

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 FONDEF - CONICYT

RESULTADOS PRIMERA ETAPA DE CIENCIA APLICADA



Santiago, 28 de Marzo de 2017

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 (Coordinator)
Alelí Osorio, PhD (Researcher)
Joaquín Dagá (MSc Student-UC)
Felipe Baratta (MSc Student-UC)
Gustavo Jimenez (Researcher UdeC-UC)
Pablo Cartes (Researcher UC/former student UdeC)
Manuel Contreras (MSc Student-UdeC)
Glenda Vargas (Student-UdeC)
Braulio Mora (Student-UdeC)

TEMARIO



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



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
- Principalmente protocolos de emergencia para habilitar tráfico en el menor tiempo
- Limitada mitigación previo a evento



Consecuencias

- Costo social por corte y rehabilitación vías (pérdida nivel de servicio)
- Sobre-costo para el Estado por inversión en reposición

Deterioros red vial post-evento



Antecedentes

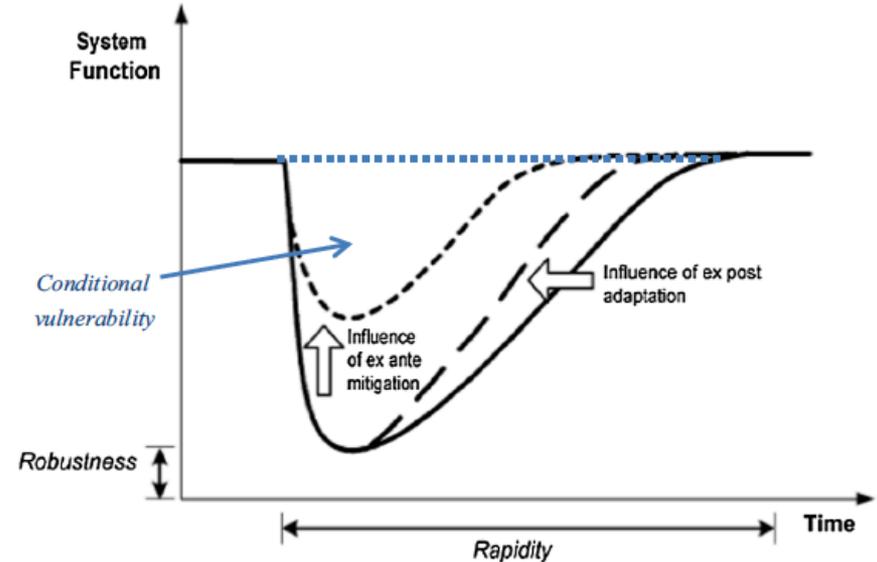
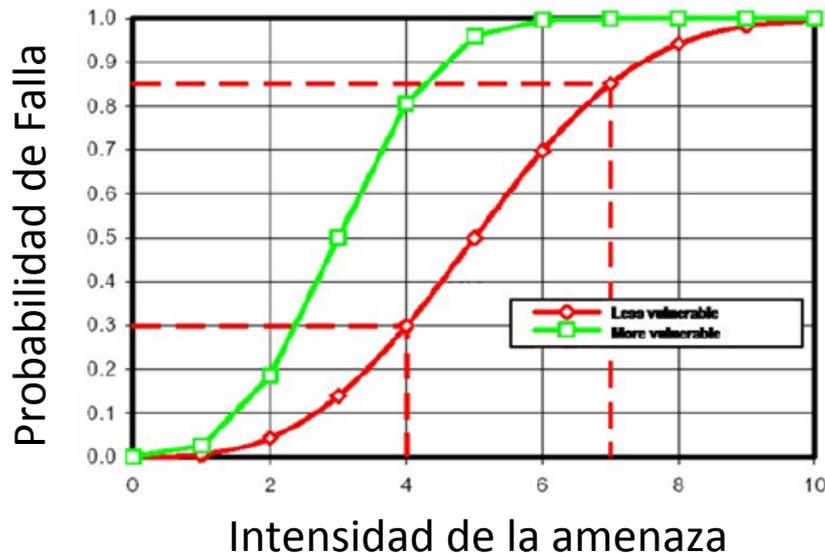


- Año 2010 EULA (UdeC) desarrolla estudio para la Dirección de Vialidad del MOP “Catastro Georeferenciado de Riesgos y Peligros Naturales en la Red Vial”.
- Estudio desarrolló Índice de riesgo que evalúa el riesgo de la red vial, considerando:
 - ✓ Inundaciones y deslizamientos en de taludes
 - ✓ Identificó 800 puntos de la red, totalizando 31 mil km de caminos con cortes, entre 1990 y 2009 con lo cual construyó un índice de riesgo.
- Internacionalmente existen procedimientos para cuantificar el riesgo de redes viales pero no necesariamente consideran a los agentes afectos ni condiciones locales
- Debe antes corroborarse adaptabilidad a condiciones locales como: características y naturaleza de las amenazas, tolerancia al riesgo y características 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 **eventos naturales que afectan** con mayor frecuencia y significancia a la red vial nacional
- **Caracterizar elementos** de la infraestructura vial **y usuarios más vulnerables** ante eventos naturales recurrentes.
- Desarrollar **modelo que permita cuantificar el riesgo** asociado a la amenaza de eventos naturales.
- Desarrollar **modelo de asignación de estrategias de mitigación**, que considere criterios de optimización técnico-económica.
- **Validar y aplicar los modelos** de cuantificación de riesgo y mitigación a pequeña escala
- Difundir la investigación y desarrollo del proyecto.

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)

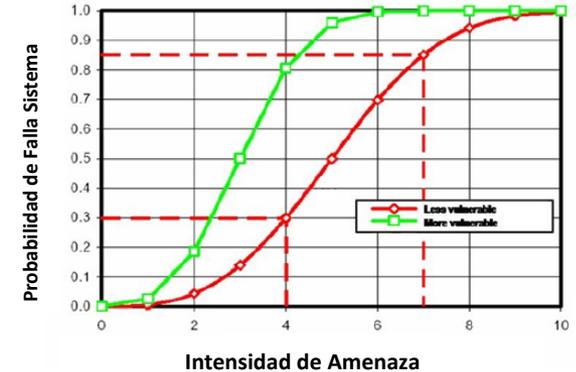
$$V_{fij} = f(\text{condición elemento "I", tipo amenaza "j"})$$

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

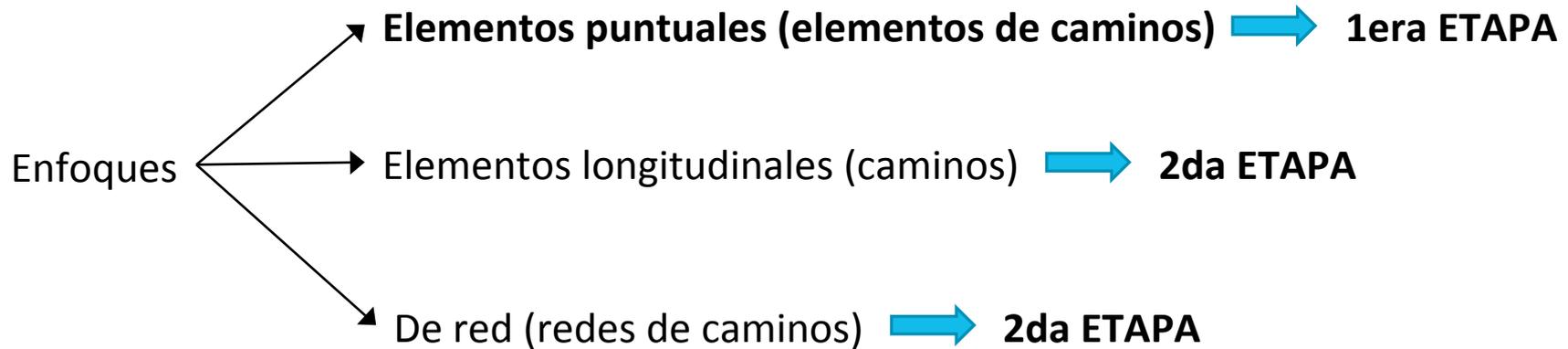
ESTÁNDARES DE MITIGACIÓN

- 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



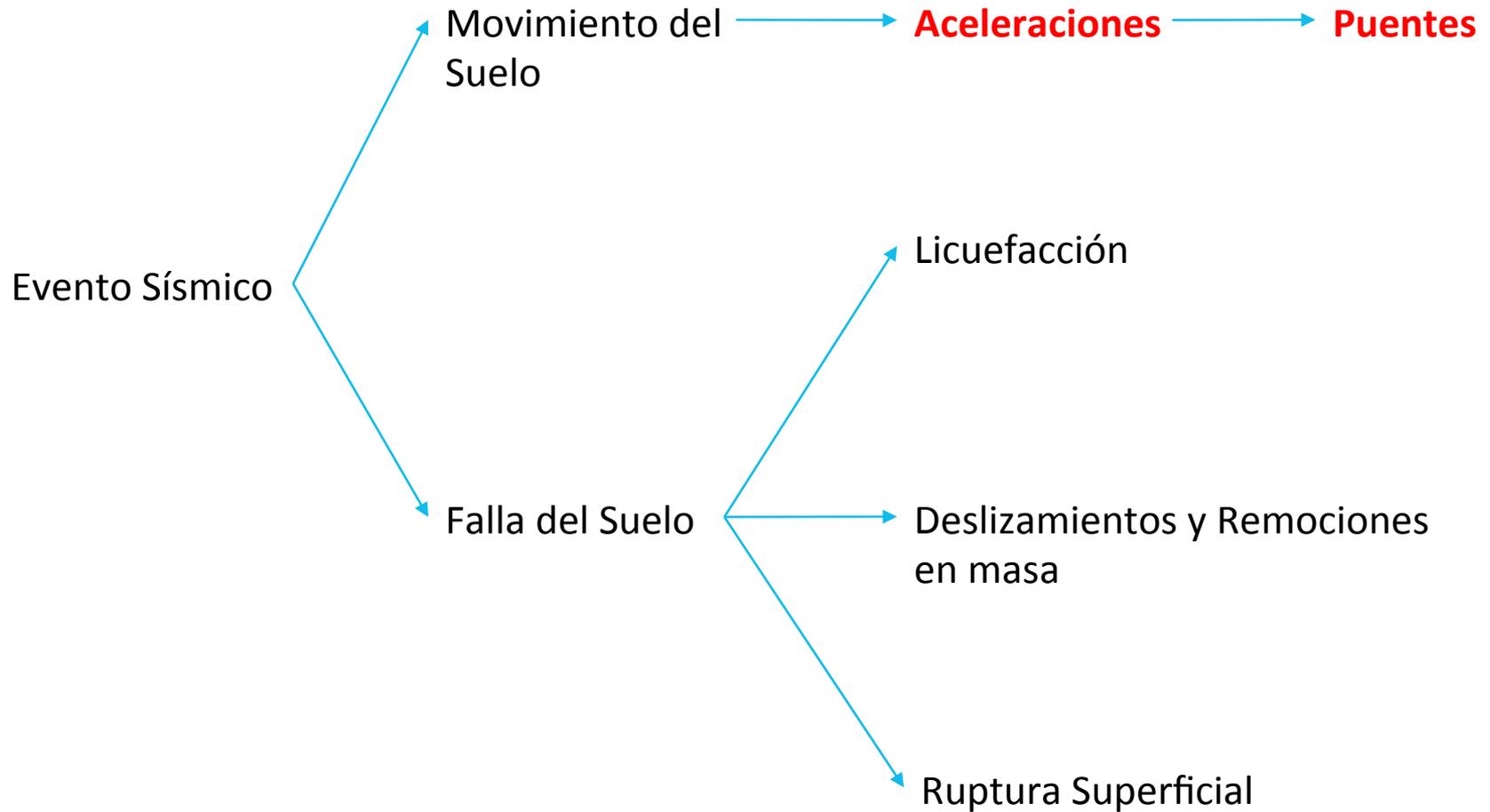
Modelos basados en:

- Índices determinísticos
- Modelos Empírico y Analíticos
- Probabilidades de falla
- Costos de usuarios y rehabilitación

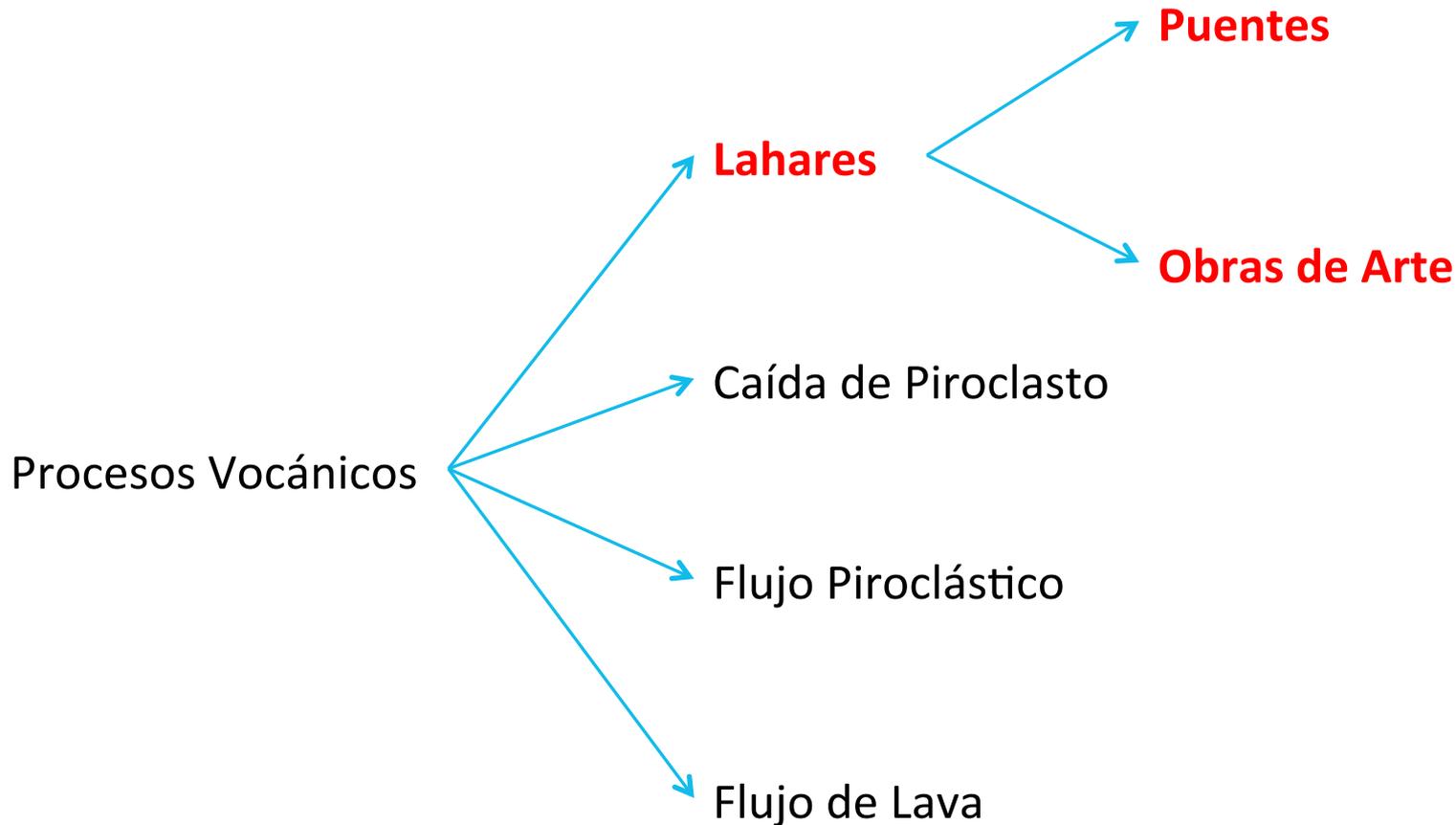
Ejemplo Herramientas Disponibles (Giovinazzi et al, 2009):

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

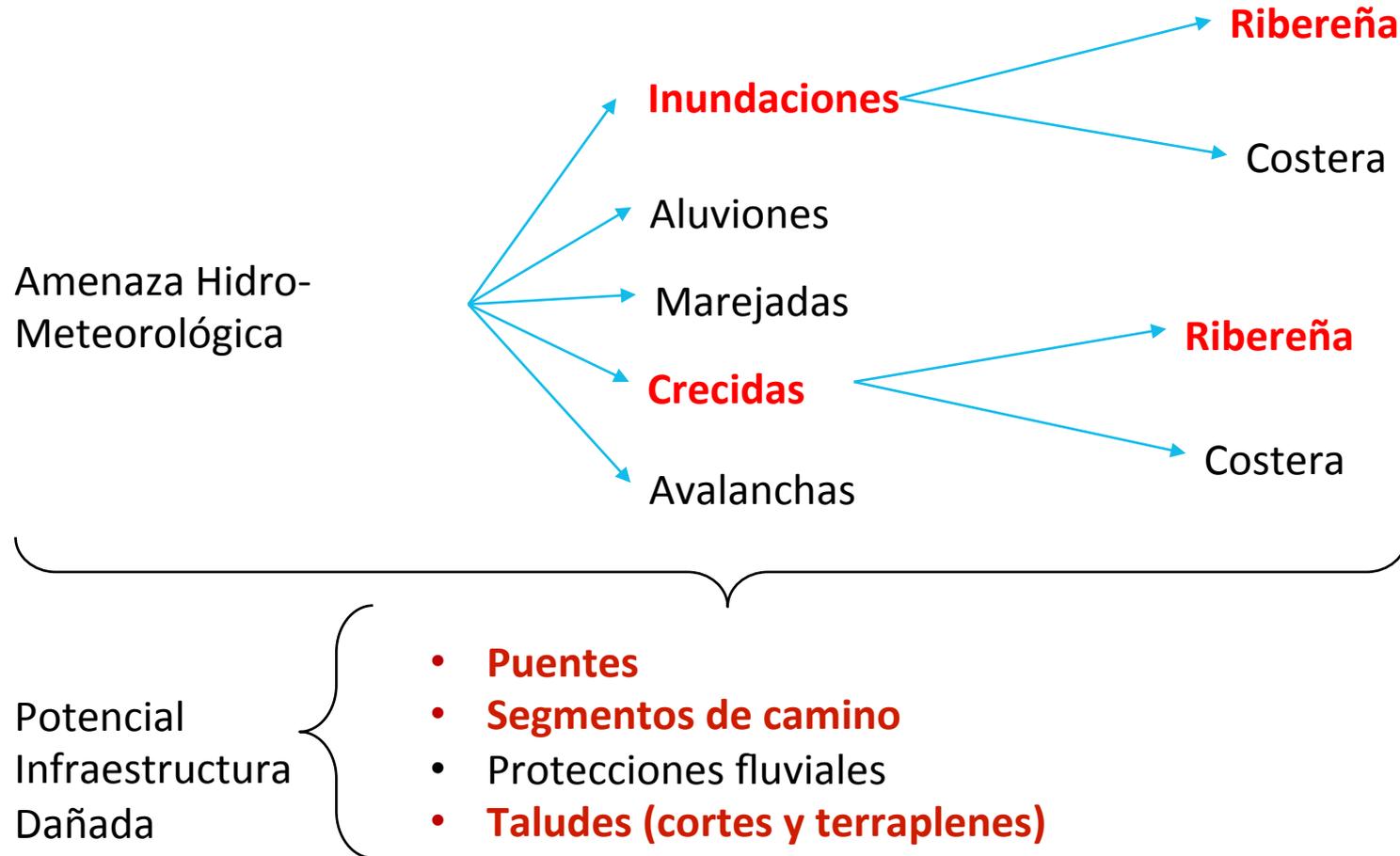
Amenaza y Sub-amenaza Sísmica



Amenaza y Sub-amenaza Volcánica



Amenaza y Sub-amenaza Hidro-meteorológica



RESULTADOS PRIMERA ETAPA DE CIENCIA APLICADA

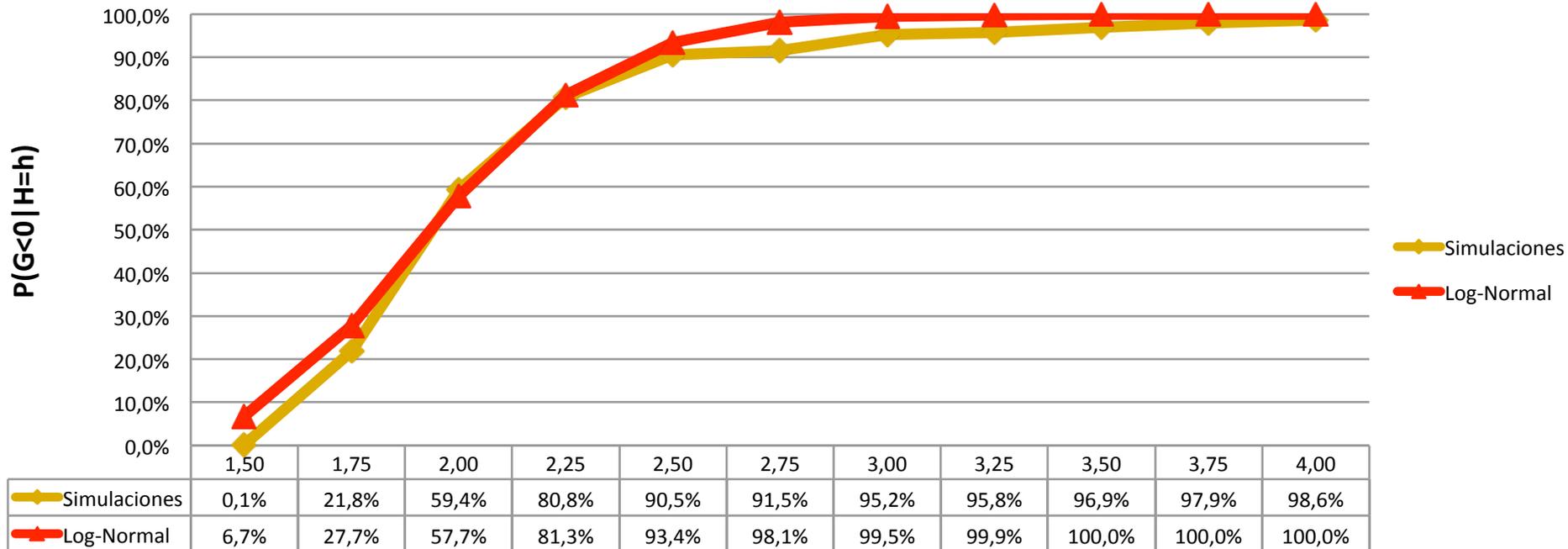


Resultados Etapa 1 Proyecto



- Modelos de riesgo calibrados y validados para Chile para principales amenazas: Eventos sísmicos (aceleraciones), volcánicos (Ej: lahares) e hidrometeorológicos (crecidas y estabilidad de taludes)

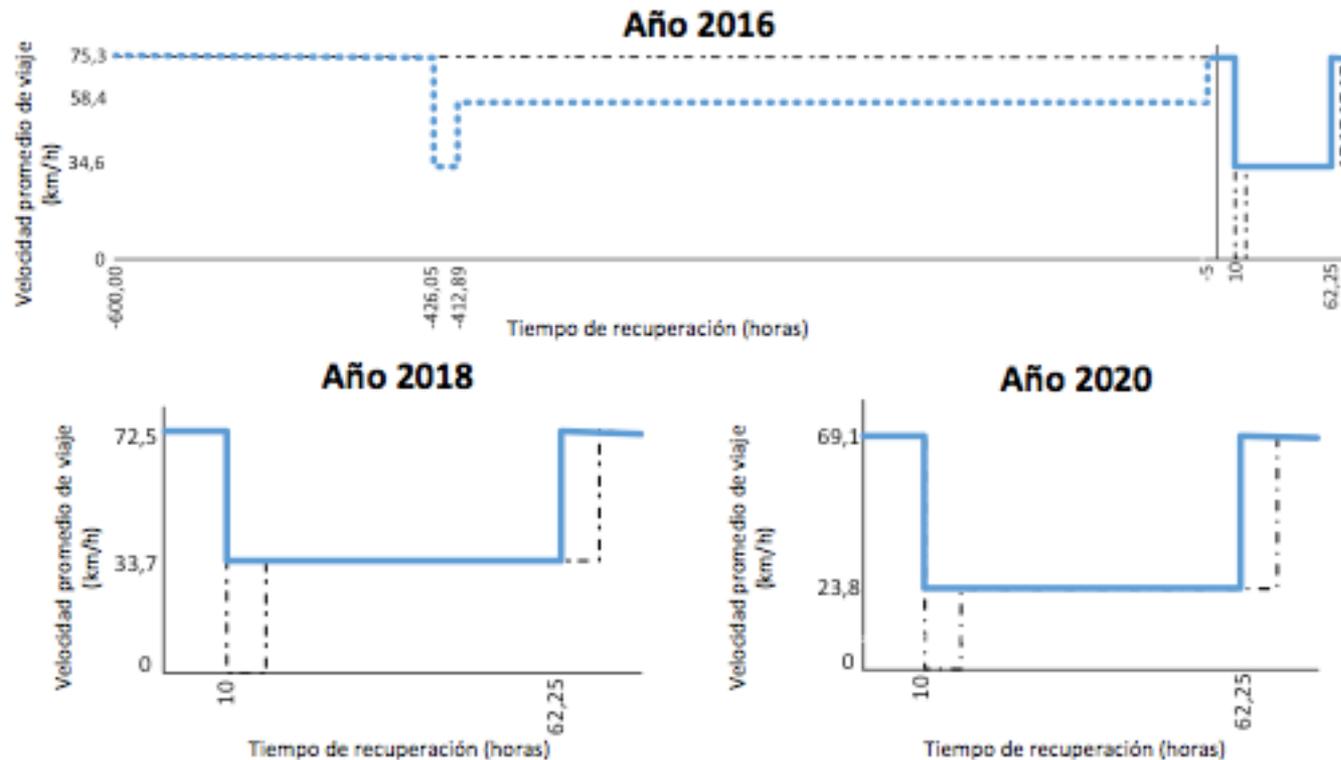
Simulaciones vs Empírica Puentes con Cepas



Resultados Etapa 1 Proyecto



- 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)



Resultados Etapa 1 Proyecto



- Aplicación de modelos a pequeña escala para elementos de la red vial (Ej: aplicación riesgo puentes expuestos a lahares)

Zoom a Region:

Temas | Identificar

Volver a parametros

Comuna: VILLARRICA

Información puentes

Rot: S-895
 Nom_ruta: Navarrete - Molino López
 Provincia: CAUTIN
 Nom_puente: MADERA S.N. 2
 Km_inicio: 4397.8919220000
 Km_termino: 4399.4919220000
 Largo: 11.6000000000
 Ancho: 3.6000000000
 Num_cepas: 0.0000000000
 Num_vigas: 6.0000000000
 Cauce_quebe: Estero Correntoso
 Est_puente: REGULAR
 Mat_carp: M
 Mat_baran: NP
 Mat_estrib: M
 Mat_cepas: M
 Mat_vigas:
 Estructura: PUENTE
 Region: 9
 Categoría: 1

Información caminos

Información perteneciente al SAG, distribución

REPUBLICA DE CHILE
 MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

NOMBRE DEL PUENTE	MADERA S/N 2	TIPO DE PUENTE	M - M - M	
EN KM	4.20	DE LA RUTA	NAVARRETE - MOLINO LOPEZ	
CODIGO RUTA	09EB17	EN EL CAUCE	CORRENTOSO	
REGION	ARAUCANIA	PROVINCIA	CAUTIN	COMUNA
				PUCON
MATERIAL ESTRIBOS	M	MATERIAL CEPAS	-	MATERIAL TABLERO
				M
LONG TOTAL	11.3	ANCHO PASILLOS	-	LUZ MAYOR
				NUMERO DE VIGAS
				6
ANCHO TOTAL	3.85	ANCHO DE CALZADA	3.85	NUMERO TRAMO
				NUMERO DE CEPAS
				-
GALIBO	2.5	ESPESOR DE LOSA	-	TIPO DE CARPETA
				MADERA
				TIENE ESVAJE
				NO

		ESTRIBOS		CEPAS		TABLERO		PUENTE	
		VOLUMEN (MM M3)	MNETO ESPERADO (MN-M)	PROB. FALLA	MNETO ESPERADO (MN-M)	PROB. FALLA	FNETA ESPERADA (MN)	PROB. FALLA	PROB. FALLA
ESCENARIO 1	SOLO HIELO	7.36	1.29	7.20%	-	-	0.1	0.00%	7.20%
5-10 AÑOS	HIELO Y NIEVE MAX	16.96	0.74	17.60%	-	-	0.1	0.00%	17.60%
ESCENARIO 2	SOLO HIELO	0	3.01	0.00%	-	-	0.1	0.00%	0.00%
800 AÑOS	HIELO Y NIEVE MAX	0	3.01	0.00%	-	-	0.1	0.00%	0.00%
ESCENARIO 3	SOLO HIELO	20	-0.13	64.30%	-	-	0.1	0.00%	64.30%
10.000 AÑOS	HIELO Y NIEVE MAX	77.5	-0.61	98.90%	-	-	-0.08	100.00%	100.00%

Desafíos Etapa 2 Proyecto



- Desarrollo de metodologías y protocolos de evaluación de riesgo de red vial pre y post evento ante amenaza sísmica, volcánica e hidro-meteorológica
- Adaptación de modelos de riesgo sísmico a nivel de red
- Desarrollo e integración de modelos de vulnerabilidad Socio-Política
- 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

DESARROLLO Y VALIDACIÓN MODELOS DE RIESGO SÍSMICO



EFECTO DE SISMOS EN RED VIAL



- Datos disponibles de Reportes Dirección de Vialidad, Concesiones y evaluaciones post-evento desarrolladas por especialistas de universidades e y organismos nacionales e internacionales
- Infraestructura crítica **puentes, terraplenes y cortes.**

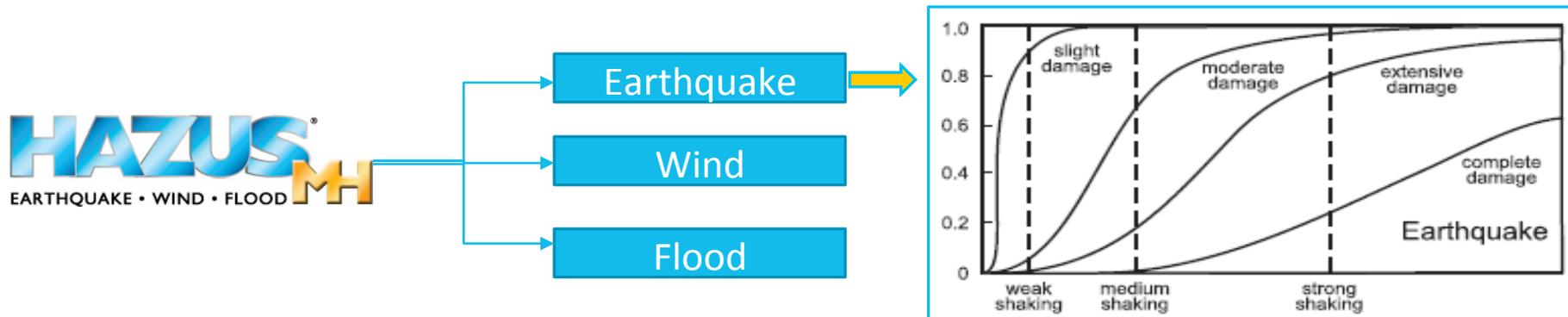


(1) y (2) Fuente: Fondef ID14I10309 (3)Fuente: emol.com

SISTEMAS DE EVALUACIÓN DE RIESGO DISPONIBLES



- Federal Emergency Management Agency (FEMA) desarrolló Hazus-MH, que es un software que puede estimar el riesgo de una infraestructura debido a la ocurrencia de un evento natural: terremotos, huracanes y crecidas.

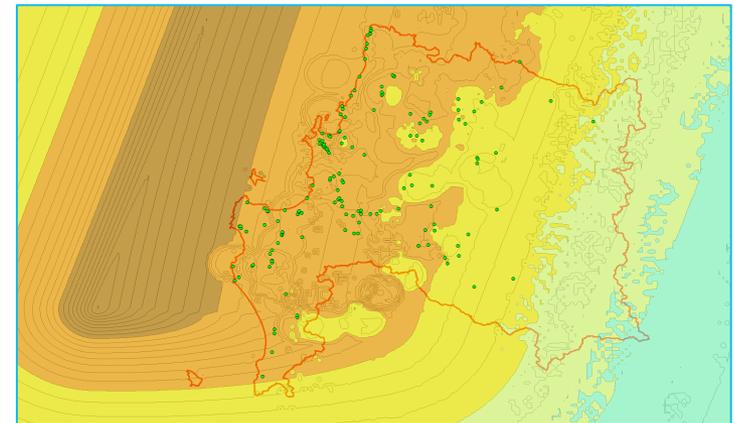
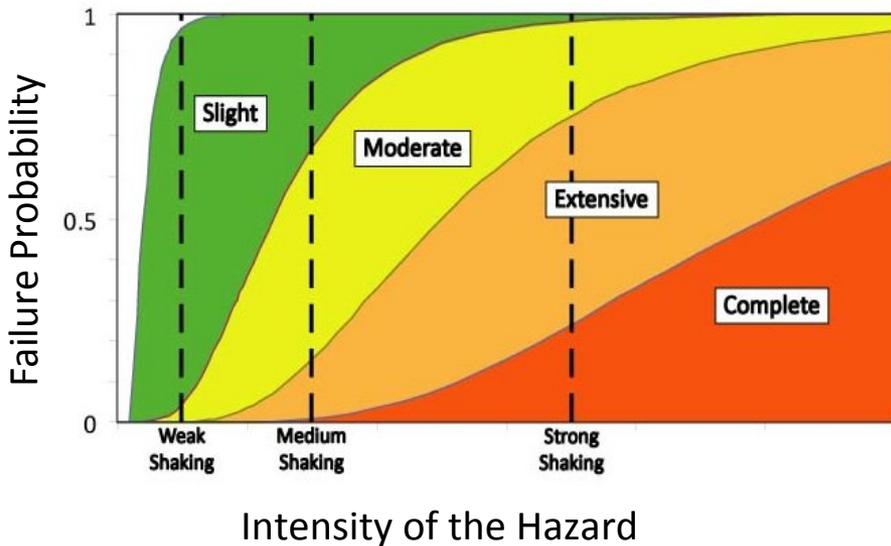


- Hazus-MH posee aplicaciones para infraestructura residencial, comercial, de transporte, servicios, entre otras.
- Ejemplos de sistemas similares son: GEM (Global Earthquake Model - OCDE), RiskScape, Redars, etc

ESTIMACIÓN RIESGO SÍSMICO



- Las curvas de fragilidad definen la probabilidad de superar un estado de falla definido para diferentes niveles de intensidad de amenaza. (Mackie & Stojadinovic, 2004).



AMENAZA: Aceleraciones 27F en ubicación de cada puente

CALIBRACIÓN DE MODELOS DE RIESGO



Para el desarrollo de curvas de fragilidad, utilizando un enfoque empírico, es necesaria cierta información:

- Mapas con la intensidad del terremoto, en términos de aceleraciones.
- Base de datos de puentes expuestos a una aceleración espectral.
- Reportes del daño en los puentes debido el terremoto.

Se utilizó la información del terremoto del 27F de 2010, en regiones distintas a la región de Bío-Bío (utilizada para validación) debido a la cantidad de información post-evento disponible.

NIVELES DE DAÑO POST-EVENTO



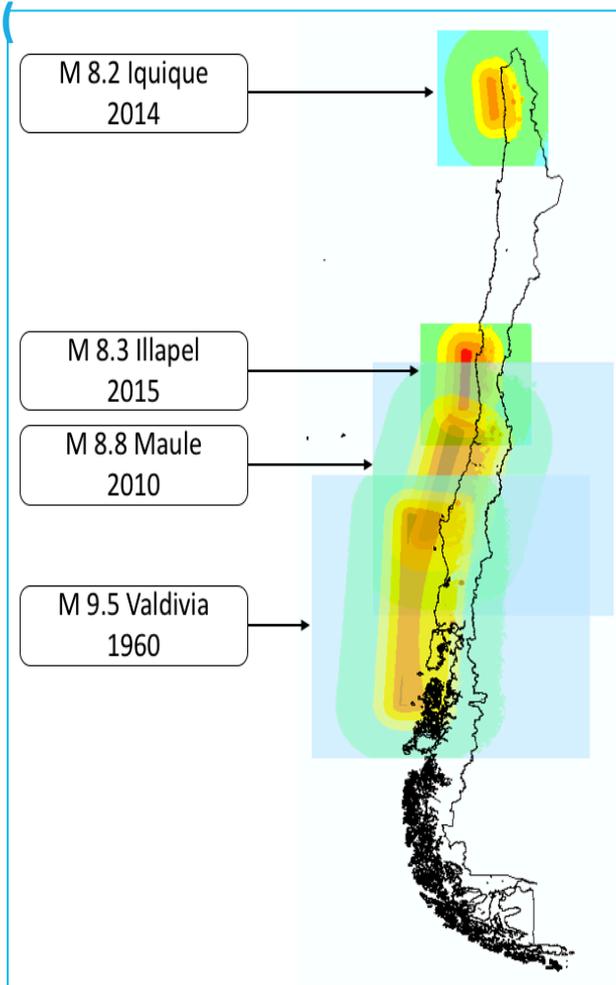
El daño reportado en los informes de la Dirección de Vialidad no ha sido categorizado en estados de daño objetivos. Utilizando el juicio de expertos, el daño de los puentes fue categorizado de acuerdo al Manual Técnico de Hazus.

Damage state	Slight/minor (ds2)	Moderate (ds3)	Extensive (ds4)	Complete (ds5)
Bridge	Minor cracking & spalling to abutments, hinges, column or deck.	Any column with moderate cracking & spalling. Moderate movement of abutment (<2"). Any connection with cracked shear keys or bent bolts.	Any column degrading without collapse. Significant residual movement at connections. Major settlement.	Any column collapsing. Any connection losing all bearing support (foundation failure).

ANÁLISIS DATOS HISTÓRICOS

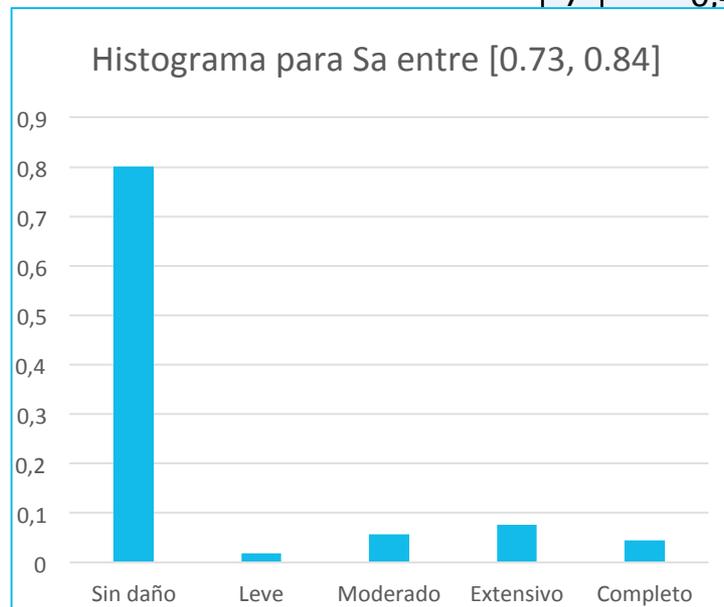


EVENTOS HISTÓRICOS



NIVEL DE DAÑO POST-EVENTO

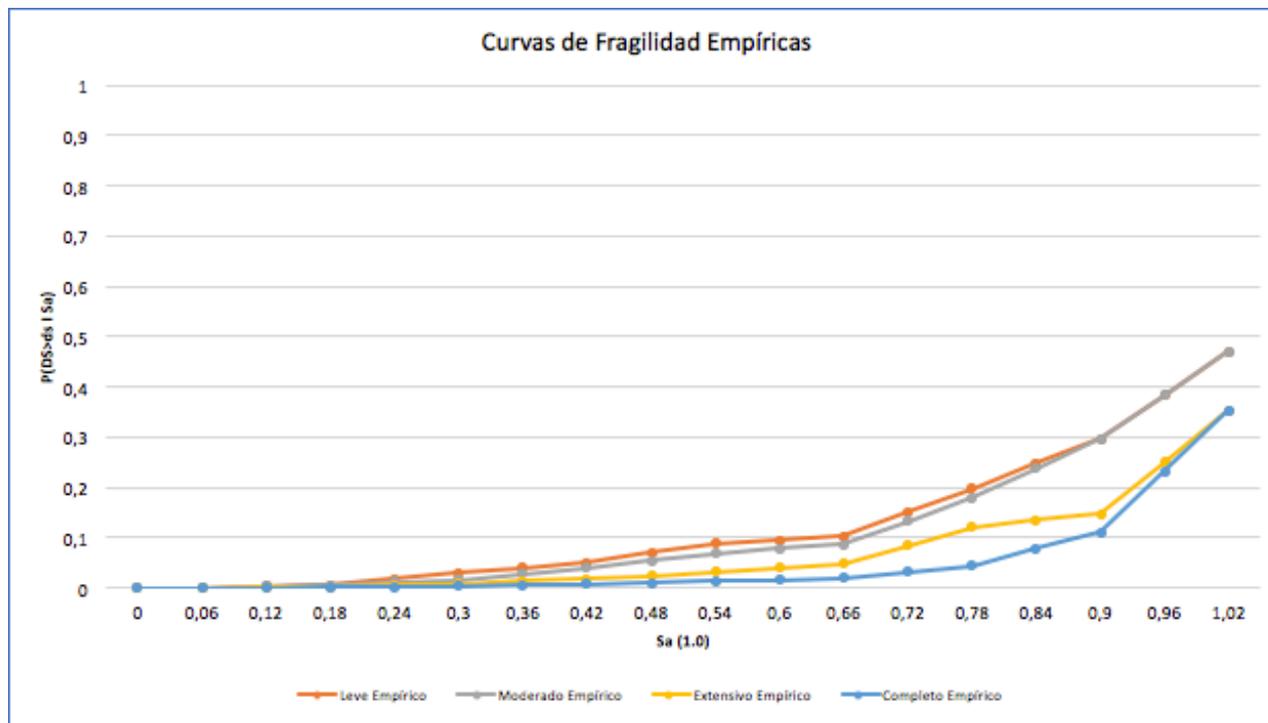
N	Sa 1.0	Damage State
1	0,52	Leve
2	0,4	Leve
3	0,32	Leve
4	0,6	Leve
5	0,52	Leve
6	0,4	Leve
7	0,4	Moderado
		Moderado
		Moderado
		Completo
		Completo
	
		Moderado



CALIBRACIÓN MODELOS DE RIESGO



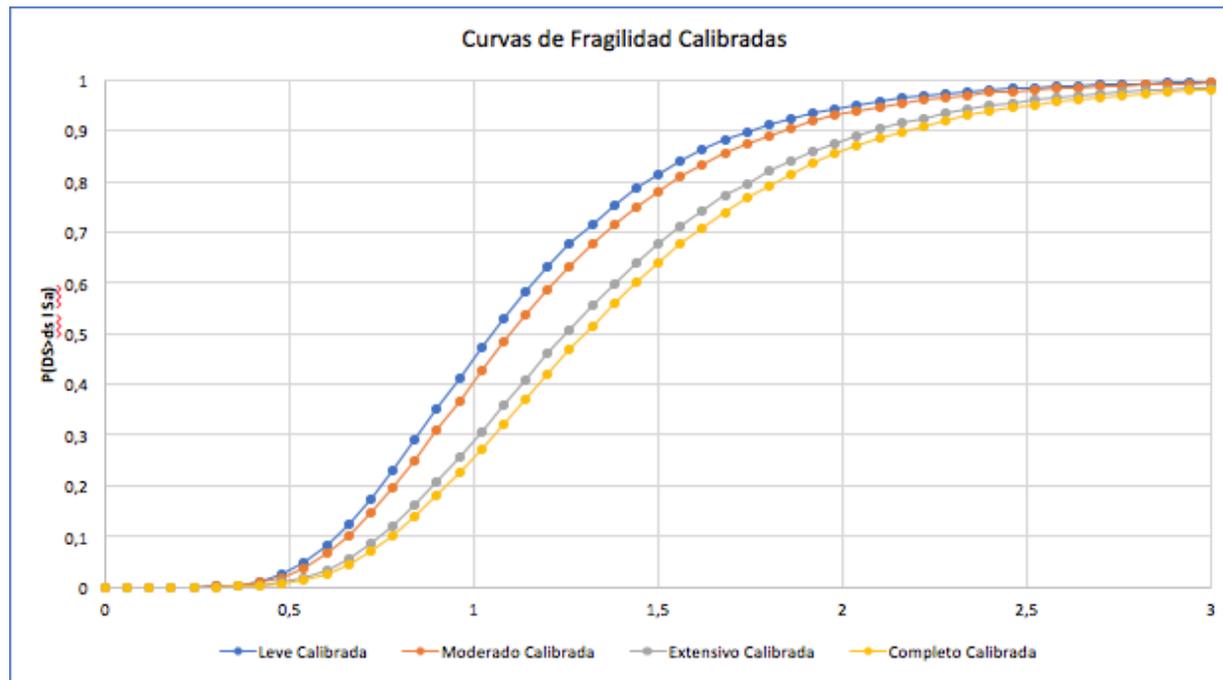
Curvas de fragilidad empíricas fueron desarrolladas hasta una intensidad de 1.02g, utilizando los datos del terremoto del 27F de 2010, excluyendo la VIII región, que fue dejada para la validación.



CURVAS DE RIESGO PARAMETRIZADAS



A partir de las curvas de fragilidad empíricas, se calibraron los parametros de curvas log-normal.



VALIDACIÓN MODELOS DE RIESGO



- Para el proceso de validación, se utilizó información de los reportes de daño en la VIII región durante el terremoto del 27F de 2010.
- Los puentes fueron intersectados con la intensidad del terremoto.

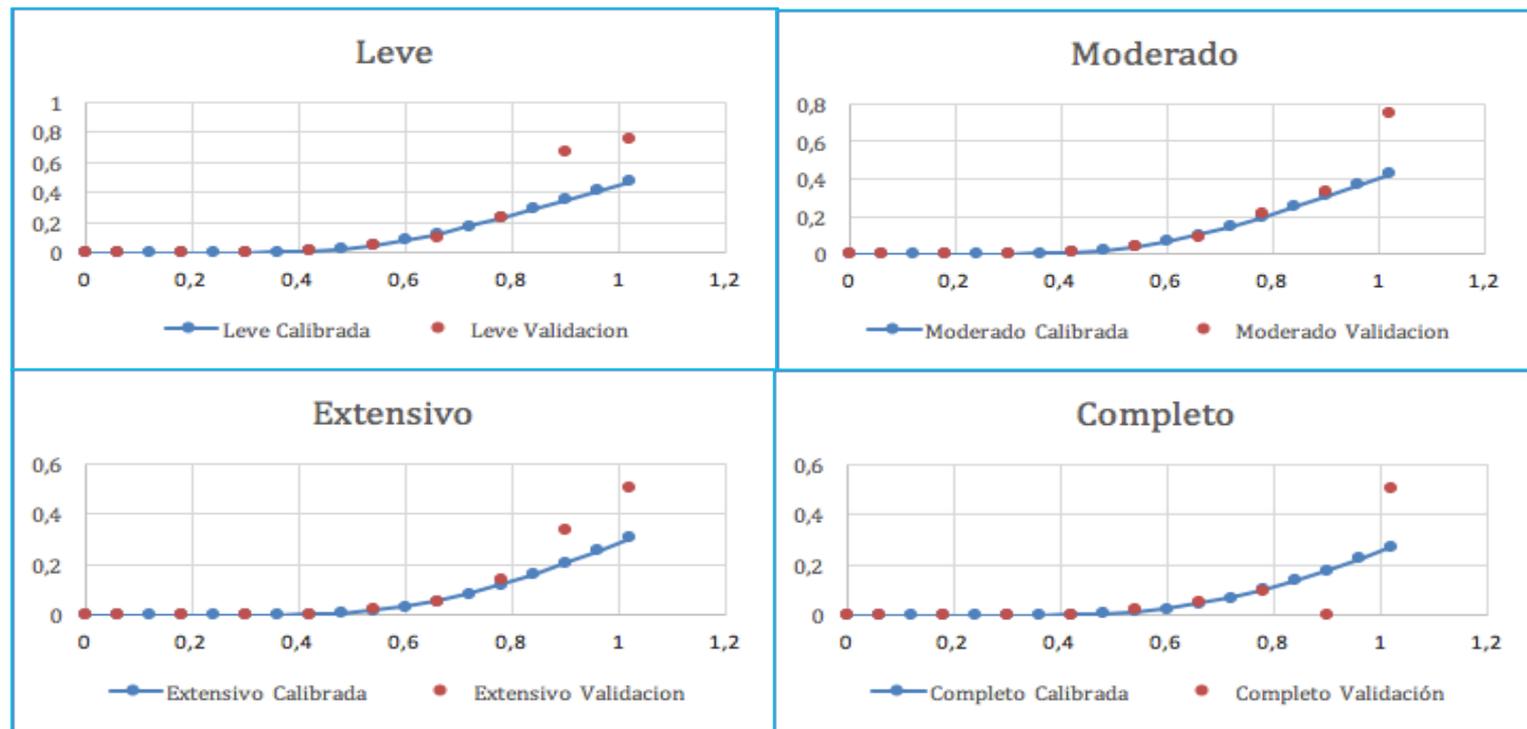


Imagen: Territorio de la VIII region de Chile, sus puentes y la intensidad del terremoto.

VALIDACIÓN MODELOS DE RIESGO



- La validación se realizó utilizando datos de la VIII región
- Se utilizó test Chi-Cuadrado para verificar bondad de ajuste respecto a distribución log-normal.
- Modelos se validaron satisfactoriamente con 90% y 95% de confianza



VALIDACIÓN MODELOS DE RIESGO



Un procedimiento estadístico fue llevado a cabo para la validación del modelo. Se utilizó el Test de Bondad de Ajuste.

- El test utilizado fue el Chi-Cuadrado
 - Una hipótesis nula fue definida:

H_0 : X sigue una distribución log-normal con los parámetros obtenidos en el desarrollo del modelo.

v/s

H_1 : X no tiene dicha distribución

- Se comparó el valor observado con el valor teórico de la función.

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\text{observada}_i - \text{teórica}_i)^2}{\text{teórica}_i}$$

VALIDACIÓN MODELOS DE RIESGO



Utilizando los datos de los puentes afectados por el terremoto del 27F de 2010 en la VIII región, los datos esperados de acuerdo al modelo y los datos observados se presentan en la siguiente tabla.

Sa (1.0)	Leve Esperado	Moderado Esperado	Extensivo Esperado	Completo Esperado	Leve Observado	Moderado Observado	Extensivo Observado	Completo Observado
0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0
0,18	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0	0
0,3	0,00	0,02	0,01	0,01	0	0	0	0
0,42	2,39	1,75	0,69	0,52	3	3	1	0
0,54	13,89	11,07	5,27	4,13	15	13	7	6
0,66	35,39	29,03	15,89	12,98	30	25	16	14
0,78	9,61	8,19	5,01	4,23	10	9	6	4
0,9	1,05	0,92	0,62	0,54	2	1	1	0
1,02	1,88	1,70	1,22	1,09	3	3	2	2

Con estos valores, se estima el Chi-Cuadrado

VALIDACIÓN MODELOS DE RIESGO



Los valores de Chi-Cuadrado para cada curva son:

Leve	Moderado	Extensivo	Completo
2,63	2,89	1,63	2,77

En todos los casos es menor que:

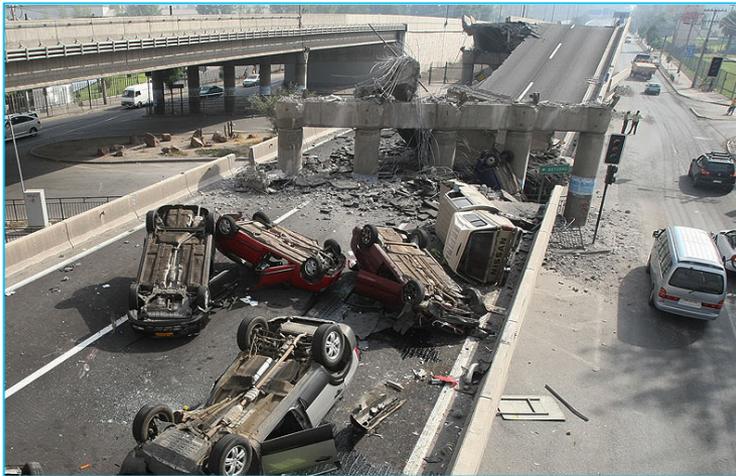
$$\chi^2_{\alpha=0,9} = 3.4895$$

Dado esto, no existe evidencia para rechazar la hipótesis nula, y se puede asumir que las curvas se validan con un 90% de confianza.

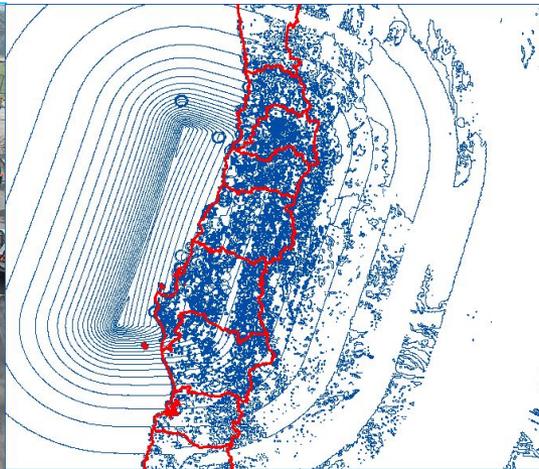
CASO DE APLICACIÓN



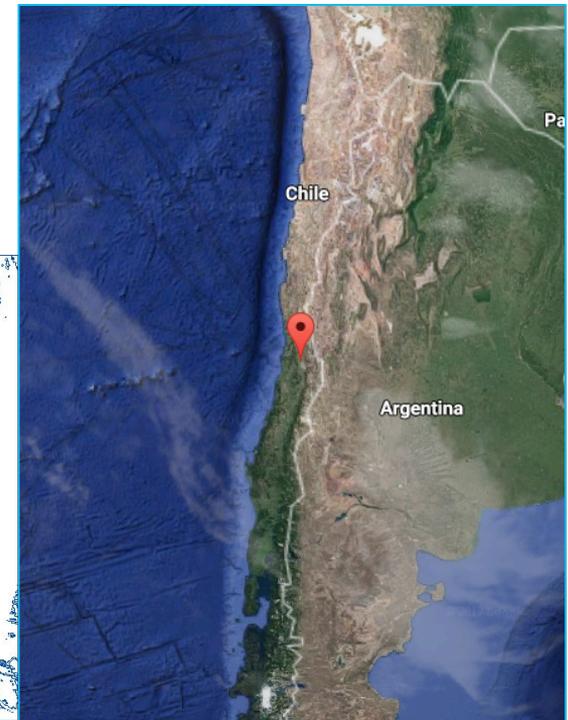
- **Paso Superior Lo Echevers:**
 - Autopista Vespucio Norte Express
 - 3 vanos
 - Infraestructura de Hormigón
 - Vigas de Hormigón
 - Terremoto de 2010 (Sa 1,12 g)



(1) Fuente: emol.com



(2) Fuente: FONDEF

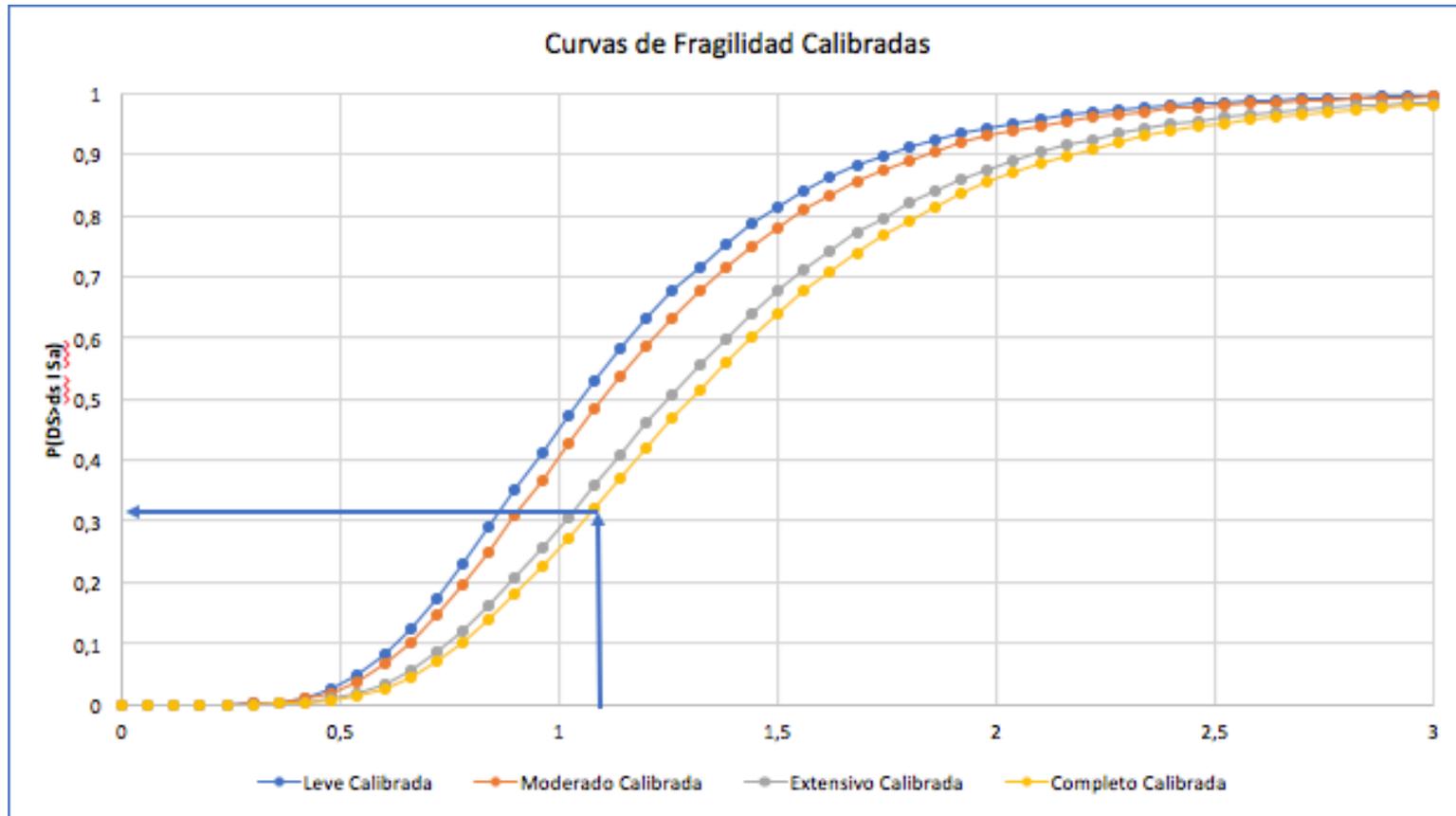


(3) Fuente: maps.google.com

RISK MODEL APPLICATION



Intensidad 1.12g (Sa)

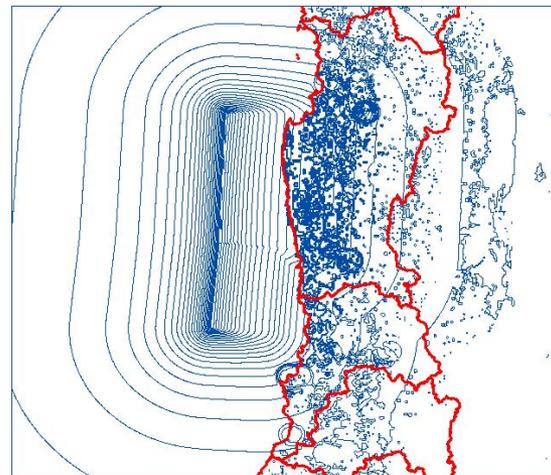


CASO DE APLICACIÓN

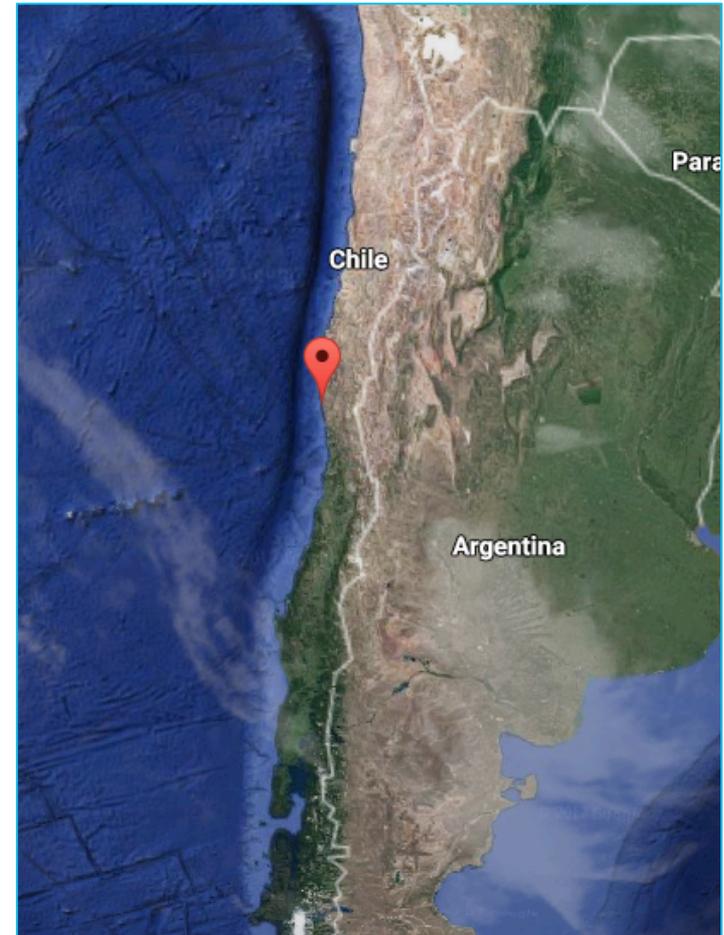


- **Puente El Teniente**

- Ruta 5 Norte
- Infraestructura de Hormigón
- Vigas de Hormigón
- Terremoto Illapel de 2015 (Sa 0,48 g)



(1) Fuente: FONDEF



(2) Fuente: maps.google.com

RISK MODEL APPLICATION



Intensidad 0.48g (Sa)

