



SEMINARIO

DESAFÍOS PARA UNA RED VIAL RESILIENTE

PROYECTO FONDEF ID14I10309. "Investigación y desarrollo de modelos para cuantificar y mitigar el riesgo de eventos naturales en la red vial nacional"

Alondra Chamorro, PhD

Profesora Escuela Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile
Investigadora Asociada CIGIDEN

18 de Octubre, 2016

INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO DE MODELOS PARA CUANTIFICAR Y MITIGAR EL RIESGO DE EVENTOS NATURALES EN LA RED VIAL NACIONAL



I CONCURSO IDeA EN DOS ETAPAS, INTERÉS PÚBLICO

PRIMERA ETAPA DE CIENCIA APLICADA:

Resultado debe ser un producto o servicio aplicado a pequeña escala

DURACIÓN: 24 meses (Abril 2015 – Abril 2017)

Síntesis del Proyecto

Beneficiaria Principal	Pontificia Universidad Católica de Chile
Beneficiaria Asociada	Universidad de Concepción
Entidades Interesadas	<ul style="list-style-type: none">• Dirección de Vialidad - Ministerio Obras Públicas• COPSA Asociación Gremial• ONEMI



Equipo de Trabajo



- **Directora de Proyecto:** **Alondra Chamorro, PhD.**
Profesora Escuela de Ingeniería PUC
Investigadora Asociada CIGIDEN.
- **Director Alterno:** **Hernán de Solminihac, PhD.**
Profesor Escuela de Ingeniería, PUC.
- **Investigador Principal:** **Tomás Echaveguren, PhD.**
Profesor Escuela de Ingeniería UdeC
Investigador CIGIDEN.
- **Asesora Internacional:** **Susan Tighe, PhD.**
University of Waterloo, Ontario, Canada.
- **Equipo de Investigación y Gestión:** **Carolina Videla** (Coordinadora)
Alelí Osorio, PhD (Investigadora)
Joaquín Dagá (Alumno MSc-UC)
Felipe Baratta (Alumno MSc-UC)
Manuel Contreras (Alumno MSc-UdeC)
Glenda Vargas (Alumna Ing-UdeC)
Braulio Mora (Alumno Ing-UdeC)

TEMARIO



1. Antecedentes
2. Síntesis del Proyecto
3. Marco Conceptual para Desarrollo de Modelos
4. Resultados Esperados 1ra Etapa y Desafíos 2da Etapa



ANTECEDENTES



Definiciones



- **Vulnerabilidad:** susceptibilidad de algún agente, estructura, infraestructura o red a perder total o parcialmente su nivel de servicio debido a la acción de eventos naturales.
- **Amenaza:** eventos naturales que afectan a agentes, estructuras o redes en algún instante de tiempo con una cierta probabilidad de ocurrencia e intensidad.

Riesgo = f (amenazas, vulnerabilidad, exposición)

- Es posible estimar la probabilidad de daño de un elemento, infraestructura o red sujeto a la potencial amenaza de un cierto evento natural en un sitio dado.



Vulnerabilidad Red Vial



- Red vial vulnerable a amenazas naturales propias del país, como: sismos, maremotos, erupciones volcánicas, inundaciones, invierno altiplánico, avalanchas, remociones en masa, aluviones, etc.
- Entre 1990 – 2009 más de 30 mil km de caminos presentaron al menos una interrupción total o parcial por amenazas naturales.
- La falta de conectividad afecta de manera directa a la población, la competitividad del país, la asignación de recursos y el desarrollo económico.

Práctica Común

Acción reactiva ante eventos naturales mediante programas y protocolos de emergencia, destinados a habilitar al tráfico en el menor tiempo posible en el área afectada post-evento.



Consecuencias

Sobre-costos a los usuarios y al Estado (inversión en reposición) frente a la alternativa de mitigar previa ocurrencia de evento o proponer diseños mas resilientes.

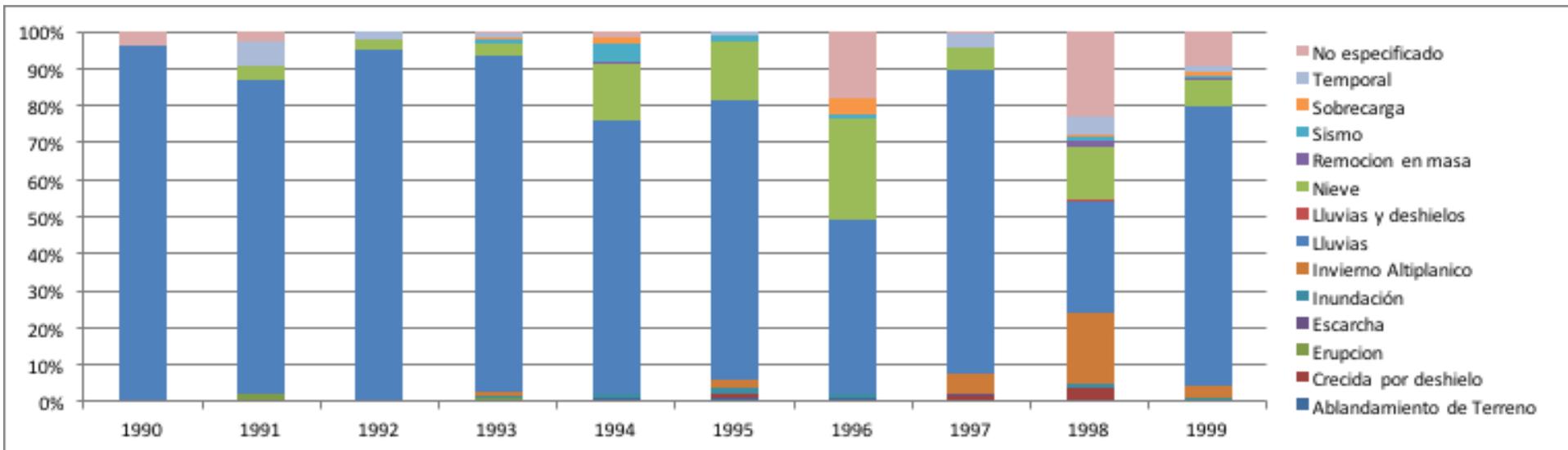
Deterioros red vial post-evento



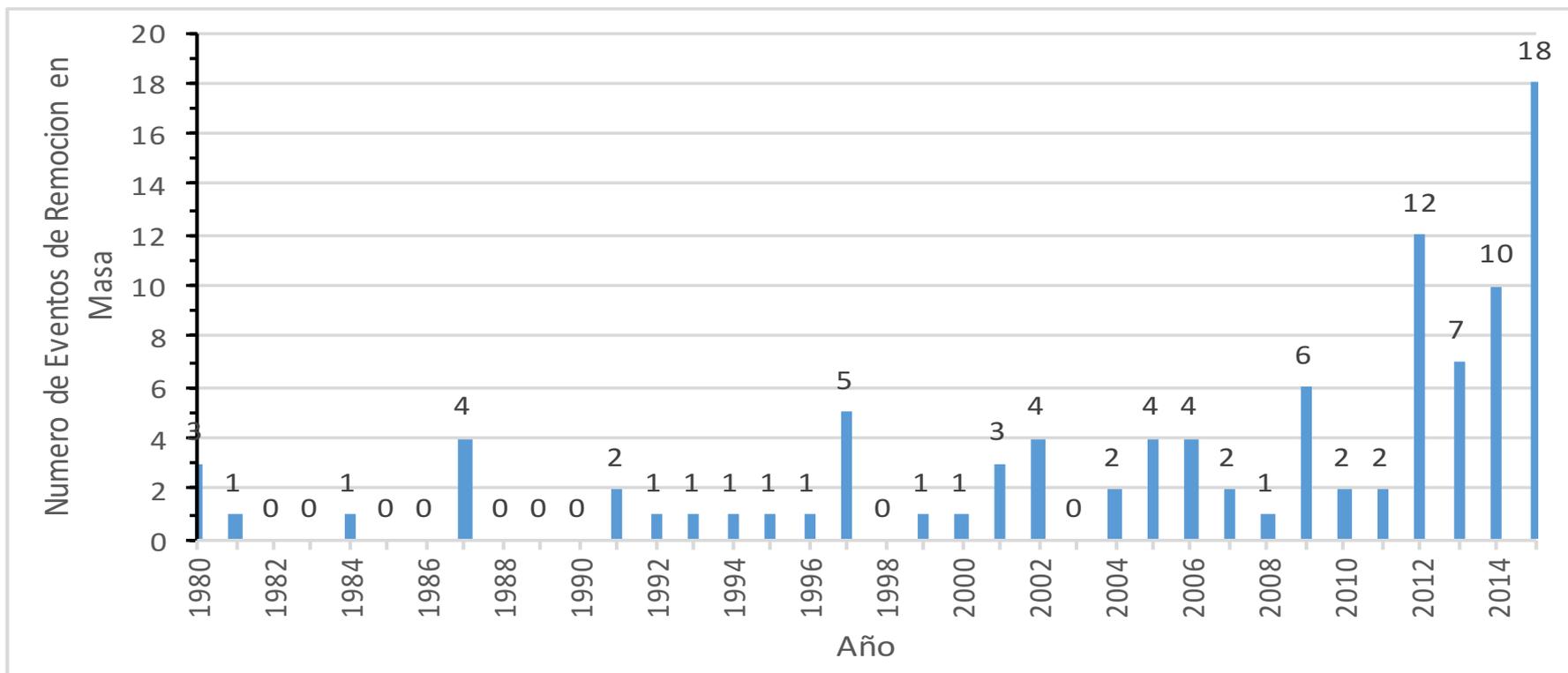
Causas de cortes de caminos



Eventos naturales causantes de cortes de caminos entre 1990 y 1999 en Chile



Cortes causados por remociones en masa



Regiones mas afectadas por remociones en masa en Chile:

- Metropolitana
- Bio Bio
- Los Rios
- Los Lagos

Antecedentes

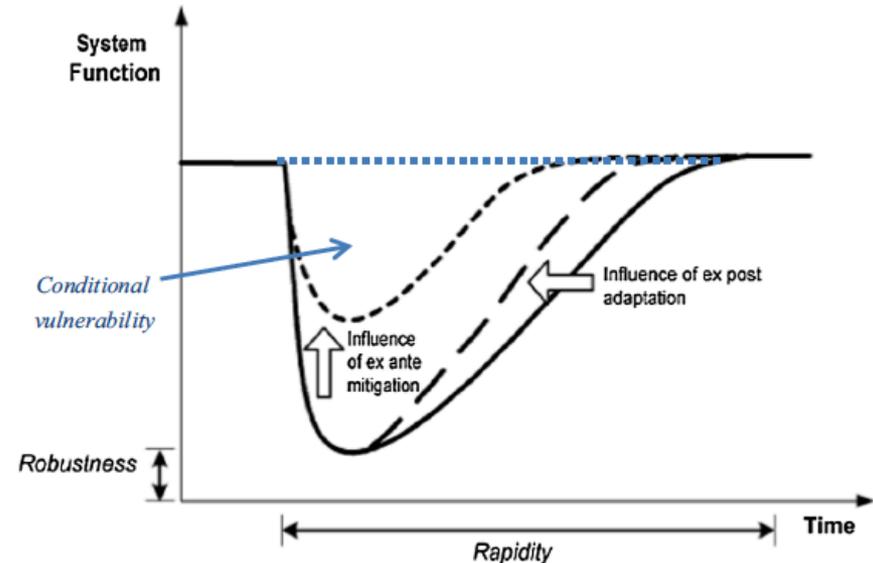
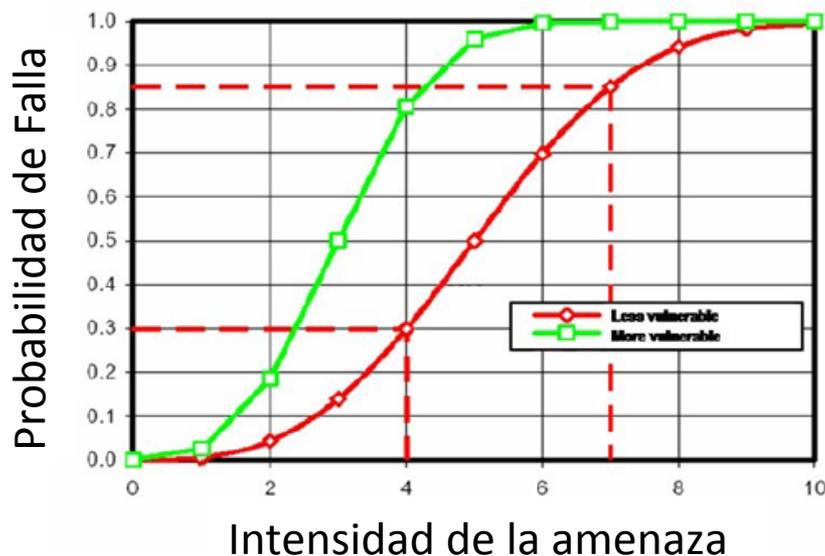


- En el año 2009 la Dirección de Vialidad del MOP licita el estudio “Catastro Georeferenciado de Riesgos y Peligros Naturales en la Red Vial”. Adjudicado en el año 2010 al Centro de Ciencias Ambientales (EULA) de la U. de Concepción. El estudio desarrolló un Índice de riesgo que evalúa el riesgo de la red vial, considerando:
 - ✓ Inundaciones y deslizamientos en de taludes
 - ✓ Identificó 800 puntos de la red, totalizando 31 mil km de caminos con cortes, entre 1990 y 2009 con lo cual construyó un indice de riesgo.
- Internacionalmente existen procedimientos para cuantificar el riesgo y vulnerabilidad de redes viales pero no necesariamente son aplicables en Chile por complejidad, por características y naturaleza de las amenazas, por la tolerancia al riesgo de la población, gobernanza asociada al riesgo e institucionalidad.

Problema y Necesidad de Investigación



- En Chile no existen modelos objetivos para evaluar el nivel de riesgo al cual se encuentra afecta la red vial nacional, considerando todas las amenazas naturales y a partir de lo cual mejorar la resiliencia de la red vial nacional.
- Para ello es necesario contar con modelos que permitan:
 - ✓ Cuantificar la vulnerabilidad de la infraestructura que compone la red vial nacional.
 - ✓ Evaluar Mitigación de efectos de eventos naturales previos a su ocurrencia.



SÍNTESIS DEL PROYECTO



Objetivo General



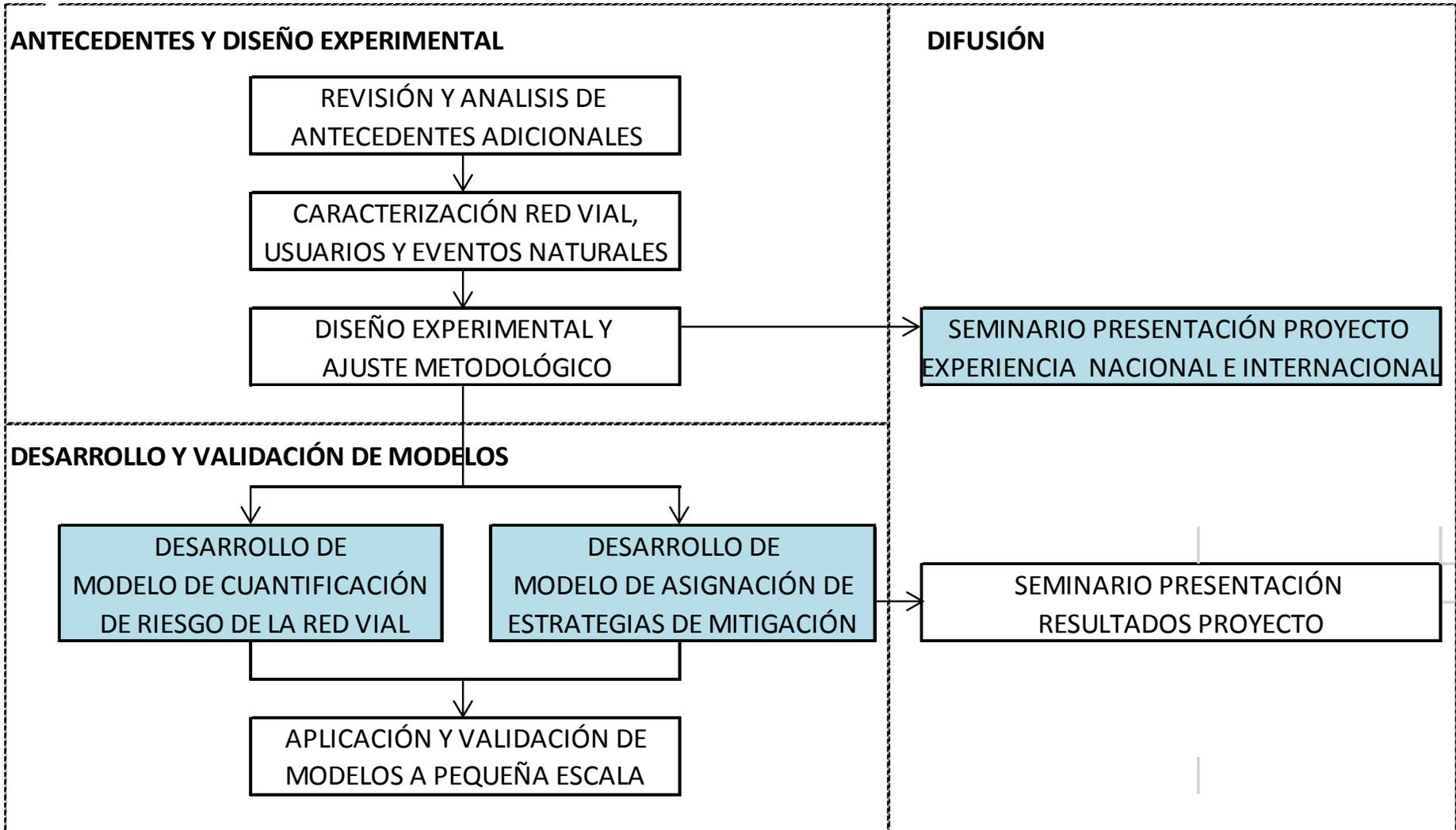
Desarrollar y validar **modelos** que permitan **cuantificar el nivel de riesgo** que afecta la red vial nacional producto de la amenaza de eventos naturales y **asignar estrategias de mitigación** que permitan disminuir dicho riesgo considerando criterios de optimización.

Objetivos Específicos



- Identificar los eventos naturales que afectan con mayor recurrencia y significancia a la red vial nacional
- Caracterizar los elementos de la infraestructura vial y usuarios que son más vulnerables ante eventos naturales más recurrentes.
- Desarrollar un modelo que permita cuantificar el riesgo asociado a la amenaza de eventos naturales.
- Desarrollar un modelo que permita asignar, mediante criterios de optimización técnica y económica, estrategias de mitigación.
- Aplicar y validar a pequeña escala los modelos de cuantificación de riesgo y mitigación
- Difundir la investigación y desarrollo llevado a cabo en el proyecto.

Metodología de Investigación



MARCO CONCEPTUAL PARA DESARROLLO DE MODELOS



DATOS ENTRADA

INVENTARIO RED Y AGENTES

ESTADO DE LA RED Y AGENTES

CARACTERIZACIÓN AMENAZAS

ESTÁNDARES ESTRATÉGICOS DE LA RED

ACCIONES DE MITIGACIÓN

COSTO ACCIONES DE MITIGACIÓN

MODELO DE RIESGO

Etapa 1 Proyecto FONDEF

MODELO VULNERABILIDAD FÍSICA (ELEMENTO)

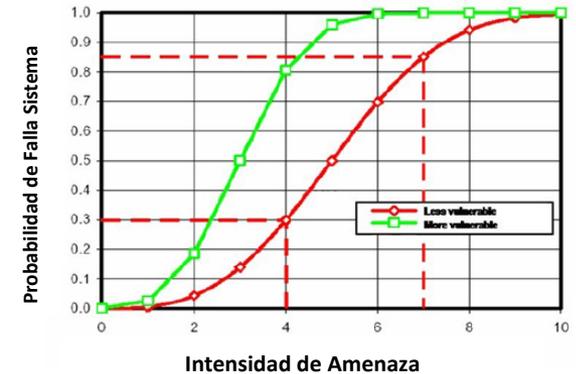
$$V_{fij} = f(\text{condición elemento "I", tipo amenaza "j"})$$

Ej: Modelos Hazus (aplicable a red vial)

$$V = f\{\text{ESTADO, VEN}\} \text{ (Ej. Echaveguren et al. 2012)}$$

V= Índice de Vulnerabilidad; ESTADO= Condición elemento; VEN = Vulnerabilidad asociada a la amenaza

MODELO DE RIESGO (FI FMENTO)



Adaptación curvas de vulnerabilidad física
Corregidas contexto nacional e importancia Socio-Política de arcos en contexto red

Etapa 2 Proyecto FONDEF

MODELO IMPORTANCIA SOCIO-POLÍTICA

$$ISP_{aj} = f(\text{variables S-P, tipo amenaza "j", Arco "a"})$$

Ej: FPSP = f{PS, IC, PB, PVA} (Godoy et al. 2015)

PS: Percepción Social; IC: Infraestructura Crítica cercana a la Vía; PB: Población Beneficiada; PVA: Presencia Vías Alternativas

ESTIMACIÓN RIESGO RED
Segmentación red
Asignación de tráfico de la red con interrupciones
Ej: REDARS

MODELO DE MITIGACIÓN

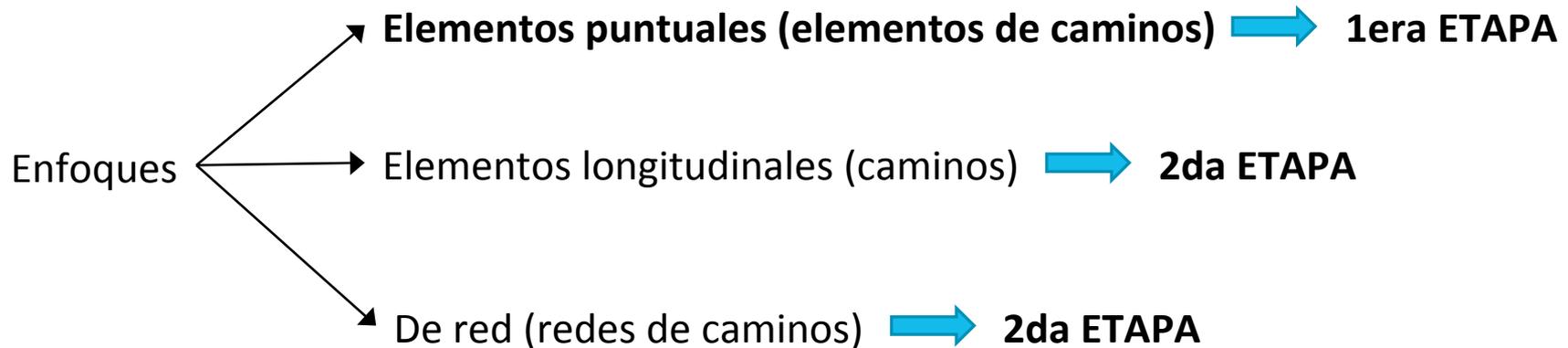
ESTÁNDARES DE MITIGACIÓN

- Actividades de Mitigación por tipo de elemento
 - Estrategias Propuestas
- Costos asociados a actividades de mitigación

VAN-EFECTIVIDAD MARGINAL APORTADA COMO ROBUSTEZ DE LA RED

$$CEM_i = \frac{\text{Riesgo}_{\text{Miti}} - \text{Riesgo}_{\text{Mitj}}}{VAN_{\text{Miti}} - VAN_{\text{Mitj}}}$$

Enfoque Modelación de Riesgo



Modelos basados en:

- Índices determinísticos
- Probabilidades
- Costos
- Mixtos

Herramientas Disponibles (Giovinazzi and King, 2009):

- **HAZUS (USA)**
- Riskscape (NZ)
- REDARS (USA)
- ALA (USA)
- MIRISK (Japon)
- LESSLOSS (EU)

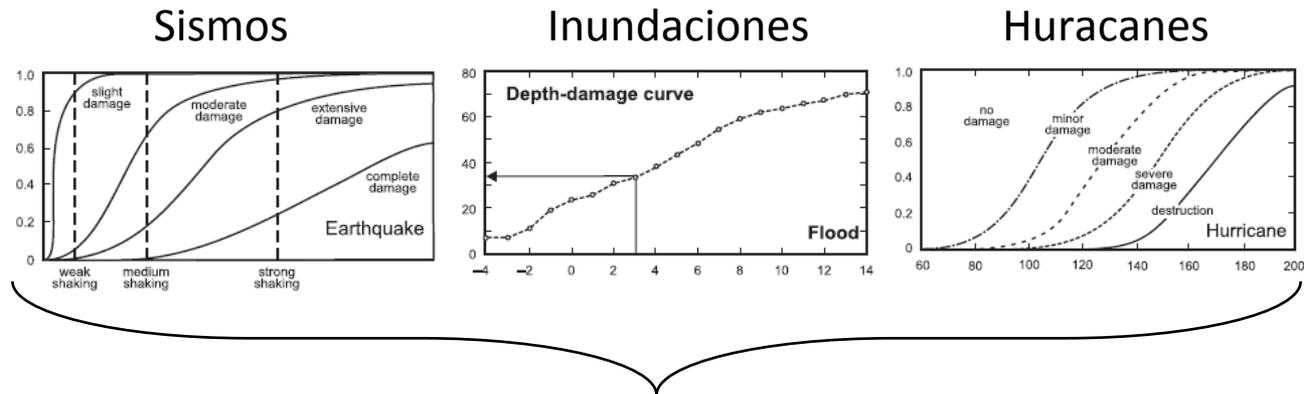


Modelos y Software HAZUS MH

- Hazus MH es un software desarrollado por FEMA, EEUU, con el propósito de estimar los impactos humanos, sociales, sobre la propiedad y financieros, producto de amenazas naturales tales como sismos, viento e inundaciones, bajo condiciones existentes y dadas posibles medidas de mitigación
- Es un software desarrollado en ambiente SIG, en la plataforma ArcGIS
- Contiene modelos de riesgo físico de distintos tipos de infraestructura, dentro de ellas la infraestructura vial



Modelos de Riesgo de HAZUS



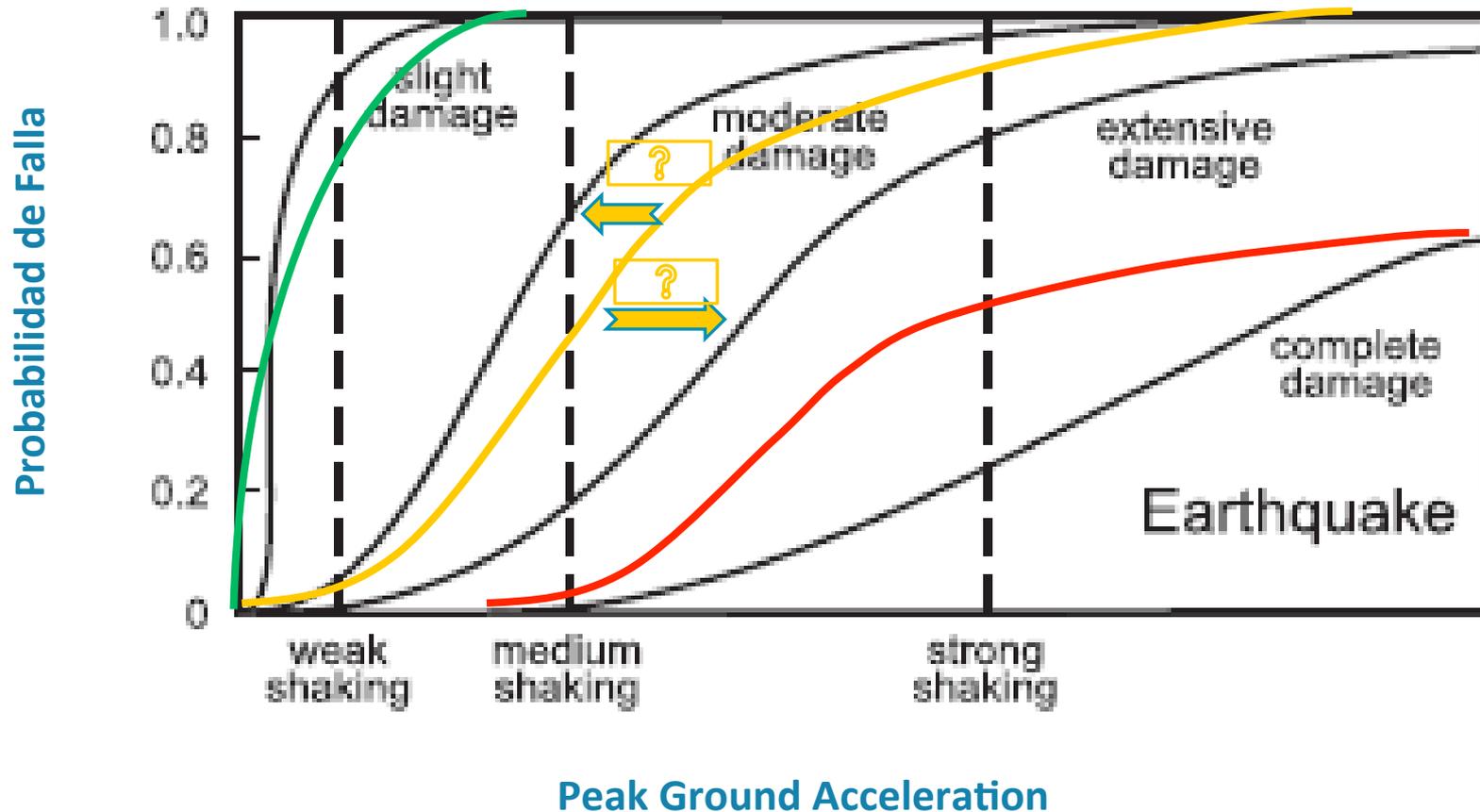
$$\text{(Amenaza)} \times \text{(Inventario)} \times \text{(Vulnerabilidad)} = \text{Riesgo}$$

- Sismos
- Inundaciones
- Huracanes

- Demografía
- Edificaciones
- Facilidades Esenciales
- Facilidades de Transporte
- Agricultura
- Vehículos

- Daño físico directo
- Daño físico inducido
- Pérdidas directas
- Pérdidas sociales
- Pérdidas indirectas

ESCENARIOS AJUSTE MODELOS RIESGO



MODELOS DE RIESGO:



- **Amenaza Sísmica**
- Amenaza Volcánica
- Amenaza Hidro-meteorológica





Experimento 1

Homologación Categorías y Metodología toma de Datos

- **Objetivos:**

- 1.a Homologar las categorías del Manual Técnico de Hazus con la información de inventario disponible en Chile.
- 1.b Homologar los estados de daño de Hazus con la información disponible de emergencias sísmicas reportadas en Chile.

Experimento 2

Validación y Calibración de Modelos de Riesgo Sísmico

- **Objetivos:**

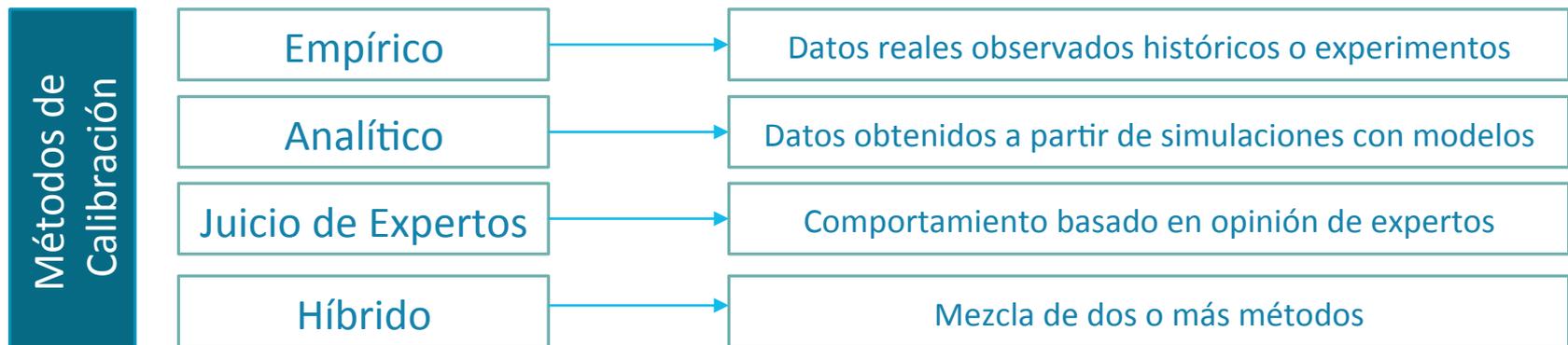
- Con los datos obtenidos acerca de las emergencias viales, validar el modelo de riesgo.
- En caso de no validar satisfactoriamente los modelos de Hazus a eventos en Chile, se deberá calibrar los modelos para Chile

VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN MODELOS RIESGO SÍSMICO



La validación corresponde a la comparación estadística del valor de riesgo calculado con Hazus y el observado de dato histórico

Si curvas no se validan satisfactoriamente al caso chileno, será necesario realizar una calibración de los parámetros de las curvas de riesgo.



Si bien se cuenta con datos históricos, la cantidad de datos puede ser insuficiente para realizar una calibración mediante el enfoque empírico.

En dicho caso se requerirá un enfoque híbrido, en que se complemente la información empírica con simulaciones.

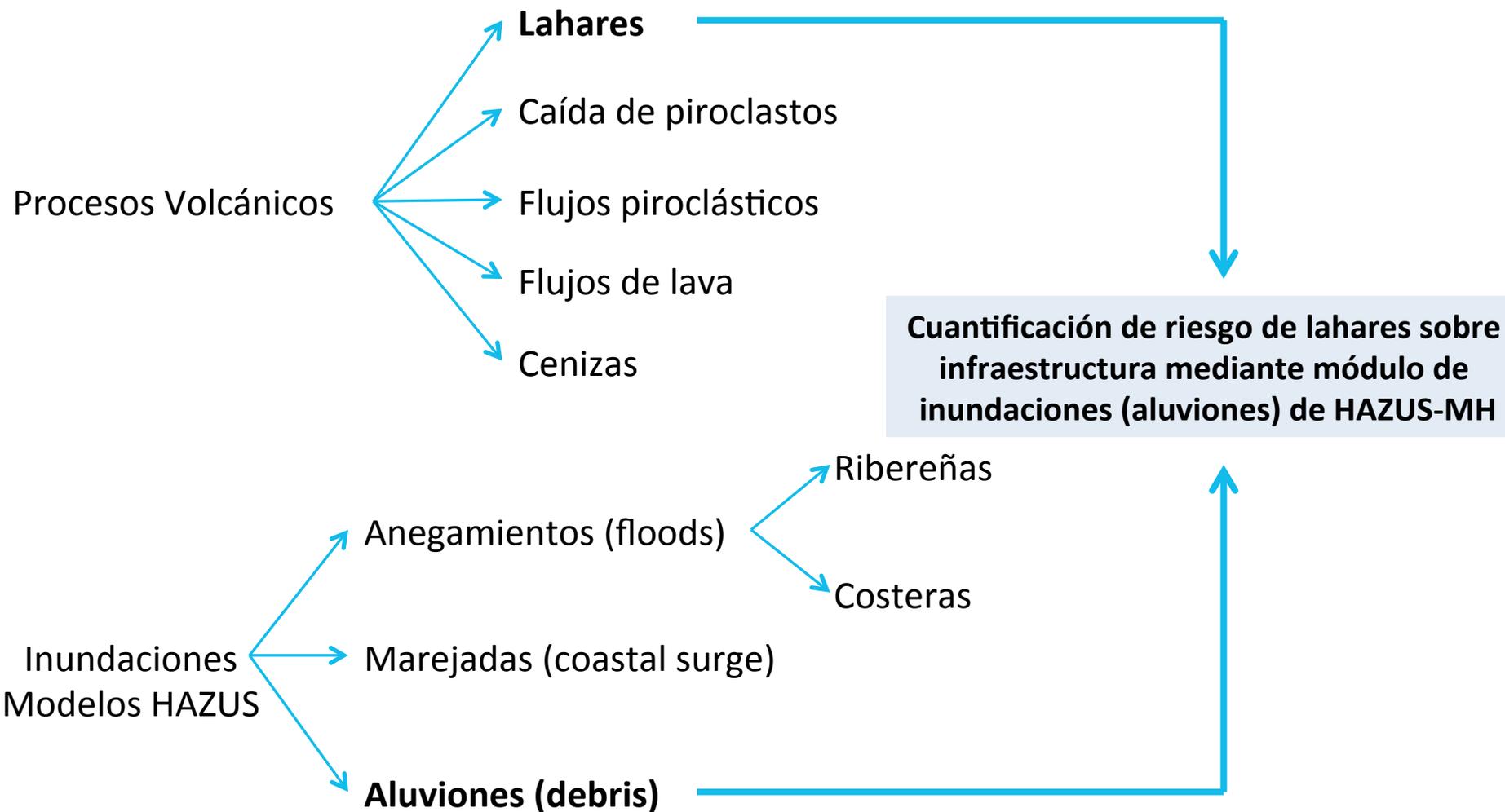
MODELOS DE RIESGO:



- Amenaza Sísmica
- **Amenaza Volcánica**
- Amenaza Hidro-meteorológica



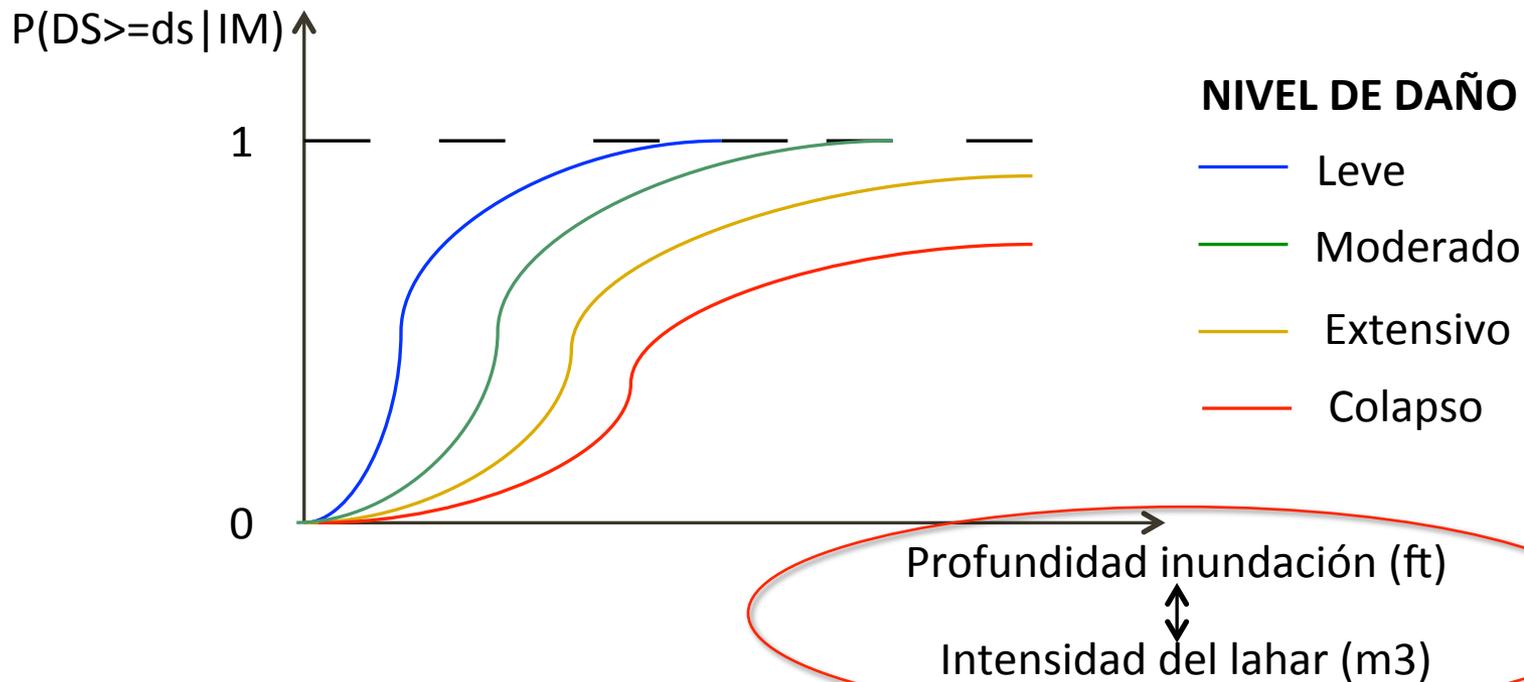
Concepto general a desarrollar



Curvas de fragilidad de elementos



- Énfasis de la estimación de riesgo basado en la socavación de la infraestructura del puente.
- La curvas deben ser calibradas para modelar el riesgo de los lahares sobre la infraestructura chilena.

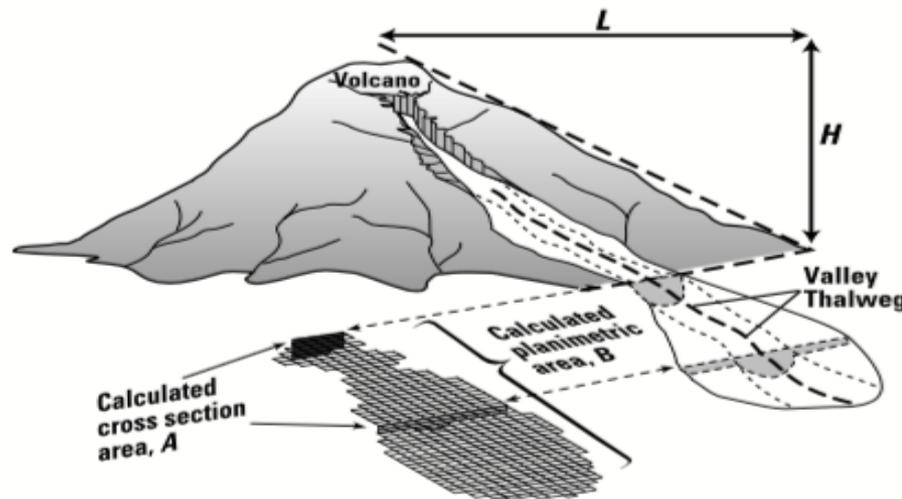


Experimento 1.

Homologación de intensidad (profundidad-volumen)



- El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) elaboró un método de delimitación de las zonas de riesgo de lahares (Iverson y Schilling, 1998).
- Se obtuvieron relaciones entre:
 - Volumen del flujo lahárico (V) y el área de la sección transversal de la inundación (A)
 - Volumen del flujo lahárico (V) y el área planimétrica de inundación (B) en el área distal del volcán.



$$A = 0,05 * V^{2/3}$$

$$B = 200 * V^{2/3}$$

Experimento 2.

Importancia de la socavación



- Más del 60% de las fallas de puentes en Estados Unidos se debe a la socavación de la infraestructura del puente (Richardson et al., 2000).
- La socavación es función de la velocidad del flujo de agua, de la altura de agua y de la duración de la crecida (FEMA, 2011).

Table 7.2 Highway Single-span Bridge Damage Relationship

Flood Return Period	Scour Potential ⁽¹⁾ /Probability of Failure (percent)				
	1	2	3	4-8	9
100-year	5	2	1	0	N/A
500-year (2x 100-year probability)	10	4	2	0	N/A
1000-year (1.5x 500-year probability)	15	6	3	0	N/A

Table 7.3 Highway Continuous-Span Bridge Damage Relationship

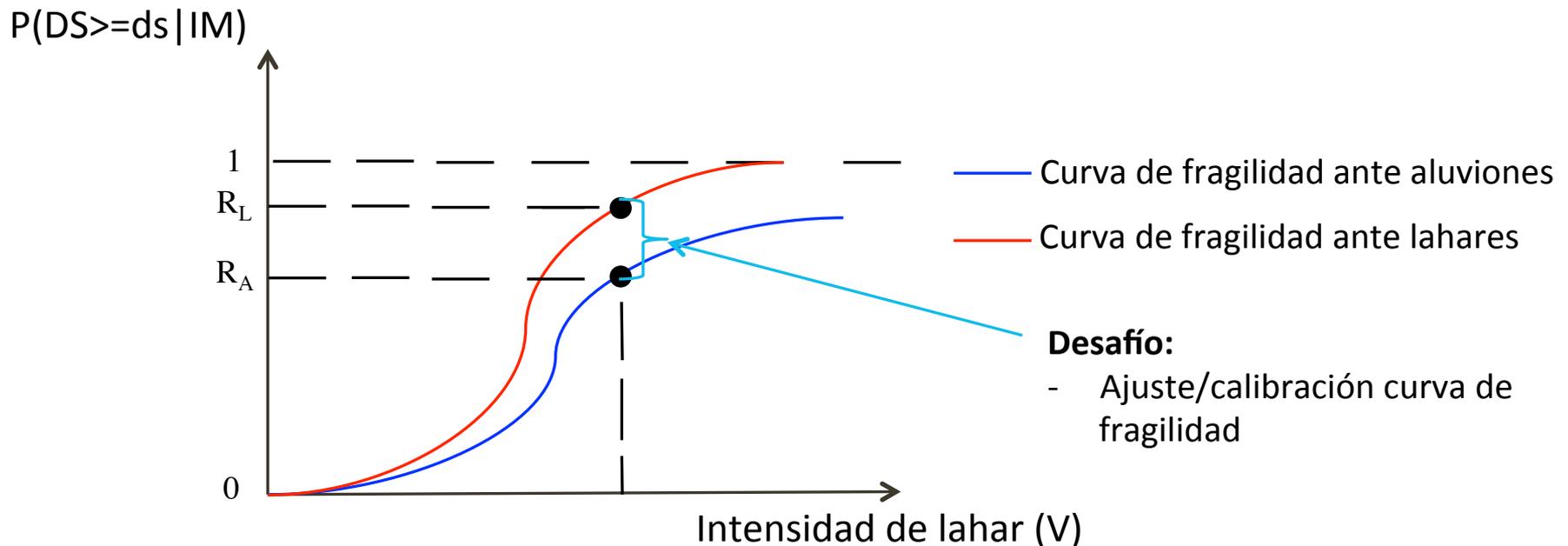
Flood Return Period	Scour Potential ⁽¹⁾ /Probability of Failure (percent)				
	1	2	3	4-8	9
100-year	1.25	0.5	0.25	0	N/A
500-year (2x 100-year probability)	2.5	1	0.5	0	N/A
1000-year (1.5x 500-year probability)	3.75	1.5	0.75	0	N/A

Experimento 3.

Necesidad de calibración de curvas HAZUS



- A pesar de la similitud de la dinámica de fluidos entre lahares y aluviones, los efectos sobre la infraestructura vial son distintos.
- Escombros y bolones de lahares aumentan los potenciales daños a la infraestructura vial.



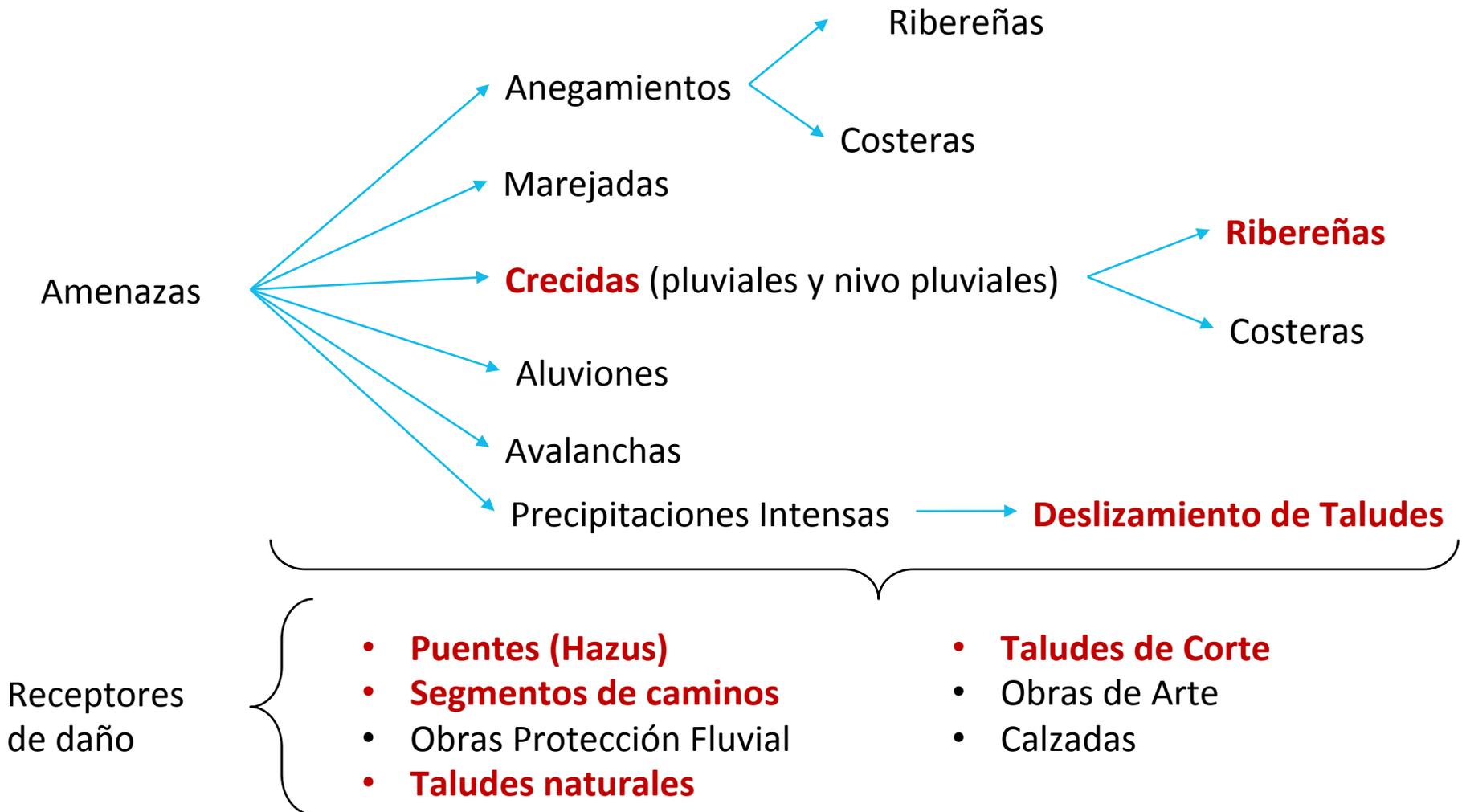


MODELOS DE RIESGO:

- Amenaza Sísmica
- Amenaza Volcánica
- **Amenaza Hidro-meteorológica**



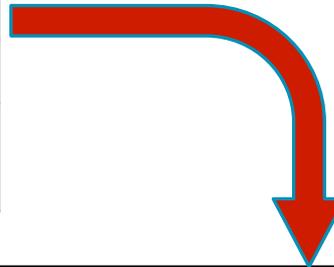
Amenaza Hidro-meteorológica: Caracterización de sub-amenazas / daño



Amenaza Hidro-meteorológica: Caracterización de sub-amenazas / daño



Amenaza	Indicador de intensidad
Inundación	Velocidad y altura
Crecida	Velocidad y altura
Deslizamiento de Talud (*)	Precipitación Crítica Agresividad de la Precipitación

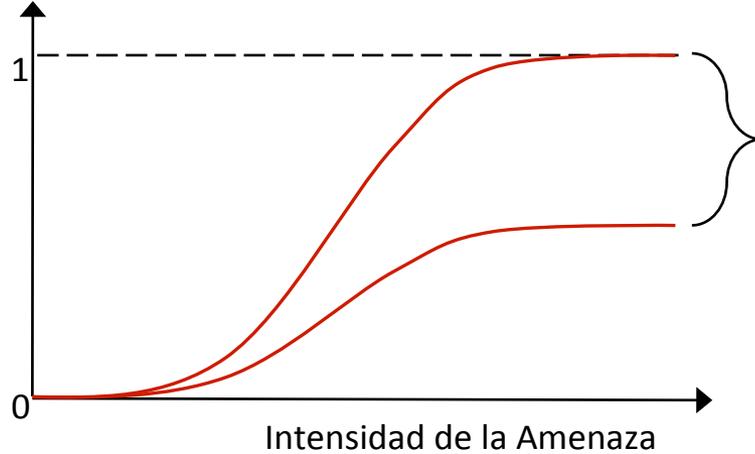


Componente	Daño	Efecto
Puente	Desplazamiento de cepas o estribos Erosión Terraplen de acceso	Perdida total de NS
Protección Fluvial	Socavación base Desmoronamiento Erosión de núcleo	Pérdida total de NS Pérdida parcial de NS
Talud de Corte	Obstrucción total o parcial de calzada Obstrucción y destrucción de calzada con compromiso de plataforma	Pérdida total de NS Pérdida parcial de NS
Talud de Terraplén	Destrucción parcial de plataforma Destrucción total de plataforma	Pérdida total de NS Pérdida parcial de NS
Talud Natural	Destrucción total de plataforma	Perdida total de NS

Amenaza Hidro-meteorológica: Calibración Hazus

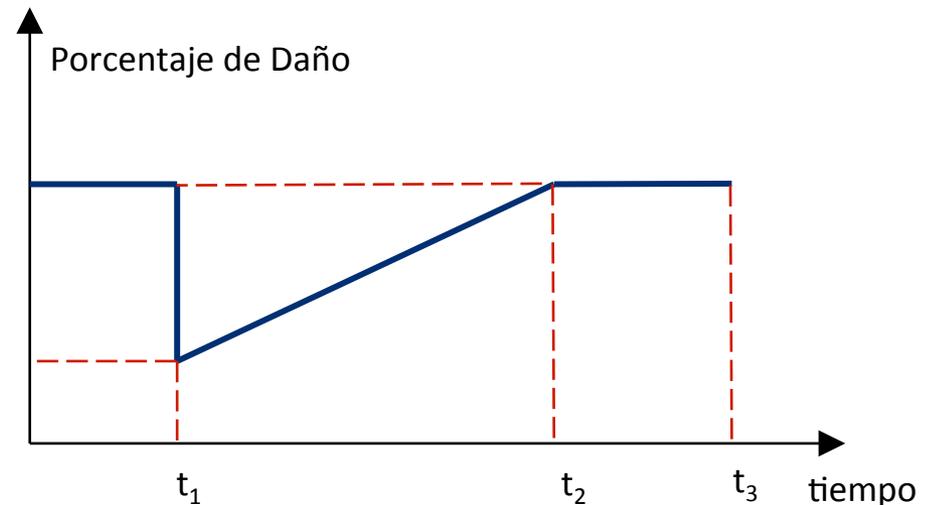


Probabilidad de Daño



Ajuste curvas Hazus para puentes

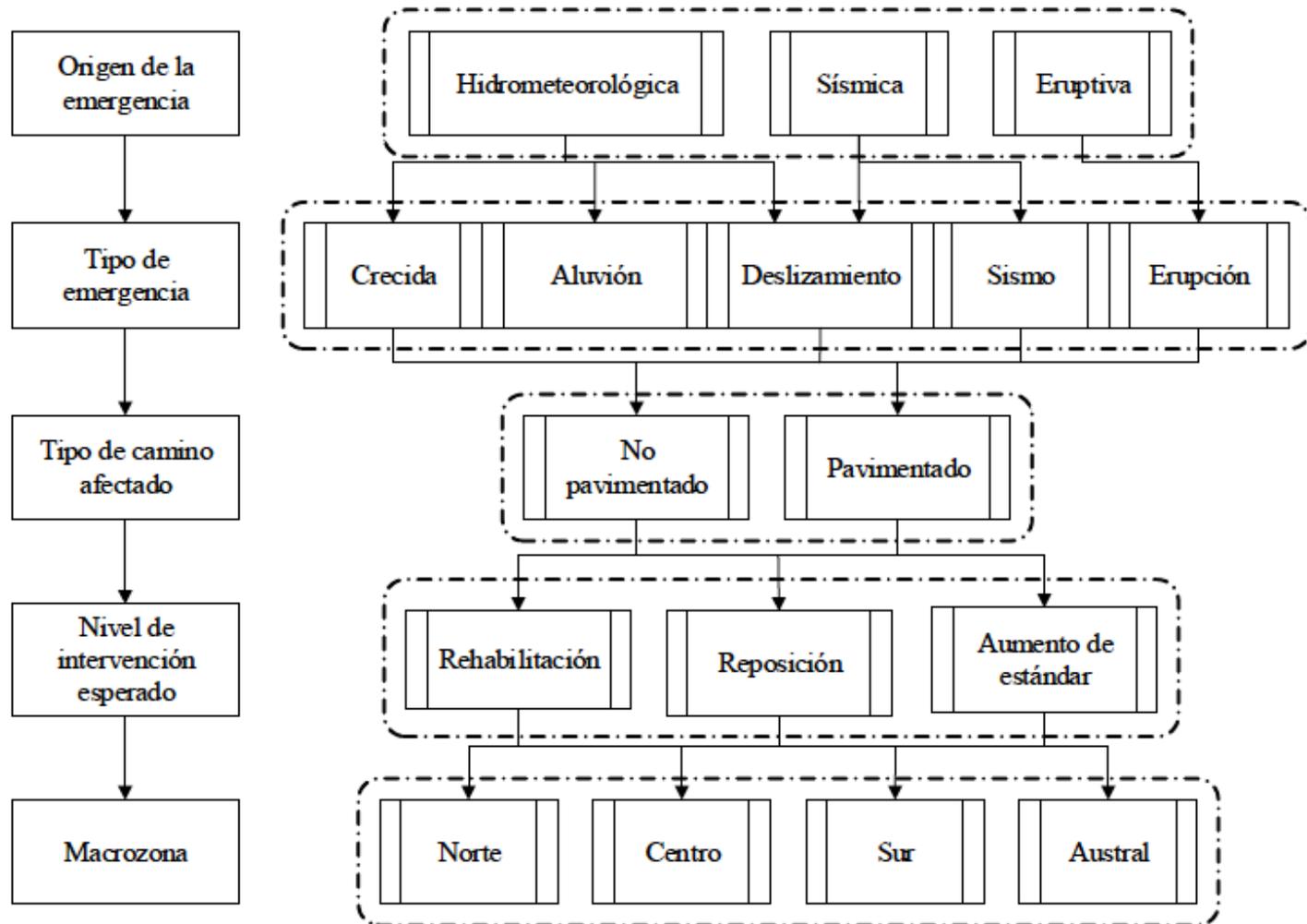
Curva de Restauración de Hazus



MODELO DE MITIGACIÓN



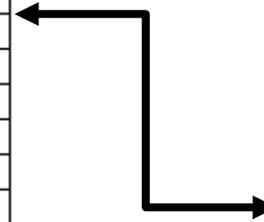
Modelo de Mitigación: Criterios de clasificación emergencias



Modelo de Mitigación: Criterios de asignación de costos



Configuración	Origen de la emergencia	Tipo de evento	Tipo de camino	Nivel de intervención
1	Eruptiva	Erupción	No Pavimentado	Rehabilitación
2	Eruptiva	Erupción	No Pavimentado	Reposición
3	Eruptiva	Erupción	No Pavimentado	Aumento Estándar
4	Eruptiva	Erupción	Pavimentado	Rehabilitación
5	Eruptiva	Erupción	Pavimentado	Reposición
6	Eruptiva	Erupción	Pavimentado	Aumento Estándar
7	Sísmica	Deslizamiento	No Pavimentado	Rehabilitación
8	Sísmica	Deslizamiento	No Pavimentado	Reposición
9	Sísmica	Deslizamiento	No Pavimentado	Aumento Estándar
10	Sísmica	Deslizamiento	Pavimentado	Rehabilitación



Combinación	Despeje	Modificación de Plataforma	Perfilado de talud	Encauzamiento	Cavión	Enrocado	Construcción de cunetas no revestidas	Limpieza de fosos, contrafosos y canales, no revestidos	Construcción de fosos y contrafosos en tan	Limpieza de fosos, contrafosos y canales, revestidos	Conservación de alcantarillas	Limpieza de cunetas revestidas
1	X											
2					X		X	X				
3		X			X				X	X	X	X
4	X											
5				X	X		X	X				
6			X	X	X				X	X	X	X
7	X											
8					X		X	X				
9		X	X		X				X	X	X	X
10	X											

A cada estrategia le corresponde un conjunto de operaciones de mantenimiento con precio unitario, cantidad de obra promedio y rendimiento, actualizados a moneda de 2016.

Datos obtenidos de emergencias MOP

Modelo de Mitigación: Ejemplo costos y rendimientos



Operación	Descripción	Unidad	Costos (\$)
7.301.1a	Limpieza manual de la faja (m2)	m2	1.170
7.301.1b	Limpieza mecanizada de la faja	m2	577
7.301.2a	Retiro manual de basuras y desechos	km	70.457
7.301.3a	Reemplazo de cercos de alambre de púas	m	6.010
7.301.4b	Remoción de alcantarillas de tubos metálicos	m	36.934
7.301.4c	Remoción de alcantarillas de tubos de hormigón	m	16.655
7.302.1a	Remoción de derrumbes	m3	3.093
7.302.1b	Remoción de arena	m3	3.109
7.302.4	Rejas para contención de derrumbes	m2	80.344
7.302.5a	Reconstrucción de la plataforma	m3	7.065
7.302.5b	Reconstrucción de terraplenes de acceso	m3	4.968
7.302.5c	Relleno de erosiones	m3	12.101

Costo unitario de operaciones



Permiten estudiar modelo de
evaluacion social

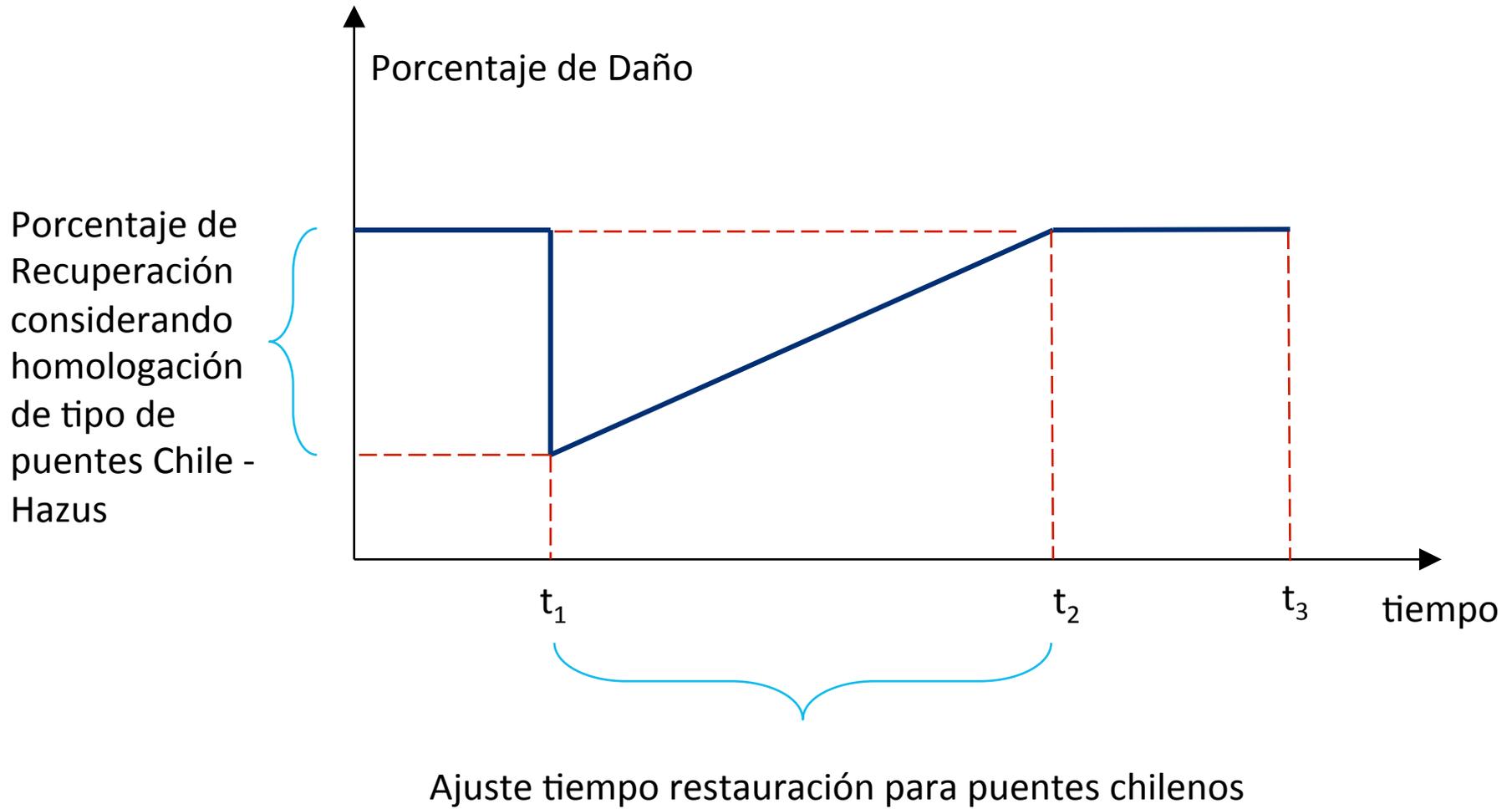
Rendimientos de operaciones



Permiten estimar tiempo de
restauracion

Operación	Descripción	Unidad	Rendimiento (unidad /día)
7.301.1a	Limpieza manual de la faja (m2)	m2	311,2
7.301.1b	Limpieza mecanizada de la faja	m2	775,8
7.301.2a	Retiro manual de basuras y desechos	km	8,9
7.301.3a	Reemplazo de cercos de alambre de púas	m	90,1
7.301.4b	Remoción de alcantarillas de tubos metálicos	m	16,8
7.301.4c	Remoción de alcantarillas de tubos de hormigón	m	90
7.302.1a	Remoción de derrumbes	m3	164,7
7.302.1b	Remoción de arena	m3	210,5
7.302.4	Rejas para contención de derrumbes	m2	18

Modelo de Mitigación: Calibración curva restauración Hazus



RESULTADOS ESPERADOS



Resultados Etapa 1 Proyecto



- Modelos de riesgo para elementos de la red vial más vulnerables ante eventos sísmicos, volcánicos e hidro-meteorológicos (crecidas y estabilidad de taludes) validados y calibrados para Chile.
- Estrategias de mitigación (tipo y costos asociados) recomendadas para elementos de la red vial más vulnerables ante eventos sísmicos, volcánicos e hidro-meteorológicos (crecidas y estabilidad de taludes)
- Aplicación de modelos a pequeña escala
- Recomendaciones para la evaluación y auscultación de deterioros/variables que inciden en la vulnerabilidad de elementos que componen la red vial nacional

Desafíos Etapa 2 Proyecto



- Desarrollo modelos de riesgo a nivel de red considerando eventos sísmicos, volcánicos e hidro-meteorológicos (crecidas y estabilidad de taludes.
- Desarrollo e integración de modelos de vulnerabilidad No-Física (Ej. vulnerabilidad social, política, estratégica, etc.)
- Optimización de estrategias de mitigación a nivel de red
- Desarrollo programa computacional para realizar análisis de riesgo y mitigación a nivel de red con interfaz SIG