

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

INFORME FINAL

ÍNDICE

| | |
|---|----|
| I) INTRODUCCIÓN | 1 |
| II) ASPECTOS METODOLÓGICOS | 4 |
| 2.1) Recopilación y análisis de información | 4 |
| 2.2) Bases Conceptuales de los Métodos de Evaluación Rápida y Detallada | 4 |
| 2.3) Método de Evaluación Rápida (MER) | 5 |
| 2.4) Aplicación del MER y selección de rutas para estudio detallado de riesgos | 7 |
| 2.5) Método de Evaluación Detallada (MED) de riesgos | 8 |
| 2.6) Modelo para la actualización de la zonificación de áreas de riesgo | 10 |
| III) RESULTADOS ETAPA I: HOMOGENIZACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN | 11 |
| 3.1) Propuesta de base de datos para estudios de riesgos | 15 |
| IV) RESULTADOS ETAPA II: DEFINICIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO Y MÉTODO DE EVALUACIÓN RÁPIDA (MER) | 16 |
| 4.1) Síntesis Macro Zona Norte | 18 |
| 4.2) Síntesis Macro Zona Centro | 19 |
| 4.3) Síntesis Macro Zona Sur | 20 |
| 4.4) Síntesis Macro Zona Austral | 21 |
| 4.5) Síntesis Propuesta de Rutas | 21 |
| V) RESULTADOS ETAPA III: ESTUDIO DE ZONAS DE RIESGO Y PELIGROS NATURALES EN LA RED VIAL (MED) | 23 |
| VI) RESULTADOS ETAPA IV: MODELO PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO | 28 |
| 6.1) Modelo para proceso de inundación-anegamiento | 28 |
| 6.2) Modelo para proceso de remoción en masa | 32 |
| 6.3) Modelo de aplicación Método de Evaluación Rápida | 36 |
| VII) CONCLUSIONES | 40 |
| VIII) REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 46 |
| IX) ANEXOS | 50 |

I) 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 complejo 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 permiten 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, obras de protección fluvial y costera, 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.

De acuerdo a lo anterior, este Informe Final tiene por objetivo presentar los principales resultados de la consultoría, siguiendo la secuencia de cada una de las etapas del estudio. El informe está organizado de la siguiente manera:

- **Capítulo I:** Introducción
- **Capítulo II,** Aspectos Metodológicos. Este capítulo entrega información general respecto a los métodos empleados en cada una de las etapas, con especial atención en el Método de Evaluación Rápida (MER) de riesgos y el Método de Evaluación Detallada (MED) de riesgos, en el modelo de zonificación de riesgos naturales e infraestructura vial.
- **Capítulo III,** Resultados Etapa I Homogenización y recopilación de información. Se entregan antecedentes respecto a la información revisada, analizada y/o depurada, en todas las etapas del estudio, con especial atención en información alfanumérica y espacial.
- **Capítulo IV,** Resultados Etapa II Definición de Área de Estudio y Método de Evaluación Rápida. Se entregan los resultados más relevantes de la aplicación del método en rutas seleccionadas en las diferentes regiones del país.
- **Capítulo V,** Resultados Etapa III Estudio de zonas de riesgo y peligros naturales en la red vial. Corresponde a los resultados de la aplicación del MED en las rutas seleccionadas, sobre la base de los resultados obtenidos al aplicar el MED en Etapa II del estudio.
- **Capítulo VI,** Resultados Etapa IV Modelo para la actualización de la zonificación de áreas de riesgo. Se presentan los resultados del modelo digital elaborado, que permite manejar y actualizar información de riesgos naturales en función de los principales atributos de la infraestructura vial. Se desarrolló una herramienta de Planificación estratégica para la detección de riesgos que pudiesen afectar a la infraestructura vial.
- **Capítulo VII,** Conclusiones
- **Capítulo VIII,** Referencias Bibliográficas
- **Anexo 1:** Homogeneización de Información y Método de Evaluación Rápida (MER)
- **Anexo 2:** Método de Evaluación Detallada (MED)
- **Anexo 3:** Manual de Referencia para la Utilización de Modelo SIG
- **Anexo 4:** Fichas de Inspección de Terreno
- **Anexo 5:** Fichas de Entrada de Información Espacial

Nomenclatura

| | |
|--------------|---|
| DBF; | Formato de archivo (Base de Datos). |
| DPA; | División Político Administrativa (Instituto Nacional de Estadística). |
| ID; | Identificador elemento (Base de Datos) |
| IR; | Índice de Riesgo |
| MER; | Método de Evaluación Rápida de Riesgos |
| MED; | Método de Evaluación Detallada de Riesgos |
| MOP; | Ministerio de Obras Públicas |
| PK; | Punto Kilométrico |
| SIG; | Sistema de Información Geográfica |
| TMDA; | Tránsito Medio Diario Anual (Vehículos/día-año) |
| IRI; | Índice de Regularidad Internacional, (m/km) |

II) 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 evaluación de riesgo. Esta información fue proporcionada por el Sub departamento de SIG y Cartografía de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas.

Un segundo tipo de información correspondió a antecedentes asociados al inventario y estado de la red vial. Estos datos permitieron estimar los niveles de tránsito, tipo de carpeta de rodadura, estado generalizado de la ruta, y localización. Los datos fueron obtenidos de diversas fuentes de la Dirección de Vialidad.

Un tercer tipo de información se refiere a antecedentes contextuales. Estos corresponden a información del sistema de actividades de las rutas, así como de coberturas cartográficas, las 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 evaluación de riesgo según los métodos que se describen en las siguientes secciones.

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

El riesgo ante eventos naturales a efectos de este estudio, se define como el producto entre la probabilidad de ocurrencia del evento natural, las consecuencias que el evento produce y la exposición al riesgo de la infraestructura. La probabilidad de ocurrencia está asociada al evento natural mismo. Es ideal el conocer y modelar el fenómeno para obtener de manera certera las propiedades que lo describen: frecuencia, magnitud, localización y área de afección. En ausencia de modelos es posible estandarizar la probabilidad de ocurrencia en base a reglas asociadas a la recurrencia observada de ciertos fenómenos por zona. Las consecuencias por su parte, poseen diversas dimensiones, siendo los cuerpos receptores el sistema natural, el sistema humano y la institucionalidad. Desde el punto de vista humano, las consecuencias pueden ser de orden económico, social y psicológicas, desde el punto de vista de inversiones necesarias de realizar para reforzar la infraestructura o recuperar la transitabilidad, costos a los usuarios de la infraestructura por operación restringida o re-ruteo, pérdida de vidas humanas. Desde el punto de vista de la institucionalidad, puede llevar a reformular estrategias de gestión de emergencias. En cuanto a la exposición, la recurrencia histórica de eventos combinada con la condición de la obras, puede llevar a conocer indirectamente el grado de vulnerabilidad de la misma.

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 detalle de estos métodos se encuentra en los anexos 1 y 2, respectivamente.

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.

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.

2.3) 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 geo-amenazas 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 dentro del concepto de 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 dichas 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 (Anexo N°1). 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 productivo local, regional, nacional o internacional. Se mide en función de la presencia o ausencia de rutas alternativas a la vía o ruta afectada por un evento natural, mediante el índice de accesibilidad, por el tamaño de la vía a través del índice de jerarquía, por el nivel de tráfico presente en la vía a través del índice de tráfico y por la relevancia de la vía para el sistema productivo expresado a través del índice del sistema productivo.
- 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 éste. 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 1 se presenta la formulación general del MER. El detalle del MER puede verse en Anexo 1, sección 4.2.1.

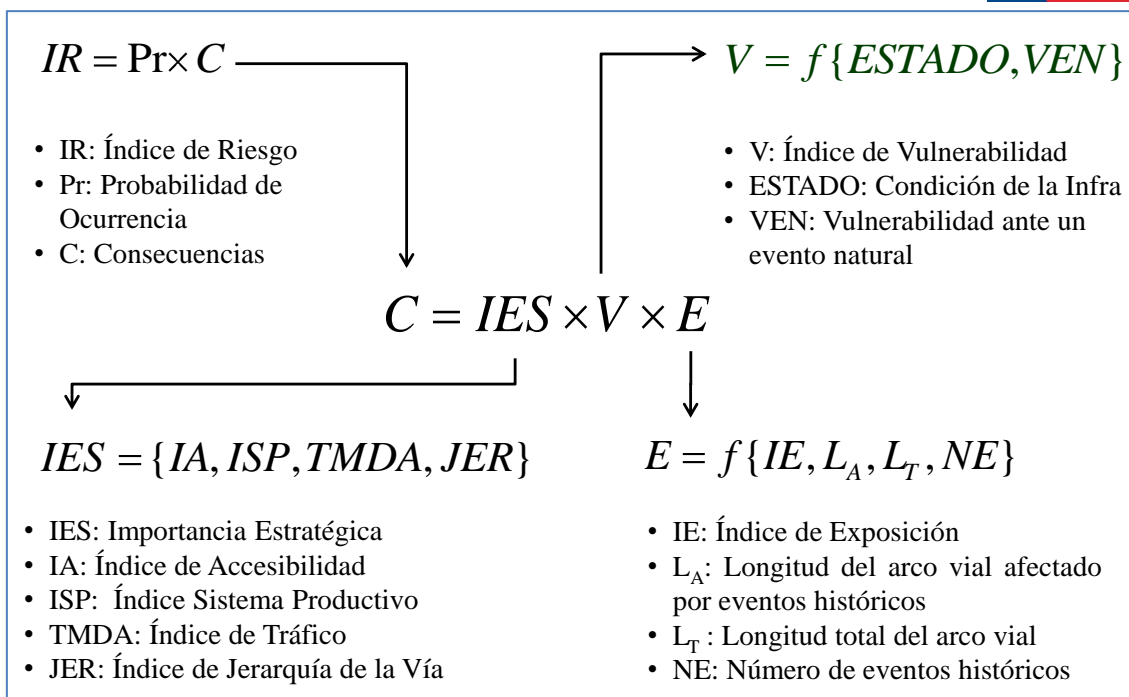


Figura 1. Formulación general del MER

2.4) 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 gráficas y alfanuméricas de la Dirección de Vialidad del Ministerio de Obras Públicas (MOP), se aplicó el MER para todos los caminos de la red vial que presentaron al menos un evento de emergencia en el período de estudio, con el objetivo de seleccionar aquellas que serían evaluadas con mayor detalle en la fase siguiente.

Para ello, de la información de emergencias viales homogeneizada y depurada, se construyó una base de datos con información histórica de eventos naturales. Esta información histórica 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 rutas afectadas por al menos un evento natural en los períodos antes mencionados, para las cuales confeccionó la base de datos requerida por el MER. La selección de las rutas se realizó considerando el valor de IR obtenido.

La base de datos para aplicar el MER 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 mencionar que dicha propuesta representa el punto de inicio para la selección de rutas, la cual se validó con las Direcciones Regionales de Vialidad, como tarea previa al inicio de la Etapa III del estudio.

2.5) 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 2 se presenta el esquema metodológico general empleado.

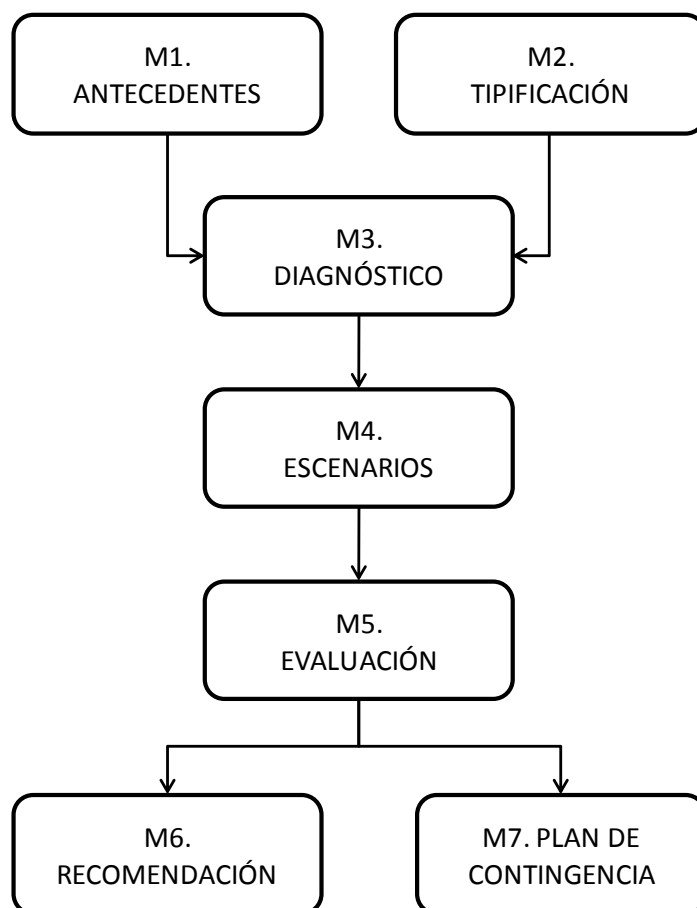


Figura 2. Esquema de componentes del Método de Evaluación Detallada (MED) de Riesgos

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 finalmente los acuerdos con el mandante. En la Tabla 1 se entrega información de las rutas evaluadas.

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 de estas visitas 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. En el Anexo N°4 se entrega la ficha tipo empleada y las fichas completadas durante el trabajo de terreno.

2.6) 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.

III) RESULTADOS ETAPA I: HOMOGENIZACIÓN Y RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

La etapa de recopilación permitió analizar la información disponible y proporcionada por el MOP, en diferentes formatos, con el objetivo de planificar y avanzar en el diseño de una estructura única de inclusión del universo de datos en las bases de datos espaciales. Un aspecto a destacar es la gran cantidad de información revisada, a la cual se aplicó un trabajo intensivo de análisis, depuración y edición.

La información procesada ha sido alfanumérica y espacial, lográndose a través de su análisis una visión detallada del universo de datos existentes y requeridos para las diferentes etapas del estudio, especialmente para la aplicación del MER y del MED con datos para los siguientes períodos: 1990 a 1999; 2001 a 2003 y 2009. Lo anterior también permitió identificar vacíos de información, calidad de la misma y requerimientos adicionales o bien complementarios para aplicar el MER.

De particular importancia fue la identificación de la causa u origen del daño a la infraestructura vial, según región, año de ocurrencia y camino afectado, siendo posible, de este modo, establecer un ranking de rutas y eventos asociados a fenómenos naturales, según región y Macro Zonas.

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 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.

Respecto a la información espacial, las coberturas digitales analizadas y bases de datos asociadas, proporcionadas por el Subdepartamento de SIG y Cartografía de la Dirección de Vialidad para cada región, corresponden a cuatro, las cuales se describen a continuación:

- **XX_emer_In.** Este *shape* contiene información en forma de polilíneas, representando los tramos de la red vial afectados por eventos de riesgo natural, de carácter exógeno y endógeno, asociados a climatología y movimientos en masa, y movimientos telúricos para un rango temporal que varía dependiendo de cada región, en función de la ocurrencia de los eventos, pero que abarca el periodo entre 1990 y 1999.
- **XX_emer_pt.** Contiene información de la misma naturaleza y rango temporal (1990-1999) que el *shape* anterior, pero con geometría de tipo multipuntos.
- **XX_emer_vial.** Presenta información acerca de eventos lineales de emergencias generados sobre la red vial en los años 2001 y 2002, con antecedentes de fecha del evento y solución provisoria o definitiva asociadas a cada evento. Se trata de una cobertura *shape* de polilíneas. No presenta información de causa u origen del evento.
- **Base_rn_XX.** Contiene información en forma de polígonos, que representan zonas de la red vial, para todas las regiones del país excepto la Región Metropolitana, afectadas por eventos naturales asociados a climatología, movimientos en masa, movimientos telúricos y vulcanismo, para el período comprendido entre los años 1993 y 2001. Esta cobertura informa de la frecuencia de los eventos por tramo de ruta o camino, como también el último año en que éste se produjo.

En la Tabla 2 se muestra la información de *shape* disponible según región, donde se aprecia que para las Regiones I a XI existe información para los rangos 1990-99, 1993-01 y 2001-02, para la Región XII rangos 1990-99 y 1993-01, y Región XIII rangos 1990-99 y 2001-02.

Tabla 2. Disponibilidad de coberturas digitales según región

| Tipo shape | Región | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|--------|----|-----|----|---|----|-----|------|----|---|----|-----|------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | XIII |
| Emergencia líneas | | | | | | | | | | | | | |
| Emergencia puntos | | | | | | | | | | | | | |
| Emergencia vial | | | | | | | | | | | | | |
| Base_rn | | | | | | | | | | | | | |

Fuente. Elaboración propia

Una vez analizadas las características y extensión de la información digital y bases de datos asociadas, se llevó a cabo una homogeneización de ésta, con el objetivo de generar una base de datos espacial que cumpliera con los estándares requeridos de compacidad y coherencia de los datos y que, además, estuviese correctamente georeferenciada. A partir de la información procesada, se generaron dos tipos de bases digitales; una con información puntual y otra con información lineal, para todas las regiones del país.

Respecto de la normalización, se estandarizó la base de datos alfanumérica (EXCEL) disponible para diferentes años y se corrigieron los *shapes* correspondientes al período 1990-1999. En este último caso, se trabajó con información alfanumérica para todo el país, en formato EXCEL, e información espacial en formato *shape* de *ArcMap*, depurando y corrigiendo los *shapes* con apoyo de la información contenida en las bases de datos. Al respecto, cabe destacar la fusión de toda la información espacial en un solo *shape* a escala nacional, con el propósito de poder trabajar de una manera única para todo el universo de datos, según la división por Macro Zonas adoptada. Este proceso se realizó para las coberturas digitales originales correspondientes a los años 1990-1999, 2001 a 2003 y 2009.

Otro aspecto importante fue la corrección topológica de los *shapes*, debido a que, posiblemente por problemas en el cambio de proyección espacial, las coberturas tenían errores de ubicación en puntos y líneas. Es decir, la gran mayoría de eventos no se ubicaban exactamente sobre la red vial, sino que existían desplazamientos no constantes. Para subsanar esta situación, se crearon reglas topológicas y se verificó que la mayoría de estos elementos se ubicaran sobre los ejes viales.

Las reglas topológicas se crearon en un archivo de topología incluido en la geodatabase original, con el *shape* de eventos puntuales y el de red vial como insumos, en el que los puntos debían estar ubicados sobre la red vial. Es decir, a partir de la regla "Point must be covered by line", se hicieron las correcciones pertinentes.

En el caso de los eventos puntuales, el resultado fue que el mayor porcentaje de eventos estaban mal referenciados con respecto a la red vial facilitada. Este error se corrigió mediante la aplicación de una serie de funciones basadas en la herramienta NEAR, que consiste en medir el punto más cercano a la red vial del elemento existente y ubicarlo en dicha posición.

A través del proceso de normalización de *shapes* y bases de datos, a nivel nacional, se creó una nueva base espacial, que fue utilizada para el cálculo del IR (Figura 3).

| FID | Shape * | ID | ROL | COD MOP | NOMBRE | REGION | FECHA | PK IN | PK FI | ERROR SD | OBS DATO | RED |
|-----|------------|----|--------|---------|--|--------|------------|-------|-------|----------|------------------------|------------|
| 26 | Polyline M | 35 | F-10-G | F-10-G | TITLI - Limache, sector: Cuesta La Dormida - Limache | 5 | 18/08/2009 | 11500 | 14000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 29 | Polyline M | 65 | F-126 | F-126 | Cruce F-30-E - La Quebrada | 5 | 27/06/2009 | 11000 | 12000 | NO ERROR | A/F (o 27 y 28 Junio) | Homologada |
| 17 | Polyline M | 84 | F-180 | F-180 | Cruce F-30-E - Los Mañenes | 5 | 18/08/2009 | 1000 | 3000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 8 | Polyline M | 62 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 27/06/2009 | 63000 | 65000 | NO ERROR | A/F (o 27 y 28 Junio) | Homologada |
| 9 | Polyline M | 59 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 19/06/2009 | 63000 | 65000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 19 | Polyline M | 63 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 27/06/2009 | 73550 | 73900 | NO ERROR | A/F (o 27 y 28 Junio) | Homologada |
| 21 | Polyline M | 25 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 29/06/2009 | 19500 | 21000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 22 | Polyline M | 26 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 15/08/2009 | 18500 | 20120 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 23 | Polyline M | 23 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 28/06/2009 | 18500 | 20120 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 24 | Polyline M | 16 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 19/06/2009 | 18500 | 20120 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 34 | Polyline M | 79 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 15/08/2009 | 73000 | 74000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 41 | Polyline M | 64 | F-30-E | F-30-E | Cruce Ruta 5 - Papudo - Cruce Ruta 60 Ch | 5 | 27/06/2009 | 73900 | 74200 | NO ERROR | A/F (o 27 y 28 Junio) | Homologada |
| 28 | Polyline M | 29 | F-360 | F-360 | Quillota - Colmo | 5 | 15/08/2009 | 7000 | 12000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 30 | Polyline M | 30 | F-366 | F-366 | Boco - Lo Rojas - La Cruz | 5 | 15/08/2009 | 9000 | 10000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 15 | Polyline M | 31 | F-590 | F-590 | San Francisco de Limache - Olmué | 5 | 16/08/2009 | 800 | 1000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 42 | Polyline M | 77 | F-730 | F-730 | Camino La Pólvora - Laguna Verde por Cuesta Balmac | 5 | 13/07/2009 | 0 | 3000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 43 | Polyline M | 82 | F-730 | F-730 | Camino La Pólvora - Laguna Verde por Cuesta Balmac | 5 | 15/08/2009 | 0 | 3000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 45 | Polyline M | 70 | F-730 | F-730 | Camino La Pólvora - Laguna Verde por Cuesta Balmac | 5 | 27/06/2009 | 5000 | 6000 | NO ERROR | A/F (o 27 y 28 Junio) | Homologada |
| 27 | Polyline M | 86 | F-760 | F-760 | Cruce F-50 - Colipuy | 5 | 19/08/2009 | 10000 | 12000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 25 | Polyline M | 80 | F-800 | F-800 | Cruce Ruta 88 - Las Tablas - Quintay | 5 | 14/08/2009 | 8000 | 14000 | NO ERROR | A/F (o 14 y 15 Agosto) | Homologada |
| 37 | Polyline M | 85 | F-850 | F-850 | Casablanca - Embalse Lo Ovalle | 5 | 15/08/2009 | 1700 | 7000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 36 | Polyline M | 83 | F-98 | F-98 | Valparaíso - Laguna Verde | 5 | 16/08/2009 | 5000 | 7000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 38 | Polyline M | 81 | F-98 | F-98 | Valparaíso - Laguna Verde | 5 | 15/08/2009 | 4000 | 6000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 39 | Polyline M | 71 | F-98 | F-98 | Valparaíso - Laguna Verde | 5 | 28/06/2009 | 3000 | 6000 | NO ERROR | S/O | Homologada |
| 40 | Polyline M | 66 | F-98 | F-98 | Valparaíso - Laguna Verde | 5 | 27/06/2009 | 5000 | 6000 | NO ERROR | A/F (o 27 y 28 Junio) | Homologada |

Figura 3. Eventos normalizados año 2009

Otro proceso digital de importancia realizado con las herramientas de “Linear Referencing” en “ArcMap 9.2”, fue la Segmentación Dinámica, el cual permitió generar, apoyándose en una red vial preexistente, un registro de tramos o puntos ubicados sobre la red vial con información asociada (Figuras 4 y 5). Esto se realizó para todos los eventos informados en las bases de datos espaciales, en la Macro Zona Centro, para el año 2009.

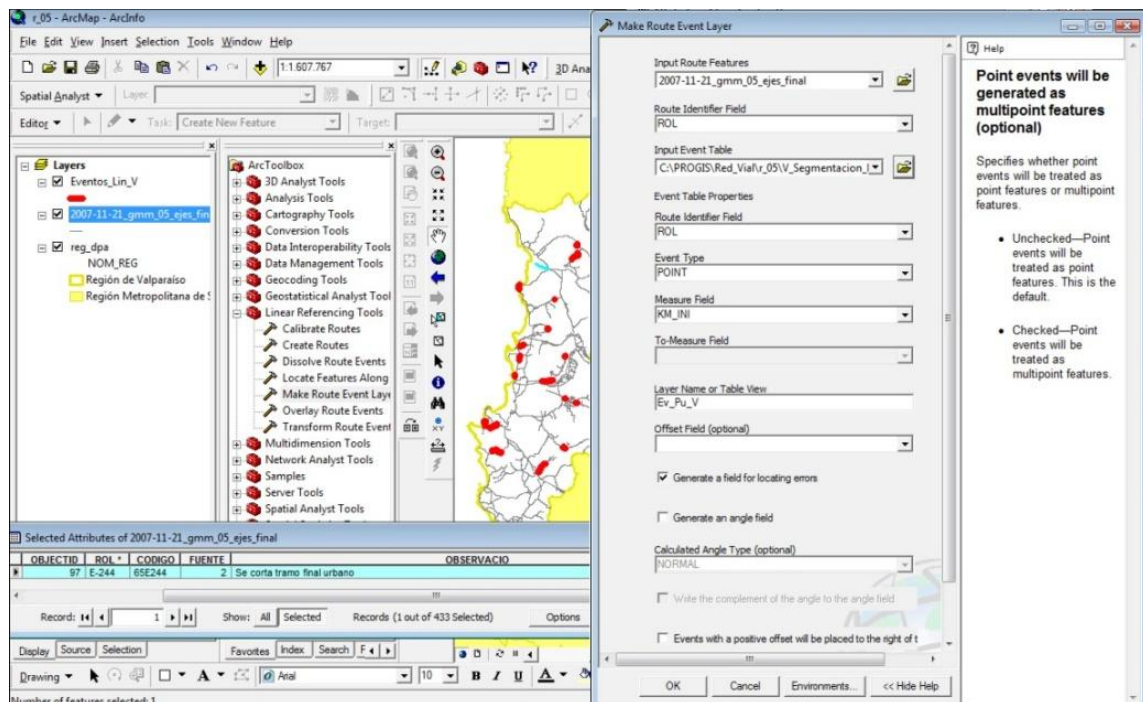


Figura 4. Proceso segmentación dinámica año 2009

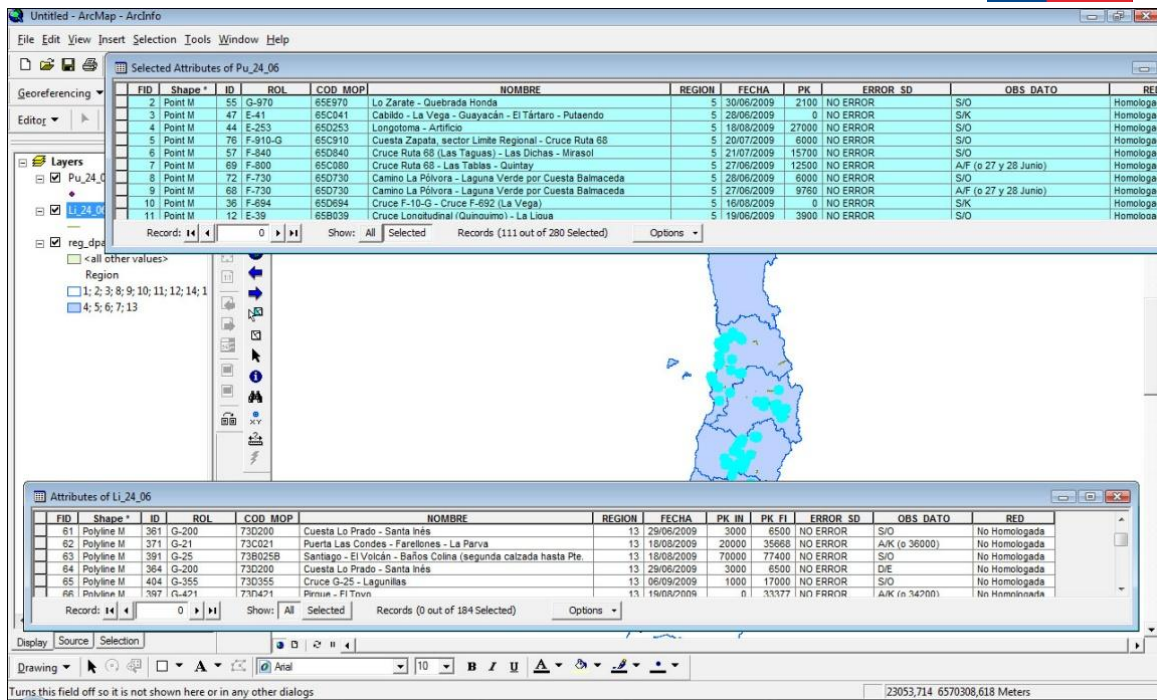


Figura 5. Eventos generados Macro Zona Centro, año 2009

3.1) 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.

IV) RESULTADOS ETAPA II: DEFINICIÓN DE ÁREA DE ESTUDIO Y 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 3 se presenta el resultado agregado del Índice de Riesgo (IR) obtenido, según región y calificación.

Tabla 3. Proporción de la red vial analizada según Índice de Riesgo (IR) estimado mediante el MER.

| Macro Zona | Región | IR Alto | | IR Medio | | IR Bajo | | Total |
|-------------------|--------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|-------------|------------|
| | | N° Caminos | % | N° Caminos | % | N° Caminos | % | |
| Norte | Arica y Parinacota | 2 | 12,5 | 4 | 25,0 | 10 | 62,5 | 16 |
| | Tarapacá | 0 | 0,0 | 14 | 56,0 | 11 | 44,0 | 25 |
| | Antofagasta | 5 | 20,8 | 2 | 8,3 | 17 | 70,8 | 24 |
| | Atacama | 5 | 18,5 | 5 | 18,5 | 17 | 63,0 | 27 |
| Centro | Coquimbo | 0 | 0,0 | 16 | 80,0 | 4 | 20,0 | 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 | 35,0 | 50 | 62,5 | 80 |
| | Maule | 2 | 1,5 | 65 | 49,2 | 65 | 49,2 | 132 |
| Sur | Biobío | 1 | 1,6 | 10 | 16,1 | 51 | 82,3 | 62 |
| | Araucanía | 3 | 3,5 | 6 | 7,0 | 77 | 89,5 | 86 |
| | Los Ríos | 4 | 6,0 | 5 | 10,0 | 41 | 82,0 | 50 |
| | Los Lagos (1) | 4 | 5,2 | 7 | 9,1 | 66 | 85,7 | 77 |
| Austral | Los Lagos (2) | 2 | 7,7 | 2 | 7,7 | 22 | 84,6 | 26 |
| | Aysén | 0 | 0,0 | 3 | 20,0 | 12 | 80,0 | 15 |
| | Magallanes | 0 | 0,0 | 0 | 0,0 | 25 | 100,0 | 25 |
| Total País | | 38 | 4,8 | 232 | 29,0 | 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 3 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 de IR (La Tabla 4 ilustra la valoración del Índice de Riesgo para el caso de la Región de Arica y Parinacota). La interpretación de los resultados también consideró mapas regionales que muestran las rutas evaluadas con su respectiva calificación (Figura 6).

Tabla 4. IR, sub-índices y calificación según caminos, región de Arica y Parinacota

| Rol Camino | Sub-índices IR | | | | | | Calificación |
|------------|-------------------------------|--------------------|----------------|-------------------|---------------------------------|----------|--------------|
| | Importancia Estratégica (IES) | Vulnerabilidad (V) | Exposición (E) | Consecuencias (C) | Probabilidad de ocurrencia (Pr) | Valor IR | |
| A-27 | 3,5 | 1,6 | 1 | 5,6 | 0,9 | 5,1 | Bajo |
| A-319 | 2,1 | 2,7 | 1 | 5,7 | 0,9 | 5,1 | Bajo |
| A-201 | 2,3 | 2,5 | 1 | 5,7 | 0,9 | 5,1 | Bajo |
| A-127 | 2,5 | 2,5 | 1 | 6,4 | 0,9 | 5,8 | Bajo |
| RUTA 5 | 4,5 | 1,9 | 1 | 8,4 | 0,7 | 5,9 | Bajo |
| A-302 | 3,1 | 2,5 | 1 | 7,8 | 0,9 | 7,1 | Bajo |
| A-235 | 2,8 | 2,8 | 1 | 7,9 | 0,9 | 7,1 | Bajo |
| A-331 | 3,1 | 2,7 | 1 | 8,4 | 0,9 | 7,6 | Bajo |
| A-23 | 3,1 | 2,8 | 1 | 8,6 | 0,9 | 7,7 | Bajo |
| A-35 | 3,3 | 2,6 | 1 | 8,6 | 0,9 | 7,7 | Bajo |
| A-323 | 3,1 | 3,0 | 1 | 9,2 | 0,9 | 8,3 | Medio |
| A-307 | 3,1 | 3,2 | 1 | 9,7 | 0,9 | 8,8 | Medio |
| A-93 | 3,3 | 3,2 | 1 | 10,8 | 0,9 | 9,8 | Medio |
| A-345 | 3,1 | 3,0 | 3 | 27,6 | 0,9 | 24,9 | Medio |
| A-15 | 3,3 | 3,5 | 3 | 35,2 | 0,9 | 31,7 | Alto |
| RUTA 11 CH | 3,5 | 3,0 | 5 | 53,0 | 0,9 | 47,7 | Alto |

Fuente. Elaboración propia

La calificación en las categorías “Alto”, “Medio” y “Bajo” de los Índices de Riesgo por Macro Zona, se realizó en base a los rangos de IR para tales categorías, descritos en las Tablas 12 y 13 del punto 4.2.1.7 del Anexo 1.

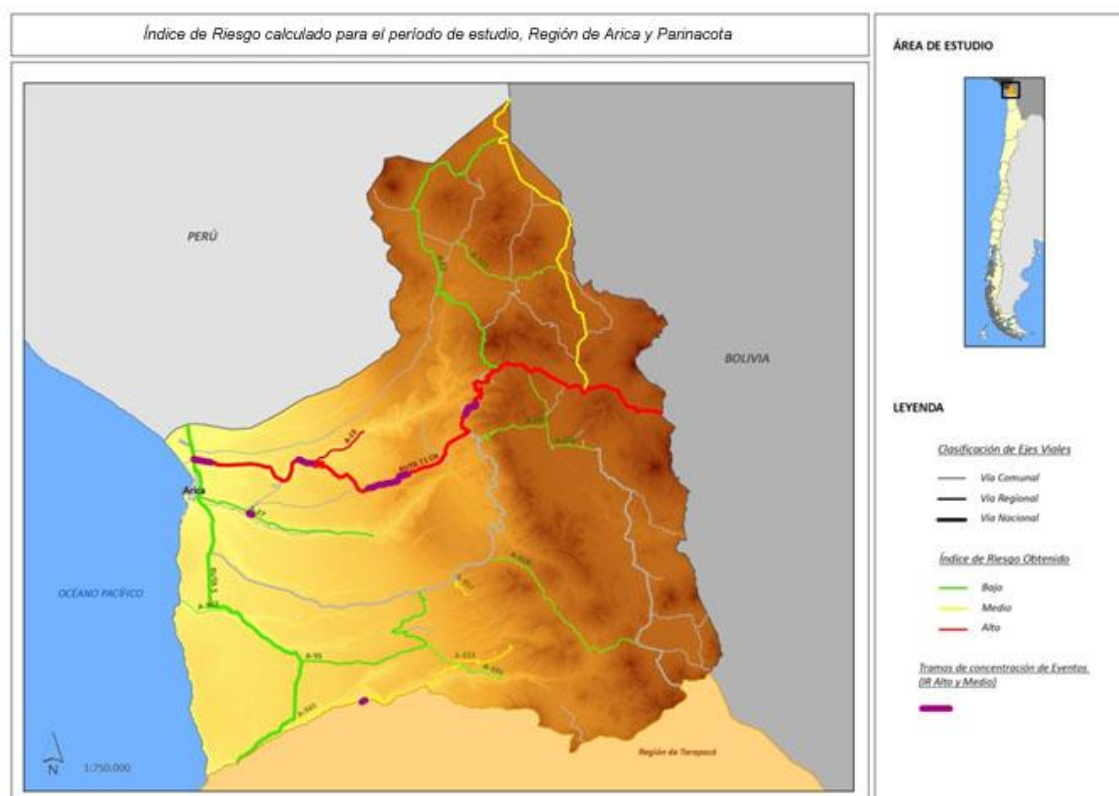


Figura 6. Representación cartográfica del IR, región de Arica y Parinacota

4.1) 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 5). 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 5. 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 |
| | 31 CH | 46,3 |
| Atacama | Ruta 5 | 39,0 |
| | C-35 | 36,6 |
| | C-17 | 30,0 |
| | C-173 | 25,8 |

Fuente. Elaboración propia

De acuerdo a los resultados obtenidos con la aplicación del MER, específicamente el valor del IR, se propuso el análisis de detalle para el estudio de riesgos naturales en 5 caminos de la red vial de la Macro Zona Norte que obtuvieron los valores más altos de IR. Estos caminos fueron los siguientes:

- **Región Arica y Parinacota.** A-15 y Ruta 11 CH. Caminos localizados en ambientes de pre-cordillera, cordillera y altiplano
- **Región de Antofagasta.** Rutas 21 CH y 23 CH. Caminos localizados en ambientes de cordillera y altiplano
- **Región de Atacama.** Ruta 31 CH. Este camino integra sectores ubicados en ambientes costeros con áreas ubicadas en precordillera y cordillera.

4.2) 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 6). 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 6. Síntesis de resultados de IR Alto en 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

De acuerdo a los resultados obtenidos, se propuso el análisis de detalle para el estudio de riesgos naturales en 6 caminos de la red vial de la Macro Zona Centro que obtuvieron los valores más altos de IR. Estos caminos fueron los siguientes:

- **Región Valparaíso.** F-30-E y Ruta 68. Caminos localizado en la Cordillera de La Costa

- **Región Metropolitana.** G-25 y G-21. Caminos localizados en ambientes precordilleranos y cordillera
- **Región de O'Higgins.** H-448. Camino localizado en el valle central de la región
- **Región del Maule.** J-60. Camino ubicado en la ribera norte del río Mataquito

4.3) Síntesis Macro Zona Sur

La Macro Zona Sur, que comprende las regiones del Biobío a Los Lagos, sin Chiloé y Palena¹, 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 7). 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 7. Síntesis de resultados de IR Alto en 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

De acuerdo a los resultados obtenidos con la aplicación del MER, específicamente con el Índice de Riesgo (IR), se propuso el análisis de detalle para el estudio de riesgos naturales en 5 caminos de la red vial de la Macro Zona Sur que obtuvieron los valores más altos de IR. Estos caminos fueron los siguientes:

- **Región del Biobío.** O-14.
- **Región de La Araucanía.** R-22.
- **Región de Los Ríos.** T-350.
- **Región de Los Lagos.** U-40 y Ruta 225 CH.

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.

4.4) 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 8). 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; X-25 (IR 36; Medio) y Ruta 7 (IR 41; Medio).

Tabla 8. Síntesis de resultados de IR Alto en la Macro Zona Austral.

| 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

De acuerdo a lo anterior, se propuso el análisis de detalle para el estudio de riesgos naturales en 3 caminos de la red vial de la Macro Zona Austral que obtuvieron los valores más altos de IR. Estos caminos son los siguientes:

- **Región de Los Lagos.** Ruta 7 y 235 CH
- **Región de Aysén.** Ruta 7 y X-25

4.5) Síntesis Propuesta de Rutas

En la Tabla 9 se presenta un resumen de los resultados obtenidos según Macro Zona y región. En ella se presentó una propuesta de rutas a considerar en el estudio de detalle de la Etapa correspondiente al Método de Evaluación Detallado (MED) del estudio. Esta lista se confeccionó a partir de la aplicación del MER y corresponde a todas las rutas que presentaron un Índice de Riesgo (IR) calificado como Alto.

Tabla 9. Rutas calificadas con IR Alto clasificadas por Macro Zona y por región.

| Macro Zona | Región | Ruta | IR |
|------------|--------------------|-------------|------|
| Norte | 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 |
| Centro | 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 | |
| Sur | 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 |
| | Los Lagos (1) | T-270 | 20,8 |
| | | Ruta 225 CH | 56,3 |
| | | V-69 | 41,3 |
| U-40 | | 34,0 | |
| Austral | Los Lagos (2) | U-30 | 22,6 |
| | | Ruta 7 | 77,1 |
| | Aysén | Ruta 235 CH | 74,9 |
| | | Ruta 7 | 41,2 |
| | | X-25 | 35,9 |

(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.

V) RESULTADOS ETAPA III: ESTUDIO DE ZONAS DE RIESGO Y PELIGROS NATURALES EN LA RED VIAL (MED)

Se propuso un método de evaluación sistemático que permitiera evaluar la conveniencia de mantener operaciones repetitivas de emergencia o bien invertir en mejorar la infraestructura para reducir su vulnerabilidad. A este método se le denominó Método de Evaluación Detallada (MED) de riesgos.

A partir de los resultados de la aplicación del MER (Ver Anexo 1) resumidos en la Tabla 9 y en coordinación con la Inspección Fiscal y algunas Direcciones Regionales de Vialidad, se seleccionaron 12 rutas representativas de 3 Macro Zonas del país, las que se muestran en la Tabla 10. A estas rutas se les aplicó el MED. Con especial detalle se aplicó al caso de la M-50, puesto que fue utilizada para ilustrar el uso del MED (Ver Anexo 2).

Tabla 10. Rutas seleccionadas para aplicar el Método de Evaluación Detallada (MED) de Riesgos

| 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 seguido para aplicar el MED consideró principalmente 2 etapas: Trabajo de terreno para recopilar información y aplicación del MED según se detalla en Anexo 2.

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. Para lograr esto se elaboró una ficha de recopilación de información que incluye los datos que permiten efectivamente precisar los valores de las variables antes indicadas. Un ejemplo de estas fichas y las fichas completadas en terreno se muestran en el Anexo 4. Una vez recopilada esta información se procedió a aplicar el MED a las 12 rutas de la Tabla 10.

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 (anexo 1), 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.

Otro aspecto fue el 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 11 se presentan los resultados agregados obtenidos en la evaluación de las 12 rutas de la Tabla 10.

Tabla 11. 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.

La tabla 11 sintetiza los resultados de la aplicación del MED. Se debe notar que los IR no son comparables directamente, puesto que el cálculo está relacionado con cada Macro Zona. Lo que sí es posible comparar es el beneficio social de aplicar una u otra opción. Las conclusiones que se obtuvieron fueron las siguientes:

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 el caso particular de la Ruta 201 CH, resultó más conveniente aplicar mantención antes que aplicar repetitivamente labores de emergencia. La alternativa de mantención 2, que involucra mantención en el año 1 y 5, resultó ser más conveniente que la alternativa de mantención 1, que consiste en invertir en mantención solamente en el año 1.

En las Rutas 1 y 21 CH, el VSAN es aproximadamente similar, por lo cual la recomendación de inversión se debe realizar en función de la alternativa de menor costo. Esto es válido también para los caminos I-45, I-400, H-30. En el caso de la Ruta 23 CH el mayor beneficio lo reporta la alternativa 1. Sin embargo en estos casos es conveniente comparar el beneficio con el resultado obtenido en reducción del Índice de Riesgo, siguiendo el procedimiento descrito en el ejemplo de cálculo de la M-50 (Anexo 2).

En las rutas de la 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.

Relacionando las rutas seleccionadas por sus valores de IR Alto, con las amenazas naturales y la vulnerabilidad de ellas a estos fenómenos, cabe señalar que las rutas seleccionadas logran sintetizar los riesgos para cada Macro Zona. Las Rutas 1; 21 CH y 23 CH de la Macro Zona Norte denotan la regularidad de la amenaza natural por la presencia de lluvias altiplánicas como agente causal de los eventos que inciden en la vulnerabilidad de la infraestructura vial. En las regiones de Arica-Parinacota, Tarapacá y Antofagasta la relación causa/efecto de dicho fenómeno puede ser observada en los caminos que atraviesan áreas de quebradas y valles con rellenos sedimentarios recientes poco consolidados y en laderas con pendientes elevadas.

Las rutas seleccionadas para la Macro Zona Centro, para las regiones de O'Higgins y El Maule, dan cuenta en sus altos valores de IR que la vulnerabilidad está vinculada en la mayor parte de los eventos con fuertes precipitaciones invernales. Vulnerabilidad de las rutas a eventos de inundación en el caso del área de la Depresión central, y a procesos de remoción en masa en las rutas asociadas a la Cordillera de la Costa. Estos IR altos son consistentes con las bases de datos de Vialidad y con lo observado en terreno.

Las rutas de la Macro Zona Sur, representan en sus IR de valor alto, la vulnerabilidad de las rutas que atraviesan la Cordillera de la Costa y áreas de pre-cordillera y cordillera andina. Ello por cuanto, tanto la amenaza natural de las precipitaciones invernales concentradas entre los meses de mayo a julio, como las precipitaciones de nieve principalmente en julio y agosto para los sectores cordilleranos; son las que inciden en la vulnerabilidad de las rutas a eventos de remoción en masa, en terrenos de cordones graníticos y sedimentarios con manto meteorizado en superficie, pendientes de más de 20° o 30% y baja cobertura vegetal.

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.

De lo anterior, resulta conveniente definir tipos de taludes (e.g. muy vulnerables, vulnerables, seguros, muy seguros) de acuerdo a su vulnerabilidad a generar procesos de remoción en masa ante una lluvia dada que, en el caso de estudio, debería corresponder por ejemplo a aquella con un período de retorno igual a la vida útil del arco vial.

En Chile, es necesario avanzar en estudios de detalle para determinar la lluvia crítica, mediante el análisis del registro de precipitación acumulada en 1, 3, 5, 7, 15, 30, 60, 90 y 120 días sobre la base de 15 años. Ello, como señala Ko Ko et al. (2004), quienes proponen caracterizar la lluvia crítica como función de la magnitud y duración de la precipitación. Como ejemplo, presentan un análisis para el tramo de carretera que une Unanderra con Moss Vale, en Australia. Por tanto, es recomendable incluir este tipo de información en el registro de eventos sobre la infraestructura, a fin de considerar su valor como un elemento de decisión adicional en la aplicación del MER y/o del MED.

VI) RESULTADOS ETAPA MODELO PARA LA ACTUALIZACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN DE ÁREAS DE RIESGO

Uno de los objetivos del estudio fue el de generar un modelo automatizado, inscrito dentro de un entorno SIG, que permitiera la obtención, de manera rápida y precisa, de la información referente a la vulnerabilidad de la red vial en el país.

Tras varias pruebas, y tomando en cuenta las observaciones de la contraparte técnica, se decidió crear una aplicación basada en dos niveles, una primera de cálculo del riesgo físico (amenaza), y una segunda de aplicación del Método de Evaluación Rápida (MER).

A continuación se expone un resumen de estos productos. El objetivo final del modelo es servir de referencia para automatizar el ingreso de información y detección de zonas de riesgos y de ocurrencia de este tipo de eventos en las distintas regiones del país.

6.1) Modelo para proceso de inundación-anegamiento

De acuerdo a las observaciones en terreno, y la revisión de los autores en la materia, se determinaron como criterios para identificar las zonas de riesgo por inundación los siguientes:

- **Geomorfológicos:** áreas muy planas ubicadas a lo largo de los ríos, terrazas aluviales, presencia de zonas de erosión fluvial y terrazas bajas.
- **Geológicos:** terrenos compuestos por depósitos recientes, no consolidados, sedimentos transportados por ríos y esteros, como estratos de lodo, arena, limo y gravas, que son muy erosionables durante las inundaciones y crecidas.
- **Topografía:** asociada a pendientes muy planas y planas; es decir pendientes menores a 2% son las que presentan un potencial de sedimentación y/o inundación; pendientes entre 2 y 6% presentan un potencial para crecidas repentinas y erosión; y pendientes mayores a 6% presentan un alto potencial erosivo, asociados a aludes torrenciales más que a inundación (COSUDE, 2002).
- **Vegetación:** presencia de vegetación perturbada por efectos de inundaciones y/o anegamientos anteriores.

En general, en función del papel de las variables que influyen en la activación de estos procesos, se ponderó en tres categorías de riesgo, adaptado a la siguiente matriz de riesgo (Tabla 12).

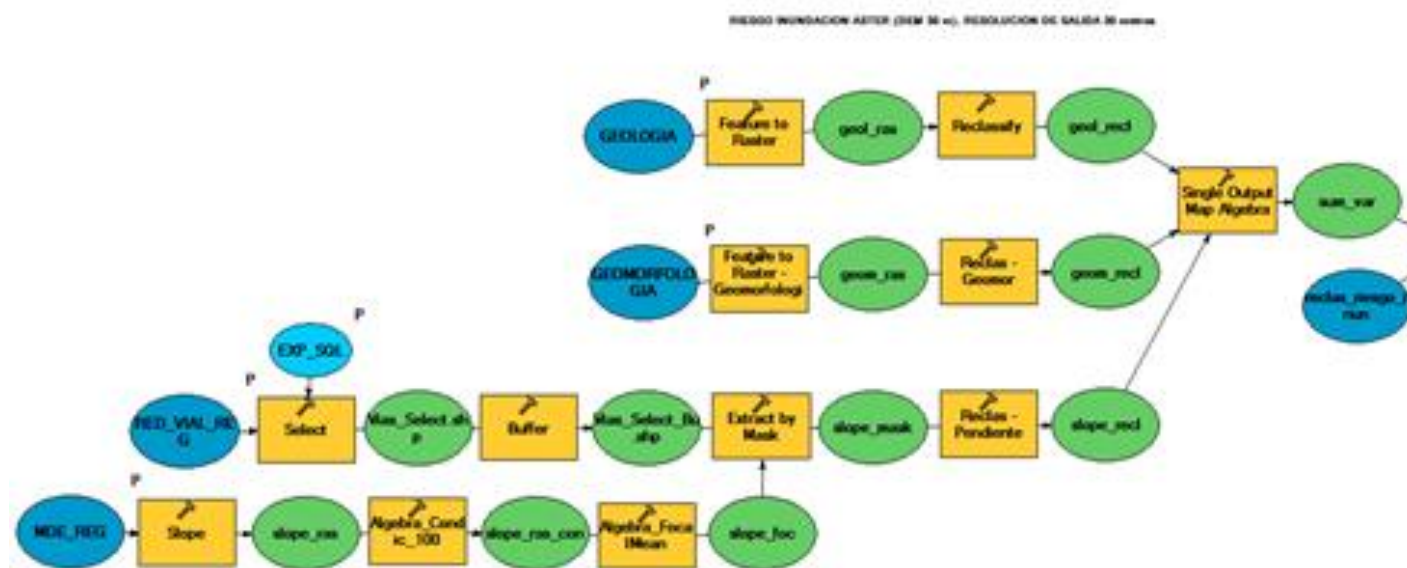
Tabla 12. Variables y criterios involucrados en riesgo de inundación y anegamiento

| Valor Factor | Bajo | Medio | Alto |
|---------------|--|--|---|
| Pendientes | > 5° | 1 – 4,9° | 0 a 0,9° |
| Geomorfología | Cordones y plataformas de escarpes fuertes | Dunas, terrazas y depósitos de escarpe medio | Terrazas, llanuras y depósitos recientes |
| Geología | Rocas intrusivas, metamórficas | Rocas volcánicas, volcansedimentarias | Rocas sedimentarias, sedimentos recientes |

Fuente: Elaboración Propia

Cabe señalar, que la combinación de estas variables o criterios en los valores señalados como 3 alto, son consistentes con lo observado en terreno para los tramos con eventos informados en la M-50 y otras rutas a lo largo del país. Con las variables y criterios definidos para la activación de los procesos de inundación y anegamiento, se elaboró el modelo digital a través del software Arcgis 9.3 con la herramienta Model Builder (Figura 7).

.



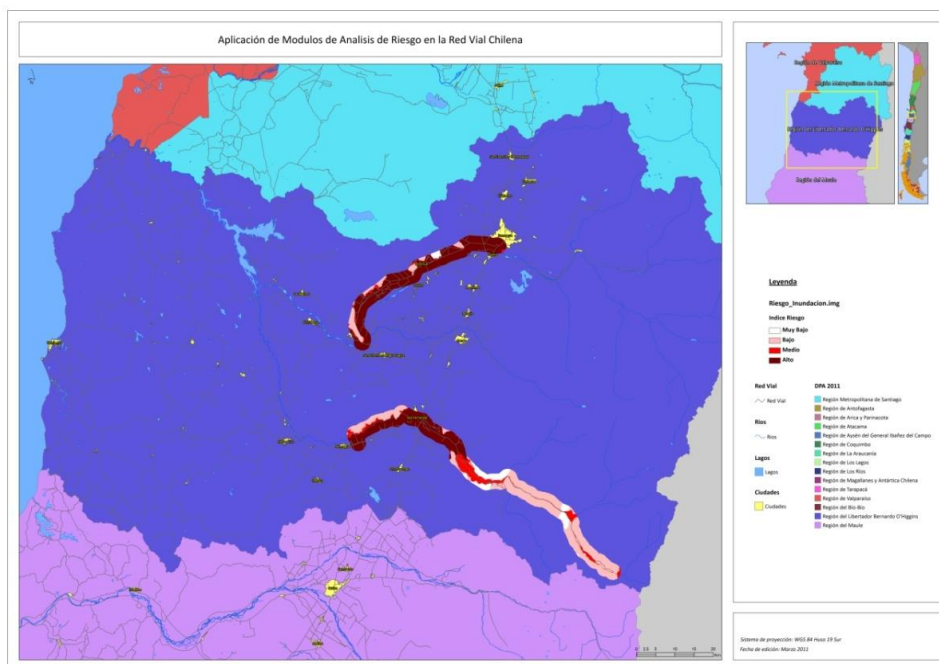
Fuente: Elaboración propia en Model Builder (ArcMap 9.3).

Figura 7. Modelo cartográfico para zonificación de riesgo de inundación-anegamiento.

A grandes rasgos, el procedimiento para la elaboración y aplicación del modelo es el siguiente:

- a) Antes de ingresar las variables con sus coberturas o base de dato, se realiza la selección de la ruta con la herramienta select de Arcgis, en la cobertura de la red vial.
- b) Sobre ella se establece un área de influencia (buffer) hasta de 3.000 m a cada lado de la ruta, transformando el polígono resultante desde un formato vectorial a un formato ráster, para poder aplicar con precisión el álgebra de mapas. Esta franja es variable dependiendo de las condiciones topográficas y de las características locales del evento natural, pudiendo existir algunos puntos específicos en donde sea distinta del valor de referencia del área de influencia.
- c) Posteriormente, se ingresan las coberturas correspondientes para generar y determinar las variables que se ocuparan, usando la herramienta CLIP para ajustarla al buffer seleccionado. Para esta aplicación las coberturas empleadas son las siguientes.
 - Para la generación de las pendientes, éstas se construyeron a partir del Modelo Digital de Elevaciones ASTER 30 m.
 - Para la generación de la geología, éstas se extrajeron del mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003)
 - Para la geomorfología, se construyeron en base a interpretación de base de datos de curvas de nivel (IGM), del mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003) y la base de datos de series de suelos de CIREN, escala 1:20.000 (CIREN, 2005).
- d) Cada cobertura, según atributos es reclasificada de acuerdo con los criterios definidos mediante la herramienta Reclassify.
- e) A cada variable seleccionada se le ingresó el valor 1, 2 o 3 según los criterios adoptados previamente. Es decir, que para el valor bajo se le ponderó como 1, para el valor medio, se le ponderó 2 y para el valor alto se le ponderó 3.
- f) Una vez reclasificadas las variables, éstas son interrelacionadas a través de un proceso de Álgebra de mapas, para llegar a una reclasificación final mediante la cual se definen las zonas potenciales de riesgo de inundación y anegamiento.
- g) La última reclasificación entrega un recorrido de puntajes de 3 a 9 puntos para las zonas potenciales de riesgo. De acuerdo a este recorrido los criterios para reclasificar y definir los riesgos, son
 - Puntajes de 3 y 4: Expresan Riesgo Bajo
 - Puntajes de 5 a 7: Expresan Riesgo Medio
 - Puntajes de 8 y 9: Expresan Riesgo Alto

De acuerdo con ello en la Figura 8 se muestra el resultado final del modelo cartográfico para las variables físicas que explican los riesgos de inundación y anegamiento. En rojo se marcan las áreas que presentan Riesgo Alto, incluyendo las observadas en terreno y aquéllas que tienen la potencialidad de generar riesgos, aunque actualmente no lo tengan



Fuente: Elaboración propia (ArcMap 9.3)

Figura 8. Resultado de aplicación del modelo cartográfico para zonificación de riesgo de inundación-anegamiento en los caminos seleccionados de la Región del Libertador Bernardo O'Higgins.

6.2) Modelo para proceso de remoción en masa

Al igual que en el caso anterior, y atendiendo a las observaciones de campo y la literatura se definieron algunas variables:

- **Geología:** que incluye afloramientos rocosos fuertemente fracturados, por fallas, diaclasas, juntas, rocas alteradas, rocas intemperizadas.
- **Topografía:** Asociada a zonas con pendientes altas y abruptas, generalmente superiores a 20°.
- **Geomorfología:** que incluye zonas rocosas o acantilados de fuerte pendiente, existencia de conos coluviales con fragmentos angulosos, zona de acumulación al pie del acantilado.
- **Vegetación:** Cubierta vegetal ausente en zonas activas, abundante en zonas inactivas.

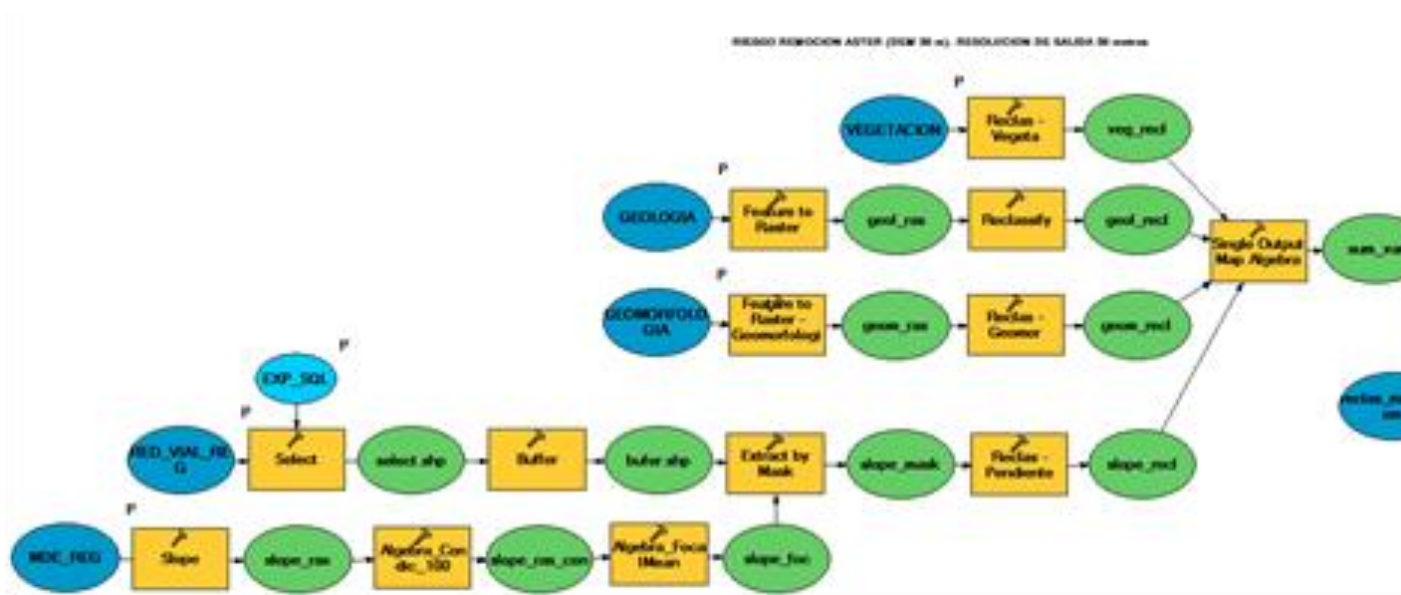
Ello ha sido adaptado mediante la elaboración de una matriz de riesgo (Tabla 13).

Tabla 13. Variables y criterios involucrados en riesgo de remoción en masa

| Valor Factor | Bajo | Medio | Alto |
|-------------------|---|---|--|
| Pendientes | 0 - 10° | 10 – 20° | > 20° |
| Geomorfología | Terrazas, llanuras y depósitos de escarpe débil | Cordones y plataformas de escarpe mediano | Cordones y plataformas de escarpes fuertes |
| Geología | Rocas sedimentarias | Rocas volcánicas, volcano-sedimentarias | Rocas intrusivas, metamórficas |
| Cobertura Vegetal | Cob. > 75% | Cob. 75 – 50 % | Cob. < 50% |

Fuente: Elaboración Propia

En los trabajos de terreno, la combinación de los criterios en los valores señalados como 3 alto, son consistentes con eventos de remoción en masa informados, lo cual permitió extrapolar la presencia de áreas potenciales de riesgo. Para la realización de este modelo sólo se agregaron las variables cobertura vegetal, a las variables geología, geomorfología y pendientes. A partir de ello, se elabora y aplica el modelo a través del software Arcgis 9.3 con la herramienta Model builder (Figura 9).



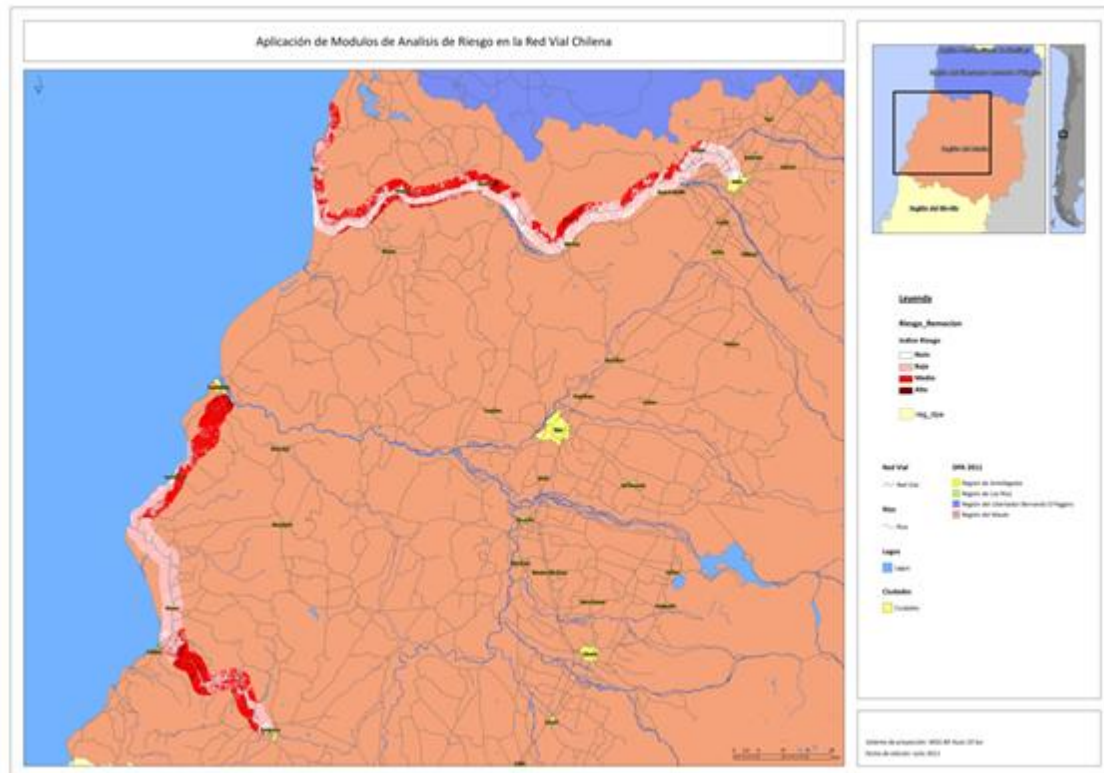
Fuente. Elaboración propia en Model Builder (ArcMap 9.3).

Figura 9. Modelo cartográfico para zonificación de riesgo de remoción en masa.

El procedimiento para la elaboración y aplicación del modelo es el siguiente:

- a) Igual que en el modelo anterior, antes de ingresar las variables con sus coberturas o base de datos, se realiza la selección de la ruta con la herramienta select de Arcgis, en la cobertura de la red vial.
- b) Sobre ella se establece un buffer de 3.000 m a cada lado de la ruta, transformando el polígono resultante desde un formato vectorial a un formato raster, para poder aplicar con precisión el álgebra de mapas.
- c) Posteriormente, se ingresan las coberturas correspondientes para generar y determinar las variables que se ocuparan, usando la herramienta CLIP para ajustarla al tamaño del buffer. Para esta aplicación las coberturas empleadas son las siguientes.
 - Pendientes. Elaborado a partir del MDE ASTER 30 m.
 - Para la generación de la geología, éstas se extrajeron del mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003)
 - Para la generación de las unidades geomorfológicas, éstas se construyeron mediante la interrelación e interpretación de la base de datos de curvas de nivel del IGM, con el mapa geológico de Chile escala 1:1.000.000 (SERNAGEOMIN, 2003) y la base de datos de series de suelos de CIREN escala 1:20.000 (CIREN, 2005).
 - Para la vegetación: se calculó a través de imágenes satelitales, una serie de índices automáticos que permitieron establecer la densidad de vegetación. Habiendo testado los índices NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) y MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index, Qi et al, 1994), se optó por utilizar el segundo. Ello porque la utilización del índice MSAVI, que consiste en determinar la densidad de la vegetación, minimiza el efecto del suelo desnudo que produce el SAVI (Índice de Vegetación de Suelo Ajustado), en lo que se refiere a la reflectividad del suelo descubierto, en otras palabras, persigue reducir el efecto que genera el suelo. Para el cálculo de este índice se generó otro modelo automatizado en el entorno de ArcGis 9.3 (Modelo_MSAVI), que permite la creación de este insumo para cualquier parte del país. Para más detalles acerca de la generación y aplicación de este índice, acudir a la página 15 del Anexo 3.
- d) Cada cobertura, según atributos es reclasificada de acuerdo con los criterios definidos para riesgo de deslizamientos y derrumbes y a lo observado en terreno mediante la herramienta Reclassify.
- e) A cada variable seleccionada se le ingresó el valor 1; 2 o 3 según los criterios adoptados previamente. Es decir, que para el valor bajo se le ponderó como 1, para el valor medio se le ponderó 2 y para el valor alto se le ponderó 3.
- f) Una vez reclasificadas las variables, éstas son interrelacionadas a través de un proceso de Álgebra de mapas, para llegar a una reclasificación final mediante la cual se definen las zonas potenciales de riesgo de derrumbes y deslizamientos.
- g) La última reclasificación entrega un recorrido de puntajes de 3 a 9 puntos para las zonas potenciales de riesgo. De acuerdo a este recorrido los criterios para reclasificar y definir los riesgos, son:
 - Puntajes de 3 y 4: Expresan Riesgo Bajo.
 - Puntajes de 5 a 7: Expresan Riesgo Medio.
 - Puntajes de 8 y 9: Expresan Riesgo Alto.

De acuerdo con ello en la Figura 10 se muestra el resultado final del modelo cartográfico para las variables físicas que explican los riesgos de derrumbes y deslizamientos. En rojo se marcan las áreas que presentan Riesgo Alto, incluyendo las observadas en terreno y aquellas que tienen la potencialidad de generar riesgos, aunque actualmente no lo tengan.



Fuente. Elaboración propia (ArcMap 9.3).

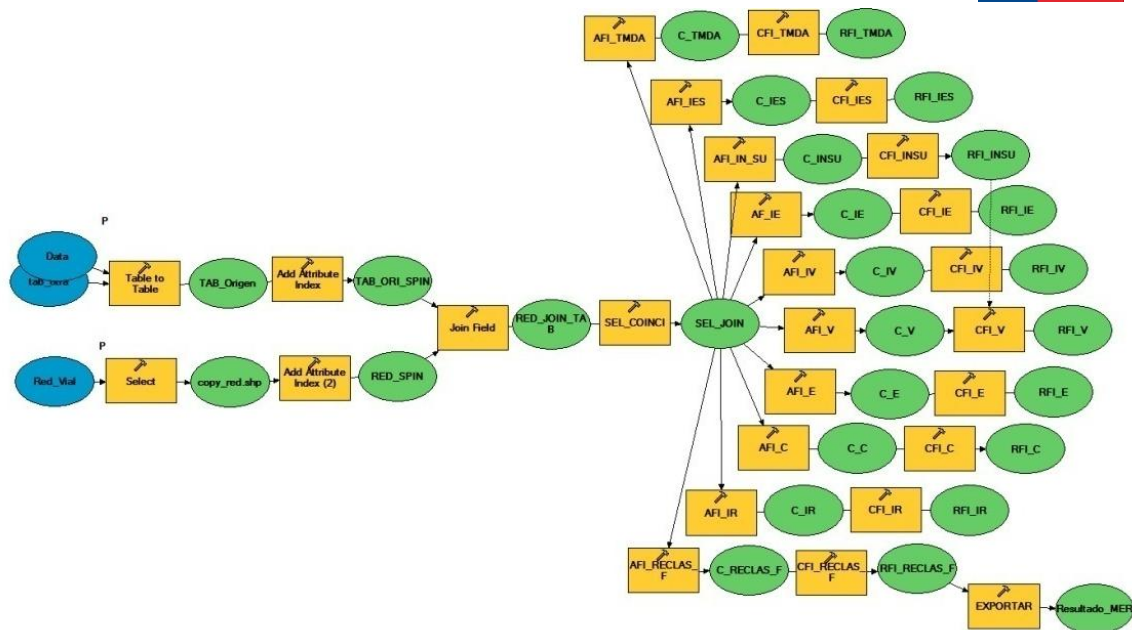
Figura 10. Resultado de aplicación del modelo cartográfico para zonificación de riesgo de remoción en masa en los caminos seleccionados en la Región del Maule

6.3) Modelo de aplicación Método de Evaluación Rápida

El último de los apartados llevados a cabo tiene que ver con el cálculo de la Vulnerabilidad (MER), dentro del entorno SIG, para que pueda ser representado espacialmente a través de una herramienta metódica y de fácil aplicación.

La aplicación de este módulo de análisis tiene que ver con la transcripción del Método de Evaluación Rápida aportado en fases anteriores del estudio, y como se ha comentado anteriormente, se calcula por camino o caminos de interés (acudir al Anexo correspondiente para su explicación detallada), para el cálculo final del MER.

Esta aplicación requiere introducir dos variables como insumo para cada región, la hoja de Excel con los datos necesarios para la aplicación de la ecuación por camino, y el shape de red vial correspondiente a la región. Igualmente este módulo dispone de ayuda, explicaciones y metadatos asociados para la correcta comprensión y aplicación (revisar en el Anexo correspondiente). A continuación se expone la estructura del modelo:



Fuente. Elaboración propia en Model Builder (ArcMap 9.3).

Figura 11. Estructura del Modelo Cartográfico Modulo_MER (vulnerabilidad).

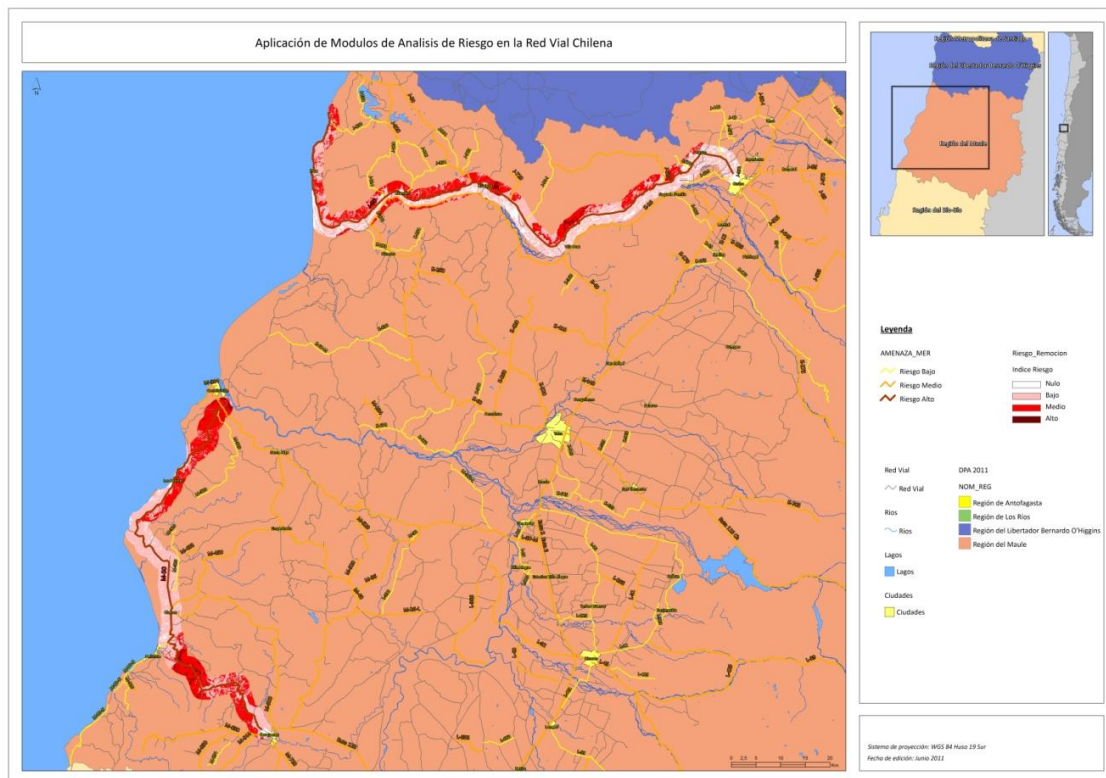
El desarrollo de esta aplicación permite generar un nuevo producto que adjuntar al factor de riesgo físico creado anteriormente, permitiendo una visión más sintética de la problemática existente.



Fuente. Elaboración propia en ArcMap 9.3

Figura 12. Resultados de aplicación del Modulo_MER en la región del Maule.

Como se ha comentado, la finalidad es relacionar los resultados de ambos módulos, para ello se propone la creación de un modelo borrador cartográfico, que permita visualizar los resultados.



Fuente. Elaboración propia en ArcMap 9.3

Figura 13. Resultados de aplicación del Modulo_FISICO y Modulo_MER en la región del Maule.

Se recomienda acudir a informe específico, Anexo 3; Manual de referencia para la utilización del modelo creado, para profundizar acerca del funcionamiento y modo de operación de los modelos.

VII) CONCLUSIONES

a) Sobre las 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.

b) Sobre el Método de Evaluación Rápida (MER) de Riesgos

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 ranquear 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.

Este último es importante destacar ya 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 clásico, sino que es más bien un método orientado a entregar una visión territorial sinóptica de la infraestructura vial, respecto de factores de orden físico, natural, económico o social que la potencian o limitan y teniendo en cuenta el registro histórico de los eventos naturales que afectan la infraestructura vial. 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.

c) 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.

d) Sobre el Método de Evaluación Detallada (MED) de Riesgos

Se logró desarrollar un método sistemático y simple para evaluar, a nivel de perfiles, opciones de inversión en medidas de mitigación, considerando no solo el beneficio económico sino que también la vulnerabilidad de las infraestructuras. El método fue aplicado a 12 casos prácticos, llegando en todos los casos a resultados consistentes en cuanto a reducción de riesgo y al dimensionamiento del beneficio social de mitigar. No obstante, la recomendación esencial es el lograr implementar computacionalmente el MED de manera de no solo programar inversiones en refuerzo de infraestructura (por ejemplo dentro de planes de mantenimiento), sino que además de monitoreo y actualización del modelo SIG descrito en Anexo 3. Asimismo, el MED incluye un análisis geográfico y físico de los riesgos naturales que permite visualizar el contexto de la infraestructura vial sobre el cual se suceden los eventos naturales. Esto puede llevar a que en el futuro se logre realizar gestión del riesgo sobre la infraestructura vial, antes (planificación), durante (contingencia) y después (reconstrucción o refuerzo).

El trabajo de terreno impuso precisiones en el cálculo del Índice de Riesgo, tanto en la definición de importancia estratégica de la ruta como en la estimación de la vulnerabilidad. Al precisar estos datos de entrada al MER, en algunos casos se llegó a una compensación de valores, dado que aumentó la importancia estratégica, pero disminuyó la vulnerabilidad, particularmente hidráulica. En esos casos, el resultado neto fue un aumento de 2 puntos del Índice de Riesgo calculado con el MER hacia el Índice de Riesgo calculado con el MED.

El origen de los eventos naturales considerados, hacen que el escenario más adecuado de modelación sea la operación restringida sin corte total de camino. Con esto, se eliminan automáticamente los costos asociados al impacto económico, limitándose el análisis al estudio de los costos de operación y demoras para el cálculo del impacto económico.

Particularmente, se evaluaron 2 escenarios: un escenario base denominado Soluciones provisionales de corto plazo, y un escenario alternativo denominado solución definitiva con dos opciones, una de intervención mayor en el año 1 y otra de intervención menor con una mantención en el año 5.

En el escenario base se asumió que existe un cierto número de eventos al año 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 asumió que se adoptan medidas de mitigación destinadas a reducir la vulnerabilidad y la exposición, por lo cual por un lado se eliminan las demoras, se reducen los costos de operación, pero se aumenta el gasto de Vialidad. El resultado en términos de riesgo es que a igual exposición, probabilidad de ocurrencia e importancia estratégica la reducción de vulnerabilidad reduce el número de eventos, al menos durante el horizonte de evaluación.

Asimismo, 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. Igualmente, en ambos escenarios alternativos las medidas de mitigación se plantearon bajo el supuesto de mantener invariable el ancho de faja (caso en el cual no se cuantifican potenciales expropiaciones).

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.

Respecto del plan de contingencia, este debe aplicarse esencialmente ante eventos en lugares distintos de los históricamente sensibles. Para ello 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 Macro Zona, hasta una escala de intervención directa ante una emergencia.

e) Sobre los tipos de riesgo y las Macro Zonas

Si bien resulta dificultoso generalizar respecto de comparaciones acerca de los riesgos para cada Macro Zona, ya que estos se presentan asociados a factores locales de

geología, geomorfología, pendientes y cobertura vegetal; cabe destacar ciertas regularidades que se han observado en el trabajo.

Para la Macro Zona Norte, se observa una regularidad entre la presencia de lluvias altiplánicas como la principal causa informada de daños a la infraestructura, asociada a fuertes precipitaciones estivales y crecidas de ríos y esteros. El fenómeno se presenta en los meses de enero de, prácticamente, todos los años, siendo un factor que actúa de manera uniforme o transversal sobre toda la red vial. Especialmente en las regiones de Arica-Parinacota, Tarapacá y Antofagasta. De esta manera, la relación causa/efecto de dicho fenómeno puede ser observada en casi todos los caminos, independientemente de su ubicación geográfica; es decir, en el altiplano con fuertes precipitaciones y crecidas de ríos, en la pre-cordillera y también en la costa.

Además, en las áreas de pre-cordillera y cordillera en el mes de agosto se presentan nevazones. Generalmente, se presenta el riesgo, en áreas de quebradas y valles con rellenos sedimentarios recientes poco consolidados y en laderas con pendientes elevadas. En estas condiciones geomorfológicas las precipitaciones de agua o nieve escurren encajonadas con un fuerte caudal y posteriormente se diseminan en el desierto arrastrando los sedimentos mal consolidados, en forma de aluviones.

Para la Macro Zona Centro, la mayor parte de los eventos se relacionan con fuertes precipitaciones invernales por avance del frente polar, principalmente entre los meses de junio y julio. Los mayores riesgos se refieren a eventos de inundación en los principales ríos y esteros con períodos de recurrencia inferiores a cinco años. En menor medida se observan fenómenos de anegamiento de las rutas.

Ello afecta principalmente las rutas que atraviesan la depresión central, debido a la torrencialidad de los ríos en su salida desde las zonas precordilleranas. En los sectores de Cordillera de la Costa los principales fenómenos corresponden a procesos de remoción en masa, asociados a la presencia de cordones graníticos y sedimentarios con manto meteorizado en superficie, pendientes superiores a 30% y escasa cobertura vegetal.

Para la Macro Zona Sur, los eventos están asociados principalmente a las precipitaciones invernales, entre los meses de mayo a julio para todo el territorio y, en el caso de precipitaciones de nieve principalmente julio y agosto para los sectores cordilleranos. Las rutas frecuentemente afectadas son aquellas situadas en la cordillera de la costa y áreas de pre-cordillera y cordillera andina. Los eventos más frecuentes se relacionan con procesos de remoción en masa en terrenos de cordones graníticos y sedimentarios con manto meteorizado en superficie, pendientes de más de 30% y baja cobertura vegetal.

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

En el estudio 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; para las once rutas priorizadas a nivel nacional.

Para actualizarlo 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 espacial con eventos tiene un comportamiento topológico óptimo (los eventos se ubican exactamente sobre la red vial), y congruencia con los parámetros generales definidos.
- Crear un listado definitivo de vías por región, en función de ROL y KILOMETRAJE, y asignarlo como un solo elemento dentro del shape, para evitar errores de consignación de datos en función de estado del proceso de homologación, ya que se han derivado muchos problemas por la no coincidencia de roles.
- Obtener cobertura referente a geología y geomorfología de manera más exacta; deseable (se entiende que es un proyecto en sí, muy amplio), definir una metodología de trabajo y desarrollar el producto para todo el país a una escala no menor a 1:50.000.
- Obtener cobertura referente a cobertura de vegetación para todo el país; dado que es poco costoso en términos económicos por gratuidad de imágenes Landsat utilizadas.

g) Sobre Precipitación Crítica

Una remoción en masa ocurrirá dependiendo fundamentalmente de la pendiente, geomorfología, geología y cobertura vegetal del terreno como respuesta a eventos naturales gatillantes 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.

Dado que taludes distintos presentan capacidad de resistencia a eventos naturales distintas, 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.

De lo anterior, resulta conveniente definir tipos de taludes (e.g. muy vulnerables, vulnerables, seguros, muy seguros) de acuerdo a su vulnerabilidad a generar procesos de remoción en masa ante una lluvia dada que en el caso de estudio debería corresponder por ejemplo a aquella con un periodo de retorno igual a la vida útil del arco vial.

Para cada tipo de talud deberá analizarse la intensidad, duración y frecuencia de la lluvia crítica, en conjunto con la humedad del suelo que antecede al evento de precipitación.

En resumen, la lluvia crítica será diferente para diferentes taludes. En forma preliminar, se sugiere trabajar con lluvias críticas de al menos 15 días de duración, asociadas a periodos de retorno de 50 años o más. De esta forma, se lograría estandarizar las intensidades de lluvia crítica (de 15 días de duración y 50 años de período de retorno) para las diferentes taludes en las diferentes Macro Zonas.

VIII) REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara, I. (2000). "Índice de susceptibilidad a movimientos del terreno y su aplicación en una región semiárida". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*. 17(1):66-75.
- Alcock, J, y Geo, P. (2001) Mass Wasting Events Associated With A Large Magnitude Rain-On-Snow Event, November 1999, Columbia And Rocky Mountains, Southeastern B.C.. Terrain Stability and Forest Management In The Interior of B.C. Workshop, Nelson, B.C., May 23-25, 2001.
- 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.
- COSUDE (2002). Instrumentos de apoyo para el análisis y la gestión de riesgos naturales en el ámbito municipal de Nicaragua. Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. Managua.
http://www.prevac.org.ni/files/doc/1143745212_Guia_Especial.pdf
- 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.
- Felicísimo A. M. (1994). Modelos digitales del terreno. Introducción y aplicaciones en las ciencias ambientales. <http://www.etsimi.uniovi.es/>
- 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.
- Ko Ko,C., Flentje, P. y Chowdhury, R. (2004). Interpretation of probability of landsliding triggered by rainfall. Landslides 2004(1): 263-275.
- 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.
- Qi, J et al (1994). A modified Soil Adjusted Vegetation Index. *Remote Sensing Environment*, 48, 119-126.
- 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.
- Sabatakakis, N., Koukis, G. y Mourtas, D. (2005). “Composite landslides induced by heavy rain falls in suburban areas: City of Patras and surrounding area, western Greece”. *Landslides* 2005(2), 202-211.
- Sepúlveda, S., Rebolledo, S. y Vargas, G. (2011) “Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, relationships and human response”. Borrador en preparación.
- SERNAGEOMIN (2003). Mapa Geológico de Chile: versión digital. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Digital, No. 4 (CD-ROM, versión1.0, 2003). Santiago.
- 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.

Base geológica escala 1:1.000.000, correspondiente a la recopilación de estudios geológicos realizados por distintos autores y escalas, según área de estudio:

Región de Antofagasta

González y Niemeyer (En Edición) escala 1:250000

Marinovic et al. (1995) escala 1:250.000

Naranjo y Puig (1984) escala 1:250.000

Marinovic y Lahsen (1984) escala 1:250.000

Ramírez y Gardeweg (1982) escala 1:250.000

Región del Libertador Bernardo O'higgins

SERNAGEOMIN (1982) escala 1:1.000.000

Charrier (1981) escala 1:250.000

Moreno y Varela (1985) escala 1:250.000

Región del Maule

SERNAGEOMIN (1982) escala 1:1.000.000

Moreno y Varela (1985) escala 1:250.000

Región de Los Ríos

SERNAGEOMIN (1982) escala 1:1.000.000

Duhart et al. (En edición) escala 1:100.000

Rodríguez et al. (1998) escala 1:100.000

Lara y Moreno (En edición) escala 1:100.000

Moreno y Lara (En preparación) escala 1:100.000

SERNAGEOMIN (1982) escala 1:1.000.000

9) ANEXOS