



Ministerio de
Obras Públicas

Gobierno de Chile



Agua



Aeropuertos



Arquitectura



Obras Hidráulicas



Obras Portuarias



Vialidad

DIRECCIÓN DE VIALIDAD

ESTUDIO

Estudio básico catastro georeferenciado de riesgos y peligros naturales en la red vial.

TODO EL TERRITORIO NACIONAL



OCTUBRE DE 2011



ESTUDIO BÁSICO CATASTRO GEOREFERENCIADO DE RIESGOS Y PELIGROS NATURALES EN LA RED VIAL

RESUMEN EJECUTIVO

1) INTRODUCCIÓN

La vialidad en Chile sufre interrupciones por la ocurrencia de fenómenos naturales, ante lo cual en algunos casos se actúa en forma preventiva y en otros reactiva, principalmente a través de programas de emergencia. Si bien existen estudios sobre estos fenómenos y sobre la identificación de zonas de riesgo o peligro frente a la ocurrencia de un evento de esta naturaleza, es difícil prever el momento de su ocurrencia y su localización exacta en un determinado territorio, como también dimensionar sus efectos. Por lo anterior, resulta imprescindible disponer de una base de datos actualizada de posibles zonas de riesgos y peligros que hayan afectado y puedan afectar a la infraestructura vial del país, es decir, un registro actualizado de eventos, como también de las condiciones o condicionantes físicas, económicas y sociales de los territorios sobre los cuales se emplazan dichas infraestructuras, que permita avanzar en una planificación territorial más integrada, preventiva y sinóptica.

El presente estudio aporta elementos que permitirán evaluar la vulnerabilidad de las obras de infraestructura vial frente a impactos esperados u observados relacionados con el cambio climático. Todo lo anterior, con el objetivo de desarrollar nuevos criterios para la formulación de planes de contingencia, defensas fluviales y defensas costeras, así como también posibles cambios en los criterios de diseño de las obras viales, que sean necesarios de implementar en las diferentes regiones del país.

La Dirección de Vialidad contrató al Centro EULA de la Universidad de Concepción el estudio denominado "Catastro Georeferenciado de riesgos y peligros naturales en la red vial", Código BIP 30044377-0. El **Objetivo General** del trabajo fue identificar las áreas de riesgos por fenómenos naturales que comprometan a la red vial nacional a través de la sistematización y análisis de la información de dichos fenómenos que la han afectado en los últimos 20 años, en consideración a las modificaciones necesarias de implementar en la infraestructura vial, como consecuencia de los posibles efectos que el cambio climático pudiese generar en el futuro. Para el logro de este objetivo, la propuesta consideró los siguientes **Objetivos Específicos**:

1. Recopilar, normalizar y georeferenciar la información existente relacionada a emergencias viales asociadas a fenómenos naturales en los últimos 20 años.
2. Determinar las zonas y las obras de infraestructura vial más sensibles a las acciones de los riesgos naturales.
3. Realizar el análisis y caracterización geográfica de los puntos más críticos dentro de la red vial, específicamente relacionados con riesgos de remoción en masa e inundación.
4. Elaborar una base de datos digital georeferenciada, escala 1:20.000, con su respectiva cartografía, que contenga la zonificación de las Áreas de Riesgos Naturales que comprometan a la red vial a estudiar.
5. Generar una metodología de actualización para la base de datos espacial digital de las áreas de riesgo naturales elaborada.

2) ASPECTOS METODOLÓGICOS

2.1) Recopilación y análisis de información

Esta actividad se realizó considerando tres tipos de información. El primer tipo tiene que ver con la información de emergencias proporcionada por el mandante, su análisis permitió identificar las rutas afectadas por eventos naturales, el tipo de evento, y la longitud afectada. Asimismo, se realizó el estudio de los vacíos de información entre los años 1990 y 2009, así como su calidad. A partir de ello se elaboró un diagnóstico y una estandarización de la información para aplicarla posteriormente en la metodología. Esta información fue proporcionada por el Subdepartamento de SIG y Cartografía de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas. Un segundo tipo de información correspondió a los antecedentes asociados al inventario y estado de la red vial. Estos datos permitieron estimar los niveles de tránsito, tipo de carpeta, estado generalizado de la ruta, y localización. Esta información fue obtenida de diversas fuentes de la Dirección de Vialidad.

Un tercer tipo de información se refiere a los antecedentes contextuales. Estos corresponden a la información del sistema de actividades que rodean los caminos, así como de coberturas cartográficas, los cuales permitieron caracterizar, entre otros aspectos, la función de las rutas como factor productivo, su emplazamiento y presencia o ausencia de rutas alternativas, su contexto territorial y el contexto topográfico y morfológico en el que se encuentran. La información de emergencias, inventario y estado de la red vial y los antecedentes contextuales, permitieron compilar la base de datos necesaria para aplicar la metodología propuesta denominada Método de Evaluación Rápida (MER).

2.1.2) Bases Conceptuales de los Métodos de Evaluación Rápida y Detallada

Con el fin de alcanzar los objetivos del estudio, se desarrollaron 2 métodos de evaluación de riesgo, denominados: Método de Evaluación Rápida (MER) y Método de Evaluación Detallada (MED) de riesgos sobre la infraestructura vial.

El MER se desarrolló como una herramienta de planificación, cuyo objetivo principal fue lograr priorizar caminos o segmentos de caminos en base a un Índice de Riesgo, sobre un espacio territorial específico, para seleccionar los caminos a los cuales posteriormente se les aplicó el estudio detallado de riesgos. Asimismo, se constituyó en una métrica común que puede apoyar decisiones de inversión por la vía del mantenimiento. Dentro del marco del estudio, el MER está asociado al objetivo específico 2. El MED por su parte, se desarrolló como una herramienta de evaluación a escala de perfil de proyecto, con el fin de obtener una estimación de la rentabilidad social de opciones de solución a emergencias en caminos críticos y a la vez obtener el impacto sobre la reducción del riesgo producto del reforzamiento de la infraestructura. Este método se asocia al objetivo específico 3 del estudio.

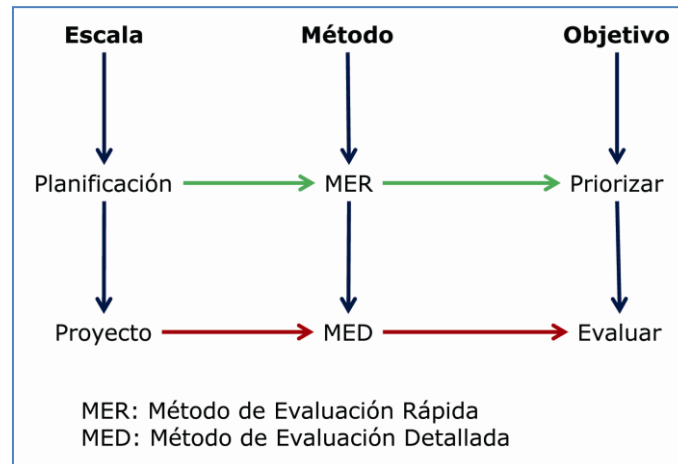


Figura 1: Enfoque conceptual del análisis de riesgo

Un aspecto central de ambos métodos fue el definir los principios bajo los cuales debían ser diseñados. Estos principios se resumen en los siguientes 5 aspectos:

- *Principio 1:* Lograr contar con una métrica estandarizada para medir el riesgo ante eventos naturales.
- *Principio 2:* Escalamiento del problema a nivel de Planificación y de Proyecto vinculando ambos niveles a través de un formato común de cálculo del riesgo.
- *Principio 3:* Facilidad de cálculo y aplicación, para su constante actualización.
- *Principio 4:* Menor requerimientos de información posible y con la mayor cantidad de información disponible.
- *Principio 5:* Que integre aspectos de ingeniería, territoriales y cartográficos.

Sobre la base de lo anterior, se formularon los métodos que constituyen la herramienta principal de análisis de riesgo.

2.2) Método de Evaluación Rápida (MER)

El objetivo fue construir un método homogéneo para identificar, en cada región del país, las rutas candidatas al análisis detallado de riesgos. Para desarrollar el método se establecieron como principios los siguientes: la facilidad de cálculo y disponibilidad de información, uso de información existente en la Dirección de Vialidad, rapidez de aplicación y enfoque de planificación basado en los riesgos naturales y principales atributos de la infraestructura vial.

El método propuesto y desarrollado se basó, principalmente, en tres pilares conceptuales: El primero referente al enfoque de gestión de geoamenazas de Free et al (2006), el cual desarrolla pasos de un sistema de gestión a redes vitales, entre las cuales se encuentra la infraestructura vial. El segundo, el enfoque metodológico de Xia (2005), Jelenius et al (2006) y Murray et al (2008) quienes desarrollan los conceptos de riesgo, probabilidad de ocurrencia y consecuencias de interrupciones totales o parciales en redes de infraestructura. Finalmente, el tercer pilar se refiere a la integración de la vulnerabilidad y riesgo de infraestructura vial, calibrado recientemente en Chile para el caso de puentes por Valenzuela et al (2010).

A partir de estos aspectos, se propuso un esquema que consideró, por un lado, ecuaciones ya calibradas para el caso de Chile y, por otro, ecuaciones calibradas para este estudio en particular. La calibración se realizó mediante la técnica de simulación de escenario. Esta técnica se basó en la conformación de todas las combinaciones de escenarios posibles, que en el caso del método corresponden aproximadamente a 2^{15} .

Esta simulación permitió, además, determinar los valores extremos de los diversos términos de las ecuaciones que componen el indicador construido. A partir de dicha configuración se dedujeron coeficientes de ciertas ecuaciones y escalas semánticas para construir los diversos índices de evaluación. Estos índices se agregaron para construir el Índice de Riesgo (IR), el cual resume la relevancia de la vía, su vulnerabilidad, exposición a eventos naturales y la probabilidad de ocurrencia de estos últimos. El concepto básico del método propuesto es el **Índice de Riesgo (IR)**, el que se definió como el producto entre la **Probabilidad de Ocurrencia (Pr)** y las **Consecuencias (C)** del evento natural sobre el sistema humano (Free et al, 2006).

- La **probabilidad de ocurrencia** corresponde a la recurrencia o frecuencia con que suceden los eventos naturales; es decir, al análisis del período de retorno del evento en un período de tiempo determinado. Esta probabilidad es propia de cada evento y específica para cada macro zona geográfica del país.
- Las **consecuencias** corresponden a los impactos sobre el sistema antrópico generados por la ocurrencia de un evento natural. Dichas consecuencias pueden medirse conociendo la **importancia estratégica** de la infraestructura vial, su **vulnerabilidad** y su **exposición** frente a eventos naturales.
- La **importancia estratégica** de un camino de la red vial o de alguno de sus componentes, está relacionada con la relevancia de la vía considerada para el sistema de actividades local, regional, nacional o internacional. Se mide en función de la presencia/ausencia de rutas alternativas a la vía o ruta afectada por un evento natural, por su tamaño y nivel de tráfico (Valenzuela et. al, 2010).
- La **vulnerabilidad** está relacionada con el estado general de la infraestructura vial y con la vulnerabilidad combinada ante diversos eventos naturales, cualificación que le permitirá, en mayor o menor medida, soportar o no soportar adecuadamente la ocurrencia de eventos naturales período a período. Asimismo, también dependerá de la probabilidad de falla de la infraestructura ante eventos naturales, es decir, de su diseño. Siguiendo a Valenzuela et al (2010) se propuso en este trabajo una forma de cualificar la vulnerabilidad de arcos viales.
- Finalmente, la **exposición** tiene que ver con la memoria acumulada de eventos sobre el camino o un segmento de este. De esta manera, existirán caminos y/o arcos que han sido más afectados por eventos y con mayor recurrencia, de tal modo que estarán o han estado más expuestos a este tipo de riesgos. En este trabajo se propone un índice de exposición específico en base a los antecedentes disponibles de emergencias viales existentes en las bases de datos.

Posteriormente el método fue aplicado a las regiones de Arica y Parinacota y Tarapacá, a fin de evaluar su comportamiento con datos reales. A partir de dicha aplicación y en conjunto con la Inspección Fiscal se realizaron ajustes al método para, en una segunda fase, aplicarlo a todas las rutas del país. En la Figura 2 se presenta la formulación general del MER.

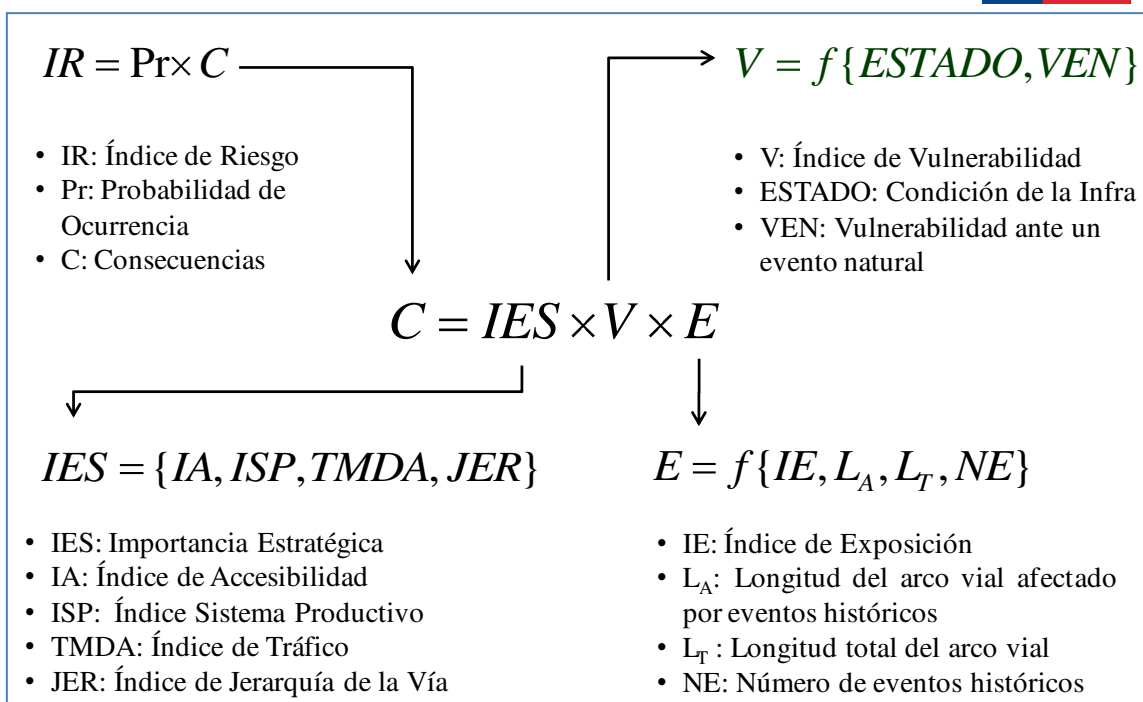


Figura 2: Formulación general MER

2.3) Aplicación del MER y selección de rutas para estudio detallado de riesgos

Una vez realizado el ajuste del método y depuradas y/o corregidas las bases de datos geográficas y alfanuméricas de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP), se realiza la selección de caminos para aplicar el MER. Para ello, de la información de emergencias viales homogeneizada y depurada, se construyó una base de datos con información histórica de eventos naturales, que consideró los períodos: 1990-1999, 2001-2003, y 2009. En años intermedios no se pudo obtener registro de eventos. De toda la red vial nacional se seleccionaron, aproximadamente 800 caminos afectados por al menos un evento natural en los períodos antes mencionados, sobre los cuales se aplicó el MER. Esto con el objetivo de seleccionar aquellas que serían evaluadas con mayor detalle en la fase siguiente, considerando el valor de IR obtenido.

Esta base de datos se agrupó en regiones contenidas en Macro Zonas. De este modo, los grupos de análisis considerados fueron:

- **Macro Zona Norte**, compuesta por las regiones de Arica y Parinacota, Tarapacá, Antofagasta y Atacama.
- **Macro Zona Centro**, compuestas por las regiones de Coquimbo, Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y Maule.
- **Macro Zona Sur**, compuesta por las regiones del Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos. En esta última no se incluyeron las provincias de Chiloé y Palena, dado que su economía, comportamiento del tráfico, condiciones climáticas, topográficas y morfológicas, las hacen más similares las regiones de Aysén y Magallanes.
- **Macro Zona Austral**, compuesta por las regiones de Aysén, Magallanes y las provincias de Chiloé y Palena.

Una vez conformada la base de datos, se calculó para cada una de las rutas analizadas el Índice de Riesgo (IR). Luego, se efectuó un análisis interpretativo de los resultados, teniendo en cuenta las variables que configuran el IR: importancia estratégica, vulnerabilidad, exposición y probabilidad de ocurrencia. A partir de los resultados del paso anterior, se seleccionaron de cada región todas aquellas rutas con valores de IR alto y se ordenaron, por región, según el IR obtenido. A partir de esto, se propusieron hasta dos rutas por región para considerar en el análisis detallado de riesgo. Cabe destacar que la definición final de las rutas seleccionadas fue validada con las Direcciones Regionales de Vialidad, como tarea previa al inicio de la Etapa III del estudio.

2.4) Método de Evaluación Detallada (MED) de riesgos

El método propuesto y desarrollado considera, en primer lugar, la caracterización de componentes de la infraestructura y los daños que pueden producir los eventos naturales sobre dichos componentes. Considera, además, la valoración de beneficios y costos sociales asociados a la interrupción total o parcial de un arco de la red. Dicha valoración se realizó contrastando diversos escenarios de valoración con respecto a un escenario base que corresponde a la aplicación reactiva de medidas correctivas mínimas. El método se sustenta en forma importante en el MER y en los conceptos de evaluación de costos desarrollado por Echaveguren et al (2000). En cuanto al cálculo de inversiones, el método consideró aspectos de la propuesta de Cid (1998) para caminos de bajo estándar. Asimismo, consideró el análisis de detalle de los eventos naturales y sus factores causales, como también su representación cartográfica de acuerdo a las bases del estudio. En general, el método y su aplicación consideró las siguientes etapas y/o actividades:

- Una descripción de la información meteorológica, topográfica, edafológica y geológica, además de otros antecedentes disponibles, que influyeron o condicionaron el desencadenamiento de los eventos analizados.
- Una valorización a nivel de perfil de los impactos directos que potencialmente puede inducir un corte o la operación restringida de la infraestructura vial, considerando los costos de recuperación del nivel de servicio al actuar en la emergencia y con el grado de daño de la infraestructura: despeje, habilitación, reposición, o rediseño y reconstrucción dependiendo del caso.
- Una estimación del Índice de Riesgo (IR) para cada escenario de evaluación, aplicando el MER pero sobre la base de datos de entrada más detallados obtenidos de información de terreno fundamentalmente. Esto con el objeto de no solamente determinar la rentabilidad social de la inversión en obras físicas, sino que además estimar el impacto sobre el IR de aplicar dicha inversión.
- La valoración de los costos directos de los usuarios expresados como: aumento de demoras y de costos de operación en el caso de cortes que involucren tránsito restringido; demoras, costos de operación y de tiempo de viaje por re ruteo.
- Un diseño a nivel de perfil de una metodología y plan de contingencia para las emergencias viales asociados a fenómenos de corte, teniendo en cuenta las actuales prácticas y recursos utilizados por las Direcciones Regionales de Vialidad en la gestión de emergencias.

En la metodología utilizada se aplicó un enfoque arco-red, en el cual para un arco vial determinado con pérdidas de serviciabilidad, se estudian los eventos naturales que lo afectan, se definen mitigaciones a escala general y se determina el impacto socioeconómico de dicha pérdida de serviciabilidad, relacionada, en este caso, con los fenómenos naturales de inundaciones y deslizamientos. En la Figura 3 se presenta el esquema metodológico general empleado.

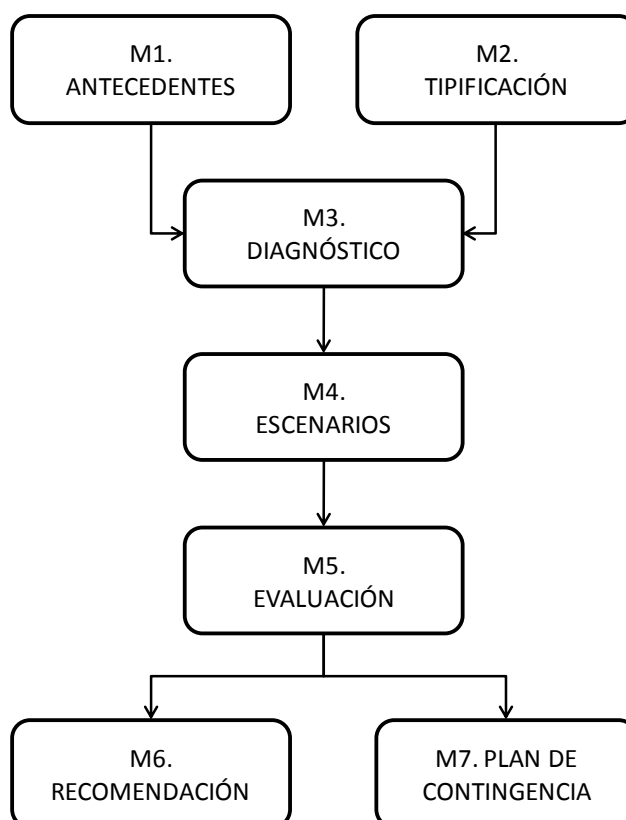


Figura 3. Metodología Evaluación Detallada de Riesgos (MED)

A su vez, para la representación espacial, la escala de trabajo utilizada fue 1:20.000 y el Sistema de Referencia de la representación espacial SIRGAS 2000 (WGS 1984), UTM huso 18 o 19 Sur, según la región en que se ubicara la ruta. Como se mencionó, la selección de las rutas se realizó sobre la base de los mayores Índices de Riesgo (IR) obtenidos al aplicar el Método de Evaluación Rápida (MER) en las regiones de Antofagasta, O'Higgins, Maule y Los Ríos, junto a las opiniones de las Direcciones de Vialidad de las mencionadas regiones y los acuerdos con el mandante.

Tabla 1. Rutas Seleccionadas para aplicar el Método de Evaluación Detallada (MED)

Macro Zona	Región	Ruta	Nombre del Tramo
Norte	Antofagasta	1	Paposo-Caleta el Cobre
		21 CH	Lasana-Ascotán
		23 CH	Calama-San Pedro de Atacama-Paso Sico
Centro	O'Higgins	I-45	Cruce Ruta 5-Termas del Flaco
		I-400	Cruce Ruta 90 (La Gloria)-San Fernando
		H-30	El Chaco-Tunca
	Maule	J-60	Quilpoco-La Pesca
		M-50	Cauquenes-Chanco-Constitución
Sur	Los Ríos	T-350	Av. Los Robles (Valdivia)-Niebla
		201 CH	Pullinque-Paso Carirriñe
		T-20	S. J. de la Mariquina-Mehuín
		203 CH	Lago Panguipulli-Puerto Fuy

Finalmente, cabe destacar que la aplicación del método consideró la realización de actividades en terreno, específicamente la visita a cada una de las rutas y tramos seleccionados en las regiones de Antofagasta, O'Higgins, Maule y Los Ríos. Los objetivos principales fueron: aplicar fichas de registro y observación de eventos naturales y factores causales que hubieren afectado la ruta y/o tramo específico analizado; identificar las principales características de los caminos, en cuanto a su condición y efectos observados, y, finalmente, mejorar y/o verificar la información territorial de contexto del área.

2.5) Modelo para la actualización de la zonificación de áreas de riesgo

El modelo para la actualización de la zonificación de riesgos se propuso en la Etapa IV del estudio, correspondiendo al diseño de un modelo digital que permite actualizar, en forma automática, la información de riesgos y su relación con la infraestructura vial. Para la automatización del proceso se utilizó la herramienta Model Builder de ArcGIS 9.3. El diseño del modelo digital se elaboró incorporando las variables físicas que intervienen en la definición del riesgo; posteriormente, se incorporaron las variables de Importancia Estratégica y Estado de la ruta, con el fin de obtener un Índice de Riesgo (IR) final semejante a los resultados del MER.

3) SÍNTESIS DE RESULTADOS

3.1) Homogeneización de información histórica utilizada para el cálculo del MER

De acuerdo a la revisión, existe información para los años 1990-99 en formato alfanumérico y de base de datos espacial, para los años 2001 y 2002 en registros EXCEL los cuales, sin embargo, presentan importantes vacíos de información, sobre todo en lo referente a causas u origen del evento informado y kilometraje afectado de la ruta. Para los años 2003, 2004 y 2005 la situación es bastante similar y, para el año 2009, la data disponible se encuentra mejor organizada. Para los años 2006, 2007 y 2008 no se encontró información susceptible de ser utilizada conforme a la finalidad del estudio. Un aspecto importante a destacar es que la información proporcionada no posee una continuidad espacial y temporal para todo el país. Es decir, los registros de datos aportados, por ejemplo gráficos, no tienen una continuidad espacial para todas las regiones del país o bien hay vacíos de información en algunos años y períodos

más extensos, como por ejemplo para los años 2006, 2007 y 2008. A continuación, se realiza una breve descripción de la información según el período al cual corresponde:

- **1990-1999.** Información en formato alfanumérico y espacial. Presenta vacíos de información, pero es el registro digital y base de datos más completo de los aportados. Destacar que la información presentada en este rango temporal proviene de un estudio anterior solicitado por la Unidad de SIG y Cartografía de la Dirección de Vialidad. Esta serie de antecedentes se recopiló de dos fuentes principalmente, Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas y diarios regionales entre los años 1990 y 2000.
- **2000-2002.** Información en formato alfanumérico y también espacial, con importantes vacíos en los campos de datos, especialmente respecto a la causa que originó el daño a la infraestructura vial. Debido a esta limitante, esta información no fue utilizada en el cálculo del Índice de Riesgo (IR).
- **2003.** La información fue obtenida del estudio “Situaciones de riesgo por amenaza de aluviones e inundaciones y movimientos sísmicos, Tomo 1-2”, Unidad de Prevención y Emergencia de la Subsecretaría de Obras Públicas (Diciembre 2003), siendo posible, luego de su transcripción y conformación de una planilla EXCEL, generar los datos requeridos sólo para el año 2003 y los shape correspondientes con los campos necesarios, que serían luego utilizados en el cálculo del MER.
- **2004, 2005, 2006, 2007 y 2008.** Del análisis de las coberturas y bases de datos proporcionadas, no fue posible generar la información requerida para la aplicación del Método de Evaluación Rápida (MER) debido a los vacíos de información en los campos de datos en lo referente a la causa que generó el daño y a que la información disponible en estos casos no se ajustaba a los requerimientos del MER.
- **2009.** Existe una base alfanumérica en formato EXCEL, bastante completa, que se ha empleado con las debidas correcciones, para generar el registro de eventos en todo el país.

3.1.1) Propuesta de base de datos para estudios de riesgos

Como resultado del análisis de información disponible en la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y de los requerimientos de antecedentes de contexto sobre la rutas que requieren los modelos, se entregó una propuesta para la configuración de una “base de datos” alfanumérica y espacial que permita incorporar la información necesaria para, por una parte, calcular el MER y, por otra, lograr el análisis detallado de riesgos o MED. Esta base de datos, define, entre otros aspectos, las tipologías de riesgos a ingresar en el sistema de información, a través del uso de descriptores o protocolos de captura de datos una vez ocurrido un evento determinado.

3.2) Método de Evaluación Rápida (MER)

A partir de la base de datos generada en la Etapa I, se identificaron 799 caminos con registros de al menos un evento informado en los períodos 1990 a 2000, 2001 a 2003 y 2009. Estos caminos fueron agrupados por región y por macro zona para posteriormente aplicar el MER. En la Tabla 2 se presenta el resultado agregado del Índice de Riesgo (IR) obtenido, según región y calificación.

Tabla 2. Proporción de la red vial analizada según Índice de Riesgo (IR) estimado mediante el MER.

Región	IR Alto		IR Medio		IR Bajo		Total
	N° Rutas	%	N° Rutas	%	N° Rutas	%	
Arica y Parinacota	2	12,5	4	25	10	62,5	16
Tarapacá	0	0	14	56	11	44	25
Antofagasta	5	20,8	2	8,3	17	70,8	24
Atacama	5	18,5	5	18,5	17	63	27
Coquimbo	0	0	16	80	4	20	20
Valparaíso	3	3,3	47	51,6	41	45,1	91
Metropolitana	5	11,6	18	41,9	20	46,5	43
O'Higgins	2	2,5	28	35	50	62,5	80
Maule	2	1,5	65	49,2	65	49,2	132
Biobío	1	1,6	10	16,1	51	82,3	62
Araucanía	3	3,5	6	7	77	89,5	86
Los Ríos	4	6	5	10	41	82	50
Los Lagos (1)	4	5,2	7	9,1	66	85,7	77
Los Lagos (2)	2	7,7	2	7,7	22	84,6	26
Aysén	0	0	3	20	12	80	15
Magallanes	0	0	0	0	25	100	25
Total País	38	4,8	232	29	529	66,2	799

(1) Las Provincias de Chiloé y Palena, se incluyeron en la Macro Zona Austral, debido a la similitud de las condiciones de los contextos ambiental, transporte, actividades productivas y tipo de infraestructura.

(2) Solo incluye las provincias de Chiloé y Palena.

Fuente. Elaboración propia

Los datos de la Tabla 2 nos permiten señalar lo siguiente: del total de vías seleccionadas para el estudio (799) un 4,8% (38) de ellas presentan un IR Alto, un 29% (232) presentan un IR Medio y un 66,2% (529) presenta un IR Bajo. Los Índices de riesgo alto tienden a concentrarse en las regiones de Antofagasta, Atacama, Metropolitana y Los Lagos, en este último caso sin las provincias de Chiloé y Palena. Los IR de nivel medio tienden a concentrarse en la Macro Zona Centro, principalmente en Coquimbo, Valparaíso, O'Higgins y Maule. Por su parte, los IR Bajos se distribuyen, en forma bastante homogénea, a través de todas las Macro Zonas del país, destacándose que en general en la Macro Zona Sur y Austral se encuentran la mayoría de los caminos con esta calificación, sobre el 80% desde la región del Biobío al sur.

Los resultados del cálculo del Índice de Riesgo (IR) fueron realizados por región y Macro Zona, entregándose la información en Tablas que, en sus filas, identifican el Rol del camino y, en las columnas, los sub-índices del IR, específicamente la Importancia Estratégica (IES), Vulnerabilidad (V), Exposición (E), Consecuencias (C), Probabilidad de Ocurrencia (Pr) y Calificación, según el valor del Índice de Riesgo. La interpretación

de los resultados también consideró mapas regionales que muestran las rutas evaluadas con su respectiva calificación (Figura 4).

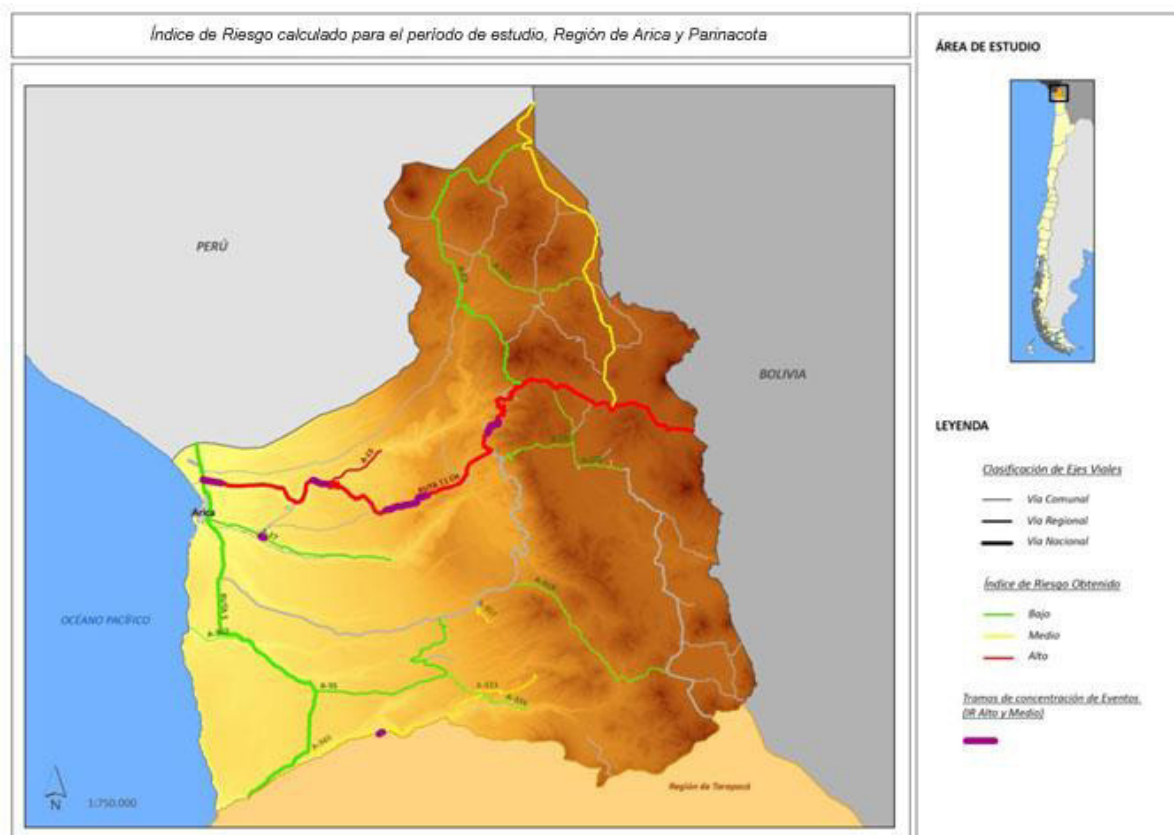


Figura 4. Representación cartográfica del IR, región de Arica y Parinacota

3.2.1) Síntesis Macro Zona Norte

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la Macro Zona Norte del país el método aplicado arrojó un total de 12 caminos con IR Alto, en las regiones de Arica y Parinacota, Antofagasta y Atacama (Tabla 3). La región de Tarapacá no presentó caminos con IR Alto. Para el rango de valor de IR Alto de la Macro Zona Norte, el valor más alto de IR se obtuvo en la región de Arica y Parinacota (IR 47,7; Ruta 11 CH), mientras que el valor más bajo para IR Alto se obtuvo en la región de Antofagasta (IR 27; Ruta 27 CH). Cabe destacar que la mayoría de estos caminos se localizan en áreas geográficas de pre-cordillera, cordillera y altiplano, siendo afectados por eventos naturales asociados a fuertes precipitaciones, nieve y crecidas de ríos y esteros.

Tabla 3. Síntesis de resultados de IR Alto Macro Zona Norte

Región	Ruta	Valor IR
Arica y Parinacota	11 CH	47,7
	A-15	31,7
Antofagasta	23 CH	41,3
	21 CH	41,2
	Ruta 1	40,6
	B-207	29,3
	27 CH	27,1
Atacama	31 CH	46,3
	Ruta 5	39,0
	C-35	36,6
	C-17	30,0
	C-173	25,8

Fuente. Elaboración propia

3.2.2) Síntesis Macro Zona Centro

De acuerdo a los resultados obtenidos, en la Macro Zona Centro del país el método aplicado arrojó un total de 12 caminos con IR Alto, en las regiones de Valparaíso, Metropolitana de Santiago, De O'Higgins y del Maule (Tabla 4). La región de Coquimbo no presentó caminos con IR Alto. De acuerdo a los rangos de valores de IR Alto para la Macro Zona Centro, el valor más alto de IR se obtuvo en la región Metropolitana (IR 50; G-25). El valor más bajo para IR Alto se obtuvo en la misma región (IR 20; Ruta G-355). Cabe destacar que, en el caso de la región Metropolitana estos caminos se localizan en ambientes pre-cordilleranos y de alta cordillera, mientras que en las regiones de Valparaíso y el Maule en sectores de la Cordillera de La Costa, siendo afectados por eventos naturales asociados a fuertes precipitaciones y nieve, con desprendimientos y deslizamientos de terrenos, y crecidas de ríos y esteros.

Tabla 4. Síntesis de resultados de IR Alto Macro Zona Centro

Región	Ruta	Valor de IR
Valparaíso	Ruta 68	34,7
	F-30-E	31,0
	F-800	24,4
Metropolitana	G-25	50,0
	G-21	31,7
	G-421	26,9
	G-251	24,8
	G-355	20,4
O'Higgins	H-448	32,1
	H-328	23,4
Maule	J-60	28,5
	M-50	26,9

Fuente. Elaboración propia

3.2.3) Síntesis Macro Zona Sur

La Macro Zona Sur, que comprende las regiones del Biobío a Los Lagos, sin Chiloé y Palena, presenta 12 caminos con valores de IR Alto y rangos que varían entre 20 y 56. Cabe destacar que en las regiones de Los Ríos y de Los Lagos se obtuvo la mayor cantidad de caminos con dicha calificación. De acuerdo a los resultados obtenidos, en la Macro Zona Sur del país el método aplicado arrojó un total de 12 caminos con IR Alto, en las regiones del Biobío, La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos (Tabla 5). Conforme a los rangos de valores de IR Alto para la Macro Zona Sur, el valor más alto de este IR se obtuvo en la región de Los Lagos (IR 56; Ruta 225 CH), mientras que el valor más bajo se obtuvo en la región de Los Ríos (IR 20,8; T-270).

Tabla 5. Síntesis de resultados de IR Alto Macro Zona Sur

Región	Ruta	Valor IR
Del Biobío	O-14	35,2
La Araucanía	R-22	27,1
	R-89	27,0
	R-35	25,1
Los Ríos	T-350	33,4
	Ruta 201 CH	25,2
	T-393	23,6
	T-270	20,8
Los Lagos	Ruta 225 CH	56,3
	V-69	41,3
	U-40	34,0
	U-30	22,6

Fuente. Elaboración propia

3.2.4) Síntesis Macro Zona Austral

En esta Macro Zona el método aplicado arrojó un total de 2 caminos con IR Alto, ambos en la región de Los Lagos (Tabla 6). De acuerdo al rango de valores de IR Alto para la Macro Zona Austral, el valor más alto de IR corresponde a la Ruta 7 (IR 77) y el límite inferior a la Ruta 235 CH (IR 75). A lo anterior, se debe agregar las dos rutas de la región de Aysén cuyos IR se sitúan próximos o en el límite del rango de IR calificado como Alto para esta Macro Zona; Rutas X-25 (IR 36; Medio) y Ruta 7 (IR 41; Medio).

Tabla 6. Síntesis de resultados de IR Alto Macro Zona Sur

Región	Ruta	Valor IR
De Los Lagos, sin Provincias de Chiloé y Palena	Ruta 7	77,1
	Ruta 235 CH	74,9
Aysén y Provincias de Chiloé y Palena	Ruta 7	41,2
	X-25	35,9

Fuente. Elaboración propia

3.3) Síntesis Estudio de Zonas de Riesgo y Peligros Naturales en la Red Vial (MED)

A partir de los resultados de la aplicación del Método de Evaluación Rápida (MER) y en coordinación con la contraparte técnica y algunas Direcciones Regionales de Vialidad, se seleccionaron caminos representativos de 3 Macro Zonas del país, las cuales, en la evaluación previa del MER presentaban IRs Altos (Tabla 7).

Tabla 7. Rutas Seleccionadas para aplicar el Método de Evaluación Detallada (MED)

Macro Zona	Región	Ruta	Nombre del Tramo
Norte	Antofagasta	1	Paposo-Caleta el Cobre
		21 CH	Lasana-Ascotán
		23 CH	Calama-San Pedro de Atacama-Paso Sico
Centro	O'Higgins	I-45	Cruce Ruta 5-Termas del Flaco
		I-400	Cruce Ruta 90 (La Gloria)-San Fernando
		H-30	El Chaco-Tunca
	Maule	J-60	Quilpoco-La Pesca
		M-50	Cauquenes-Chanco-Constitución
Sur	Los Ríos	T-350	Av. Los Robles (Valdivia)-Niebla
		201 CH	Pullinque-Paso Carirriñe
		T-20	S. J. de la Mariquina-Mehuín
		203 CH	Lago Panguipulli-Puerto Fuy

El procedimiento para aplicar el MED consideró principalmente 2 etapas: Trabajo de terreno para recopilar información y aplicación del modelo.

En el trabajo de terreno se recopilaron los antecedentes necesarios para cuantificar con mayor precisión el Índice de Riesgo, lo que se traduce principalmente en precisar la importancia estratégica del segmento de ruta en estudio, la vulnerabilidad y la exposición al riesgo.

Puesto que el principal objetivo del MED es evaluar alternativas, se definieron dos aspectos relevantes: uno el contar con indicadores de desempeño, que en este caso fueron el Índice de Riesgo (IR) y el valor social actualizado neto (VSAN). El IR se calcula en base a los mismos procedimientos descritos en el MER, pero considerando los antecedentes de terreno y el efecto de la aplicación de inversiones en refuerzo de la infraestructura. El VSAN por su parte, se aplicó considerando:

- Una tasa social de descuento del 6 %.
- Un horizonte de evaluación de 5 años.
- Costos de Los Usuarios compuestos por costos de demoras y de operación.
- Costos de la Dirección de Vialidad, que corresponden al monto de inversión tanto en la situación base como en los escenarios alternativos de evaluación.

El otro aspecto fue definir adecuadamente los escenarios de evaluación, para lo cual se conceptualizaron 2 escenarios: uno Base, denominado **Soluciones Provisorias de Corto Plazo**, y uno Alternativo denominado **Solución Definitiva**, con dos opciones, una de intervención mayor en el año 1 y otra de intervención menor en el año 1 con una mantención en el año 5.

En el escenario Base se asumió que existe un cierto número de eventos naturales al año, o riesgos, que restringen la operación durante un cierto número de días, caso en

el cual las principales actividades de Vialidad son las de ejecutar tareas de despeje y reposición. Durante ese período, los usuarios exhiben demoras y costos de operación asociados a circulación restringida. En el escenario Alternativo, se adoptan medidas de mitigación destinadas a reducir la vulnerabilidad, por lo cual, por un lado, se eliminan las demoras y se reducen los costos de operación, pero se aumenta el gasto de Vialidad.

De acuerdo a lo antes expuesto, en la Tabla 8 se presentan los resultados agregados obtenidos en la evaluación de las 12 rutas de la Tabla 7.

Tabla 8. Resumen de resultados obtenidos al aplicar el MED en 12 caminos de las Macro Zonas Norte, Centro y Sur.

Macro Zona	Región	Ruta	IR			VSAN (mm\$)	
			SB	A1	A2	SB-A1	SB-A2
Norte	Antofagasta	1	34	25	25	1827,1	1756,0
		21 CH	44	27	27	1743,9	1714,4
		23 CH	38	24	24	4059,6	3714,7
Centro	O'Higgins	I-45	412	18	18	1755,1	1850,0
		I-400	14	3	3	1798,9	1860,8
		H-30	16	4	4	2050,3	1909,3
	Maule	J-60	44	18	18	2351,7	1979,6
		M-50	44	30	15	2089,0	1922,9
Sur	Los Ríos	T-350	38	14	14	204,9	355,6
		201 CH	49	37	37	-1522,4	277,3
		T-20	20	5	5	156,1	300,2
		203 CH	52	23	23	421,4	287,3

SB: Situación Base; A1: Alternativa 1; A2: Alternativa 2. SB-A1: Comparación de situación base con alternativa A1; SB-A2: comparación de la situación base con la alternativa 2. VSAN: Valor Social Actual Neto.

En todos los casos analizados, con excepción de la ruta 201 CH, resulta más rentable aplicar siempre medidas de mitigación de riesgos frente a aplicar repetitivamente labores de emergencia. Esto se debe esencialmente a que las rutas analizadas no poseían alternativas competitivas, por lo cual la demanda de viajes tendía a ser inelástica y por tanto altamente sensible a los costos de operación y demoras.

En las rutas de Macro Zona Sur se aprecia una diferencia importante en el orden de magnitud de las rentabilidades. Esto se debe esencialmente a la diferencia en el valor de la inversión y en la magnitud de los flujos. Las inversiones en dicha Macro Zona son superiores al resto y los flujos más bajos, por lo cual es esperable el resultado obtenido.

El resultado en términos de evaluación del riesgo es que a igual probabilidad de ocurrencia e importancia estratégica, la reducción de la exposición refleja la reducción del número de eventos sobre una ruta o segmento de ella, al menos durante el horizonte de evaluación propuesto. Las medidas de mitigación adoptadas consideraron dos niveles de intervención que inducen costos distintos. Asimismo, en ambos escenarios alternativos las medidas de mitigación se plantearon bajo el supuesto de mantener invariable el ancho de faja del camino, caso en el cual no se cuantificarían potenciales expropiaciones.

Los resultados del MED muestran que, debido a la naturaleza de los eventos naturales informados, el escenario más adecuado de modelación es la operación restringida sin corte total de un camino determinado. Con este mecanismo de gestión, se eliminarían

automáticamente los costos de la comunidad, limitándose el análisis sólo al estudio de los costos de operación de la vía y demoras para el cálculo del impacto económico.

Finalmente, las evaluaciones realizadas en todas las rutas seleccionadas mostraron que siempre es recomendable activar, más que un Plan de Contingencia, un Plan de Mitigación en las zonas afectadas por un evento natural, dado el beneficio social que implicaría hacerlo. El beneficio social de realizarlo se da en el mediano plazo, por cuanto un plan de contingencia no resuelve los tiempos de espera ni los costos que se dan año a año. El plan de mitigaciones en cambio actúa sobre las variables que generan el riesgo principalmente sobre la reducción de vulnerabilidad, lo cual reduce necesariamente el valor del Índice de Riesgo.

Respecto a los eventos naturales analizados, cabe destacar lo siguiente: con las visitas a terreno y la información territorial de contexto fue posible validar o confirmar la relación o relaciones existentes entre la concentración e intensidad de las precipitaciones, las características del sustrato geológico y la cobertura vegetal en las zonas en las cuales se localiza la infraestructura vial. Con el objetivo de integrar variables para la caracterización de los riesgos naturales, como geología, geomorfología, pendientes, suelos y cobertura vegetal, se aplicaron Matrices de Evaluación para riesgo de remoción en masa y para riesgo de inundación, lo anterior a través de la denominada superposición cartográfica.

Los resultados obtenidos fueron satisfactorios, observándose, en general, una relación entre el evento informado en una ruta o bien en un segmento de ella, respecto de la estimación de su vulnerabilidad a partir de las observaciones de terreno y de la integración de variables de contexto o bien de detalle, según fuere el caso. En este sentido, en la Etapa IV del estudio se avanzó en un modelo cartográfico que permita automatizar el proceso para las rutas priorizadas mediante el álgebra de mapas.

Una variable que se mantiene en todas las Macro Zonas dice relación con los eventos de precipitaciones intensas como detonante de los riesgos naturales. De este modo, precipitaciones intensas sobre cordones montañosos en rocas metamórficas o intrusivas, con parte de su superficie meteorizada y baja cobertura vegetal, son factores detonantes de eventos de riesgo, particularmente de deslizamientos o derrumbes, situación que aumenta la vulnerabilidad de las vías y posible exposición. Como resultado del análisis, es posible afirmar que estos procesos tienden a activarse en todas las áreas que presentan pendientes superiores a 30% o 20°, representando este valor un umbral a ser considerado en futuros diseños viales o bien medidas de mitigación.

Una remoción en masa ocurrirá dependiendo fundamentalmente de la pendiente, geomorfología, geología y cobertura vegetal del terreno como respuesta a eventos naturales detonantes tales como sismo, lluvia, nieve o combinación de los anteriores (e.g. Alcock y Geo, 2001; Sabatakaski et al., 2005).

En este sentido el control climático es la humedad, la cual a través de la percolación crea condiciones de presión alta en los poros del suelo y de las rocas. Especialmente, en ambientes de tipo mediterráneo, a pesar de la sequía general que los caracteriza durante muchos meses del año, los eventos extraordinarios pueden ocasionar grandes movimientos del terreno (Alcántara, 2000). Sepúlveda et al. (2011) entregan una excelente revisión de los eventos que han gatillado procesos de remoción en masa en Chile en los últimos años.

Por ello es recomendable que, frente a taludes distintos que presentan distinta capacidad de resistencia a eventos naturales, en principio no es correcto asumir una

condición umbral única que delimite la ocurrencia de la no-ocurrencia de un proceso de remoción en masa para toda una Macro Zona. La condición umbral i.e. lluvia crítica, aplica en forma sitio-específica, vale decir para un talud en particular, donde el talud queda caracterizado según su pendiente, geomorfología, geología y cobertura vegetal. Los resultados del MED indican que, debido a la naturaleza de los eventos naturales informados, el escenario más adecuado de modelación sería la operación restringida sin corte total de un camino determinado. Con este mecanismo de gestión, se eliminarían automáticamente los costos a los no-usuarios, limitándose el análisis sólo al estudio de los costos de operación de la vía y demoras para el cálculo del impacto económico.

3.4) Modelo para la actualización de la zonificación de áreas de riesgo

Se desarrollaron dos herramientas dentro del software ArcGis (ArcToolBox). La primera de ellas, asimilable al factor amenaza, denominada Modulo FISICO, cuya finalidad es calcular la riesgosisdad de las vías en materia de inundación y remoción en masa y, la segunda, el Modulo MER asociado a la vulnerabilidad, que se aplicó directamente al Método de Evaluación Rápida (MER). El interés de esta aplicación radica en la posibilidad de poder mostrar, de una manera rápida, sintética y analítica, una serie de procesos de análisis que, integrando una cantidad de variables, genera un resultado espacial a una escala macro, que facilita la toma de decisiones en lo que a gestión de la red vial se refiere. De este modo, lo novedoso del método propuesto se basa en la posibilidad de integrar información relativa al riesgo físico, conjuntamente con otras variables de índole económico y socio-demográfico, en la aplicación de un modelo sencillo, fácilmente actualizable y replicable en todo el país, que posibilita una visión global, plasmable en una cartografía comprensible por todos, de la vulnerabilidad de la red vial chilena ante los riesgos naturales.

4) CONCLUSIONES

4.1) Sobre fuentes de información y bases de datos

En relación a la información proporcionada por la Dirección de Vialidad y otras reparticiones del MOP (bases de datos gráficas y alfanuméricas), presentaba problemas de diversa índole, lo que requirió un esfuerzo de depuración y estandarización. Sobre la base de estos antecedentes, debidamente corregidos, se aplicó el MER para todas las rutas del país, obteniéndose una mirada global del estado o condición de los caminos en función de su riesgo frente a eventos naturales. La información utilizada para aplicar el MER presenta deficiencias perfectibles en cuanto a cobertura espacial y temporal. Los métodos de obtención y registro de información de emergencias viales difieren sustancialmente en las regiones analizadas, siendo necesario depurar, corregir y normalizar las bases de datos, de acuerdo a los requerimientos del Método de Evaluación Rápida propuesto en este estudio y de otras necesidades de información del Ministerio de Obras Públicas. Para ello, es necesario desarrollar una arquitectura de base de datos que permita el intercambio y resumen de datos que son específicos y/o transversales a la evaluación de riesgos sobre la infraestructura vial.

4.2) Sobre el Método de Evaluación Rápida (MER)

Se desarrolló un método que permitió evaluar el riesgo que afecta a la infraestructura vial sobre la base de su importancia estratégica, vulnerabilidad y la exposición histórica a eventos naturales. El índice desarrollado permitió rankear el nivel de afectación de la vialidad ante eventos naturales lo cual tiene una doble utilidad. La primera es el propósito de este estudio: identificar vías para un análisis detallado sobre

la base de información existente. La segunda utilidad tiene que ver con el uso de este índice para priorizar inversión, o atención, por Macro Zona, lo cual trae beneficios innegables toda vez que es posible incluir, por ejemplo, emergencias viales en planes de conservación y/o planes de mitigación de las mismas.

Un aspecto importante a destacar es que el MER demostró su utilidad como una herramienta de Planificación de la infraestructura vial a nivel regional y nacional, logrando integrar una diversidad de variables, con datos de relativa fácil obtención, en un indicador de síntesis que permite focalizar y orientar inversiones y medidas de prevención, especialmente referidas a la exposición de la infraestructura vial frente a riesgos naturales. En este sentido, el MER no constituye una herramienta de detalle para evaluar riesgos, en un sentido más clásico, o la condición específica de una ruta o un segmento de ella para fines de diseño o constructibilidad, sino más bien está orientada a entregar una visión territorial sinóptica de la infraestructura vial, respecto de otros factores que la condicionan, potencian o bien limitan, sean éstos de orden físico, natural, económico o social. Mediante la aplicación del método se obtuvo un listado de vías jerarquizadas de acuerdo al IR por macro-zonas y región, resultados consistentes con la experiencia previa y conocimiento de la infraestructura vial del equipo de trabajo y de la contraparte técnica.

4.3) Sobre el Método de Evaluación de Detalle (MED)

En el escenario alternativo, se asumió que se adoptan medidas de mitigación destinadas a reducir la vulnerabilidad de una ruta o segmento de ella, por lo cual por un lado se eliminan las demoras, se reducen los costos de operación, pero se aumenta el gasto de vialidad. En términos de riesgo el resultado es que a igual exposición, probabilidad de ocurrencia e importancia estratégica la reducción de vulnerabilidad reduce el número de evento, al menos durante el horizonte de evaluación. A su vez, en el escenario alternativo se consideraron dos tipos de medidas de mitigación dando origen a las denominaciones, Escenario Alternativo 1 y Escenario Alternativo 2. Las medidas de mitigación adoptadas consideraron dos niveles de intervención que inducen costos distintos. Asimismo, en ambos escenarios alternativos las medidas de mitigación se plantearon bajo el supuesto de mantener invariante el ancho de faja, caso en el cual no se cuantifican potenciales expropiaciones.

De acuerdo a las evaluaciones realizadas, el escenario más de adecuado de modelación sería la operación restringida, sin corte total de camino. Con esto, se eliminan automáticamente los costos a los no-usuarios, limitándose el análisis al estudio de los costos de operación y demoras para el cálculo del impacto económico. Cabe destacar que las evaluaciones realizadas, en todos los ejemplos, mostraron que siempre es recomendable activar más que un plan de contingencia un plan de mitigación en las zonas afectadas dado el beneficio social que implica hacerlo. Finalmente, respecto del plan de contingencia, se recomienda considerar los resultados de este estudio para revisar y mejorar la sección 7.206 del volumen 7 del Manual de Carreteras, en cuanto a la gestión de emergencias, partiendo por una fase de planificación a escala de macrozona, hasta una escala de intervención directa ante emergencias.

4.4) Sobre el Modelo para la actualización de la zonificación de áreas de riesgo

En el proyecto se logró generar una serie de funciones basadas en las aplicaciones del Model Builder, que permiten automatizar la entrada y salida de información relacionada con los riesgos naturales de inundación-anegamiento y procesos de remoción en masa en un ambiente de Sistema de Información Geográfica (SI), para las once rutas priorizadas a nivel nacional. Para actualizar dicho modelo sólo se deben

introducir con cierta regularidad los archivos de entrada para el cálculo del riesgo en cada ruta y región. En este sentido se recomienda:

- Proponer una estructura fija y ordenada de inclusión de datos de eventos en base de datos espacial. Algunos de los campos que según el modelo propuesto deben ser incluidos manualmente, número de eventos y longitud afectada, podrían ser calculados automáticamente por el SIG si la base es de calidad.
- Crear un listado definitivo de vías por región, en función de ROL y KILOMETRAJE, y consignado como un solo elemento dentro del shape, para evitar errores de consignación de datos en función de estado de homologación.
- Obtener o generar coberturas de geología y geomorfología de manera más exacta. Sería conveniente, además, definir una metodología de trabajo y desarrollar el producto para todo el país a una escala no menor a 1:50.000.

4.5) Sobre la infraestructura vial, riesgos naturales y cambio climático

Respecto de los escenarios de incertidumbre que genera el cambio climático, se proponen líneas de acción para aplicar el concepto de adaptación al cambio climático. Estas líneas de acción se refieren principalmente a un grupo de proyectos de investigación aplicada destinados a conformar una base de conocimiento en torno al tema. Cabe señalar que la mayoría de los estudios recomendados, tiene por objetivo predecir una condición futura del clima, la cual contrastada con la situación actual permitirá determinar el costo de la adaptación de la infraestructura vial sensible, al cambio climático.

- **Modelación Climática.** En los diversos países se han desarrollado modelos de escala global acerca de las tendencias de cambio climático. En Chile existen estudios que muestran patrones generales de cambio en temperatura y precipitaciones. En este caso se recomienda sin embargo, focalizar estos estudios en base a:
 - Modelación Local de Patrones de cambio climático, integrando datos meteorológicos y modelos predictivos. Esto permitirá definir zonificaciones actuales y futuras de condición climática y a la vez definir por zona, diversos escenarios climáticos.
 - Modelación Local de curvas Intensidad-Duración-Frecuencia, las cuales permiten predecir con mayor precisión las magnitudes de las crecidas de diseño para obras de protección fluvial, saneamiento, drenaje y puentes.
 - Desarrollo de modelos predictivos de eventos nivales y nivo-pluviales extremos especialmente en zonas montañosas, lo cual permitirá determinar de una manera más precisa la oportunidad y dimensión de las acciones de mantenimiento invernal.
- **Vulnerabilidad de la Red Vial.** En este caso lo que se persigue es definir las condiciones de contexto sobre las cuales se emplaza la red vial, tanto sobre la base climática actual como para los escenarios climáticos, cuál es la condición actual y futura de la red en cuanto a su vulnerabilidad. Particularmente, se recomienda:
 - Identificar las zonas inundables tanto por aumento del nivel del mar como por inundaciones y anegamiento.
 - Identificar las macro-zonas con potencial de deslizamiento.
 - Desarrollar un mapa nacional de vulnerabilidad de la red vial.

- **Puentes y Alcantarillas.** En este caso se recomienda, en base a los estudios anteriores, revisar las normativas en cuanto a proporcionar métodos de evaluación rápida de potencial de socavación y de vulnerabilidad hidráulica en las rutas de mayor vulnerabilidad. Se recomienda asimismo, y en base a los modelos climáticos, y de vulnerabilidad, revisar las prácticas y normas de diseño de puentes y alcantarillas, a fin de incorporar potenciales cambios en criterios generales de diseño.
- **Pavimentos y materiales.** La mayor parte de la red vial pavimentada de Chile se ha construido con mezcla asfáltica y/o en base a tratamientos superficiales. Los diseños se realizan sobre el supuesto que los rangos de temperatura y radiación solar de trabajo permanecen constantes en tiempo. A partir de la información recopilada existe evidencia que este supuesto no es recomendable dado el cambio climático debido a que subvalúa el envejecimiento del material. Por tanto, se sugiere desarrollar estudios tendientes a evaluar el impacto sobre los pavimentos asfálticos del aumento de temperatura y radiación solar.

Asimismo, se recomienda realizar estudios de caracterización de la capacidad de soporte de los suelos típicos sobre los cuales se emplazan los caminos, pensando en que el tiempo de saturación aumentará en algunos casos, así como la susceptibilidad a las heladas. Lo anterior lleva también a la necesidad de revisar los procedimientos de diseño hidráulico de alcantarillas, de los sistemas de drenaje y de los métodos de caracterización de tiempos de saturación de bases y sub-bases granulares. Eventualmente podrá ser necesario evaluar nuevos materiales que refuercen la resiliencia de los materiales usados en el diseño de pavimentos.

- **Mantenimiento Vial.** Teniendo en cuenta el modelo británico, es posible visualizar que las acciones de mantenimiento vial vean aumentado su costo, dado que las necesidades de mantenimiento, o de adaptación impondrán aumentos a los estándares de diseño y construcción y eventualmente a los niveles de servicio con que se evalúa el mantenimiento. Asimismo, la planificación de mantenimiento, que se desarrolla en base a ciertos supuestos de condiciones climáticas, debiera ser revisada considerando los diversos escenarios climáticos, no solo a nivel nacional, sino que a la vez a nivel local, aprovechando modelos climáticos locales.
- **Otros Aspectos a considerar.** Los efectos del cambio climático se manifiestan de dos formas. A largo plazo, mediante un cambio sostenido, y a corto plazo, principalmente por ocurrencia de eventos catastróficos. Los estudios precedentes recomendados se refieren a los impactos de largo plazo. Sin embargo, en el corto plazo y particularmente ante la presencia de eventos catastróficos, se recomienda:
 - Sistematizar los sistemas de alerta de emergencias viales, particularmente los referidos a eventos naturales exacerbados por el cambio climático
 - Sistematizar los sistemas de información, almacenamiento y comunicación de emergencias viales
 - Sistematizar planes de contingencia a nivel local en las zonas de la red vial nacional que exhiban una mayor vulnerabilidad.

5) REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bell, M. G. H, Kanturska, U Schmocker J.-D. And Fonzone, A (2008), Attacker–defender models and road network vulnerability. *Phil. Trans. R. Soc. A* (2008) 366, 1893–1906.
- Berdica, K (2002). An introduction to road vulnerability: what has been done, is done and should be done. *Transport Policy*, 9, 117 – 127.
- Cid, G (1998). Metodología de cálculo de inversión social para proyectos de Caminos de Bajo Estándar. Memoria de Título. Supervisor: Tomás Echaveguren. Universidad de Concepción, Departamento de Ingeniería Civil. Chile.
- Dirección de Planeamiento (2003). Análisis y evaluación del sistema de planificación de la infraestructura desde el punto de vista de la competitividad del país. Elaborado por ARISTO Consultores. Chile.
- Dirección de Planeamiento (2004). Estudio análisis de accesibilidad territorial – fronteras interiores. Desarrollado por consorcio HABITERRA-INTRAT Ltda. Chile.
- Dirección de Planeamiento (2008). Estudio de Infraestructura para la Competitividad. El MOP en la Promoción del Crecimiento Económico. Actualización de Antecedentes 2008. Chile
- Dirección de Vialidad (1994-2008). Plan Nacional de Censos de Vialidad. <http://servicios.vialidad.cl/censo/index.htm>. Chile.
- Dirección de Vialidad (2007). Estudio Básico Análisis para Asignación de Tránsitos a la Red Vial. Elaborado por LEN & Asociados Ingenieros Consultores. Chile.
- Dirección de Vialidad (2008a). Proposición de acciones de mantenimiento y estado de la calzada y bermas para caminos pavimentados de la red vial nacional. Departamento de Gestión Vial. Chile.
- Dirección de Vialidad (2008b). Instructivo para efectuar el inventario de conservación vial nuevo enfoque. Subdirección de Mantenimiento, Departamento de Conservación. Chile.
- Echaveguren, T Cifuentes, O y Echaveguren, E (2000). Costos Directos de los Usuarios en Sistema de Gestión de Puentes MAPRA. VI Congreso PROVIAL 2000. 259 - 274. La Serena. Chile.
- Erath, A., J. Birdsall, K.W. Axhausen and R. Hajdin (2009), Vulnerability Assessment of the Swiss Road Network. TRB 2009 Annual Meeting, Unites States.
- ESRI (2006) ArcGis Desktop Help. 1999-2006 ESRI, 380 New York Street, Redlands, CA 92373-8100, USA
- ESRI (2004) ArcGis 9. Linear Referencing in ARCGIS. Patrick Brennan, Melanie Harlow, 2002-2004, ESRI.
- Free, M Anderson, S Milley, C and Mian, J (2006). Geohazard risk management for infrastructure projects, *Proceedings of ICE Civil Engineering*, 159, 28 - 34.
- Hall, J Dawson, R Manning, L Walkden, M Dicksin, M and Sayers, P (2006). Managing changing risks to infrastructure systems, *Proceedings of ICE Civil Engineering* 159. 21 - 27.
- Hair, J Anderson, R Tatham, R and Black, W (1999). Análisis Multivariante. 1a Edición en Español. Prentice Hall-Iberia, Madrid.
- Hauser, A (2000). Remociones en Masa en Chile. Boletín 59, Subdirección Nacional de Geología, SERNAGEOMIN, Chile.
- Husdal, J. (2005). The vulnerability of road networks in a cost-benefit perspective. TRB 2005 Annual Meeting, Unites States.
- Husdal, J (2006). Transport network vulnerability – which terminology and metrics should we use?. NECTAR Cluster 1 Seminar, Molde, Norway, 12-13 May 2006.

- Jelennius, E and Madson L-G (2006). Developing a methodology for road network vulnerability analysis. Nectar Cluster 1 Seminar, 12th – 13th May 2006, Molde University College, Molde (Norway)
- Jenelius, E Petersen, T and Matsson, L-G (2006). Importance and exposure in road network vulnerability analysis. *Transportation Research*, 40A, 537 – 560.
- Keller, G (2002). Rural Roads Vulnerability Reduction Assessment, Mitigation Measures, and Training. *ASCE Journal of Transportation Engineering*, Vol. 3, No. 4, November 1, 139 – 147.
- Ministerio de Obras Públicas (1995). Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica. Dirección General de Aguas. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (2003). Situaciones de riesgo por amenaza de aluviones e inundaciones y movimientos sísmicos, Tomo 1-2. Unidad de Prevención y Emergencia de la Dirección de Vialidad.
- Ministerio de Obras Públicas (2008a). Procedimientos de Estudios Viales. Volumen 2 Manual de Carreteras. Dirección de Vialidad. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas (2008b). Instrucciones y Criterios de Diseño. Volumen 3 Manual de Carreteras. Dirección de Vialidad. Chile.
- Ministerio de Obras Públicas y Transporte (1969). Normas para la Numeración de Caminos. Decreto N°556 del 13 de Junio de 1969. Chile.
- Ministerio de Vivienda y Urbanismo (2000). Actualización Plan Regional de Desarrollo Urbano 1a Región. Chile.
- MINITAB Ltd. (2005) Minitab (c) 14.2 User Manual. United States.
- Murray, A Matisziw, T and Grubestic, T (2008). A methodological overview of network vulnerability analysis. *Growth and Change*, 39(4), 573 – 592.
- Rowshan, S et al (2003). A State DOT Guide to Highway Vulnerability Assessment. TRB 2003 Annual Meeting. Unites States.
- Ryall, M.J. (2001). Bridge Management. 1st Ed. Butterworth - Heinemann, Oxford.
- Susilawati, and Taylor, M (2007). The Assessment of the Regional Network Vulnerability: The Case Study of The Green Triangle Region. 29th Conference of Australian Institutes of Transport Research (CAITR) 5 – 7 December 2007 Transport System Centre, University of South Australia, Adelaide, Australia
- Taylor, M, et al (2006), Application of Accessibility Based Methods for Vulnerability Analysis of Strategic Road Networks, *Netw Spat Econ* (2006) 6: 267–291
- Valenzuela, S De Solminihac, H y Echaveguren T (2010). Proposal of an Integrated Index for Prioritization of Bridge Maintenance, *Journal of Bridge Engineering*, 15(1), 337 - 343.
- Varnes D J (1984). Landslide hazard zonation: a review of principles and practice. *Natural Hazards*, 3, UNESCO Press. Paris.
- Vásquez, CPJ (2009). Estudio de Susceptibilidad y amenaza a los deslizamientos en algunos taludes de concepción. Memoria de Título. Supervisor: Mario Valenzuela. Universidad de Concepción, Facultad de Ingeniería, Departamento de Civil. Chile.
- Xia, J Chen, M and Liu, R (2005). Framework for Risk Assessment of Highway Network. TRB 2005 Annual Meeting, Unites States.