgo, probabilidad de ocurrencia e incertidumbre climática.

La resiliencia de la infraestructura, por definición, se fundamenta en la anticipación, la preparación y la reducción de vulnerabilidades estructurales. No responde a una lógica determinística de corto plazo, sino a una planificación estratégica de mediano y largo horizonte, orientada a reducir pérdidas futuras, asegurar continuidad operativa de servicios esenciales y proteger activos públicos frente a amenazas recurrentes y crecientes. Esta diferencia de temporalidades genera una tensión institucional que debe ser explícitamente abordada.

6.1. El sesgo estructural del presupuesto anual frente a la inversión preventiva

El marco presupuestario vigente se estructura sobre la base de partidas anuales con compromisos futuros acotados por subtítulo, asignaciones específicas y restricciones de reasignación intra-anual. A ello se suma un sistema de evaluación de desempeño de los servicios públicos fuertemente asociado a indicadores de ejecución financiera, tales como:

- Porcentaje de ejecución del subtítulo 31 (inversión real),
- Nivel de avance físico-financiero de proyectos,
- Cumplimiento de metas anuales de inversión sectorial.

Este diseño institucional genera un incentivo implícito a privilegiar proyectos con ejecución cierta dentro del ejercicio presupuestario, en desmedro de inversiones cuya justificación se basa en escenarios probabilísticos de riesgo. En otras palabras, el sistema favorece estructuralmente el gasto reactivo y penaliza la inversión preventiva.

Desde una perspectiva de gestión del riesgo, esta situación resulta particularmente problemática. Los eventos hidrometeorológicos, sísmicos e incendios forestales que afectan recurrentemente a la infraestructura nacional no responden a calendarios administrativos ni a ciclos presupuestarios. Ocurren todos los años, con magnitudes variables, y generan impactos acumulativos sobre redes viales, sistemas sanitarios, infraestructura energética, portuaria y equipamientos críticos.

Sin embargo, una inversión asociada a resiliencia —por ejemplo, reforzamiento estructural, obras de redundancia vial, protección de taludes, soluciones basadas en la naturaleza para control de inundaciones o infraestructura verde urbana— se fundamenta en la reducción de una pérdida esperada futura, no en una demanda observable inmediata. Si el evento no ocurre en el año presupuestario, la ejecución de estos recursos puede ser cuestionada desde la lógica de los indicadores de gestión, aun cuando su racionalidad económica y social sea incuestionable.

Este sesgo institucional reproduce un ciclo fiscal reactivo: subinversión crónica en prevención, altos costos post-desastre, endeudamiento extraordinario para reconstrucción y reasignaciones presupuestarias de emergencia que afectan la continuidad de la inversión sectorial.

6.2. La brecha entre la Evaluación Social de Proyectos y la ejecución presupuestaria

El desarrollo metodológico de la ESP ha avanzado significativamente hacia enfoques que integran análisis de riesgo, vulnerabilidad social, continuidad operativa y evaluación de pérdidas evitadas. Sin embargo, persiste una brecha entre la lógica de evaluación ex ante y las condiciones efectivas de ejecución presupuestaria.

En términos prácticos, un proyecto puede obtener una recomendación favorable bajo criterios de resiliencia —por ejemplo, por su contribución a la redundancia de una red crítica o a la protección de una población vulnerable—, pero enfrentar posteriormente dificultades para su materialización debido a:

- Restricciones de caja anual,
- Prioridades coyunturales de inversión sectorial,
- Compromisos heredados de carteras anteriores,
- Presiones por cumplir metas de ejecución financiera.

De este modo, la resiliencia corre el riesgo de consolidarse como un marco conceptual robusto, pero con baja capacidad de incidencia real sobre la asignación efectiva de recursos públicos.

6.3. La resiliencia como componente estructural de la política fiscal

La evidencia internacional muestra que los países que han avanzado hacia modelos de infraestructura resiliente han debido incorporar el riesgo como una variable explícita de la política fiscal. Esto implica reconocer que los desastres no son eventos excepcionales, sino fenómenos estructurales del desarrollo contemporáneo, exacerbados por el cambio climático, la urbanización acelerada y la presión sobre ecosistemas frágiles.

Desde esta perspectiva, la resiliencia debe ser entendida como una inversión estratégica de protección de activos públicos, análoga a un seguro soberano implícito. Cada obra preventiva reduce la exposición fiscal futura, disminuye la volatilidad del gasto público y fortalece la sostenibilidad de las finanzas del Estado.

El enfoque moderno de finanzas públicas resilientes se basa en cuatro principios:

1. Anticipación: internalizar el riesgo antes de que se materialice.
2. Prevención: reducir vulnerabilidades estructurales.
3. Protección fiscal: limitar pasivos contingentes del Estado.
4. Continuidad operativa: asegurar servicios esenciales.

Estos principios deben reflejarse no solo en la planificación sectorial, sino también en la arquitectura presupuestaria y en los sistemas de control de gestión.

6.4. Propuesta de instrumento presupuestario para resiliencia en infraestructura

En este contexto, resulta pertinente explorar la creación de un mecanismo presupuestario específico para resiliencia dentro del subtítulo 31 (inversión real), con un diseño institucional que permita compatibilizar la disciplina fiscal con la gestión moderna del riesgo.

Este instrumento podría estructurarse bajo las siguientes características:

a) Asignación base anual estimada

Una provisión inicial determinada a partir de análisis probabilísticos de riesgo sectorial (infraestructura vial, sanitaria, energética, portuaria, equipamiento crítico), considerando escenarios de amenaza y vulnerabilidad.

b) Carácter contingente y flexible

Capacidad de reasignación intra-anual en función de la ocurrencia o no de eventos disruptivos, sin penalización de los indicadores de gestión sectorial.

c) Evaluación de desempeño basada en resultados de resiliencia

Incorporación de indicadores tales como:

- Reducción de población expuesta,
- Disminución de activos críticos en zonas de riesgo,
- Aumento de redundancia de redes,
- Mejora en tiempos de recuperación.

d) Integración con el Sistema Nacional de Inversiones (SNI)

Vinculación explícita con la ESP resiliente, de modo que los proyectos priorizados por criterios de riesgo cuenten con respaldo presupuestario coherente.

e) Articulación con instrumentos financieros de protección fiscal

Coordinación con seguros paramétricos, fondos de emergencia y bonos catastróficos para conformar una estrategia integral de gestión del riesgo.

6.5. Beneficios fiscales y territoriales del enfoque propuesto

La implementación de un instrumento presupuestario de resiliencia generaría beneficios estructurales para la gestión pública:

- Reducción del gasto post-desastre y del endeudamiento extraordinario.
- Mayor estabilidad del ciclo fiscal.
- Disminución de pérdidas económicas y sociales.
- Protección de territorios vulnerables.
- Fortalecimiento de la equidad territorial.
- Mayor coherencia entre planificación, evaluación y ejecución.

Desde el punto de vista territorial, este enfoque permitiría orientar inversión preventiva hacia zonas con alta exposición y vulnerabilidad social, evitando que los costos de los desastres recaigan de manera desproporcionada sobre las comunidades con menor capacidad de recuperación.

6.6. Hacia una política pública de infraestructura resiliente

La transición hacia una infraestructura resiliente no puede descansar únicamente en marcos metodológicos sofisticados. Requiere una transformación institucional que alinee incentivos, instrumentos y capacidades del Estado.

Mientras la ESP avanza hacia modelos integrados de evaluación de riesgo, es imprescindible que el sistema presupuestario evolucione en paralelo. De lo contrario, la resiliencia permanecerá confinada al plano técnico, sin capacidad de incidir en la asignación efectiva de recursos.

En definitiva, la resiliencia no es un gasto contingente ni una externalidad ambiental. Es una inversión estructural en seguridad económica, estabilidad fiscal y bienestar social. Incorporarla de manera sistemática en la arquitectura presupuestaria del Estado es una condición necesaria para construir un país preparado frente a los riesgos del siglo XXI.

VII



REFLEXIONES FINALES



El presente análisis ha establecido un argumento claro y contundente: en un mundo definido por la creciente frecuencia e intensidad de los desastres y la compleja interdependencia de nuestros sistemas sociales y técnicos, la resiliencia ya no es una opción, sino una necesidad imperativa. La integración formal y sistemática de los principios de resiliencia en la Evaluación Social de Proyectos es una evolución indispensable para garantizar que las inversiones en infraestructura no solo impulsen el desarrollo económico, sino que también salvaguarden el bienestar de la sociedad frente a un futuro incierto. Hemos demostrado que los enfoques tradicionales, centrados en componentes aislados y beneficios directos, son insuficientes para capturar la naturaleza sistémica de los riesgos modernos. En su lugar, hemos propuesto un marco metodológico integral que combina el análisis multiamenaza, la evaluación de la vulnerabilidad multidimensional y el uso de herramientas analíticas avanzadas para cuantificar la robustez, la redundancia y la capacidad de recuperación de los sistemas de infraestructura. Este enfoque permite tomar decisiones de inversión más informadas, equitativas y sostenibles, asegurando que cada proyecto contribuya a construir un futuro más seguro para todos.

El artículo *"Bridging technical and social dimensions in critical infrastructure accessibility assessment: A case study from Chile"* (Contreras et al., 2025), destaca cuatro conclusiones fundamentales para la gestión de desastres y la planificación de inversiones:

- 1. Necesidad de una Planificación de "Doble Enfoque":** Los autores concluyen que la toma de decisiones no debe basarse solo en criterios técnicos. Se propone una estrategia de inversión dual que:
 - Mejore los enlaces viales identificados como críticos técnicamente (por flujo o redundancia).
 - Priorice aquellos enlaces que dan acceso a los servicios más valorados por la comunidad (especialmente el agua potable).
- 2. El Valor de la Dimensión Social en la Criticidad:** La integración de preferencias sociales (Escenario b) proporciona una comprensión más completa y "sintonizada socialmente" de la criticidad que los enfoques tradicionales. Ignorar la percepción ciudadana puede llevar a subestimar la importancia de ciertas rutas que, aunque técnicamente parezcan secundarias, son vitales para la supervivencia y tranquilidad de la población (como el acceso a agua).
- 3. Prioridad Absoluta del Agua Potable:** Dado que el acceso al agua potable fue identificado como la prioridad dominante tanto en zonas urbanas como rurales, las políticas públicas deben priorizar la resiliencia de la red vial que conecta con estas instalaciones.
- 4. Equidad Territorial y Zonas Aisladas:** La metodología resaltó la vulnerabilidad de zonas rurales con baja redundancia vial, como San José de Maipo. El análisis espacial demostró que, al considerar las preferencias sociales, la criticidad de las pocas rutas de acceso en estas zonas aumenta significativamente. Por tanto, se requieren inversiones específicas en estas áreas "subconectadas" para evitar el aislamiento y garantizar la equidad en el acceso a servicios básicos tras un desastre.

Para traducir este marco conceptual en una práctica de política pública efectiva, se formulan las siguientes recomendaciones clave dirigidas a los responsables de políticas y a los planificadores de infraestructura:

- 1. Adoptar formalmente el marco metodológico:** Se recomienda la institucionalización de este marco de evaluación de resiliencia como un componente obligatorio dentro de los lineamientos nacionales para la Evaluación Social de Proyectos de infraestructura. Esto aseguraría que todos los proyectos de inversión pública sean examinados a través del lente de la resiliencia.
- 2. Invertir en la recopilación y gestión de datos de alta resolución:** La calidad de la evaluación de la resiliencia depende directamente de la calidad de los datos disponibles. Es crucial realizar inversiones estratégicas en la recopilación, estandarización y actualización de datos de alta resolución sobre peligros naturales, el estado y la geolocalización de los activos de infraestructura, y los indicadores de vulnerabilidad social a nivel local. La creación de plataformas de datos abiertos y geospaciales facilitaría el acceso y el uso de esta información.
- 3. Fomentar la capacitación y el desarrollo de capacidades técnicas:** La aplicación de este marco requiere competencias técnicas especializadas en áreas como el modelado de redes, el análisis espacial y la evaluación de riesgos. Se debe implementar un programa nacional de capacitación dirigido a los profesionales de las agencias públicas responsables de la planificación y evaluación de proyectos, para desarrollar las capacidades necesarias para llevar a cabo análisis de resiliencia de manera rigurosa.
- 4. Crear plataformas interinstitucionales para la coordinación:** La resiliencia de la infraestructura crítica es un problema que trasciende los silos sectoriales. Es fundamental establecer plataformas o comités interinstitucionales permanentes que reúnan a representantes de los ministerios de obras públicas, energía, transporte, planificación, y de las agencias de gestión de desastres. El propósito de estas plataformas sería mejorar la coordinación en la planificación, la gestión de riesgos y la respuesta a emergencias de las infraestructuras críticas interdependientes.

La evaluación del riesgo de desastres en proyectos de infraestructura requiere ajustes metodológicos que permitan identificar, valorar y gestionar eficazmente los riesgos asociados a amenazas naturales y cambio climático. Es fundamental que estos ajustes acompañen todas las etapas de un proyecto, desde la identificación hasta la operación, para asegurar la resiliencia de la infraestructura en el largo plazo

En primer lugar, se debe establecer un análisis sistemático de amenazas potenciales que puedan afectar al proyecto, utilizando fuentes oficiales y herramientas geospaciales para determinar la exposición específica de la infraestructura a peligros como sismos, inundaciones, incendios, remociones en masa y tsunamis. Posteriormente, se analiza la vulnerabilidad del proyecto considerando no solo los aspectos estructurales, sino también factores sociales y operativos que pueden amplificar los daños o dificultar la recuperación.

Dentro del proceso metodológico, uno de los pasos clave es la estimación del riesgo, que integra la probabilidad de ocurrencia del evento, la exposición y la vulnerabilidad. Esta valoración debe ir acompañada de un análisis integrado de alternativas de diseño, priorizando aquellas que minimizan los riesgos o facilitan la pronta recuperación y continuidad de los servicios. La metodología recomienda, además, valorar explícitamente los beneficios de la resiliencia en términos socioeconómicos, calculando las pérdidas evitadas y considerando los efectos indirectos sobre la población y la economía local.

También es esencial evaluar el riesgo bajo un enfoque progresivo: proyectos que muestren una mayor exposición o criticidad deben ser sometidos a análisis más rigurosos y detallados, permitiendo así una adecuada priorización de recursos y medidas de mitigación, según la magnitud del riesgo identificado.

Por último, la integración de la evaluación de riesgos en los procesos normativos y de aprobación de proyectos públicos debe ser un requisito formal y no solo una recomendación, asegurando que toda infraestructura implementada incorpore medidas de adaptación y gestione riesgos de manera sistemática. Esto fortalece la resiliencia social y territorial y contribuye a la reducción sostenible de la vulnerabilidad frente a desastres.

Una propuesta de ajustes metodológicos para la evaluación del riesgo de desastres en proyectos de infraestructura puede organizarse en cinco ejes: ampliar el objeto de evaluación, incorporar el riesgo en forma explícita y cuantificable, valorar los beneficios de la resiliencia, integrar criterios distributivos y alinear el proceso con marcos normativos e institucionales. Estos ajustes buscan que la evaluación deje de tratar los desastres como "excepciones" y pase a considerarlos una condición estructural del desarrollo.

VIII



GESTIÓN DEL RIESGO PARA INFRAESTRUCTURA PÚBLICA: Marco Integral de Medidas Técnicas, Financieras y Metodológicas



La resiliencia de la infraestructura pública es un componente esencial para garantizar el bienestar social, la continuidad de servicios críticos y la estabilidad fiscal de un país. Frente al aumento de amenazas naturales y climáticas —como incendios forestales, inundaciones, sequías, olas de calor y remociones en masa— se hace indispensable avanzar hacia un enfoque que combine estándares técnicos modernos, instrumentos financieros, coordinación institucional y metodologías robustas de evaluación.

A continuación, se presenta un marco integral consolidado, que agrupa medidas de gestión del riesgo para infraestructura pública, incorporando buenas prácticas internacionales, herramientas de protección financiera promovidas por el BID y lineamientos metodológicos para fortalecer la evaluación social de inversiones.

1. Evaluación y planificación del riesgo

La gestión del riesgo debe comenzar desde la formulación misma de los proyectos. Para ello se propone:

- Ampliar el objeto de evaluación, incorporando escenarios multi-amenaza y eventos concurrentes (inundaciones simultáneas con remociones en masa, sequías prolongadas combinadas con incendios, volcán y lahares, olas de calor que afectan sistemas de transporte).
- Evaluar el desempeño de la infraestructura a lo largo del tiempo, considerando niveles de servicio antes, durante y después del evento, con énfasis en continuidad operativa, redundancia funcional y rapidez de recuperación.
- Integrar evaluaciones geoespaciales, análisis de exposición territorial y proyecciones climáticas.

Este cambio implica pasar de un análisis centrado en eficiencia estática a uno que reconoce explícitamente el riesgo futuro como determinante central de la rentabilidad social.

2. Módulo obligatorio de análisis de riesgo

La evaluación social debe incorporar explícitamente un módulo de análisis de riesgo de desastres, que permita estimar probabilidad, exposición y vulnerabilidad para escenarios de diferente severidad.

Se recomienda:

- Incorporar un módulo obligatorio dentro del Servicio Nacional de Inversiones que vincule riesgo con métricas de desempeño de la red (tiempo de reposición, nivel de servicio, redundancia).
- Utilizar metodologías multicriterio y herramientas geoespaciales como:
 - índices de riesgo de desempeño de redes,
 - matrices multi-amenaza,
 - sistemas tipo SIGer-RV,
 - modelos de impactos indirectos y en cascada.

Esto permite captar la heterogeneidad territorial del riesgo y sus interdependencias.

3. Valoración económica de la resiliencia

Un sistema de inversión pública resiliente debe internalizar explícitamente los beneficios y costos asociados al riesgo. Se proponen las siguientes medidas:

- Ajustar el análisis costo–beneficio para incluir pérdidas evitadas por daños físicos, interrupción de servicios, desvíos de tráfico, pérdida de productividad y costos de emergencia.
- Estimar el valor social de la resiliencia mediante beneficios adicionales como:
 - reducción de tiempos de recuperación,
 - mantenimiento de conectividad crítica,
 - protección de cadenas logísticas y de suministro.
- Utilizar rangos de valores y supuestos probabilísticos cuando la información sea limitada, priorizando transparencia y trazabilidad metodológica.

Con ello, los proyectos pueden demostrar que invertir en resiliencia reduce costos futuros y protege el bienestar social.

4. Enfoque distributivo y territorial del riesgo

La infraestructura pública debe responder a criterios de equidad y justicia territorial. Por lo tanto:

- Se deben incorporar indicadores de vulnerabilidad social, acceso a infraestructura crítica y brechas territoriales para priorizar medidas donde más se necesitan.
- La evaluación debe distinguir claramente qué grupos y territorios resultan más afectados por fallas, y cómo las alternativas de diseño contribuyen a reducir —o agravar— desigualdades existentes.

Este enfoque asegura que la inversión pública promueva resiliencia inclusiva y no reproduzca patrones de exclusión.

5. Alineamiento normativo e institucional

Para que las medidas anteriores sean operativas, se requiere fortalecer la arquitectura institucional:

- Definir umbrales de riesgo aceptable y estándares mínimos de servicio para infraestructura estratégica, que condicionen la elegibilidad de proyectos dentro del SNI.
- Integrar la gestión del riesgo con las políticas de adaptación al cambio climático, marcos normativos sectoriales y planificación territorial.
- Fortalecer capacidades técnicas mediante guías, capacitaciones, softwares y herramientas de diagnóstico.

Este alineamiento normativo permite coherencia entre estándares técnicos, inversión pública y financiamiento del riesgo.

6. Instrumentos financieros, seguros y protección fiscal³

La infraestructura pública es altamente vulnerable y su reparación implica grandes costos fiscales. Para reducir este impacto, el BID recomienda un portafolio diversificado de instrumentos financieros:

- Seguros soberanos y mecanismos de transferencia del riesgo
- Seguros paramétricos
- Bonos catastróficos (Cat Bonds) y Bonos de Resiliencia
- Fondos de contingencia
- Líneas de crédito contingente (CAT-DDO)
- Seguros sectoriales específicos
- Esquemas público–privados de coaseguro

Estos instrumentos fortalecen la resiliencia fiscal, clave para sostener la continuidad de la infraestructura frente a eventos extremos.

Desde una lógica del modelo de gestión de seguros, los mayores costos de inversión en infraestructuras por ser más resilientes ante fenómenos socionaturales, permitirían manejar de manera predecible las primas de riesgos de dicho seguro, sobre todo en la visión de un sistema integrado regional o nacional de gestión de infraestructura resiliente.

7. Monitoreo, mantenimiento y adaptación

- Monitoreo estructural, geotécnico y climático en tiempo real.
- Mantenimiento predictivo basado en datos.
- Adaptación progresiva a nuevas condiciones climáticas y escenarios de amenaza.
- Soluciones basadas en la naturaleza (SbN) para mitigar inundaciones, erosión costera y calor extremo.

8. Capacitación, educación y digitalización

- Capacitar funcionarios en financiamiento del riesgo, análisis probabilístico y diseño resiliente.
- Fomentar microseguros y seguros digitales para ampliar cobertura.
- Desarrollar plataformas tecnológicas que integren mapas de riesgo, inventarios de infraestructura y análisis financiero.

Con estas medidas, el sistema de inversión pública evoluciona desde un enfoque centrado en eficiencia estática hacia un modelo que reconoce explícitamente el riesgo, valora el aporte de la resiliencia al bienestar social y orienta la inversión hacia infraestructuras capaces de sostener niveles de servicio en contextos de amenaza creciente.

La integración de estándares técnicos, análisis de riesgo, instrumentos de protección financiera y enfoque territorial permite construir una infraestructura pública más segura, sostenible y fiscalmente responsable frente al futuro.

³ Propuestas BID en Seminario "Invertir en resiliencia es necesario y rentable", organizado por Itrend y CPI (noviembre 2025): https://www.infraestructurapublica.cl/wp-content/uploads/2025/12/CUADERNO-176_VF.pdf



Bibliografía

Allen, E., Chamorro, A., Poulos, A., Castro, S., de la Llera, J. C., & Echaveguren, T. (2025). Road network criticality considering pavement deterioration and maintenance costs under traffic diversions. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 126, 105592.

Allen, E., Costello, S. B., Henning, T. F. P., Chamorro, A., & Echaveguren, T. (2025). Integration of resilience and risk to natural hazards into transportation asset management of road networks: A systematic review. *Structure and Infrastructure Engineering*, 21(5), 755–773. <https://doi.org/10.1080/15732479.2023.2238281>

Arango, E., Nogal, M., Yang, M., Sousa, H. S., Stewart, M. G., & Matos, J. C. (2025). Resilience-based preparedness framework with optimal adaptation strategies for road transport networks to wildfires. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 121, 105371.

Aydin, N. Y., Tas, M., Tapsir, S., & Sancı, M. (2025). Rebuilding Antakya: Cultivating urban resilience through cultural identity after the 2023 Turkey earthquake sequence. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 117, 105196.

Coles, D., Yu, D., Wilby, R. L., Green, D., & Herring, Z. (2017). Evaluating the impact of different flooding hazards on emergency service accessibility. *Journal of Hydrology*, 546, 419–436.

Contreras, M., Chamorro, A., Gómez, T., Echaveguren, T., & Molinos-Senante, M. (2025). *Bridging technical and social dimensions in critical infrastructure accessibility assessment: A case study from Chile*. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 51, 100811. <https://doi.org/10.1016/j.ijcip.2025.100811>

Contreras-Jara, M., Chamorro, A., Echaveguren, T., Sáez, E., Bonilla, C. A., Sandoval, C., & Gironás, J. (2025). *Quantifying Travel Time Impacts of Rainfall-Induced Cut-Slope Failures on Road Networks*. *Sustainability*, 17(20), 9170. <https://doi.org/10.3390/su17209170>

Cradock-Henry, N. A., Buelow, F., & Hepi, M. (2025). Framing resilience: Post-disaster communication after Cyclone Gabrielle. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 128, 105748.

Chamorro, A., Echaveguren, T., Pattillo, C., Contreras-Jara, M., Contreras, M., Allen, E., Nieto, N., & de Solminiach, H. (2023). SIGeR-RV: A Web-Geographic Information System-Based System for Risk Management of Road Networks Exposed to Natural Hazards. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2677(12), 754–769.

Dargin, J. S., Mostafavi, A., & Ganapati, N. E. (2021). Compound hazard risk assessment framework for pandemics and hurricanes: A case study of Harris County, Texas. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 65, 102560.

Dave, A. (2021). Integrated hazard modeling and impacts on terrestrial systems. *Environmental Research Letters*, 16(10), 104050.

Garschagen, M., & Sandholz, S. (2018). The role of social vulnerability and minimum supply in the management of and governance for critical infrastructure resilience. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(4), 1233–1246.

Hinojos, S., McPhillips, L., Stempel, P., & Grady, C. (2023). Social and environmental vulnerability to flooding: Investigating cross-scale hypotheses. *Applied Geography*, 157, 103017.

Jiménez-Ramos, G., Echaveguren, T., Vargas-Baecheler, J., & Chamorro, A. (2023). Traffic interruption risk induced by cut-slope failure: The rainfall effect. *Transportation Geotechnics*, 41, 100993. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2023.100993>

Kermanshah, A., & Derrible, S. (2016). A geographical and topological vulnerability analysis of road networks to extreme earthquakes. *Reliability Engineering & System Safety*, 153, 39–49.

Lapietra, I., Caloiero, T., & Cotroneo, L. (2025). Assessing social risk to flood hazard at suburban scale: A GIS-based approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 127, 105666.

Li, Z., Zhang, X., Ma, Y., Feng, C., & Hajiyev, A. (2019). A multi-criteria decision making method for urban flood resilience evaluation with hybrid uncertainties. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 36, 101140.

Lu, P., Zheng, Y., & Liu, G. (2025). The denser the road network, the more resilient it is? —A resilience measurement model of road network based on graph theory and its practical application. *Land*, 14(4), 724.

Moghadas, M., Asadzadeh, A., Vafeidis, A., & Kötter, T. (2019). A multi-criteria decision making method for urban flood resilience evaluation with hybrid uncertainties. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 35, 101069.

Nicholas, J. P., Donovan, A., & Oppenheimer, C. (2025). Experts at risk: The influence of expertise on conceptualising multi-hazard risk perception and preparedness in Squamish, Canada. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 117, 105208.

Robson, E. B., McGowran, P., Rusczyk, H. A., Malamud, B. D., Simpson, E., Densmore, A. L., ... & Woldearegay, K. (2025). Interdisciplinary perspectives on the intersections of roads, sustainable development, and disaster resilience. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 105691.

Rouhana, F., Zhu, J., Bagtzoglou, A. C., & Burton, C. G. (2025). Analyzing structural inequalities in natural hazard-induced power outages: A spatial-statistical approach. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 117, 105184.

Seo, H., Kim, J., & Kim, B. (2022). A decision-making support model for seismic performance management of road networks. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(1), 387–400.

Sextos, A., Kilanitis, I., & Vamvatsikos, D. (2018). Assessing the impact of post-earthquake traffic demand variation on resilience of road networks. *Case Studies in Nondestructive Testing and Evaluation*, 10, 36–49.

Shtayat, A., Moridpour, S., Best, B., & Rumi, S. (2022). Moderating effect of regulatory framework on the relationship between road assets maintenance and the performance of road agencies in Kenya. *International Journal of Research and Publication Reviews*, 3(6), 1145-1158.

Sohouenou, P. Y. (2022). *A quantitative framework to assess the role of network characteristics and recovery strategies in road network resilience [Doctoral dissertation, University of Nottingham]*.

Theocharidou, M., Mebarki, A., & Lounis, Z. (2018). Proposed methodology for risk analysis of interdependent critical infrastructures to extreme weather events. *International Journal of Critical Infrastructure Protection*, 21, 57-71.

Van de Lindt, J. W., Rosenheim, N., Koliou, M., Sasani, M., Deniz, D., Dillard, M., ... & Gu, D. (2020). Community resilience-focused technical investigation of the 2016 Lumberton, North Carolina, flood: An interleaved engineering, social science, and household-level study. *Natural Hazards Review*, 21(2), 04020005.

Wang, S., Li, Y., Wu, C., & Zhang, Y. (2025). Spatial inequities and temporal trends of social vulnerability in urban and rural Australia, 2001–2021. *Habitat International*, 163, 103495.

Yunto, S., Sugiarto, S., & Dinata, A. C. (2024). Road user costs due to delays in road repairs on high-volume roads. *International Journal of Engineering and Technology Innovation*, 14(3), 270-281.

Zhang, W., Wang, N., & Nicholson, C. (2017). Resilience-based post-disaster recovery strategies for road-bridge networks. *Structure and Infrastructure Engineering*, 13(8), 1056-1068.

Zheng, J., Fang, W., Tang, S., Chen, Y., Zhang, Z., & Chen, G. (2025). A novel framework for multi-hazard loss assessment of tropical cyclones using machine learning. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 117, 105204.



Anexo

Análisis Biométrico

RESUMEN

Se analizaron múltiples visualizaciones bibliométricas que incluyen WordClouds, Trend Topics, análisis factorial, dendrogramas de temas y diagramas Sankey. Los resultados indican una fuerte convergencia entre resiliencia vial, cambio climático, ingeniería de pavimentos y gestión del riesgo.

Este estado del arte presenta un análisis bibliométrico integral sobre la resiliencia en obras de infraestructura, basado en múltiples visualizaciones —nubes de palabras, análisis de tendencias, análisis factorial, dendrogramas y diagramas de Sankey— que permiten comprender la evolución conceptual, las prioridades metodológicas y las interrelaciones temáticas del campo a nivel internacional.

Los resultados muestran que la literatura internacional se ha concentrado ampliamente en las redes viales, con conceptos predominantes como *roads and streets*, *road network*, *pavements*, *climate change*, *resilience*, *disaster management* y *risk management*. Esto evidencia que la resiliencia en infraestructura se analiza prioritariamente en torno a sistemas de transporte expuestos a riesgos climáticos y desastres naturales. El cambio climático aparece como un eje transversal que articula amenazas como inundaciones, eventos extremos, lluvias intensas y sismos. A su vez, la relevancia de términos como *decision making* y *sustainable development* revela que la resiliencia se entiende no solo como un atributo técnico del diseño estructural, sino como un proceso de gobernanza y planificación estratégica.

El análisis de tendencias temáticas muestra que existen tópicos fundacionales —*roads and streets*, *climate change*, *sustainable development*— que se mantienen constantes, mientras emergen otros más recientes, como *road network resilience*, *decision making*, *life cycle* y *motor transportation*. Esta evolución refleja una transición desde enfoques ingenieriles tradicionales hacia aproximaciones integradas que incorporan continuidad de servicios, economía del mantenimiento, planificación bajo incertidumbre y gestión de infraestructura crítica frente a impactos climáticos crecientes.

El análisis factorial identifica dos grandes dimensiones temáticas que explican más del 75% de la variabilidad del corpus. La primera es una dimensión técnico-material, asociada a pavimentos, módulos resilientes, diseño estructural y mantenimiento, típica del enfoque ingenieril clásico. La segunda corresponde a la gestión del riesgo, incluyendo riesgo de desastres, cambio climático, inundaciones, resiliencia organizacional y planificación de emergencias. Conceptos como *resilience*, *climate change* y *road network* se ubican en el espacio intermedio entre ambas dimensiones, funcionando como puentes conceptuales que conectan ingeniería, gestión del riesgo y planificación estratégica.

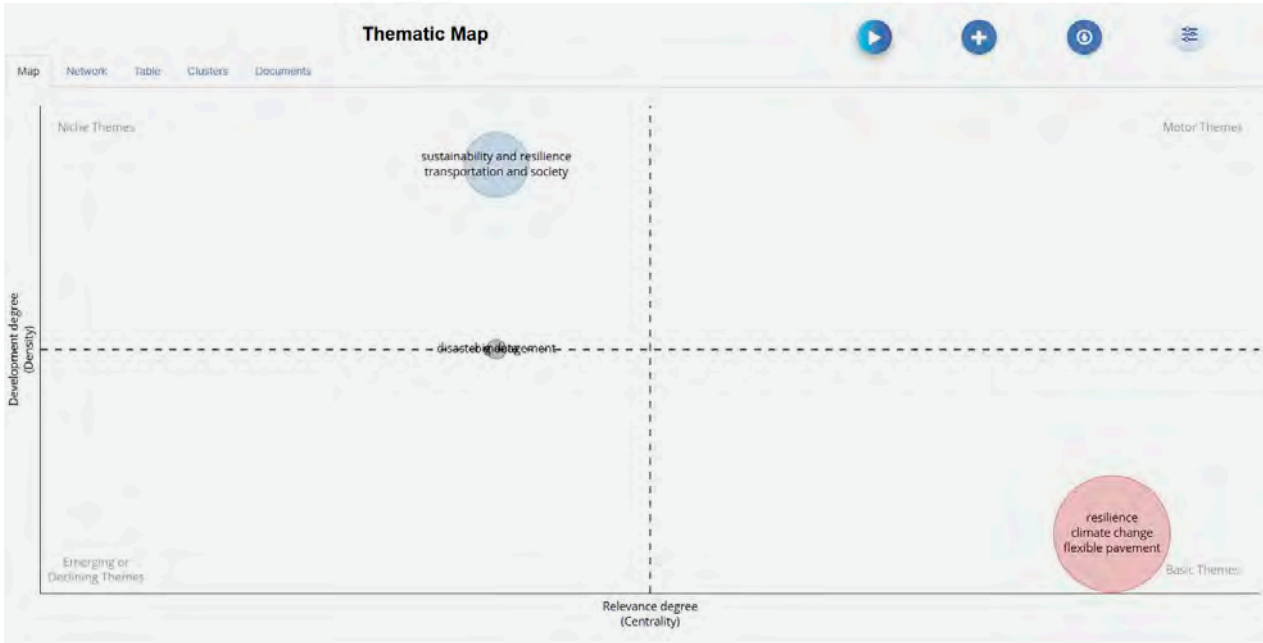
El dendrograma temático evidencia la existencia de cuatro macrofamilias: resiliencia climática y amenazas naturales, ingeniería vial y desempeño técnico, gestión del desastre y políticas públicas, y análisis de redes críticas e infraestructura estratégica. Esta organización jerárquica confirma una creciente convergencia interdisciplinaria, donde la resiliencia se concibe como un enfoque integral que articula exposición, vulnerabilidad, operación, recuperación y desempeño sistémico.

Los diagramas de Sankey aportan una visión articulada de las relaciones entre temas, países y autores influyentes. Estados Unidos, Canadá, Reino Unido y Chile aparecen como polos relevantes de producción científica. Chile destaca particularmente por su trayectoria en resiliencia sísmica y adaptación de infraestructura vial, mientras que Estados Unidos lidera en investigación sobre diseño de pavimentos, redes de transporte, modelación de impactos climáticos y análisis de redes. Entre los autores más influyentes se encuentran Parry, Lee, Yuan, Farahmand y Mostafavi, vinculados a líneas de investigación en modelación avanzada, pavimentos resilientes, análisis de redes críticas y sistemas predictivos.

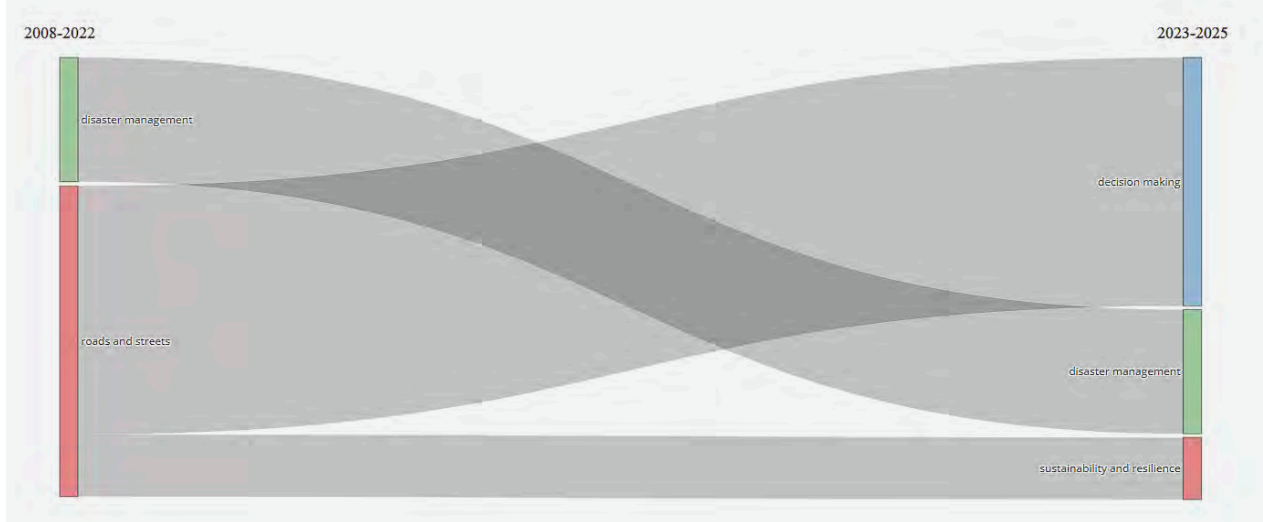
Finalmente, el análisis de frecuencia de términos en los resúmenes muestra una creciente incorporación de tecnologías emergentes como *machine learning*, materiales basados en geopolímeros, datos satelitales, modelación de inundaciones y herramientas de predicción. Estos elementos reflejan una transición hacia enfoques más sofisticados que combinan datos masivos, inteligencia artificial y materiales innovadores para anticipar fallas y fortalecer la resiliencia estructural y funcional.

En conjunto, este estado del arte revela un campo en plena expansión, caracterizado por la convergencia entre ingeniería civil, gestión del riesgo de desastres, economía del ciclo de vida, planificación territorial y adaptación al cambio climático. La resiliencia se entiende hoy como un atributo sistémico que combina desempeño estructural, continuidad operativa, preparación institucional y reducción de vulnerabilidades. La investigación contemporánea se orienta hacia modelos predictivos, análisis de ciclo de vida, soluciones basadas en datos y materiales de alto desempeño, consolidando un enfoque de infraestructura preparada para enfrentar amenazas crecientes en contextos de mayor incertidumbre climática y socioambiental.

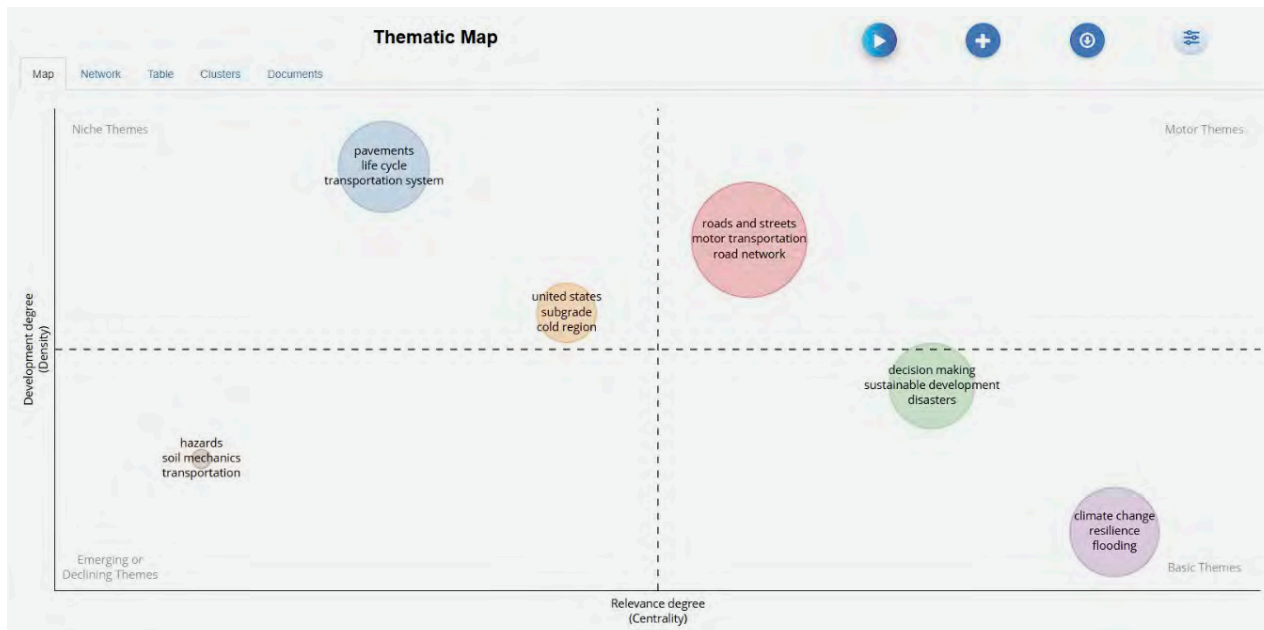
DESARROLLO



El primer mapa temático posiciona los temas según densidad y centralidad. Los temas centrales (basic themes) incluyen resiliencia, cambio climático y pavimentos flexibles, indicando que estos conceptos forman el núcleo del campo. Los niche themes, como 'sustainability and resilience' y 'transportation and society', muestran alto desarrollo pero menor relevancia estructural. 'Disaster management' aparece como tema emergente o en transición.



El análisis evolutivo muestra un desplazamiento desde temas tradicionales como 'roads and streets' y 'disaster management' hacia enfoques más integrados asociados a 'decision making', 'sustainability and resilience' y resiliencia climática. Esto evidencia un giro conceptual hacia la gobernanza adaptativa en infraestructura crítica.



El segundo mapa temático diferencia cuatro cuadrantes: • Niche Themes: 'pavements', 'life cycle', 'transportation system', mostrando desarrollo técnico avanzado. • Motor Themes: 'roads and streets', 'motor transportation', 'road network', que articulan e impulsan el campo. • Emerging Themes: 'hazards', 'soil mechanics', 'transportation', indican áreas en reconversión. • Basic Themes: 'climate change', 'resilience', 'flooding', que estructuran la agenda investigativa actual.

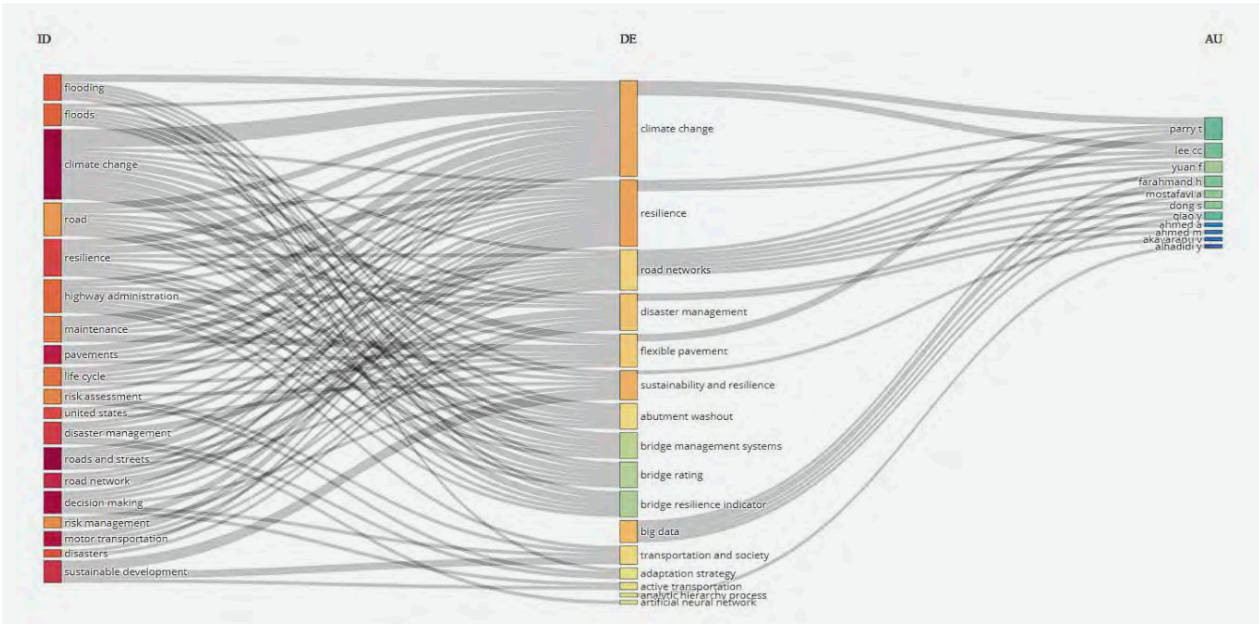
El conjunto de mapas y gráficos analizados permite identificar con claridad la estructura y evolución actual del campo de estudio sobre resiliencia en infraestructura vial. Primero, los WordClouds, análisis factoriales y diagramas de frecuencia muestran que la investigación se ha consolidado alrededor de conceptos clave como resiliencia, cambio climático, inundaciones, pavimentos y redes viales. Estos temas conforman el núcleo conceptual desde el cual se desarrollan nuevas líneas investigativas.

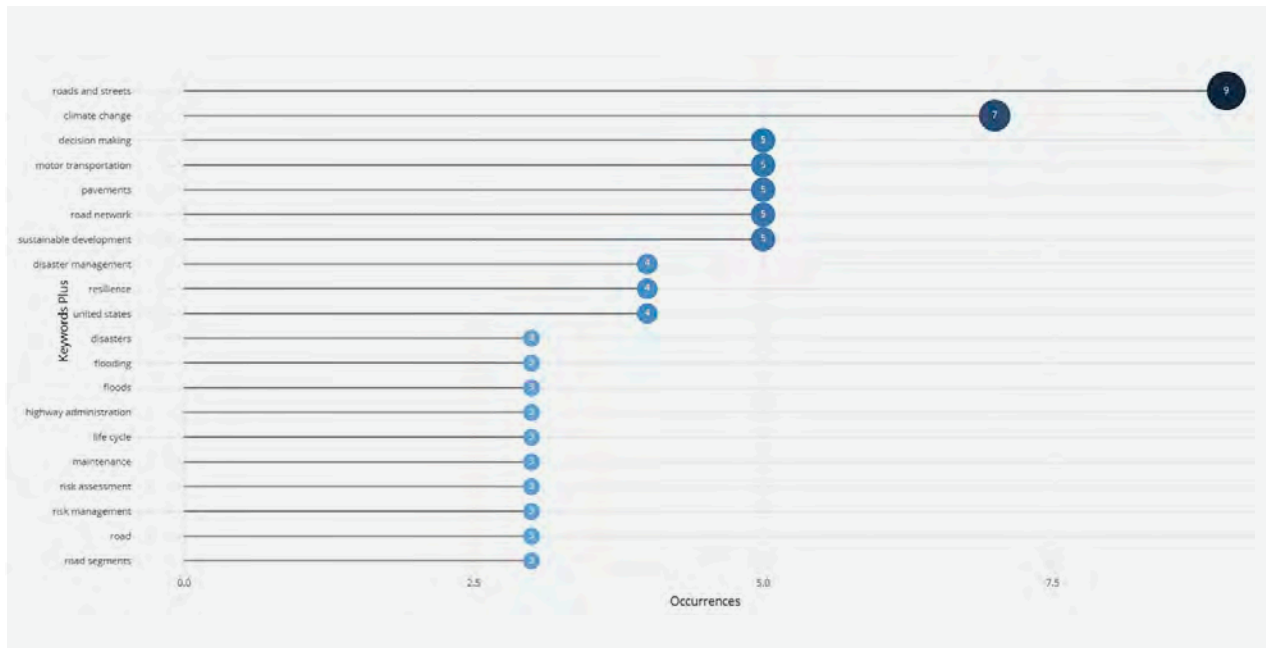
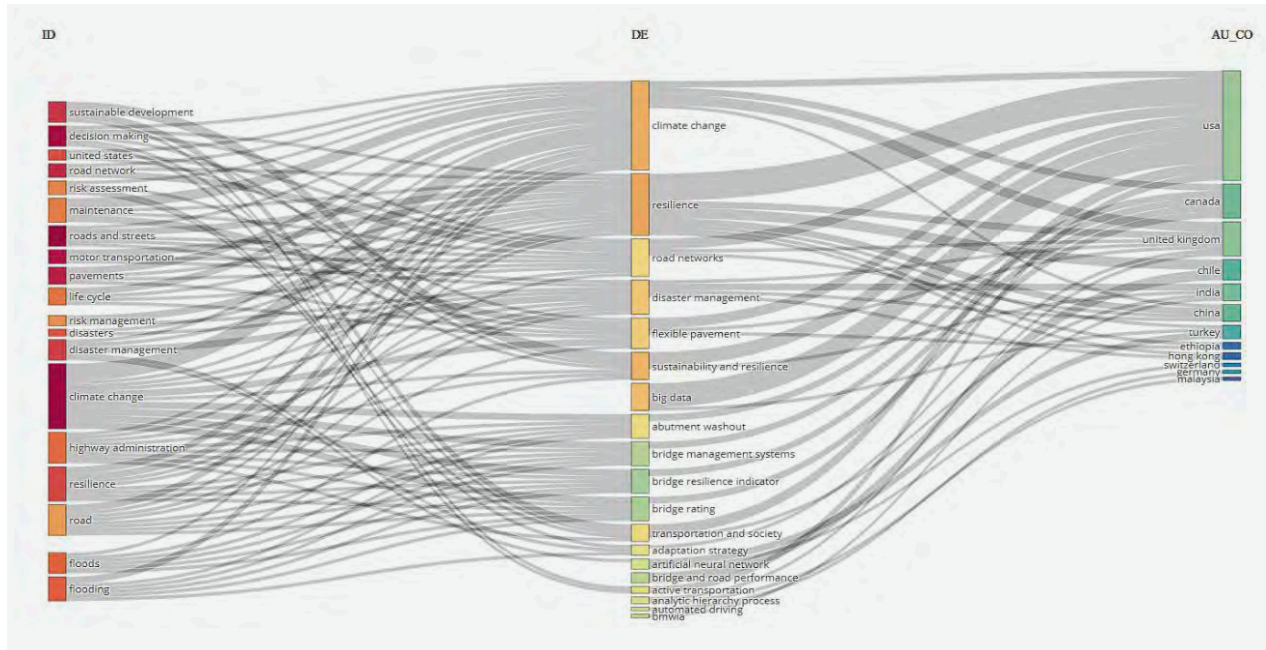
Los mapas temáticos indican una jerarquía clara: los Basic Themes —resilience, climate change y flooding— representan el corazón del campo y su creciente relevancia global ante el aumento de eventos meteorológicos extremos. Los Motor Themes, centrados en infraestructura vial (roads and streets, road network, motor transportation), reflejan la importancia estructural de las carreteras como sistemas críticos frente a amenazas climáticas.

Los Niche Themes —como análisis de ciclo de vida de pavimentos y sostenibilidad del transporte— evidencian líneas de investigación especializadas y técnicamente profundas que aún no dominan el campo, pero que aportan marcos metodológicos robustos. Paralelamente, los temas emergentes o declinantes relacionados con 'soil mechanics' o 'hazards' muestran áreas que están siendo reinterpretadas para adaptarse a la agenda de resiliencia climática.

El análisis de evolución temática revela una transición significativa: la investigación pasó de centrarse en infraestructura física y gestión reactiva de desastres (2008–2022) hacia modelos de gobernanza, toma de decisiones, sostenibilidad y resiliencia sistémica (2023–2025). Esta transformación refleja el impacto del cambio climático y la necesidad de integrar múltiples disciplinas —ingeniería, economía del ciclo de vida, políticas públicas y análisis de riesgo— para enfrentar los desafíos actuales.

En síntesis, el campo se encuentra en un proceso de maduración acelerada, avanzando desde una visión técnica de la infraestructura hacia un enfoque holístico que concibe las redes viales como sistemas adaptativos, interdependientes y críticos para la continuidad territorial y económica. La resiliencia deja de ser un atributo opcional para convertirse en un criterio esencial de diseño, operación y planificación estratégica.





Los Sankey permiten ver cómo se conectan los conceptos con autores y países líderes.

Países más influyentes

- Estados Unidos
- Canadá
- Reino Unido
- Chile
- India y China

Chile destaca debido a su liderazgo regional en: normativa sísmica, sistemas de evaluación continua, estudios de cambio climático y vulnerabilidad vial.

Conceptos más vinculados internacionalmente

- climate change
- resilience
- road networks
- disaster management

Indican consenso global en considerar la resiliencia vial como un problema transnacional.

Liderazgo académico

Autores como Parry, Lee, Yuan, Farahmand, Mostafavi aparecen repetidamente asociados a los temas centrales, consolidando una red internacional de investigación centrada en:

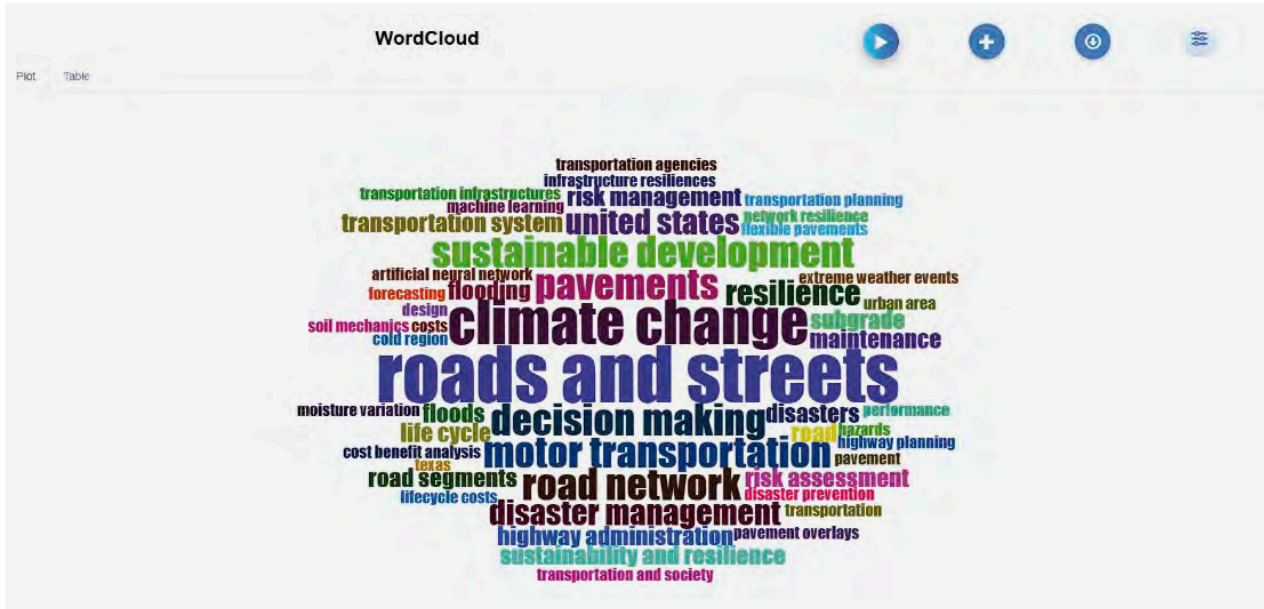
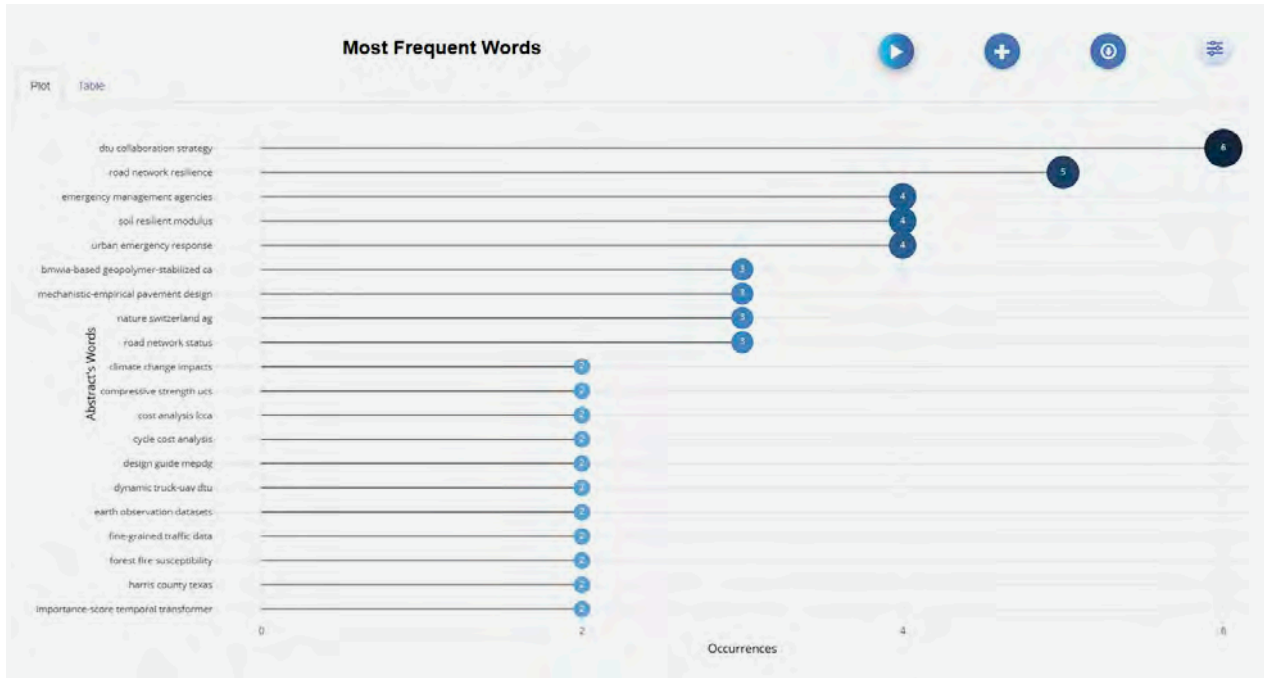
1. modelación predictiva,
2. ingeniería de pavimentos resilientes,
3. análisis de redes críticas,
4. gestión multi-amenaza.

El gráfico de *Most Frequent Words* confirma:

- road network resilience (6 apariciones)
- dtu collaboration strategy / emergency management agencies (5)
- soil resilient modulus, urban emergency response, geopolymer-stabilized materials, mechanistic-empirical pavement design (3)

Esto señala el surgimiento de una agenda más sofisticada:

- utilización de materiales alternativos y tecnologías geopoliméricas,
- modelación mecánico-empírica,
- integración de servicios de emergencia a los modelos de resiliencia,
- uso de ciencia de datos y machine learning.





Las word clouds reflejan la centralidad de ciertos conceptos que articulan el campo:

Conceptos más frecuentes

- roads and streets, road network, pavements → evidencia la concentración de la investigación en infraestructura vial, probablemente por su alta exposición a amenazas y su rol como red crítica habilitadora de movilidad, logística y servicios esenciales.
- climate change, extreme weather events, flooding → el cambio climático emerge como el principal factor de presión sobre las inversiones.
- resilience, disaster management, risk management, decision making → los estudios combinan infraestructura física con gobernanza, planificación y sistemas de gestión de riesgo.
- sustainable development y sustainability and resilience → se consolida un enfoque donde la resiliencia es vista como dimensión estructural del desarrollo sostenible.

La nube más reciente incorpora nuevos términos emergentes como machine learning, soil resilient modulus, geopolymer-stabilized materials y emergency response, que muestran un giro hacia soluciones avanzadas, predictivas y basadas en materiales innovadores.

El gráfico de *Factorial Analysis* muestra dos dimensiones dominantes:

Dimensión 1 (52,7%) – Enfoque técnico-material

Agrupar conceptos como:

- pavements
- life-cycle cost
- flexible pavement
- maintenance
- subgrade, soil mechanics

Representa el componente ingenieril de diseño, desempeño y envejecimiento de la infraestructura.

Dimensión 2 (23,1%) – Enfoque de gestión del riesgo

Incluye:

- risk management
- flooding, extreme weather events
- infrastructure resiliences
- disaster management

Indica la integración creciente entre ingeniería civil y políticas de resiliencia climática y gestión del riesgo de desastres.

Conceptos como **climate change**, **road network** y **resilience** se ubican entre ambas dimensiones, lo que evidencia su rol articulador y transversal.





El dendrograma revela cuatro macrofamilias temáticas:

1. Resiliencia climática y amenazas naturales
 - climate change, extreme weather events, sustainability
 - riesgo como eje estructurante.
2. Ingeniería vial y desempeño técnico
 - pavements, flexible pavement, subgrade, life-cycle cost.
3. Gestión del desastre y políticas públicas
 - disaster management, transport planning, emergency response.
4. Análisis de redes e infraestructura crítica
 - road networks, bridges, abutment washout, network flooding.

Esta organización confirma que la resiliencia ya no es solo una propiedad de diseño, sino un concepto sistémico que combina:

- amenaza
- vulnerabilidad
- exposición
- continuidad de servicio





CPI
Propone