

ANEXO 2 MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

Guía Metodológica Definitiva

“GUÍA METODOLÓGICA PARA LA ELABORACIÓN DE ESTUDIOS DE RIESGO DE LOS PLANES REGULADORES DEL NIVEL COMUNAL E INTERCOMUNAL”

INDICE DE CONTENIDOS

1	ANEXO: MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA	4
1.1	Amenazas por Inundaciones	7
1.1.1	Descripción general	7
1.1.2	Metodologías	8
1.1.3	Inundaciones por desborde de cauces	10
1.1.4	Inundaciones por anegamiento.....	14
1.1.5	Inundaciones por maremoto o tsunami.....	15
1.1.6	Inundaciones por marejadas.....	17
1.2	Amenazas Gravitacionales	18
1.2.1	Descripción general	18
1.2.2	Metodologías	19
1.2.3	Remociones en masa	27

1.2.4	Procesos de subsidencia	32
1.3	Amenazas Volcánicas	34
1.3.1	Descripción general	34
1.3.2	Metodologías	35
1.3.3	Caída de piroclastos	37
1.3.4	Corrientes de densidad piroclástica (PDC)	37
1.3.5	Lahares	38
1.3.6	Flujos de lava	40
1.4	Amenazas Sísmicas	41
1.4.1	Descripción general	41
1.4.2	Ruptura superficial de falla	42
1.4.3	Efecto de sitio	44
1.5	Amenazas Antrópicas	45
1.5.1	Amenazas por suelos contaminados	45
1.5.2	Amenaza de incendio forestal	54
3	BIBLIOGRAFÍA	58

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-1:	Métodos para la evaluación de susceptibilidad de generación de Remoción en Masa.....	21
Ilustración 1-2:	Fases metodológicas para la gestión de suelos contaminados.	47
Ilustración 1-3:	Identificación y georreferenciación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes.....	49
Ilustración 1-4:	Ocurrencia de Incendios en Chile. 1964-2016	54
Ilustración 1-5:	Daño Nacional Histórico (ha)1964-2016	54
Ilustración 1-6:	Tipo de superficie afectada.....	55
Ilustración 1-7:	Dimensiones, factores y variables para determinar la amenaza de incendio forestal.	56

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1.1 Clasificación de las amenazas y su correspondencia con el Art. 2.1.17. de la OGUC.	4
Cuadro 1.2 Métodos de análisis de inundación.	9
Cuadro 1.3 Criterios para definir intensidad de inundación por desborde de cauces en función de alturas de inundación (H) y/o velocidades de escurrimiento (v).	13
Cuadro 1.4 Criterios para asignar niveles de amenaza de inundación por desborde de cauces en función de la recurrencia modelada y la intensidad resultante del modelo.	13
Cuadro 1.5 Criterios para asignar niveles de amenaza de inundación por anegamiento en función de la altura de inundación (intensidad) y la recurrencia.	15
Cuadro 1.6 Criterios para asignar niveles de amenaza en función de la magnitud de la fuente y la altura de inundación.	17
Cuadro 1.7: Síntesis de métodos de análisis de remociones en masa.	20
Cuadro 1.8: Síntesis de los factores condicionantes.	28
Cuadro 1.9 Criterios para definir intensidad de flujos en función de alturas de inundación (H) y/o velocidades de escurrimiento (v).	31
Cuadro 1.10 Criterios para asignar niveles de amenaza de inundación por desborde de cauces en función de la recurrencia modelada y la intensidad resultante del modelo.	32
Cuadro 1.11 Variables requeridas para el estudio de cada amenaza.	37
Cuadro 1.12 Criterios para asignar niveles de amenaza de corrientes de densidad piroclástica en función de la recurrencia y el alcance.	38
Cuadro 1.13 Criterios para asignar niveles de amenaza de lahares en función de la recurrencia y el alcance.	39
Cuadro 1.14 Criterios para definir intensidad de inundación por desborde de cauces en función de alturas de inundación (H) y/o velocidades de escurrimiento (v).	39
Cuadro 1.15 Criterios para asignar niveles de amenaza de lahares en función de la recurrencia modelada y la intensidad resultante de la modelación hidráulica.	40
Cuadro 1.16 Criterios para asignar niveles de amenaza de flujos de lava en función de la recurrencia y el alcance.	41
Cuadro 1.17: Marco normativo e instrumentos de gestión asociados a suelos abandonados con presencia o identificación de sustancias contaminantes o peligrosas.	45
Cuadro 1.18: Metodología para determinar amenaza antrópica por Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC).	47
Cuadro 1.19: Listado de fuentes con información disponible.	48
Cuadro 1.20: Información para elaboración de base de datos de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes.	49
Cuadro 1.21: Ficha de inspección.	50
Cuadro 1.22: Categorización del riesgo preliminar.	52
Cuadro 1.23: Contenidos de la Investigación Preliminar.	53
Cuadro 1.24: Porcentaje de superficie afectada por incendios forestales por región.	56

1 ANEXO: MÉTODOS DE EVALUACIÓN DE LA AMENAZA

Esta guía metodológica, a través de los métodos que presenta en este anexo, pretende contribuir a la estandarización de un lenguaje técnico común, que facilite el diálogo y el entendimiento interdisciplinario entre los y las profesionales del ámbito de los Instrumentos de Planificación Territorial.

Para llevar a cabo este análisis, se realizó previamente una selección bibliográfica de guías y manuales a nivel nacional e internacional. En general, se observó que las guías y manuales de riesgo centran su atención, principalmente, en los aspectos de la *gestión del riesgo de desastres*, y menos en la temática específica de la amenaza. En aquellos trabajos que sí se aborda la amenaza desde un punto de vista metodológico, se observaron distintos grados de profundidad en el desarrollo de los temas, dependiendo del número y la diversidad de amenazas estudiadas (es decir, a mayor número y diversidad de amenazas, menor profundidad del análisis metodológico).

En este anexo en particular, el análisis de los métodos para la evaluación las amenazas naturales se desagregan según las cuatro categorías generales (inundaciones, gravitacionales, volcánicas y sísmicas), y se presentan las amenazas antrópicas como una quinta categoría. En cada una de ellas, a su vez, se incorporan detalles para sus amenazas específicas, tal como se indica en el Cuadro 1.1.

Cuadro 1.1 Clasificación de las amenazas y su correspondencia con el Art. 2.1.17. de la OGUC¹.

CATEGORÍAS DE AMENAZAS	AMENAZA		RIESGO
	AMENAZAS ESPECÍFICAS		Art 2.1.17 de la OCUG
INUNDACIONES	Desbordes de cauces y otros cuerpos de agua	Inundaciones terrestres	Numeral 1. Zonas inundables o potencialmente inundables, debido entre otras causas a maremotos o tsunamis, a la proximidad de lagos, ríos, esteros, quebradas, cursos de agua no canalizados, napas freáticas o pantanos.
	Anegamientos		
	Tsunamis	Inundaciones litorales o costeras	
	Marejadas		
GRAVITACIONALES	Procesos de ladera ²	Remociones en masa	Numeral 2. Zonas propensas a avalanchas, rodados, aluviones o erosiones acentuadas.
	Flujos		
	Procesos de subsidencia ³		
SÍSMICAS	Ruptura superficial de falla		Numeral 3. Zonas con peligro de ser afectadas por actividad volcánica, ríos de lava o fallas geológicas.
VOLCÁNICAS	Efectos de sitio		
	Corrientes de densidad piroclástica (PDC)		
	Caída de piroclastos		
	Lahares		
ANTRÓPICAS	Flujos de lava		Numeral 4. Zonas o terrenos con riesgos generados por la actividad o intervención humana.
	Suelos mecánicamente inestables o con potencial presencia de contaminantes		
	Incendios forestales		

Fuente: Elaboración propia.

¹ OGUC vigente a la fecha de publicación de esta guía.

² Por procesos de ladera se entienden los fenómenos de caídas, deslizamientos, volcamientos, deformaciones y propagaciones.

³ Pueden ser procesos de subsidencia por disolución, colapso de suelos salinos o calcáreos u otros

En términos técnicos, la evaluación de las amenazas naturales puede entregar dos tipos de resultados: la susceptibilidad y/o la peligrosidad, dependiendo del método (o de los métodos) seleccionado(s) para el análisis. Si bien la susceptibilidad se puede considerar como un paso inicial, previo al cálculo de la peligrosidad, también puede ser considerada como un producto en sí mismo e incluso se pueden considerar como productos complementarios. Ambos tipos de resultados pueden usarse en el proceso de planificación urbana, ya que en ambos casos se pueden realizar zonificaciones prácticas y bien fundamentadas de las amenazas que pretenden representar.

Los métodos para evaluar la amenaza son variados y son fuertemente dependientes de las características particulares del área estudiada, de la forma como las amenazas actúan en ese lugar en particular, de la información disponible y de los alcances y limitaciones propios del estudio. Por estas razones, una guía metodológica no debe entregar recomendaciones fijas y estrictas respecto de qué métodos se deben usar y cuáles no. Más bien, debe mostrar la diversidad de métodos disponibles, y contextualizar su uso en relación con las distintas variables que se deben tener en consideración (como la escala de trabajo, la cantidad y la calidad de la información, los recursos disponibles, etc.).

El hecho de contar con una categorización de los distintos tipos de métodos disponibles no implica que estos sean excluyentes entre sí. Más bien, lo que se recomienda es considerar elementos de distintos tipos de métodos (o desarrollar distintos métodos en paralelo), donde el equipo de trabajo debe seleccionar, con base en su experiencia previa, la mejor combinación posible de métodos y variables. En otras palabras, conviene usar (o al menos evaluar) los métodos en combinación unos con otros, y no de manera independiente. Cabe señalar, además, que los métodos que se presentan en este anexo son solo los más frecuentemente utilizados y no representan una lista excluyente de las alternativas disponibles.

En general, cualquier método que se aplique necesita contar con información sólida que lo sostenga. Cualquier método que se aplique con información insuficiente entregará resultados insatisfactorios.

Todos los métodos para la evaluación de la amenaza requieren de una investigación previa respecto de la ocurrencia histórica de eventos pasados, de acuerdo con ciertos parámetros críticos para cada amenaza. Por ejemplo, para el caso de tsunamis, es clave la recopilación de antecedentes respecto del tamaño y recurrencia de los sismos, así como las consecuencias que los tsunamis han provocado en el territorio en estudio; en el caso de remociones en masa, es fundamental tener un inventario lo más completo posible de las remociones que hayan ocurrido en el área de estudio o sus entornos; en el caso de las inundaciones terrestres, los niveles hasta los cuáles han afectado eventos pasados, etc. El inventario se considera como un piso mínimo a partir del cual se puede optar por distintos métodos de análisis. Esto supone una limitante considerable en la selección de los métodos, ya que entre distintos territorios ocurren diferencias sustanciales en la cantidad y calidad de la información, tanto disponible como aquella que es posible de levantar.

A su vez, todos los métodos para la evaluación de la amenaza consideran que una correcta caracterización de la geomorfología del territorio en estudio es un factor clave en el análisis, ya sea para utilizarla directamente como un insumo, o bien, para que aporte en la comprensión previa del equipo de trabajo respecto de las características morfodinámicas del lugar. La forma en la que se utilice la geomorfología dependerá del método de análisis que se seleccione.

Un aspecto decisivo en la clasificación de los métodos de análisis de las amenazas corresponde a la incidencia (o relevancia) que tiene la *toma de decisiones* a partir del denominado *criterio experto/a*, en alguno de los pasos del proceso de análisis. Al grado de incidencia de la toma de decisiones antes mencionada se le conoce como la *componente heurística*, la cual varía considerablemente entre unos métodos y otros: puede ser más dominante (más decisiva) en algunos de ellos (como los métodos con enfoques cualitativos), y menos en otros (como los son algunos métodos estadísticos o las modelaciones numéricas de base física).

En cualquier caso, las guías metodológicas consultadas para la elaboración de este anexo, son enfáticas e insistentes en mencionar que **la componente heurística no debe desaparecer del análisis**. Incluso en las modelaciones numéricas más complejas existen juicios discrecionales, que deben tomar decisiones respecto a ciertas consideraciones prácticas y según las limitaciones propias de los modelos. En última instancia, cualquier método debe ser interpretado y validado en vista de la coherencia de sus resultados. Y en caso de que estos resultados no sean útiles o consistentes, se debe evaluar si es pertinente utilizar otros métodos más simples. Es decir, **la componente heurística⁴ debe funcionar como una base permanente de control** respecto de los resultados que entreguen los distintos métodos, independiente de la mayor (o menor) complejidad de estos.

En general, los métodos más complejos requieren de mayores niveles de procesamiento de datos, capacidad técnica, recursos, plazos, análisis, interpretación y validación de resultados por expertos y expertas calificadas. Por lo tanto, para la elección de los métodos a utilizar **se debe aplicar un correcto balance entre las limitantes técnicas del proyecto, sus limitantes de gestión y los objetivos y alcances del estudio**. Esto último afirma la idea de que los métodos no deben ser recomendados de manera fija y estricta, sino, más bien, se deben entregar lineamientos generales para orientar las decisiones técnicas de los equipos de trabajo que desarrollen los estudios.

Por último, se recomienda que la evaluación de la amenaza se realice a partir de un análisis progresivo, donde se va acotando el problema en la medida en que se va agregando información.

⁴ En la literatura científica también se le denomina "enfoque heurístico".

1.1 AMENAZAS POR INUNDACIONES

1.1.1 Descripción general

Una inundación corresponde a la ocupación por agua, más o menos repentina, de terrenos habitualmente secos. Dependiendo del sistema dominante en que ocurren las inundaciones, estas se pueden clasificar como inundaciones terrestres o inundaciones litorales (Díez-Herrero, Laín-Huerta, & Llorente-Isidro, 2008).

Se debe tener en cuenta que es posible que ocurran combinaciones o situaciones intermedias entre ambas categorías, dependiendo del territorio analizado (por ejemplo, un río en condición de crecida que no pueda desaguar al mar por encontrarse este con altos niveles debido a una tormenta o en situación de pleamar) (Díez-Herrero, Laín-Huerta, & Llorente-Isidro, 2008). Las condiciones ambientales propias del medio (factores condicionantes) pueden potenciar o intensificar las características e impactos de las inundaciones, como son, por ejemplo, algunos parámetros topográficos (pendientes, red hidrográfica, tamaño y forma de la cuenca, entre otros), el tipo de suelo o la cubierta vegetal.

El aumento de asentamientos humanos y actividades productivas en llanuras de inundación o en zonas costeras, en conjunto con los cambios en magnitud y frecuencia de las inundaciones por el cambio climático, conlleva un aumento del riesgo por inundaciones (Maranzoni, D'Oria, & Rizzo, 2022).

Las inundaciones terrestres ocurren tierra adentro de los continentes por ocupación del terreno por agua dulce. Pueden originarse por desbordes de cauces fluviales o de cuerpos de agua (ríos, esteros, lagos, etc.) o por anegamiento (que a su vez incluye inundaciones pluviales, por surgencia de aguas subterráneas o elevación del nivel freático).

Las **inundaciones por desborde de cauces** (también denominadas inundaciones fluviales) corresponden a inundaciones debido al aumento de caudal por encima de la capacidad de transporte de un punto o tramo del cauce en cuestión. Es decir, caudales anormalmente altos, que son fenómenos propios del ciclo hidrológico natural (Díez-Herrero, Laín-Huerta, & Llorente-Isidro, 2008; Rojas, Mardones, Arumí, & Aguayo, 2014). También se consideran en esta categoría las inundaciones por desborde o desagüe de lagos u otros cuerpos de agua.

De acuerdo con el trabajo de Rojas y otros (2014), las principales causas (factores desencadenantes) de este tipo de inundaciones en Chile son (en orden de mayor a menor frecuencia): precipitaciones intensas o recurrentes, procesos volcánicos, procesos nivoglaciares, deslizamientos e intervención antrópica.

Los aumentos de caudal pueden darse de forma "lenta" o "rápida", generando una categorización de este tipo de inundaciones (Díez-Herrero, Laín-Huerta, & Llorente-Isidro, 2008). Un aumento de caudal lento se relaciona con precipitaciones generalizadas, de varios días de duración o por fusión progresiva de nieves o deshielo glaciar. Por otra parte, un aumento de caudal más bien rápido o repentino puede deberse a precipitaciones intensas y concentradas, roturas de represamientos naturales (lagos, lagunas) o artificiales (obras hidráulicas), o por fusión repentina de nieves y glaciares inducida por actividad volcánica. En Chile, este aumento de caudales que pueden derivar en inundaciones se suele denominar como "crecidas".

Las **inundaciones por anegamiento** corresponden a inundaciones producto del encharcamiento de zonas llanas o endorreicas. Este encharcamiento puede ser causado por acumulación de la precipitación, por surgencia de aguas subterráneas o por elevación del nivel freático (origen hidrogeológico).

Por su parte, las inundaciones litorales (o costeras) ocurren en sectores costeros limítrofes con el dominio terrestre, con ocupación del terreno por aguas marinas o lacustres-palustres (Díez-Herrero, Laín-Huerta, & Llorente-Isidro, 2008). Los aumentos del nivel del agua por encima de sus niveles y variaciones normales pueden ser causados por tsunamis o marejadas.

Los **tsunamis** o maremotos corresponden a una serie de ondas, cuyos períodos y longitudes de onda son muy grandes, por lo que tienen la energía suficiente para viajar a través de océanos completos, y son generadas por perturbaciones volumétricas en la masa de agua (SHOA, 1992). Estas perturbaciones son causadas por diferentes fuentes generadoras, o fuentes tsunamigénicas, que pueden ser diferentes tipos de terremotos (en Chile los más comunes son los de interplaca de profundidad intermedia), deslizamientos submarinos o subaéreos (remociones en masa), impactos de meteoritos o erupciones volcánicas (SHOA, 2015). A medida que estas ondas se acercan a aguas someras se hacen más escarpadas y aumentan en altura, inundando áreas de diversas elevaciones según su tamaño. En aquellos lugares donde la topografía submarina condiciona que las ondas se hagan aún más escarpadas, estas pueden romper y causar enormes daños (SHOA, 1992).

En ambientes costeros, donde coexisten distintos procesos físicos asociados a la hidrodinámica y transporte de sedimentos, el oleaje constituye el principal agente modelador y, en este sentido, las **marejadas** pueden definirse como eventos de oleaje extremo (Ministerio del Medio Ambiente, 2019). De acuerdo con el SHOA, una marejada puede definirse como una "ola larga ocasionada generalmente por una tormenta lejana; tienen por lo común varios centenares de metros de longitud" (SHOA, 1992). Asimismo, se puede agregar que corresponden a perturbaciones meteorológicas inducidas en las condiciones marítimas locales que pueden alterar significativamente la morfología costera (Ministerio del Medio Ambiente, 2019). Entre los impactos más significativos de las marejadas están las inundaciones costeras, la erosión costera (incluso pérdida de playas) y daños en la infraestructura y actividades antrópicas (Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

1.1.2 Metodologías

Para evaluar la amenaza de inundaciones, el análisis puede ser abordado utilizando diversos métodos, los cuales se pueden agrupar con base en diferentes criterios. La importancia de poder agrupar los métodos en categorías permite definir los alcances y limitaciones de la evaluación de la amenaza de inundaciones. Es por esto que, lo ideal, es utilizar los distintos tipos de métodos de forma integrada, calibrada y complementaria, en la medida en que los datos que se tengan a disposición lo permitan.

En primer lugar, las metodologías de evaluación de inundaciones se pueden agrupar según el enfoque metodológico (Maranzoni, D'Oria, & Rizzo, 2022; Mudashiru, Sabtu, & Abustan, 2021). La elección de estos enfoques dependerá tanto de los datos disponibles como del objetivo del estudio:

- Enfoque cualitativo: corresponden a enfoques puramente heurísticos donde el juicio experto toma un rol preponderante en el análisis.
- Enfoque semicuantitativo: corresponden a enfoques basados en la asignación de pesos a los diferentes factores considerados en el análisis de la amenaza, aplicando enfoques heurísticos y estadísticos. En general, se apoyan bastante en el uso de herramientas SIG y son bastante eficientes a escalas regionales o de cuenca, o en zonas donde la información es escasa.
- Enfoque cuantitativo: corresponden a enfoques basados en escenarios hidrológicos y modelamiento hidráulico, para lo cual se requiere definir ciertos parámetros y supuestos con el fin de aplicar ecuaciones matemáticas. Estos enfoques requieren una buena cantidad y calidad de datos y recursos computacionales.

Paralelamente, esta diversidad de métodos se puede agrupar también según tipos de insumo utilizado en el análisis (Díez-Herrero, Laín-Huerta, & Llorente-Isidro, 2008; Mudashiru, Sabtu, & Abustan, 2021):

- Métodos históricos y paleohidrológicos: se basan en evidencia histórica (marcas o placas, documentación, testimonios) o paleohidrológica (evidencias geológicas o arqueológicas anteriores al período histórico) para reconstruir la distribución, extensión u otras características de inundaciones

pasadas. Se trabaja sobre el supuesto de que los niveles alcanzados por inundaciones en el pasado podrían volver a ocurrir.

- **Métodos geológicos-geomorfológicos:** se basan en el análisis de depósitos y formas del relieve (litológico y geomorfológico) generados durante eventos de inundaciones anteriores, en el análisis del funcionamiento hidrogeológico de aguas subterráneas como desencadenante de inundaciones por ascenso de nivel freático, entre otros. Estas evidencias permiten definir áreas geomorfológicamente activas y, por lo tanto, susceptibles de ser inundadas en el marco de la dinámica natural de los sistemas analizados.
- **Métodos hidrodinámicos⁵:** se basan en la definición y utilización de parámetros hidrológicos e hidráulicos para modelar inundaciones. En algunos casos, los datos provenientes de la aplicación de metodologías históricas, paleohidrológicas y geológicas-geomorfológicas pueden servir como datos de entrada para las modelaciones o como datos de calibración. El análisis hidráulico se puede realizar según distintos métodos, dependiendo de los supuestos que hace sobre el flujo a modelar. Estos métodos son: flujo unidimensional, flujo bidimensional, modelo 3D y flujo bifásico y arrastre de sólidos. Cada uno de estos métodos se describe en la sección 1.1.3.

En general, los enfoques cualitativos (incluso los semicuantitativos), utilizan métodos históricos, geológicos y geomorfológicos. Estas técnicas, al contrastar los datos de inventario con las características físicas o ambientales del medio, permiten identificar los factores que condicionan la ocurrencia de inundaciones y sus características específicas. El resultado que se obtiene a partir de estos análisis corresponde a la **susceptibilidad** de la amenaza.

En caso de que los alcances y objetivos del estudio así lo permitan, es recomendable que estos resultados se puedan combinar con análisis de enfoque cuantitativo (específicamente, con técnicas metodológicas hidrodinámicas). Es decir, un primer nivel análisis sería a partir de métodos históricos, paleohidrológicos, geológicos y geomorfológicos, mientras que un segundo nivel de análisis podría incorporar métodos hidrodinámicos. Al estimar las áreas de afectación asociadas a eventos de cierta magnitud en sectores específicos (es decir, para un período de retorno dado, o para una probabilidad de ocurrencia determinada), los resultados que entregan estos análisis corresponden a la **peligrosidad** de la amenaza.

En el Cuadro 1.2, se presenta un resumen del tipo de métodos de análisis de inundación.

Cuadro 1.2 Métodos de análisis de inundación.

Métodos de análisis de inundación				
Enfoque	Métodos específicos		Resultado	
Cualitativo	Métodos heurísticos	Históricos-paleohidrológicos	Susceptibilidad	
		Geológicos-geomorfológicos		
Cuantitativo	Métodos hidrodinámicos (modelaciones)	Análisis hidrológico		Peligrosidad
		Análisis hidráulico	Flujo unidimensional	
			Flujo bidimensional	
			Modelo 3D	
Flujo bifásico y arrastre de sólidos				

Fuente: Elaboración propia.

⁵ A los métodos hidrodinámicos se los suele llamar "modelaciones numéricas", o simplemente "modelaciones". Se desaconseja el uso de este último, porque es un término genérico para referir a una representación de los fenómenos, y no exclusivamente a métodos numéricos-hidrodinámicos.

1.1.3 Inundaciones por desborde de cauces

Las inundaciones por desborde de cauces se pueden analizar desde un enfoque cualitativo (orientado a la definición de la susceptibilidad de la amenaza) o desde uno cuantitativo (orientado a la definición de la peligrosidad de la amenaza). Sin embargo, el mejor resultado se obtiene cuando ambas ópticas se utilizan de forma complementaria.

a) Enfoque cualitativo

El análisis de esta amenaza debe comenzar desde un enfoque cualitativo, es decir, a partir de las características geológicas y geomorfológicas del área. Esto permite identificar, a partir de las formas del relieve y depósitos asociados, las dinámicas fluviales que operan en el área en estudio. Estos resultados deben ser complementados y contrastados con un análisis histórico de eventos de inundación.

Este análisis también necesita considerar antecedentes históricos y otra información entregada por personas que han conocido eventos de inundación. Estos pueden ayudar a estimar la periodicidad con que son afectadas distintas áreas ubicadas junto a los cauces analizados.

Si bien el enfoque cualitativo puede constituir una herramienta potente para utilizar como base en la definición de los niveles de amenaza asociados a las zonas inundables, muchos cauces, especialmente en áreas urbanas, se encuentran intervenidos con obras de contención o de otro tipo. Dichas obras pueden incidir en los resultados que se obtengan por esta metodología, porque pueden modificar, o incluso borrar completamente, las evidencias geológicas y geomorfológicas asociadas a las crecidas. También pueden modificar la zona de escurrimiento, de manera que las condiciones bajo las cuales ocurrieron inundaciones en el pasado difieran de las actuales, restando validez a los antecedentes históricos como representativos de grandes inundaciones. De esta forma, este tipo de metodología será más eficiente mientras menos intervenido se encuentre un cauce, mientras que en los casos que los cauces se encuentran muy intervenidos la modelación hidráulica es una herramienta más eficiente.

Por otra parte, se recomienda el uso de este tipo de metodologías cuando la estadística para cuantificar el caudal que se modelará abarca un período muy breve o cuenta con muchos años sin precipitaciones (situación frecuente en la zona norte de Chile).

También se debe considerar este tipo de metodologías para ajustar modelos numéricos en aquellas zonas donde ocurran situaciones especiales, que no permitan garantizar que el resultado generado sea adecuado. Un ejemplo de esta situación lo constituyen cauces de pendientes muy pronunciadas, para los cuales algunos modelos hidráulicos no han sido diseñados.

Debe considerarse que, habitualmente, los antecedentes geológicos y geomorfológicos sólo entregan información de las áreas que pueden inundarse y no de otros parámetros que entreguen información acerca de la energía del flujo, como la altura de escurrimiento.

En cuanto a los criterios para definir los niveles de amenaza, estos deben considerar diferentes antecedentes, además de los que dan cuenta de las zonas afectadas. En particular, se deben considerar antecedentes que ayuden a estimar la recurrencia de las inundaciones. Se sugiere utilizar los siguientes criterios:

- La máxima extensión del área de nivel de amenaza moderado debe definirse considerando la máxima inundación que se reconoce a partir de las evidencias disponibles (geológicas, geomorfológicas, históricas, arqueológicas, entre otras). Esta se debería relacionar con un nivel de amenaza moderado.

- La máxima extensión del área de nivel de amenaza alto debe definirse considerando el área inundada producto de las principales inundaciones de las cuales se cuente con registro histórico. A modo de referencia, se pueden considerar inundaciones que ocurran con recurrencias mayores que 50 años.
- La máxima extensión del área de nivel de amenaza muy alto se puede asociar a eventos de inundación ocurridos frecuentemente. Para ello se pueden considerar zonas inundadas recurrentemente, cada 10 a 25 años.

b) Enfoque cuantitativo

El enfoque cuantitativo de esta amenaza necesariamente debe considerar, como paso previo, el estudio de las condiciones geomorfológicas y geológicas de los cauces modelados. Posteriormente, se debe considerar dos etapas para desarrollar el análisis: la primera está orientada a cuantificar el caudal de crecidas (análisis hidrológico) y la segunda busca representar los efectos que genera dicho caudal sobre el territorio (análisis hidráulico). Estos análisis, en conjunto, también se conocen como "métodos hidrodinámicos". A continuación, se describe cada uno de ellos.

Análisis hidrológico: La hidrología busca estimar los caudales generados en una cuenca o corriente en base a datos de caudales y su análisis estadístico, o datos de precipitaciones y la aplicación de modelos hidrometeorológicos.

Para este análisis es básica la caracterización temporal de los caudales anómalos a partir del hidrograma de crecida del evento analizado, mediante el cual se pueden determinar uno o más parámetros, y el hietograma correspondiente. Los parámetros del hidrograma se pueden diferenciar en: elementos (flujo máximo, curvas de ascenso, descenso y agotamiento), componentes (tipos de escorrentía y caudal base) y tiempos característicos.

Análisis hidráulico⁶: El análisis hidráulico intenta determinar las velocidades y alturas con que el agua va a circular en un determinado tramo fluvial, a partir de supuestos referentes al comportamiento de los flujos de agua y su modelación, para estimar diferentes parámetros como profundidad, velocidad o energía del agua.

Debido a que las metodologías hidráulicas se basan en supuestos respecto del comportamiento de los flujos de agua para su análisis, se pueden clasificar según las aproximaciones del flujo en cuestión, lo que determinará las ecuaciones y modelizaciones a aplicar. En ese sentido, se pueden identificar cuatro métodos de análisis:

- *Flujo unidimensional*: se simplifica el flujo de agua en una corriente fluvial como unidimensional, es decir, la profundidad y velocidad solo varían en la dirección longitudinal del cauce, cuyo eje supone una línea aproximadamente recta y velocidad constante en cualquier punto de una sección transversal. Es decir, una simplificación relativa al promedio de velocidades por el cauce.

En general, las metodologías basadas en flujo unidimensional son adecuadas para cauces confinados, es decir, que la zona de escurrimiento se encuentra bien definida. También son adecuados cuando no se cuenta con una topografía lo suficientemente detallada como para utilizar modelos más complejos. Un caso particular de lo anterior son los cauces con escurrimiento permanente, porque es muy difícil que se pueda contar con información topográfica de la zona inundada que tenga un nivel de detalle suficiente como para aplicar modelos más complejos. En los modelos unidimensionales sólo obtiene

⁶ También se le conoce como "modelación hidráulica", "modelación numérica" o simplemente "modelación". Se desaconseja el uso de este último, se desaconseja el uso de este último, porque es un término genérico para referir a una representación de los fenómenos, y no exclusivamente a métodos numéricos-hidrodinámicos.

información referida a la altura de escurrimiento, es decir, la zona de inundación está definida por una cota.

- *Flujo bidimensional*: permite incorporar al análisis de flujo las componentes o flujos secundarios perpendiculares a la dirección del flujo principal, como en el caso de desbordes, o complejizar el análisis en casos de confluencias, flujos alrededor de estructuras, cauces compuestos, curvas pronunciadas o en entornos urbanos (alcantarillados o cunetas, por ejemplo). En algunos casos se pueden combinar secciones 1D y secciones 2D, y conectar ambos modelos, para mejorar el rendimiento de cada una de las modelizaciones. La simplificación bidimensional se considera aceptable si las variaciones de las componentes horizontales en la vertical son pequeñas y si la distribución vertical de presiones es hidrostática. Es decir, se desprecian las variaciones en la vertical.

Los modelos bidimensionales entregan información para casos más complejos, en que no se conoce a priori las zonas de escurrimiento. Un caso común de esta situación corresponde a los abanicos aluviales. Estos modelos exigen contar con información topográfica mucho más detallada que los modelos unidimensionales. Su aplicación es difícil en el caso de cauces con escurrimiento permanente, porque habitualmente no se cuenta con información topográfica lo suficientemente detallada de la zona inundada.

- *Modelos 3D*: permite modelar flujos turbulentos, pero requieren más capacidad de procesamiento debido a que considera las variaciones de los vectores promedio de las velocidades. En general se aplican a situaciones puntuales y no relacionadas a la dinámica natural de sistemas fluviales.

Los modelos tridimensionales se aplican para situaciones muy particulares y es poco probable que sean una herramienta adecuada para aplicar en instrumentos de planificación territorial. Estos demandan una gran cantidad de información y recurso computacional.

- *Flujo bifásico y arrastre de sólidos*: la influencia de la carga sólida en el comportamiento de las corrientes puede ser relevante dado que pueden viajar de distintas formas. En el análisis de amenazas, son particularmente interesantes los sólidos en flotación (por su capacidad de obstruir o represar la corriente), en suspensión (que en altas concentraciones pueden modificar las propiedades del fluido), y la carga de fondo y movimiento del lecho (ya que altera la superficie por donde fluye la corriente, genera turbulencias y obstáculos dinámicos). Las aproximaciones matemáticas al problema del acarreo o arrastre de sólidos se basan en la relación entre la energía de la corriente y la granulometría de los sedimentos, y en la cantidad de material disponible.

Los modelos de flujo bifásico y arrastre de sólido deben aplicarse cuando existe evidencia de que el escurrimiento habitualmente tiene una parte importante de material sedimentario. Por lo general, corresponden a modelos bidimensionales.

Las técnicas metodológicas del enfoque cuantitativo son herramientas eficientes en los casos que se cuenta con un registro hidrológico sólido. Sin embargo, sus resultados deben utilizarse con precaución en aquellos casos en que la estadística abarque un período reducido, muy antiguo o en zonas donde es frecuente que no llueva por varios años.

A nivel mundial, existen abundantes propuestas para asignar niveles de amenaza, que dependen de aspectos locales y normativos. En esta guía, se recomienda utilizar una matriz que considere la recurrencia (período de retorno) a que se ha asociado el modelo y la intensidad de la inundación (Cuadro 1.4). Para los niveles de

intensidad, se recomienda utilizar la asignación de intensidad, propuesta por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), que se basa en la altura y velocidad de escurrimiento⁷. Este criterio se sintetiza en el siguiente cuadro:

Cuadro 1.3 Criterios para definir intensidad de inundación por desborde de cauces en función de alturas de inundación (H) y/o velocidades de escurrimiento (v).

Intensidad ⁸	CRITERIO DOH-MOP	
Alta	$H \geq 1 \text{ m}$	o $v * H \geq 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$0,5 \text{ m} \leq H < 1 \text{ m}$	o $0,5 \text{ m}^2/\text{s} \leq v * H < 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	$0,1 \text{ m} \leq H < 0,5 \text{ m}$	o $0,1 \text{ m}^2/\text{s} \leq v * H < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Muy baja	$0 \text{ m} < H < 0,1 \text{ m}$	$0 \text{ m}^2/\text{s} < v * H < 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$
Despreciable	$H = 0 \text{ m}$	$v * H = 0 \text{ m}^2/\text{s}$

Fuente: Basado en los criterios definidos por DOH MOP.

Una vez que se tiene un modelo numérico y se han asignado niveles de intensidad, se recomienda utilizar la siguiente matriz para asignar niveles de amenaza:

Cuadro 1.4 Criterios para asignar niveles de amenaza de inundación por desborde de cauces en función de la recurrencia modelada y la intensidad resultante del modelo.

		Recurrencia			
		< 10 años	10 – 50 años	50 – 100 años	≥ 100 años
Intensidad	Alta	Muy alta	Muy alta	Alta	Alta
	Media	Muy alta	Alta	Moderada	Moderada
	Baja	Alta	Moderada	Moderada	Poco significativa
	Muy baja	Moderada	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa
	Despreciable	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa

Fuente: Elaboración propia.

⁷ Ordinario DOH N° 2852 (30 de septiembre de 2021).

⁸ Las categorías para los intervalos de intensidad se pueden nombrar de distintas maneras. MOP-DOH usa "alta", "media" y "baja". En esta tabla se agregaron las categorías "muy baja" y "despreciable". En otros trabajos también se usa "extremo", "fuerte", "medio", "débil" y "despreciable", o también numérico (i1, i2, i3, i4, etc.).

1.1.4 Inundaciones por anegamiento

Se reconocen dos tipos de inundaciones por anegamiento: (1) asociada a la acumulación de aguas lluvias y (2) asociada al nivel freático.

La inundación por acumulación de aguas lluvia (inundaciones pluviales) ocurre en zonas con drenaje insuficiente producto de la baja capacidad de infiltración y/o condiciones inadecuadas para el drenaje superficial.

Para el análisis de esta amenaza, la información suele ser insuficiente. Un documento que normalmente entrega información relevante respecto de esta amenaza corresponde a los Planes Maestros de Aguas Lluvias, elaborados por la Dirección de Obras Hidráulicas.

El análisis de esta amenaza debe considerar las siguientes metodologías:

- Reconocimiento, mediante antecedentes históricos, de las zonas que han sido afectadas en el pasado.
- Análisis de las características geomorfológicas y geológicas que condicionan esta amenaza.
- Identificación, mediante un modelo digital de elevación de alta resolución, de las zonas que pueden presentar un comportamiento endorreico. El resultado que se obtenga debe compararse con los dos puntos anteriores.

El otro tipo de inundación por anegamiento se relaciona con la surgencia de aguas subterráneas o elevación del nivel freático.

Para el análisis de esta amenaza se deben considerar las siguientes metodologías:

- Reconocimiento, mediante antecedentes históricos, de las zonas que han sido afectadas en el pasado.
- Análisis de la geología de superficie y subsuperficie.
- Caracterización de la geomorfología.
- Análisis de antecedentes hidrogeológicos (niveles freáticos, unidades hidrogeológicas, entre otros).

Es importante destacar la importancia de incluir en estos análisis la presencia de humedales en el área urbana y en áreas potenciales de extensión urbana, su comportamiento actual e histórico ya que, por definición, corresponden a "todas aquellas extensiones de marismas, pantanos y turberas, o superficies cubiertas de aguas, sean éstas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina, cuya profundidad en marea baja no exceda los seis metros y que se encuentren total o parcialmente dentro del límite urbano" (Art. 1, Ley 21.202)

Un parámetro adecuado para asignar niveles de amenaza asociados al anegamiento es la altura de inundación. Para estandarizar la asignación de niveles de amenaza asociados a anegamiento, se sugiere utilizar los criterios de inundación por desborde de cauces, que se presentan en el Cuadro 1.3, como referencia para la asignación de niveles de amenaza. Debe considerarse que existen dos diferencias principales entre ambos casos: (1) en la inundación por anegamiento la energía cinética es prácticamente nula, porque el agua no se encuentra en movimiento, y (2) normalmente no se cuenta con información para cuantificar la recurrencia asociada a esta amenaza. Estas dos condiciones se tomaron en cuenta para la definición de criterios a utilizar (Cuadro 1.5).

Cuadro 1.5 Criterios para asignar niveles de amenaza de inundación por anegamiento en función de la altura de inundación (intensidad) y la recurrencia.

		Recurrencia			
		< 10 años o Sin información	10 – 50 años	50 – 100 años	≥ 100 años
Intensidad	Alta (> 1 m)	Muy alta	Muy alta	Alta	Alta
	Media (0,5 – 1 m)	Muy alta	Alta	Moderada	Moderada
	Baja (0,1 – 0,5 m)	Alta	Moderada	Moderada	Poco significativa
	Muy baja (0 – 0,1 m)	Moderada	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa
	Despreciable (0 m)	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa

Fuente: Elaboración propia.

1.1.5 Inundaciones por maremoto o tsunami

De acuerdo con SHOA, en el marco de la elaboración de Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU):

Para evaluar cuantitativamente el riesgo de tsunami de origen tectónico en áreas costeras, ha sido necesario ejecutar estudios inter-disciplinarios en sismología, geología, geofísica y oceanografía, incluyendo la revisión de las fuentes históricas. Dentro de este contexto, la modelación de tsunamis ha sido utilizada para discriminar entre diferentes escenarios posibles (i.e. localización de la fuente y mecanismos de ruptura) que puedan afectar a una región en particular, elaborando una Carta de Inundación para el evento sísmico más extremo, ya sea conocido o probable.

Actualmente, la simulación numérica es la mejor técnica de análisis geofísico e hidrodinámico disponible para estudiar el riesgo de tsunami en las áreas donde los registros históricos son insuficientes. El modelo que se ha aplicado para desarrollar el proyecto CITSU, COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model) diseñado por el Dr. S.N. Seo basado en el modelo de Shuto's (Agosto 10, 1993) y Yongsik Cho (Agosto 10, 1993) en la Escuela de Ingeniería Civil y Ambiental, de la Universidad de Cornell.⁹

Cabe mencionar que las CITSU que elabora el SHOA corresponden a una representación cartográfica de las diferentes alturas de inundación máxima producidos por un evento de tsunami en un área determinada. Estos resultados son obtenidos mediante modelaciones numéricas en base a un evento sísmico extremo conocido o probable (SHOA, 2015), conocidos como *Megathrust*. Para elaborar estas cartas de inundación se utiliza información topobatemétrica, planimétrica, datos históricos de sismos y tsunamis, y una caracterización adecuada de los parámetros de la fuente tsunamigénica y la deformación inicial de la superficie libre del cuerpo

⁹ <http://www.shoa.cl/php/citsu.php>, consultada en julio de 2023.

de agua, para realizar la modelación numérica. El resultado es una zonificación del área de inundación en base a, a lo menos 5 niveles de profundidad de inundación expresada en metros.

Así, para el estudio de amenaza de inundación por tsunami, se recomienda:

1. Si existen cartas CITSU para el territorio en análisis:
 - Utilizar las cartas de inundación oficiales (alturas de inundación) y la escala a la que fueron elaboradas (en formato PFD, KMZ y KML¹).
 - Las cartas de inundación elaboradas por el SHOA se pueden complementar con modelaciones de escala local, orientadas a precisar las modelaciones que se presentan en las cartas CITSU o a ajustarlas a la topografía y topografía del instrumento de planificación territorial. En este caso se deben seguir las Especificaciones Técnicas para la Elaboración de CITSU (SHOA, 2015).
 - Si fuese necesario, ajustar áreas de inundación dependiendo de la escala de la CITSU y del IPT en desarrollo. Para ello se debe considerar la topografía de detalle disponible siempre que sea de mayor resolución que las utilizadas para la elaboración de la CITSU, además de otros antecedentes que pudieran existir (en caso de que, por ejemplo, los límites de las modelaciones no cubran toda la extensión del territorio costero en análisis) como antecedentes históricos, geomorfológicos, geológicos u otras modelaciones.

2. Si no existen cartas CITSU para el territorio en análisis, se recomienda:
 - Realizar modelaciones numéricas utilizando criterios y modelos similares a los utilizados por SHOA para las cartas CITSU, de acuerdo con las Especificaciones Técnicas para la Elaboración de CITSU (SHOA, 2015)
 - En caso de no sea posible realizar modelaciones numéricas (limitaciones de presupuesto, tiempo, alcances del estudio u otro), se recomienda realizar un análisis de antecedentes históricos, geológicos, geomorfológicos, entre otros, para establecer una zonificación en base a la susceptibilidad.

En los casos que no se cuente con modelos para representar esta amenaza, se puede usar como referencia las observaciones asociadas a eventos pasados. En este caso, se deben diferenciar aquellos terremotos más extremos que rompen la totalidad de la zona de contacto entre placas (conocidos como *Megathrust*) de aquellos que no lo hacen y que ocurren más frecuentemente. No resulta adecuado, para este caso, utilizar como referencia tsunamis asociados a eventos de fuente lejana (por ejemplo, ocurridos en Japón).

Las zonas inundadas y alturas de inundación son sensibles a variaciones en el nivel del mar del orden a algunos metros, por lo que no tiene sentido incluir en el análisis terremotos de magnitudes milenarias, posiblemente asociadas a un nivel del mar diferente del actual.

En cuanto a la intensidad, el parámetro más adecuado para representarla es la altura de inundación. Sin embargo, en el caso de las metodologías basadas en antecedentes históricos no se contará con esta información.

Considerando lo tratado en los párrafos anteriores, se recomienda utilizar los criterios que se definen en el Cuadro 1.6, para asignar niveles de amenaza asociados a tsunami.

Cuadro 1.6 Criterios para asignar niveles de amenaza en función de la magnitud de la fuente y la altura de inundación.

		Insumo	
		Megathrust ¹	Otros terremotos de interplaca ²
Intensidad (Altura de inundación)	Alta (> 2 m)	Muy alta	Muy alta
	Media (1 – 2 m)	Alta	Muy alta
	Baja (0,5 – 1 m)	Moderada	Alta
	Muy baja (0 – 0,5 m)	Poco significativa ³	Moderada
	Despreciable (sin inundación)	Poco significativa	Poco significativa

¹ Modelaciones CITSU, otras modelaciones asociadas a terremotos tipo *Megathrust*, observaciones de terreno asociadas a terremotos tipo *Megathrust*.

² Modelaciones numéricas u observaciones de terreno asociadas a terremotos que no rompen completamente la zona de contacto entre placas.

³ Las cartas de inundación elaboradas por el SHOA (CITSU) realizan cortes en la altura de inundación cada 1 m, y por lo tanto, no se puede hacer diferencias entre las zonas con inundaciones menores que ese rango. Por lo tanto, en el caso de dichas cartas, se debe asignar un nivel de amenaza moderado a la zona con niveles de inundación entre 0 y 0,5 m.

Un caso especial que no se ha considerado en los criterios para asignar niveles de amenaza corresponde a los tsunamis generados por remociones en masa que pueden ocurrir en zonas donde la línea de costa tiene una forma compleja (por ejemplo, tsunami de Aysén en 2007), que favorezcan la canalización del tsunami. Estos casos pueden generar alturas de inundación considerables, pero resulta difícil definir la fuente (ubicación y tamaño de la remoción en masa) y una posible recurrencia de este fenómeno. Este tipo de procesos requiere un análisis especial, que no es posible de abordar en el marco de esta guía, y que debe ser analizado en detalle por profesionales con la preparación adecuada.

1.1.6 Inundaciones por marejadas

Dado que las marejadas se caracterizan por olas de gran altura ocasionadas por vientos fuertes en el océano y que, por lo tanto, evolucionan temporal y espacialmente a medida que se propagan desde la zona de generación, existen diversos modelos para estudiar el oleaje, que a su vez son complementarios entre sí (Ministerio del Medio Ambiente, 2019).

Sin embargo, en muchos casos las modelaciones no son posibles de realizar, por lo que se recomienda realizar la evaluación de la amenaza en base a antecedentes históricos (alturas de olas, alcances, entre otros) y sus tendencias, complementados con análisis geomorfológicos.

Para definir los niveles de amenaza de marejadas, se pueden considerar aspectos de recurrencia en base a antecedentes históricos. Respecto a la intensidad, esta puede ser en base a información de alturas de olas o a características cualitativas como son la clasificación del Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, que las

clasifica como "marejadas" (eventos donde las olas ingresan a la bahía y afectan el normal desarrollo de actividades en el borde costero y el estado de los puertos) y "marejadas anormales" (eventos donde se esperan mayores daños a la infraestructura costera, sobrepasos e inundaciones).

1.2 AMENAZAS GRAVITACIONALES

1.2.1 Descripción general

En esta guía metodológica se consideran amenazas gravitacionales a dos tipos de procesos: (1) remociones en masa y (2) subsidencias.

Las remociones en masa se definen como el movimiento que ocurre en dirección ladera abajo de una masa de materiales por acción de la gravedad. Normalmente, estos materiales corresponden a roca y/o suelo/sedimento, con una proporción variable de agua, los que pueden además incorporar la cobertura vegetal y elementos antrópicos a su paso. Estos procesos pueden ser de movilización lenta o rápida, de dimensiones variables y son el resultado de la interacción entre una serie de factores condicionantes y otros que actúan como desencadenantes (PMA, 2007; Arenas & Opazo, 2017; Brantt, Pantoja, & Muñoz, 2021).

Las remociones en masa se clasifican según el tipo de movimiento que desarrollan. En esta guía, se establecen dos categorías: **procesos de ladera** (que agrupan a las caídas, deslizamientos, volcamientos, deformaciones y propagaciones) y **flujos**. A continuación, se describe cada una de ellas según las definiciones propuestas por Hungr et al. (2013), complementadas por Muñoz et al. (2021) y las referencias citadas ahí dentro.

Caída: es un tipo de remoción en masa en que uno o varios bloques de roca o suelo (bloque, detrito, limo y/o arcilla) se desprenden de una ladera, con un desplazamiento cortante leve o nulo. El material desprendido desciende de forma no cohesiva, principalmente en el aire a través de golpes, rebotes y rodamientos. Suele ocurrir con velocidades muy rápidas a extremadamente rápidas¹⁰.

Deslizamiento: es un tipo de remoción en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente a lo largo de una superficie, en la cual se desarrolla una gran deformación cortante y que define un plano de falla en el material.

Volcamiento: es un tipo de remoción en masa que involucra el desprendimiento, rotación hacia adelante y volcamiento de roca, suelo o sedimento y que puede continuar, o no, su trayectoria como caída.

Deformación: corresponden a un tipo de remoción en masa que presenta rasgos de deslizamiento, pero sin una superficie de cizalle distinguible; son movimientos lentos a extremadamente lentos y no alcanzan grandes desplazamientos en comparación con las demás remociones en masa ya descritas. Dentro de esta categoría se reconocen los procesos de reptación y solifluxión.

Propagación: corresponde a la deformación de roca, suelo o arcillas producto de la presencia de capas más débiles subyacentes. Pueden ser lentos o extremadamente rápidos.

¹⁰ Las categorías de velocidades asociadas a remociones en masa no se incluyen en este anexo. Ver referencias citadas para más información.

Flujo: es un tipo de remoción en masa que durante su desplazamiento desarrolla un comportamiento mecánico semejante al de un fluido; puede ser extremadamente rápido o lento, saturado o seco. De acuerdo con esta clasificación, las avalanchas son un tipo de flujo que puede movilizar material rocoso y/o suelo/sedimento.

Por su parte, los **procesos de subsidencia** corresponden a fenómenos en que el material terrestre (roca, suelo u otro) colapsa producto de la acción de la gravedad debido a inestabilidades generadas en capas subyacentes. Estas debilidades pueden darse por disolución, colapso de suelos salinos o calcáreos o asociado a construcciones subterráneas, entre otros.

1.2.2 Metodologías

El marco metodológico que se presenta a continuación está exclusivamente referido al análisis de remociones en masa (es decir, a procesos de ladera y flujos). Los métodos para el análisis de subsidencias se presentan por separado, en la sección 1.2.4.

Esta síntesis metodológica está fundamentada en tres trabajos, los cuales establecen una mirada panorámica de la *tipología de métodos* que suelen utilizarse para la evaluación de la amenaza de remociones en masa:

- Proyecto Multinacional Andino – Geociencias para las Comunidades Andinas (PMA-GCA, 2007), en el cual tuvo participación directa el SERNAGEOMIN.
- The Seventh Framework Programme for Research and Technological Development (FP/7), de la Comisión Europea (SafeLand, 2011) que, de toda la bibliografía consultada, entrega el desarrollo más acabado sobre la temática.
- Guía Metodológica para la Elaboración de Mapas de Susceptibilidad a las Remociones en Masa a Escala Regional, del SERNAGEOMIN (2017), que realiza una completa síntesis de trabajos desarrollados por la institución, así como de otras experiencias internacionales, tanto en países de la región andina como en otros lugares del mundo.

El fenómeno de las remociones en masa tiene la particularidad de que puede afectar lugares distantes respecto del sitio donde estas se generan. Por lo mismo, se debe realizar un análisis diferenciado para las zonas de *generación* de las remociones (es decir, identificar los lugares donde estas son más propensas a *iniciarse*) y otro para su *alcance* (lugares hasta donde ellas podrían *movilizarse*).

En la mayoría de los casos, el análisis de la amenaza de remociones en masa, tanto de generación como de alcance, se realiza a través de métodos que entregan como resultado la susceptibilidad (es decir, son métodos que analizan y ponderan los *factores que condicionan* la ocurrencia y movilización de las remociones). Los análisis que derivan en la peligrosidad del fenómeno son bastante menos comunes, principalmente por la escasez de los datos de inventario y por la incertidumbre respecto a la edad de los eventos registrados. Por lo mismo, esta síntesis metodológica le da mayor énfasis a la susceptibilidad del fenómeno.

Los métodos para el análisis de susceptibilidad de generación (o iniciación) de remociones en masa son variados, pero pueden ser categorizados en 3 tipos, según los insumos principales en los que basan sus análisis: (1) *experiencia*, (2) *manejo de datos* y (3) *modelos físicos*.

Estos 3 grupos utilizan distintos tipos de variables y admiten distintos grados de incidencia del denominado *criterio experto/a*. Por lo mismo, también se pueden clasificar como enfoques “cualitativos” o “cuantitativos”, según sea el caso.

Por su parte, los métodos para el análisis de susceptibilidad de alcance de remociones en masa se pueden clasificar según dos tipos: empíricos y analíticos/racionales. Estos métodos, dependiendo de sus especificidades, también pueden ser considerados como "cualitativos" o "cuantitativos".

En el Cuadro 1.7, se presenta una síntesis de los métodos de análisis de remociones en masa antes mencionados.

Cuadro 1.7: Síntesis de métodos de análisis de remociones en masa

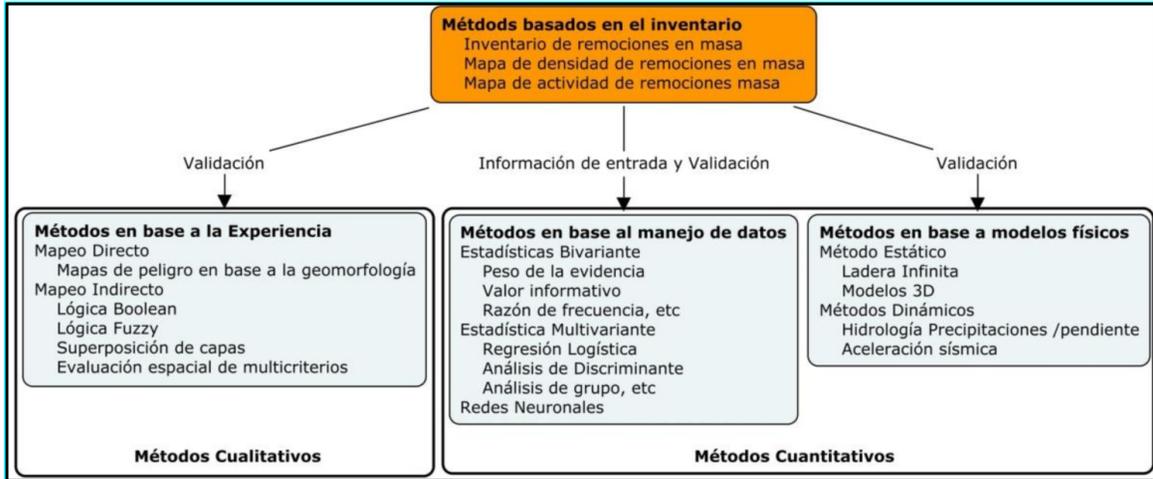
Métodos de análisis de remociones en masa (procesos de ladera y flujos)				
Enfoque	Categoría general	Métodos específicos		Resultado
Cualitativo	Experiencia (<i>enfoque heurístico</i>)	Mapeo directo a partir de geomorfología		Susceptibilidad (<i>de generación</i>)
		Mapeo indirecto	Lógica Boolean	
			Lógica Fuzzy	
			Superposición de capas	
			Evaluación espacial multicriterios	
Cuantitativo	Manejo de datos (<i>enfoque estadístico</i>)	Estadística bivariante	Peso de la evidencia	
			Valor informático	
		Estadística multivariante	Razón de frecuencia, etc.	
			Regresión logística	
			Análisis discriminante	
	Redes neuronales	-		
	Modelos físicos	Métodos estáticos	Ladera infinita	
			Modelos 3D	
		Métodos dinámicos	Hidrología precipitaciones/pendiente	
			Aceleración sísmica	
Cualitativo	Empíricos	Geomorfológicos		Susceptibilidad (<i>de alcance</i>)
Cuantitativo		Geométricos		
		Cambios de volumen		
		Modelos discretos		
		Modelos continuos		
	Analíticos / racionales			

Fuente: Elaborado a partir de Safeland (2011) y SERNAGEOMIN (2017).

a) Susceptibilidad de generación

Todos los métodos a través de los cuales se obtiene como resultado la susceptibilidad de generación de remociones en masa, dependen de un paso previo, de base, que corresponde a la elaboración de un inventario de remociones. Este inventario, posteriormente, se usa como información de entrada y/o como insumo de validación de los métodos aplicados Ilustración 1-1.

Ilustración 1-1: Métodos para la evaluación de susceptibilidad de generación de Remoción en Masa.



Fuente: extraído de SERNAGEOMIN (2017).

Según SafeLand (2011), es posible obtener la susceptibilidad de generación directamente a partir del inventario, según mapas de densidad y mapas de actividad de remociones en masa. Sin embargo, esto solo debe considerarse como una aproximación inicial, luego de lo cual se deben aplicar otro tipo de métodos de análisis.

A continuación, se describen los 3 tipos de métodos generales mencionados en la introducción de este capítulo (es decir, basados en *experiencia*, *manejo de datos* y *modelos físicos*) y, adicionalmente, se antepone una descripción de los métodos basados en *inventario*.

1. Métodos basados en el *inventario* de remociones

Estos métodos (también referidos como métodos de ocurrencia histórica) se consideran como los más simples, o lo más directos, ya que se basan fundamentalmente en la distribución espacial de las remociones, las cuales se representan mediante puntos o áreas. Para cualquier análisis de la amenaza, el escenario ideal es poder contar con la mayor cantidad de información posible respecto de cada evento, donde no solo se establezca con claridad su ubicación, sino también la fecha de ocurrencia, el área afectada, una estimación de su volumen, el tipo de movimiento, de fractura, de desencadenante, etc.

Los productos que se esperan de estos análisis (ver ilustración de arriba) corresponden al inventario propiamente tal (es decir, una base de datos complementada con mapas donde se explicita la distribución de las remociones y el tipo), mapas de densidad (cuantificación de la frecuencia de las remociones por unidad de área) y mapas de actividad (análisis de los lugares donde las remociones se encuentran más activas, o menos).

La mayor desventaja que tiene este método, es que no entrega información sobre las áreas que no presentan eventos de remociones. Es decir, si bien permite hacer análisis de distribución de las remociones, no es un buen predictor de posibles remociones en el futuro y, por lo tanto, no debe considerarse como una representación de la susceptibilidad de remociones en masa. Su uso debe alimentar otro tipo de métodos.

Cabe señalar que, en general, en el contexto nacional no es posible levantar inventarios de remociones en masa con tanto nivel de detalle: las fechas de ocurrencia, los volúmenes desplazados y los desencadenantes específicos suelen ser desconocidos. Sin embargo, a pesar de esta brecha de información, es clave contar con

inventarios lo más completos posibles, ya que estos servirán para cualquier método de análisis que se quiera implementar. Además, entregan una valiosa información a los tomadores de decisiones, y les muestra lineamientos técnicos en la forma de registrar este tipo de fenómenos, para que puedan continuar con su registro en eventos futuros.

2. Métodos basados en la *experiencia* del equipo de trabajo (o enfoque heurístico)

En este tipo de métodos la opinión del grupo de expertos y expertas juega un rol decisivo. Según la clasificación de SafeLand (2011), el enfoque heurístico puede ser dividido en 2 grupos de métodos: los de mapeo *directo* de la amenaza y los de mapeo *indirecto* de la amenaza.

- Métodos de mapeo *directo*.

Si el equipo de trabajo ya cuenta con un inventario de remociones en masa, puede agregar como insumo el mapa geológico-geomorfológico del área, para detectar los condicionantes de base de los fenómenos. A su vez, este tipo de mapeos requieren de un amplio conocimiento técnico del área de estudio, que debe ser complementado con visitas a terreno y entrevistas con personas que conozcan directamente el territorio. Es la combinación de estos 3 componentes (inventario, geología-geomorfología y visita a terreno) más la experiencia del equipo de trabajo, lo que permite elaborar un mapa de la susceptibilidad correctamente fundamentado.

A este tipo de mapeos directos se los conoce con el nombre de "mapas de amenaza con base en la geomorfología", "mapeo geomorfológico de la amenaza", "análisis geomorfológico de la amenaza", o a veces simplemente "mapeo directo de la amenaza".

De acuerdo con el trabajo de SafeLand (2011), el mapeo de la susceptibilidad con base en la geomorfología se usa extensamente en escalas de tipo local (1:5.000 a 1:25:000), y ha servido para orientar procesos de planificación territorial en diversos países del mundo. Si bien este método es altamente sensible a la experiencia del grupo de trabajo, estos mapas pueden entregar resultados con un alto grado de especificidad, ya que permiten establecer diferencias localizadas sin tener que incorporar las simplificaciones y generalizaciones que se requieren en la mayoría de los otros métodos.

En contrapartida, una desventaja de los métodos de mapeo *directos* es que los criterios de evaluación pueden ser tan específicos, o con tantas reglas subjetivas de decisión, que se dificulta la explicación clara de cuáles fueron dichos criterios (muchos de los cuales quedan, finalmente, "escondidos").

Para efectos de esta guía metodológica, cualquier estudio de amenaza para Instrumentos de Planificación Territorial, ya sea para escalas de PRC o PRI, debe estar fundamentado en un análisis pormenorizado del inventario de procesos, de las líneas de base y de visita(s) a terreno. Por lo tanto, los mapeos directos de la amenaza se consideran como un "mínimo", es decir, se aceptan este tipo de métodos, u otros de mayor complejidad.

- Métodos de mapeo *indirecto*

Para resolver la problemática de los criterios "escondidos" de los mapeos directos de la amenaza, se pueden utilizar métodos de combinación de factores condicionantes. Con base en el conocimiento experto de una zona en particular, los equipos de trabajo determinan qué factores (es decir, qué parámetros) son los que más inciden en la ocurrencia de remociones en masa (por ejemplo, las pendientes, unidades litológicas, unidades geomorfológicas, curvatura, densidad de la red de drenaje, etc.). Se elaboran cartografías que representan a cada uno de estos factores condicionantes (los cuales se denominan "mapas temáticos"), y luego, el equipo de

expertos y expertas debe asignar distintos valores a los mapas (es decir, deben determinar cuánto pesa cada uno de esos mapas respecto a los otros).

Las formas en las que se asignan estos pesos son variadas, y de ellas se derivan múltiples métodos distintos. En Chile, los 2 métodos más extendidos (y que son recomendados por la guía del SERNAGEOMIN (2017) para el análisis de la susceptibilidad de mapas en escalas regionales, 1:25:000 a 1:250.000) corresponde a la "superposición de capas" (que es una ponderación simple entre los parámetros de los mapas) y la "evaluación espacial multi-criterio" (que puede incluir una ponderación diferenciada de los mapas temáticos, y/o una ponderación diferenciada de las clases al interior de cada mapa).

En el caso de la evaluación espacial multicriterio, se suele recomendar el uso de un procedimiento estandarizado de toma de decisiones denominado "proceso de análisis jerárquico" (AHP, por sus siglas en inglés).

Una dificultad general para los métodos de mapeo *indirecto* consiste en la determinación exacta de los pesos que se deben considerar. Por ejemplo, una combinación particular de factores puede ser un muy buen predictor en un área determinada, pero muy mal predictor en otras. Esto ocurre ya que el proceso de ponderación de los factores implica una generalización para todo el territorio en estudio, sin poder atender a las especificidades de este. Así, se recomienda que la decisión del peso de los factores debe estar fundamentada en un amplio conocimiento del territorio específico que se evalúa, y se recomienda validar cuidadosamente los resultados, en el sentido de detectar los sectores donde el modelo funciona bien, y dónde no lo hace.

Por otro lado, el hecho de poder aplicar un único criterio de zonificación, de manera sistematizada y en una amplia extensión territorial, tiene la ventaja de que permite mostrar con claridad cuáles fueron los criterios de decisión utilizados, y se pueden discutir de manera transparente entre técnicos, así como también pueden ser defendidos ante los tomadores de decisiones, incluso entendiendo que los pesos fueron designados con criterios subjetivos.

Estos métodos son recomendables en estudios de amenaza para IPT, tanto para PRC como para PRI. Sin embargo, si se utilizan en PRC, cuyas escalas de trabajo son de más detalle (pueden variar entre 1:000 y 1:5.000), se recomienda validar los resultados con una visita a terreno adicional. Esto, ya que los criterios estandarizados podrían generar resultados inconsistentes en determinados sectores. En estos casos, se debe evaluar la aplicación de otro tipo de métodos, sectorizados, para asegurar una correcta determinación de la susceptibilidad. Las razones por las cuales se toma la decisión de aplicar otro tipo de métodos, y los criterios para decidir en qué sectores se llevarán a cabo, deben quedar debidamente presentados y justificados en el informe técnico del estudio.

3. Métodos basados en el manejo de *datos* (o enfoque estadístico)

Lo que define a este grupo de métodos es que la combinación de factores que condicionan la ocurrencia de remociones en masa en un lugar determinado (es decir, la distribución de pesos de los factores), se determina mediante un análisis estadístico y no a partir del criterio experto/a. Estos métodos utilizan el inventario de remociones para obtener estadísticamente la importancia relativa de cada uno de los factores (así como de las clases al interior de dichos factores).

Este enfoque es dividido en 3 grupos de métodos principales, según la forma en la que analiza sus estadísticas:

- Estadística bivalente

Cada mapa temático (pendientes, geología, curvatura, etc.) se combina con el mapa de distribución de remociones, y se establecen relaciones para cada clase (es decir, para las clases de pendientes, de unidades litológicas, de curvatura, etc.). Se pueden aplicar varios métodos estadísticos para calcular los pesos, como el peso de la evidencia, el método de valor informativo, la razón de frecuencia, entre varios otros.

Según la PMA (2007), dentro del enfoque estadístico, el bivalente es el más comúnmente utilizado, a pesar de que tiene la limitación de requerir un gran número de datos de inventario. Por esta misma razón, en el contexto nacional no es común encontrar este tipo de análisis.

- Estadística multivariante

En este caso se establece una correlación entre un grupo de variables de predicción y la densidad de movimientos en masa, para cada unidad de terreno. Según el PMA (2007), dada la complejidad que revisten estos cálculos, la dificultad de su calibración y la necesidad de contar con inventarios demasiado completos, este método en la práctica no es comúnmente utilizado para la zonificación de susceptibilidad de remociones en masa.

- Redes neuronales

Mediante un complejo sistema de funciones no lineales, se establecen organizaciones del tipo "red neuronal" para reconocer patrones y clasificaciones. La red se ve forzada a encontrar relaciones entre distintas variables y sus clases, dada una cierta distribución de remociones inventariadas. En Chile, este tipo de métodos pueden considerarse como "de vanguardia", ya que aún no han sido extensamente probados, más allá de círculos académicos o investigaciones de punta.

4. Métodos basados en *modelos físicos*

A diferencia de todos los anteriores, estos métodos utilizan modelos que simulan los principios y leyes físicas que conducen los procesos de remoción en masa. En general, se trata de modelos de estabilidad de laderas, donde el método más utilizado es el de "ladera infinita", en el que se determina un factor de seguridad que corresponde al cociente entre las fuerzas que resisten el movimiento y las fuerzas que lo favorecen. Un factor menor a 1.0 indica que el movimiento es inminente.

Estos métodos pueden dividirse en 2 grupos, los estáticos (no incorporan la variable tiempo) y los dinámicos (sí la incorporan). En el caso de los métodos que simulan deslizamientos superficiales, estos pueden modelar incluso la respuesta de los materiales frente a la infiltración de aguas lluvia, o el efecto de las aceleraciones sísmicas.

Se considera que los resultados de estos métodos son más concretos y confiables que los heurísticos y los estadísticos. Sin embargo, requieren de mayor tiempo de análisis, más recursos técnicos, puede haber complicaciones para obtener los parámetros de entrada y requieren de una sólida experiencia para interpretarlos. Además, para ser aplicados sobre áreas extensas (y no solo en laderas puntuales) se requiere de una homogeneidad respecto de los parámetros geológicos y geomorfológicos del lugar, así como una alta capacidad de recursos.

En el caso de estudios de amenaza para Instrumentos de Planificación Territorial, la aplicación de estos métodos de manera extensiva para todo el territorio resulta impracticable, ni para PRC ni para PRI. Sin embargo, dependiendo de las características del territorio, bien podría ser requerido un análisis puntual con modelaciones

físicas de algún tipo, para sectores particulares. Lo anterior requiere de una adecuada y oportuna gestión de los recursos del estudio, en el sentido de que debe estar solicitado explícitamente en sus bases técnicas, y se deben destinar recursos suficientes para ello.

b) Susceptibilidad de alcance

Según el trabajo de Safeland (2011), en el caso de la susceptibilidad de alcance (o de distancia de viaje) los métodos para su evaluación se organizan (y se nombran) de una manera distinta de aquellos que evalúan la generación. Esto puede implicar confusiones entre los equipos de trabajo, ya que esta distinción es altamente específica. Sin embargo, conviene hacerla, ya que el proceso de análisis de ambos tipos de susceptibilidad (generación y alcance) tiene diferencias sustanciales. Mientras que en el caso de la generación lo decisivo son los factores que condicionan la *ocurrencia* del fenómeno, en el alcance se ponen en juego las variables que *transportan* y *depositan* el material ladera abajo.

Los dos grandes grupos de métodos que evalúan el alcance son: (1) *empíricos* y (2) *analíticos / racionales*.

1. Métodos *empíricos*

Los métodos *empíricos* se basan en observaciones de campo, en las relaciones entre parámetros morfométricos de las remociones, en las características de los posibles "senderos" que puede seguir la remoción (rugosidad, obstrucciones, etc.) y la distancia de viaje de depósitos anteriores. Se fundamentan en algunos supuestos muy simplificados de la realidad física, y por lo mismo, la interpretación de sus resultados no siempre es evidente.

Estos métodos se pueden dividir en 3 subgrupos:

- Geomorfológicos: se basan en registros de remociones anteriores. El registro de depósitos antiguos y recientes son la base para determinar posibles alcances futuros. En caso de que los inventarios de remociones anteriores fueran lo suficientemente robustos y confiables, se pueden obtener estadísticas de distancias alcanzadas con sus probabilidades correspondientes.

Una dificultad que tiene este tipo de métodos es que muchas veces los depósitos de remociones antiguas se encuentran suavizados o borrados por los procesos erosivos, o bien, se encuentran enterrados por otros procesos. Se recomienda usualmente para procesos de gran escala (alta magnitud y baja frecuencia), ya que es más probable que sus rasgos morfológicos aún sean visibles.

Si bien su aplicación tiene varias limitaciones, pueden ser útiles en casos donde no se cuenta con otro tipo de métodos.

- Geométricos: utilizan métodos simples que relacionan algunos parámetros geométricos de las remociones y las máximas distancias de viaje observadas. Los dos más utilizados son el "ángulo de alcance" (para deslizamientos) y el "cono de la sombra" (para caídas). Al utilizar las máximas distancias de viaje observadas como referencia, los resultados de este método se consideran como "conservadores", pero al mismo tiempo "realistas", ya que se basan en datos directos de terreno.

Cabe señalar que sus resultados no entregan los parámetros cinemáticos de las remociones (velocidad y energía cinética), pero sí pueden entregar una buena primera aproximación al problema de la evaluación de los alcances.

Podrían ser útiles en estudios de amenaza para PRC, pero no para ser usados extensivamente sobre todo el territorio, sino más bien para sitios específicos que requieran de la aplicación de criterios especiales.

- Cambios de volumen: se utilizan principalmente para determinar alcances de flujos de detritos. Son métodos que aplican un balance entre el volumen que entra en el sistema y el que se deposita, correlacionando el largo, ancho y la pendiente de los depósitos, por tramos. Estos modelos establecen fórmulas para calcular los cambios de volumen a lo largo de la trayectoria del flujo, dividiendo el volumen del depósito por el largo; asumen una reducción progresiva aguas abajo, hasta que eventualmente el flujo se detiene.

En el caso de los estudios de amenaza para PRC, podrían ser útiles para quebradas individuales, pero no se recomiendan para ser utilizados extensivamente el territorio en estudio.

2. Métodos *analíticos / racionales*

Los métodos *analíticos / racionales* están basados en el uso de modelos matemáticos que simulan las leyes físicas del movimiento de las partículas, y pueden ser de distintos grados de complejidad. Se pueden clasificar en 2 subgrupos:

Modelos discretos: modelan el impacto de partículas simples con algún parámetro de restitución, que simula el roce con la topografía. Existen modelos sencillos, en que las partículas de la remoción no interactúan entre sí, y otros más complejos, que describen las fuerzas internas de contacto entre ellas. Estos modelos utilizan relativamente pocos parámetros de entrada (principalmente los coeficientes de fricción y de cohesión de los materiales). Se recomiendan principalmente para caída de rocas.

Pueden ser útiles tanto para estudios de amenaza a escala de PRC como de PRI. Un ejemplo de modelo discreto para evaluar alcances, que ha tenido cada vez más uso en estudios nacionales, corresponde al módulo de simulación GPP (*Gravitational Process Path Model*) del programa de código abierto SAGA-GIS.

- Modelos continuos: se basan en Mecánica de Medios Continuos, y pueden incluir una combinación de del comportamiento mecánico, hidráulico y termodinámico de las partículas. Tienen distintos niveles de complejidad, desde los modelos 3D basados en modelos multifase, modelos 3D de presión-velocidad y aproximaciones simplificadas en 2D.

Estas últimas tienen una correlación con las modelaciones hidráulicas presentadas en este anexo, en la sección de inundación por desborde de cauces. Si en ese tipo de modelaciones se incluye un porcentaje de material sólido, se obtiene la modelación de un flujo de detritos. Este tipo de modelaciones podría ser aplicable en quebradas específicas, para estudios de amenaza de PRC, pero no para todas las quebradas del territorio, ni para estudios de amenaza para PRI. Para más detalles ver la sección 1.1.

c) Peligrosidad

Tal como se dijo en la introducción de este capítulo, si bien la susceptibilidad puede funcionar como un paso previo para obtener la peligrosidad, también funciona como un resultado en sí mismo, que sí puede ser utilizado para la toma de decisiones en la planificación territorial (SafeLand, 2011). Esto cobra relevancia en el contexto chileno, ya que, en la mayoría de los casos, la falta de datos y la poca fiabilidad de los mismos, convierten el análisis de la peligrosidad en un resultado altamente impreciso. A su vez, este tipo de procedimientos, si bien

han sido probado en áreas de estudio de grandes extensiones (tal vez comparables a las de los PRI), pierden su capacidad predictiva en áreas más acotadas, como pueden ser las áreas sujetas a planificación en un PRC.

Para pasar de la susceptibilidad a la peligrosidad, se requiere del cálculo de 3 tipos de probabilidades: (1) probabilidades espaciales de ocurrencia de las remociones, (2) probabilidades temporales de los desencadenantes de las remociones y (3) probabilidades de ocurrencia de la magnitud de las remociones. Estos parámetros probabilísticos son los que la diferencian de la susceptibilidad.

Por lo tanto, en caso de que el inventario de remociones sí esté lo suficientemente bien correlacionado con los registros históricos de lluvias y sismos (es decir, si se cuenta con información suficiente respecto de cuáles han sido los eventos de lluvia que han desencadenado determinado tipo de remociones, con su frecuencia y tamaño, y lo mismo para el caso de los sismos), entonces se puede determinar cuál es la intensidad de lluvia (o de sismos) que se requiere para que se empiecen a desencadenar cierto tipo de remociones, de cierto tamaño. Esa intensidad se denomina "umbral de excedencia".

Una vez que se ha determinado el umbral de excedencia, existen metodologías estadísticas para calcular la probabilidad de ocurrencia de dicha intensidad, en un determinado periodo de retorno. De este modo, esa probabilidad de ocurrencia, distribuida en el territorio, puede ser ponderada por la susceptibilidad para obtener una medida de la peligrosidad.

En Chile, como se plantea más arriba, generalmente los estudios de amenaza para remociones en masa entregan como resultado la susceptibilidad¹¹. Los estudios en los que se ha obtenido la peligrosidad aún son escasos, aunque se puede mencionar el estudio pionero de SIGMA (2021). Como contraste, otro ejemplo de este tipo de métodos se puede revisar en la Guía Metodológica de Colombia (SGC, 2017), dedicada exclusivamente a remociones en masa. En Colombia, por sus características geográficas y por el alto nivel de desarrollo de la GRD, se cuenta con inventarios robustos y con información detallada respecto del tipo de remociones en masa que se desencadenan con determinadas intensidades de lluvias (particularmente de deslizamientos). Al hacer esta comparación, se aprecia una diferencia sustantiva en la cantidad y calidad de información de inventario que se dispone en ambos países.

Por lo mismo, la recomendación de aplicar la peligrosidad en los estudios de amenaza, particularmente para procesos de ladera, debe realizarse cuidadosamente, atendiendo a las particularidades de cada estudio y de cada territorio.

1.2.3 Remociones en masa

Una vez que ya se tiene el inventario de remociones, lo decisivo para el análisis de las remociones en masa es reconocer los factores que condicionan su ocurrencia.

Si bien los procesos de ladera (es decir, caídas, deslizamientos, volcamientos, deformaciones y propagaciones) y los flujos tienen diferencias entre sí, los factores que controlan su ocurrencia son genéricos: topografía, geología, suelos, hidrogeología, geomorfología, hidrología, factor antrópico, clima y ambiente¹².

¹¹ Cabe destacar que la excepción a esta regla son los flujos de detritos, los cuales pueden ser analizados mediante modelaciones hidráulicas, entregando así la medida de la peligrosidad del fenómeno.

¹² Estos factores y sus descripciones fueron extraídos del trabajo de SERNAGEOMIN (2017).

En el Cuadro 1.8, se presenta una síntesis de los factores condicionantes para caída de rocas (CR), deslizamientos (D) y flujos (F). Estos tres tipos de remociones son los que más comúnmente afectan al territorio nacional. A su vez, se categoriza la importancia relativa de cada uno de estos factores en la evaluación de la susceptibilidad, según 4 niveles: C = crítica, A = alta importancia, M = moderada importancia, B = baja importancia. Esta síntesis se extrae del trabajo de SERNAGEOMIN (2017), la cual fue realizada para el análisis de remociones en masa a escala regional.

Cuadro 1.8: Síntesis de los factores condicionantes

Grupo	Parámetro	Relevancia	Importancia según tipo de remoción		
			CR	D	F
Geomorfología	Ambiente geomorfológico	Montañoso, glacial, periglacial, denudacional, costero, tropical, etc.	A	M	A
	Remociones antiguas	Características del material y del terreno en sectores modificados, que lo hacen más propensos a la reactivación.	M	A	A
	Actividad de remociones históricas	Información histórica sobre la actividad de remociones en masa.	C	A	C
Uso de suelo y factor antrópico	Uso común del suelo	Tipo de cobertura de suelo, tipo de vegetación, cobertura de copa de árboles, profundidad de enraizamiento, peso.	A	A	A
	Cambios en el uso de suelo	Variación temporal en la cobertura y uso de suelo.	M	A	C
	Infraestructura vial	Zona de influencia de caminos y cortes de caminos en áreas con pendientes.	M	A	A
	Edificios	Taludes generados por la construcción de edificios.	M	M	A
	Redes de drenaje e irrigación	Fugas desde las redes que pueden provocar la generación de remociones en masa.	B	M	A
	Canteras y minería	Estas actividades alteran la geometría de laderas y la distribución de fuerzas. Vibraciones debido a las tronaduras pueden desencadenar remociones en masa.	A	A	A
	Represas y reservorios	Los reservorios cambian las condiciones hidrogeológicas del terreno. Las represas pueden fallar.	B	A	A
Terremotos y volcanes	Mecanismos de falla	Localización de la falla, tipo de falla, largo y zona de ruptura, falla cubierta o expuesta, distancia desde la falla, bloque colgante y yacente.	A	M	A
	Tipo de volcán	Altura y composición del edificio volcánico. Estabilidad de la cámara magmática.	M	M	A
	Tipo de erupción volcánica	Explosiones laterales, colapso de la cámara magmática, flujos piroclásticos y lahares.	M	M	A
Clima y ambiente	Temperatura	Influye de manera importante en la hidrología y las condiciones de vegetación. Cambios rápidos de temperatura, derretimiento de nieve, ciclos de hielo y deshielo, permafrost.	A	A	A

Fuente: extraído de SERNAGEOMIN (2017). CR: caída de roca. D: deslizamiento. F: flujo. Las 3 columnas de la derecha indican la importancia de cada parámetro en la evaluación de la susceptibilidad, para cada tipo de remoción. C: crítico. A: alta. M: moderada. B: baja.

a) Procesos de ladera

Para las remociones en masa en general, y para los procesos de ladera en particular, la forma en la que los factores condicionantes están interrelacionados entre sí (es decir, sus retroalimentaciones) es de alta complejidad. A su vez, el tipo de afectaciones que tienen los procesos de ladera sobre el territorio es dependiente de la energía cinética de su movimiento. Por lo tanto, la intensidad que puede tener un evento depende de la velocidad y del volumen (o masa) desplazado. Esto implica que existen múltiples combinaciones posibles para tener una misma intensidad, ya que bloques de distintos tamaños, según sus velocidades, podrían tener la misma energía cinética.

En el contexto geográfico nacional, resulta muy poco probable que se disponga de información suficiente como para asignar una recurrencia precisa y fidedigna a este tipo de amenazas, y asociar esas recurrencias a cierto tipo de eventos, a ciertos tamaños de remociones, con cierta distribución de velocidades y de volúmenes. Por lo tanto, los análisis de los procesos de ladera generalmente quedan acotados a la susceptibilidad (es decir, al análisis de sus condicionantes) y no de la peligrosidad.

Las metodologías que suelen utilizarse para evaluar la susceptibilidad de procesos de ladera, son de enfoque heurístico, específicamente a través del mapeo directo de la amenaza, o bien, a través del mapeo indirecto (particularmente, mediante evaluación espacial multicriterio). Menos comunes son los métodos estadísticos bivariantes, con la aplicación del peso de la evidencia.

Si bien los factores que controlan la ocurrencia de los procesos de ladera pueden variar considerablemente entre distintos territorios, los aspectos topográficos (pendiente, elevación, relieve, disposición, orientación, forma, curvatura, rugosidad) y geológicos (tipo de roca, meteorización, discontinuidades, orientación de estructuras, fallas), suelen ser los factores de primer orden. Estos factores pueden verse acentuados por otros, dependiendo del área de estudio en particular. En cualquier caso, los fenómenos de remociones en masa inventariados siempre juegan un rol clave en el reconocimiento de los factores a considerar en la evaluación.

Por otro lado, el tipo de resultado a partir del cual se obtiene la susceptibilidad es altamente dependiente del tipo de método que se usa (por ejemplo, no es lo mismo tener categorías de susceptibilidad obtenidas a partir de un mapeo directo de la amenaza, que de un método estadístico bivalente). Por lo mismo, para esta amenaza, no es factible entregar criterios físicos específicos para asignar sus niveles.

En la literatura técnica comparada, en el trabajo de SERNAGEOMIN (2017) existe una recomendación general respecto de cómo debe asignarse el nivel muy alto de la amenaza, cuando se trabaja con la susceptibilidad de remociones en masa, que toma en consideración la distribución de las remociones en el lugar que se estudia:

"Se aconseja incluir el mayor número de remociones en masa posible en aquellos sectores clasificados como de mayor susceptibilidad, tratando de mantener, a la vez, el mínimo de superficie para dichas clases. Es decir, las clases mayores de susceptibilidad deben tener los valores más altos de densidad de remociones en masa, incluso si esta no es calculada."

Por su parte, en el trabajo de SGC (2017), para las clases de susceptibilidad de remociones se proponen los siguientes criterios generales:

Muy Atlo: *"Corresponde a los movimientos en masa obtenidos en el inventario de procesos morfodinámicos. En estas áreas se incluyen los movimientos tipo deslizamiento y caída. Los polígonos de flujos clasificados como avenida torrencial o reptación no hacen parte de esta categoría"*

Alto y Moderado: *"En estas categorías debe incluirse la descripción de los tipos de movimiento que pueden ocurrir y una descripción breve de los factores geoambientales que condicionan esta posibilidad, haciendo énfasis en la importancia relativa de cada factor de acuerdo con las hipótesis planteadas y los resultados obtenidos en el análisis de cada tipo de movimiento. Cada tipo de movimiento está condicionado por un factor o una combinación de factores específica, que debe describirse de manera precisa en la leyenda."*

Poco significativo (o Bajo): *"deben incluirse la descripción de las características geoambientales que condicionan la ausencia o muy baja posibilidad de ocurrencia de un movimiento en masa. Esta descripción también debe estar basada en la importancia relativa de cada factor de acuerdo con las hipótesis planteadas y los resultados de los análisis por tipo de movimiento que se hayan realizado."*

En el marco de este anexo metodológico, cualquier criterio que se aplique para definir niveles de amenaza debe tener coherencia con el marco general que se ha propuesto en el cuerpo central de esta guía. En el caso de los procesos de ladera, una vez que se ha realizado el análisis, se debe describir claramente cuáles son los factores que se reconocen como condicionantes, indicando la importancia relativa que se le asigna a cada factor.

Por otro lado, no todos los territorios están expuestos a los mismos procesos de ladera. En determinados lugares podría ser descartada la ocurrencia de cierto tipo de fenómenos (por ejemplo, si no existen evidencias de deformación, propagación o volcamientos, ni tampoco se observan condiciones para su ocurrencia, el mapa de amenaza de procesos de ladera podría estar referido únicamente a caídas y deslizamientos).

La recomendación general es que los procesos de ladera se evalúen de manera separada, ya que los factores que condicionan uno u otro tipo suelen ser lo suficientemente distintos. Con respecto a las diferencias entre zonas de generación y de alcance, si un punto del territorio tiene 2 niveles de amenaza distintos (uno por generación y otro por alcance), se debe dar prioridad a los niveles mayores.

Una vez que se ha hecho el proceso de zonificación por separado entre los distintos procesos de ladera, igualmente se debe realizar un mapa adicional, donde se muestre el resultado genérico de todos los procesos de ladera combinados, con los 4 niveles de amenaza. En esta superposición, se debe resguardar que los niveles de amenaza más altos tomen prioridad por sobre los niveles de amenaza más bajos.

En casos muy específicos, puede ser conveniente agrupar el análisis de distintos procesos de ladera. Por ejemplo, se puede tomar el caso de un farellón rocoso de gran desnivel (cientos de metros), donde las caídas de roca tienen grandes alcances e intensidades (mucho mayores que el fenómeno de los deslizamientos, que está acotado a las coberturas de no consolidado a la base del farellón, con alcances menores e intensidades bajas). En este caso, si la amenaza de caídas contiene espacialmente a la amenaza de deslizamientos y, a su vez, tiene un mayor impacto sobre el territorio, entonces podría justificarse la realización de un solo análisis (el de caídas) que represente espacialmente a ambos procesos. Este tipo de decisiones deben quedar explicitadas y bien fundamentadas en el informe técnico.

b) Flujos

Esta amenaza se puede analizar mediante métodos cuantitativo, como modelos hidráulicos, o con otros métodos de carácter cualitativo, como podría ser la geología y geomorfología.

Los métodos cualitativos son una herramienta eficiente para analizar toda el área de estudio, lo que permite construir un diagnóstico inicial de toda el área. Los productos que se pueden obtener de este análisis son la asignación de los niveles amenaza, que se puede traducir en una zonificación con un nivel de detalle mayor en la medida que se cuente con mejor información para ello, y una priorización de los cauces que requieren analizarse por otros métodos. En la medida que la información sea lo suficientemente detallada y que los cauces

no estén muy intervenidos, la zonificación mediante criterios cuantitativos puede ser adecuada. Una ventaja de este tipo de modelos es que las evidencias perduran por un período mucho más largo.

Los métodos cuantitativos son una herramienta adecuada para analizar cauces específicos, en sectores acotados, y son una herramienta eficiente en cauces complejos. Difícilmente se puede analizar la totalidad de los cauces mediante modelos numéricos. Un caso en que la modelación numérica resulta particularmente eficiente es en cauces muy intervenidos, ya sea por obras destinadas a contener o encauzar los flujos o por otro tipo de infraestructura. Mayores detalles acerca de las herramientas disponibles para el análisis cualitativo de los flujos se encuentran en este anexo, en el capítulo referido a inundación por desborde de cauces.

Como los flujos suelen relacionarse con eventos de precipitaciones, los antecedentes hidrológicos pueden ser una buena referencia para cuantificar la recurrencia asociada a la amenaza. Sin embargo, como en este caso también incide la fracción sólida, se deben incluir otras variables diferentes, como la temperatura, que puede condicionar la cantidad de sedimento que arrastra un determinado flujo. Esto implica una mayor incerteza en la asignación de la recurrencia. Por otra parte, el escenario actual de cambio climático aumenta la incerteza respecto de la recurrencia de los flujos.

En caso de que se utilicen modelaciones hidráulicas, se recomienda utilizar las asignaciones propuestas por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) para asignar los niveles de amenaza, que se basa en la altura y velocidad de escurrimiento¹³. Este criterio se sintetiza en el siguiente cuadro:

Cuadro 1.9 Criterios para definir intensidad de flujos en función de alturas de inundación (H) y/o velocidades de escurrimiento (v).

Intensidad ¹⁴	CRITERIO DOH-MOP	
Alta	$H \geq 1 \text{ m}$	o $v * H \geq 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$0,5 \text{ m} \leq H < 1 \text{ m}$	o $0,5 \text{ m}^2/\text{s} \leq v * H < 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	$0,1 \text{ m} \leq H < 0,5 \text{ m}$	o $0,1 \text{ m}^2/\text{s} \leq v * H < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Muy baja	$0 \text{ m} < H < 0,1 \text{ m}$	$0 \text{ m}^2/\text{s} < v * H < 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$
Despreciable	$H = 0 \text{ m}$	$v * H = 0 \text{ m}^2/\text{s}$

Fuente: Basado en los criterios definidos por DOH MOP.

Una vez que se han asignado niveles de intensidad, se recomienda utilizar la siguiente matriz para asignar niveles de amenaza:

¹³ Ordinario DOH N° 2852 (30 de septiembre de 2021).

¹⁴ Las categorías para los intervalos de intensidad se pueden nombrar de distintas maneras. MOP-DOH usa "alta", "media" y "baja". En esta tabla se agregaron las categorías "muy baja" y "despreciable". En otros trabajos también se usa "extremo", "fuerte", "medio", "débil" y "despreciable", o también numérico (i1, i2, i3, i4, etc.).

Cuadro 1.10 Criterios para asignar niveles de amenaza de inundación por desborde de cauces en función de la recurrencia modelada y la intensidad resultante del modelo.

		Recurrencia			
		< 10 años	10 – 50 años	50 – 100 años	≥ 100 años
Intensidad	Alta	Muy alta	Muy alta	Alta	Alta
	Media	Muy alta	Alta	Moderada	Moderada
	Baja	Alta	Moderada	Moderada	Poco significativa
	Muy baja	Moderada	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa
	Despreciable	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa

Fuente: Elaboración propia.

En cualquier caso, la mejor alternativa para zonificar esta amenaza considera utilizar simultáneamente información generada mediante modelación hidráulica y antecedentes geológicos-geomorfológicos.

1.2.4 Procesos de subsidencia

La subsidencia corresponde a la manifestación superficial de diferentes procesos subterráneos de deformación, que se manifiestan en superficie como el hundimiento del terreno. Cada uno de estos procesos es consecuencia de mecanismos diferentes. La metodología para analizar esta amenaza depende del mecanismo que da origen al proceso. A continuación, se analizan algunos de los diferentes casos reconocidos (Tomás, Herrera, Delgado, & Peña, 2009). El resto de los casos de subsidencia son poco relevantes para los instrumentos de planificación territorial.

a) Subsidencia por disolución subterránea

Hace referencia a la disolución de materiales generalmente de origen natural, como cloruro sódico, yeso y carbonatos. En Chile, esta situación se asocia a la zona norte del país, donde las condiciones geológicas, geográficas y climáticas favorecen la génesis de depósitos salinos (INN, 2016).

La NCh 3394 (Suelo Salino – Requisitos geotécnicos y de instalaciones sanitarias para diseño y ejecución de obras) define los estándares bajo los cuales se debe construir en áreas que presentan condiciones favorables para esta amenaza. Por lo tanto, los instrumentos de planificación territorial deberán definir las áreas que podrían presentar condiciones favorables para esta amenaza. Estas áreas resultan de las unidades geológicas que existen en el área.

La definición de áreas de riesgo permite tomar medidas desde las metodologías de construcción para enfrentar esta amenaza. De esta forma, se recomienda asignar un nivel de amenaza alto a estas zonas, excepto en los casos en que existe otra amenaza que pudiera agravar la situación (por ejemplo, fallas que pudieran generar ruptura superficial). En estos casos, se recomienda la asignación de un nivel de amenaza muy alto.

b) Subsistencia por construcción de obras subterráneas o galerías mineras

Se refiere al hundimiento de la superficie del terreno, debido a la deformación y/o colapso de galerías generadas para la extracción de minerales o la construcción de túneles.

En el caso de faenas actuales o relativamente recientes, las áreas afectadas por esta amenaza se encuentran bien definidas, mientras que para las faenas más antiguas las redes de túneles pueden desconocerse parcial o totalmente.

Los instrumentos de planificación territorial deben buscar evitar el uso del territorio en las áreas donde existe condiciones favorables para esta amenaza y, en las áreas consolidadas, se deben tomar medidas para evitar el aumento de la vulnerabilidad.

c) Subsistencia por compactación

Se refiere a la consolidación del terreno como consecuencia del peso que ejercen los sedimentos o las construcciones. Algunos desencadenantes de este tipo de subsidencia son las vibraciones producidas por terremotos, explosiones y extracción de fluidos (agua, gas, petróleo).

Se identifican dos casos relevantes para la planificación territorial en Chile.

El primero de ellos es la subsidencia producto de la despresurización que resulta de la extracción de aguas subterráneas, que favorece la compactación y el consecuente hundimiento del terreno. Esta amenaza es difícil de percibir, porque actúa de forma muy lenta y relativamente homogénea en el terreno, pero sus efectos pueden ser importantes.

Además de la extracción de agua, posiblemente el principal condicionante es la existencia de unidades acuíferas con alto contenido de materiales finos, que son más propensos a compactarse.

Para esta amenaza, no es posible establecer o recomendar a priori una metodología de análisis, sin embargo, esta debe tener por objetivo identificar los factores condicionantes.

El segundo corresponde a materiales geológicos que presentan condiciones favorables para compactarse producto de sismos (el caso más relevante corresponde a los rellenos artificiales). Esta es una de las causas que determina la importancia de reconocer los rellenos artificiales que existen en el área planificada por el instrumento de planificación territorial. Por lo tanto, la metodología se debe orientar a identificar este tipo de depósitos, lo que puede ser muy difícil en territorios muy consolidados.

La mitigación de ambos tipos de subsidencia se debe enfrentar desde los métodos de construcción. Por lo tanto, es adecuada la definición de áreas de riesgo en estos sectores, que entreguen herramientas para exigir métodos constructivos adecuados. En consecuencia, se debe asignar un nivel de amenaza alto o, en casos extremos, muy alto.

1.3 AMENAZAS VOLCÁNICAS

1.3.1 Descripción general

Los volcanes corresponden a zonas en la corteza terrestre donde el magma alcanza la superficie. Existen distintos tipos de volcanes, cuyas morfologías y tipos de erupciones, se relacionan con el contexto geológico, composición química del magma y con su propia historia eruptiva.

Los volcanes se consideran geológicamente activos cuando han tenido, al menos, una erupción en los últimos 11.700 años (Holoceno) o bien, cuando, sin certeza de esto último, presentan signos de actividad como desgasificación, sismicidad o deformación del terreno.

Existen diversos tipos de procesos volcánicos considerados como amenazas. Entre ellas se encuentran caída de piroclastos, corrientes de densidad piroclástica, lahares, flujos de lava, emisiones de gases, avalanchas volcánicas, sismos asociados a volcanismo y tsunamis gatillados por actividad volcánica.

A continuación, se describen cuatro de las principales amenazas, que corresponden a las amenazas más frecuentes y que, en general, es posible zonificar. Estas definiciones se basan en el trabajo de MIAVITA (2012).

Caída de piroclastos: material emitido al aire durante erupciones explosivas que son arrastrados por los gases calientes propios de la columna eruptiva o, que también, es eyectado a partir de explosiones en el centro de emisión, y que luego cae a la superficie terrestre por gravedad. Los fragmentos pueden ir desde los 0,001 mm hasta más de 10 m. En función del tamaño se clasifican en ceniza (<2 mm), lapilli (2-64 mm) o bomba/bloque (>64 mm). La caída de piroclastos finos o ceniza puede afectar grandes áreas y a un gran número de personas ya que son transportados por el viento. Por otro lado, las bombas y bloques siguen una trayectoria balística parabólica y pueden alcanzar distancias de hasta 10 km desde el origen de la erupción (sin embargo, normalmente su alcance es de unos 5 km).

Corrientes de densidad piroclástica (PDC, por sus siglas en inglés): son flujos controlados por la gravedad formados por gas y rocas volcánicas fragmentadas. Se transportan por las laderas del volcán a velocidades de entre 10 y 100 km/h, con temperaturas que pueden superar los 700 °C. Pueden ser gatilladas por diversas causas como: colapso gravitacional de una columna eruptiva, colapso gravitacional de un domo o lava silícea empinada, explosiones freatomagmáticas (en las que interactúan las rocas volcánicas calientes con agua externa), explosiones laterales, o por interacción de flujos de lava con nieve o hielo en volcanes de flancos empinados, entre otras. Estas corrientes han sido tradicionalmente llamadas flujos piroclásticos, pero en la actualidad la comunidad científica los denomina PDC ya que así se pueden caracterizar de mejor manera sus diferentes comportamientos a causa de la variabilidad en su densidad.

Según las diferencias de densidad, en general se dividen entre PDC diluido y PDC concentrado. A los más diluidos, es decir más ricos en gases, se les llama **oleadas piroclásticas**. Son extremadamente móviles (alcanzan velocidades de decenas a centenas de km/h, y excepcionalmente incluso pueden llegar hasta los 500 km/h) y producen depósitos finos, con espesores centimétricos a decimétricos. A los PDC más densos se les llama **flujos piroclásticos**, y su desplazamiento está controlado por la topografía, por lo que generalmente avanzan por valles o zonas de bajas altitudes.

Lahares: corresponden a flujos de detritos formados por agua y material volcánico suelto. Para que se formen lahares debe haber agua, abundante material volcánico suelto y pendientes favorables, lo cual puede ocurrir en lugares de lluvias intensas tropical y/o con presencia de glaciares y lagos. Los lahares usualmente se desplazan por los cauces que descienden por laderas volcánicas y pueden alcanzar distancias de decenas a centenas de kilómetros desde su origen.

Los lahares pueden ocurrir durante una erupción (lahares primarios) o después de una erupción (lahares secundarios). Los **lahares primarios** pueden formarse de distintas maneras: por la erupción explosiva de un lago ubicado en un cráter, por el derretimiento de nieve y/o hielo provocado por lavas o flujos piroclásticos, o por la movilización de depósitos de tefra a causa de lluvias intensas. Los **lahares secundarios** pueden ocurrir horas, años o miles de años después de una erupción y pueden formarse por removilización de depósitos de tefra por lluvias intensas, deslizamientos en laderas de volcanes que se encuentran alteradas por actividad fumarólica durante lluvia torrencial, o por caída de material volcánico represando lagos.

Flujos de lava: corresponde a roca fundida emitida por un volcán durante una erupción, con temperaturas que van desde los 650 °C a los 1200 °C. Las lavas pueden fluir y alcanzar distintas distancias a una gran variedad de velocidades (desde pocos metros a decenas de km/h) lo que depende de su composición, temperatura, tasa efusiva, viscosidad, densidad y de la topografía de la superficie por la cual se desplazan.

1.3.2 Metodologías

De acuerdo con el trabajo recopilatorio de Ogburn, et al. (2023), las metodologías utilizadas para la construcción de mapas de amenaza volcánica en el mundo, por lo general se basan principalmente en uno de los siguientes métodos o una combinación de ellos:

- Historia geológica: incluye registros históricos de la historia eruptiva, mapeo de campo e interpretación de los depósitos e información de volcanes análogos. También puede incluir criterio experto o diagramas de árbol de eventos para incorporar el conocimiento geológico y la información análoga.
- Modelación de escenarios: utiliza modelos numéricos para simular escenarios de erupciones de interés. Se basa en un número limitado de modelaciones con parámetros de entrada seleccionados que permitan modelar escenarios específicos basados en la historia eruptiva.
- Modelación probabilística: se basa en un gran número de modelaciones, del orden de miles, junto con un tratamiento estadístico de los parámetros de entrada. Dado que el objetivo de estos mapas es mostrar diferentes probabilidades de un proceso, estos mapas suelen ilustrar un solo proceso volcánico a la vez.

La metodología propuesta a continuación propone una combinación entre estos métodos y está fundamentada en tres trabajos principales:

- MIAVITA (2012). Handbook for Volcanic Risk Management. Prevention, crisis management, resilience.
- Jorquera, C. (2018). Análisis de peligro volcánico por flujos de lava y corrientes de densidad piroclástica en los estratovolcanes activos Callaqui, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile.
- Vera, F. (2023). Avances y desafíos en la evaluación de peligros volcánicos en la Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile.

Además, se tuvo como referencia el trabajo realizado por la Unidad de Geología y Peligros de Sistemas Volcánicos de SERNAGEOMIN, en particular dos de sus más recientes mapas:

- Toloza, V.; Jorquera, C.; Mella, M; Gho, R. (2020) Peligros del Complejo Volcánico Puyehue-Cordón Caulle, regiones de Los Ríos y Los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 36: 63 p., 1 mapa escala 1:75.000. Santiago.
- Vera, F.; Jorquera, C.; Amigo, Á.; Bertin, L. (2022). Peligros de los volcanes Descabezado Grande, Cerro Azul, Quizapu y centros eruptivos menores, región del Maule. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 39: 99 p., 1 mapa escala 1:75.000. Santiago.

Antecedentes

La recopilación y revisión de antecedentes tiene por objeto conocer lo mejor posible el volcán o volcanes que se encuentran en el territorio. La información requerida para tener un conocimiento acabado de los centros eruptivos se puede obtener a partir de estudios técnicos y científicos, y de reportes de monitoreo volcánico. A continuación, se mencionan los principales insumos necesarios:

- Historia eruptiva: esta información se obtiene de los estudios geológicos y sus dataciones, pero también de los registros históricos existentes. Conocer la historia eruptiva permite comprender la dinámica pasada y actual del volcán y estimar su evolución a futuro. Esto incluye poder conocer ubicación de los cráteres, altura de columnas eruptivas, volúmenes eruptados, tasas eruptivas, duración de erupciones, recurrencia eruptiva.
- Mapas geológicos: idealmente un mapa geológico específico del volcán, que incluya los depósitos volcánicos más recientes y/o extensos y sus características principales (tipo de depósitos, estilo eruptivo, química, etc.), sus edades relativas o absolutas y las características estructurales principales. Esta información permite reconocer el tipo de actividad que ha tenido el volcán y tener una noción de los alcances que han tenido sus productos volcánicos para identificar zonas susceptibles a ser afectadas por procesos volcánicos.
- Geomorfología: resulta necesario obtener un modelo de elevación digital (DEM) de alta resolución que abarque desde el volcán hasta el área que se va a planificar. El DEM permite reconocer la geomorfología (las formas del territorio) que dan indicios de erupciones previas y, además, permite evaluar el alcance y dispersión de aquellas amenazas volcánicas que dependen fuertemente de la topografía.

Diagnóstico

El diagnóstico se desarrolla usando como base los antecedentes recopilados para poder caracterizar el o los volcanes. Esta caracterización se debe orientar a entregar información para la definición de escenarios eruptivos y la modelación de las amenazas. La selección de las amenazas volcánicas que se evalúan se realiza en función de la historia eruptiva de cada volcán. Así, la caracterización se debe orientar a las siguientes variables:

- Zonas de cráteres (zonas con similar probabilidad de activación de cráteres)
- Reconocimiento de alcances, magnitudes, volúmenes y otros parámetros físicos de las amenazas volcánicas, que sean de utilidad para la posterior aplicación de modelos numéricos.
- Eventos históricos y prehistóricos.
- Definición de erupciones de referencia con sus características.

Es importante considerar que el registro geológico puede mostrar erupciones extremadamente antiguas e improbables y, por lo tanto, se debe definir, en el marco de la planificación territorial, cuáles son los eventos que se quieren considerar para la toma de decisiones. Esta decisión debe ser el resultado de la revisión de eventos históricos y prehistóricos, que permitan escoger las erupciones que se utilizarán como referencia.

A continuación, se presentan algunas variables específicas según el tipo de amenaza que se analiza (Cuadro 1.11).

Cuadro 1.11 Variables requeridas para el estudio de cada amenaza.

Amenaza	VARIABLES ESPECÍFICAS DE LA AMENAZA
Caída de piroclastos	Tamaño y distancia alcanzada, espesor a diferentes distancias, direcciones y velocidad de viento, tasa de acumulación
Corrientes de densidad piroclástica (PDC)	Volumen o área de influencia, morfologías.
Lahares	Material suelo, precipitaciones importantes, hielo, nieve, posibles represamientos, lagos cratéricos.
Flujos de lava	Composición y morfologías.

Fuente: Elaboración propia.

Existen distintas formas de establecer escenarios. En general se consideran diferentes tamaños de erupciones, basados en el Índice de Explosividad Volcánica (VEI), o diferentes rangos de volúmenes de las amenazas volcánicas. Otra posibilidad es considerar escenarios basados en el estilo eruptivo o proceso de amenaza, como efusivo, explosivo, formación de domo, erupción freática, formación de lahares por lluvia o derretimiento de nieve. También es posible considerar el escenario más probable o el peor escenario considerando erupciones pasadas específicas, ya sea del volcán de estudio o un volcán análogo.

1.3.3 Caída de piroclastos

La caída de piroclastos debe considerar dos situaciones de forma paralela, relacionadas con el material grueso y fino.

El análisis de esta amenaza debe utilizar como indicador las evidencias, es decir, el alcance y tamaño de los bloques para el material grueso y el espesor acumulado en función de la distancia al centro eruptivo y tasas de acumulación para el material fino. Además, deben considerarse variables climáticas (velocidad y dirección).

La caída de material más grueso (bombas o bloques) que siguen trayectorias balísticas puede provocar destrucción de edificios o lesiones (o incluso muerte) de personas. Por lo tanto, si es que la recurrencia de las erupciones lo justifica, se debe considerar que el área no presenta condiciones para su utilización de forma segura, y por lo tanto, se debe asignar un nivel de amenaza muy alto.

La acumulación de material piroclástico fino puede afectar a las edificaciones como una sobrecarga, que debe enfrentarse mediante exigencias constructivas que impidan la acumulación de material. Si bien es una amenaza que puede producir efectos importantes, existen medidas concretas que se pueden definir en instrumentos de planificación territorial (por ejemplo, pendiente de los techos). En este sentido, el nivel de amenaza moderado es suficiente para enfrentar esta amenaza.

Para el caso de bombas o bloques, es posible utilizar un modelo probabilístico denominado Ballistics (Bertin, 2017) y para el material piroclástico más fino se puede usar el modelo Tephra 2 (Bonadonna, y otros, 2005)

1.3.4 Corrientes de densidad piroclástica (PDC)

La intensidad de un PDC, representada por el alcance del proceso, va a estar asociada a la recurrencia de la amenaza y, por lo tanto, se define a partir de los escenarios eruptivos establecidos. Se sugiere establecer estos escenarios para una recurrencia de menor a 100 años, entre 100 y 1000 años y mayor a 1000 años. Sin embargo, esto puede ser modificado, según el registro eruptivo estudiado y sus características. Para cada escenario existen dos opciones de intensidad el máximo (capacidad para destruir todo como resultado del evento) y el nulo. Dadas las características del proceso, no corresponde la asignación de niveles de intensidad intermedios

Aunque es posible obtener el alcance a partir de antecedentes geológicos y de modelaciones numéricas de forma separada, los mejores resultados se obtienen cuando se utilizan ambas fuentes de información de forma conjunta. En los casos que exista información, se puede establecer el o los escenarios y modelarlos. En los casos que no hay información, se debe utilizar un volcán análogo o utilizar modelos probabilísticos. Para los PDC algunos de los modelos numéricos que se utilizan son: Conos de energía de secciones transversales rectas (Malin & Sheridan, 1982) y Volcflow (Kelfoun & Druitt, 2005).

El criterio general para la asignación de niveles de amenaza bajo este enfoque se sistematiza en el esquema del Cuadro 1.12.

Cuadro 1.12 Criterios para asignar niveles de amenaza de corrientes de densidad piroclástica en función de la recurrencia y el alcance.

		Recurrencia		
		≤ 100 años	> 100 años ≤ 1000 años	> 1000 años
Intensidad	Con alcance asociado a escenario eruptivo para la recurrencia dada	Muy alto	Alto	Moderado
	Sin alcance	Poco significativo	Poco significativo	Poco significativo

Fuente: Elaboración propia.

1.3.5 Lahares

Los lahares se pueden analizar mediante diferentes enfoques. A continuación, se describen algunos de ellos, partiendo desde los más simples hasta los más complejos.

El primero de ellos se basa en antecedentes geológicos y geomorfológicos, que complementados con información climática e histórica entregan un marco general para la identificar si es que existen condiciones para que se generen lahares. Esta forma de analizar la amenaza entrega una primera visión de esta amenaza, pero, además, sirve como base para desarrollar cualquier otra metodología.

Luego, existen modelos numéricos que permiten identificar las zonas afectadas por la amenaza, para un determinado escenario (basado en características de depósitos laháricos para cierta recurrencia y/o volumen de agua de disponible). Este es el segundo enfoque.

Se propone establecer escenarios para una recurrencia de menor a 100 años, entre 100 y 1000 años y mayor a 1000 años. Pero esto puede ser modificado, según el registro eruptivo estudiado y sus características.

Para los lahares algunos de los modelos numéricos que utilizados son: LaharZ (Schilling, 1998), Ramms (WSL, 2013) y LaharFlow (<https://www.laharflow.bristol.ac.uk/>).

El criterio general para la asignación de niveles de amenaza bajo este enfoque se sistematiza en el esquema del siguiente cuadro:

Cuadro 1.13 Criterios para asignar niveles de amenaza de lahares en función de la recurrencia y el alcance.

		Recurrencia		
		≤ 100 años	> 100 años ≤ 1000 años	> 1000 años
Intensidad	Con alcance asociado a escenario eruptivo para la recurrencia dada	Muy alto	Alto	Moderado
	Sin alcance	Poco significativo	Poco significativo	Poco significativo

Fuente: Elaboración propia.

El enfoque descrito anteriormente es adecuado para aplicarse en instrumentos de planificación territorial de escala intercomunal y, posiblemente, comunal.

El tercer enfoque está orientado a definición de niveles de amenaza en zonas acotadas y se debiera aplicar únicamente en instrumentos de planificación territorial de alcance comunal.

Este consiste en que, una vez que se tiene el volumen que escurre, se utilizan modelos hidráulicos para estimar alturas y velocidades de escurrimiento. Para poder utilizar este tipo de modelos se requiere contar con una gran cantidad de información, que difícilmente estará disponible con el nivel de detalle adecuado para ser utilizado en instrumentos de planificación territorial.

Para estos casos, se recomienda asignar los niveles de intensidad utilizando los criterios propuestos por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH), que se basa en la altura y velocidad de escurrimiento¹⁵, que se sintetizan en el siguiente cuadro:

Cuadro 1.14 Criterios para definir intensidad de inundación por desborde de cauces en función de alturas de inundación (H) y/o velocidades de escurrimiento (v).

Intensidad ¹⁶	CRITERIO DOH-MOP	
Alta	$H \geq 1 \text{ m}$	o $v * H \geq 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Media	$0,5 \text{ m} \leq H < 1 \text{ m}$	o $0,5 \text{ m}^2/\text{s} \leq v * H < 1,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Baja	$0,1 \text{ m} \leq H < 0,5 \text{ m}$	o $0,1 \text{ m}^2/\text{s} \leq v * H < 0,5 \text{ m}^2/\text{s}$
Despreciable	$H < 0,1 \text{ m}$	$v * H < 0,1 \text{ m}^2/\text{s}$

Fuente: Basado en los criterios definidos por DOH MOP.

Una vez que se han asignado niveles de intensidad, se recomienda utilizar la siguiente matriz para asignar niveles de amenaza:

¹⁵ Ordinario DOH N° 2852 (30 de septiembre de 2021).

¹⁶ Las categorías para los intervalos de intensidad se pueden nombrar de distintas maneras. MOP-DOH usa "alta", "media" y "baja". En esta tabla se agregaron las categorías "muy baja" y "despreciable". En otros trabajos también se usa "extremo", "fuerte", "medio", "débil" y "despreciable", o también numérico (i1, i2, i3, i4, etc.).

Cuadro 1.15 Criterios para asignar niveles de amenaza de lahares en función de la recurrencia modelada y la intensidad resultante de la modelación hidráulica.

		Recurrencia		
		≤ 100 años	> 100 años ≤ 1000 años	> 1000 años
Intensidad	Alta	Muy alta	Alta	Alta
	Media	Alta	Moderada	Moderada
	Baja	Moderada	Moderada	Poco significativa
	Despreciable	Poco significativa	Poco significativa	Poco significativa

Fuente: Elaboración propia.

Los resultados que se obtienen mediante modelaciones hidráulicas son menos conservadores que mediante los enfoques anteriores. Esto tiene que ver con que estos modelos cuentan con una mayor certeza respecto de los resultados generados.

Por otro lado, si se comparan los criterios definidos para lahares con los de inundación por desborde de cauces, se observa que los primeros son más restrictivos. Esto se debe a que los escenarios en el caso de lahares son más inciertos que en inundaciones por desborde de cauces.

1.3.6 Flujos de lava

Al igual que para los PDC, la intensidad de los flujos de lava, representada por el alcance del proceso, va a estar asociada a la recurrencia de la amenaza y, por lo tanto, se define a partir de los escenarios eruptivos establecidos. Se sugiere establecer estos escenarios para una recurrencia de menor a 100 años, entre 100 y 1000 años y mayor a 1000 años. Sin embargo, esto puede ser modificado, según el registro eruptivo estudiado y sus características. Para cada escenario existen dos opciones de intensidad el máximo (capacidad para destruir todo como resultado del evento) y el nulo. Dadas las características del proceso, no corresponde la asignación de niveles de intensidad intermedios.

Aunque es posible obtener el alcance a partir de antecedentes geológicos y de modelaciones numéricas de forma separada, los mejores resultados se obtienen cuando se utilizan ambas fuentes de información de forma conjunta. En los casos que exista información, se puede establecer el o los escenarios y modelarlos. En los casos que no hay información, se debe utilizar un volcán análogo o utilizar modelos probabilísticos. Para los flujos de lava uno de los modelos numéricos que se utilizan es: Q-LavHA (Mossoux, y otros, 2016).

Cuadro 1.16 Criterios para asignar niveles de amenaza de flujos de lava en función de la recurrencia y el alcance.

		Recurrencia		
		≤ 100 años	> 100 años ≤ 1000 años	> 1000 años
Intensidad	Con alcance asociado a escenario eruptivo para la recurrencia dada	Muy alto	Alto	Moderado
	Sin alcance	Poco significativo	Poco significativo	Poco significativo

Fuente: Elaboración propia.

1.4 AMENAZAS SÍSMICAS

1.4.1 Descripción general

Un sismo es el resultado de la liberación de energía en forma de ondas que ocurre durante el proceso de ruptura en una falla geológica. Esta energía se acumula debido a los esfuerzos tectónicos en la litósfera y se libera cuando estos superan la resistencia de la roca o de la falla.

Aproximadamente el 10% de la energía liberada durante el proceso de ruptura se propaga en forma de ondas sísmicas, siendo esta la manifestación más reconocida del fenómeno. El resto se libera en forma de calor, ruptura de rocas, deformación del material en la falla y desplazamiento o movimiento en la misma falla.

Estos eventos generan diversos efectos sobre la superficie terrestre que son considerados amenazas sísmicas. Para efectos de la planificación territorial, las dos principales amenazas que se pueden analizar son: (1) rupturas superficiales de la falla y/o (2) efecto de sitio, que responde a la amplificación de las ondas sísmicas que se propagan por el medio a causa de condiciones particulares del sitio analizado.

La forma en que las estructuras se diseñan para disminuir los daños en su interacción con las ondas sísmicas y otras materias de construcción están desarrolladas en las normas chilenas NCh433 y NCh2369, y no forman parte de los contenidos de esta guía.

La **ruptura superficial de falla** resulta de la activación de una falla geológica que afecta la superficie del terreno. Esta genera cambios directos y circunscritos a la traza de la falla en la superficie del terreno o a su cercanía inmediata. Este fenómeno puede provocar daños significativos en las estructuras afectadas.

Por su parte, los materiales terrestres que son propensos a sufrir el **efecto de sitio** corresponden a depósitos y roca altamente meteorizada o masas inestables, como depósitos de remociones en masa, coluvios, materiales aluviales en general y especialmente aquellos de granulometrías finas. Estos materiales logran amplificar el movimiento sísmico en la superficie, pudiendo generar graves daños en las construcciones e infraestructura que están sobre ellos.

1.4.2 Ruptura superficial de falla

La ruptura superficial de falla ocurre cuando la propagación durante un evento sísmico alcanza la superficie de la Tierra, y se produce una deformación en la superficie durante el mismo sismo. Esta deformación puede ser discreta o difusa y, por lo tanto, puede generar un escarpe de falla, una serie de fisuras, o un abombamiento o depresión en el terreno.

En general, la ruptura superficial de falla se asocia a aquellos movimientos sísmicos que ocurren en fallas corticales superficiales, para eso el sismo debe ser de una magnitud tal que la ruptura alcance a propagarse hasta la superficie. No todos los sismos en fallas corticales alcanzan a producir una ruptura en superficie y no todas las fallas en la corteza de la Tierra pueden producir sismos. Con respecto a las recurrencias, las rupturas superficiales pueden tener periodos de retorno de centenas, miles o decenas de miles de años y no necesariamente son intervalos regulares, por lo que se requiere un estudio profundo y acabado del comportamiento de la falla para poder estimar una recurrencia promedio.

De lo anterior surge el concepto de falla activa, que corresponde a una falla que puede generar movimientos sísmicos en el futuro en respuesta al campo de esfuerzo al que se encuentra sometida, que es resultante del régimen tectónico en que se ubica.

Se debe considerar como una falla activa a aquella que cumpla con alguna de las siguientes características:

- Ha generado sismos de data histórica
- Presenta microsismicidad
- Corresponde a un margen entre placas tectónicas actuales
- Presenta actividad holocena comprobada mediante dataciones
- Desplaza o deforma depósitos o materiales geológicos de edad relativa holocena, o de depósitos o materiales más antiguos si su desplazamiento acumulado permite estimar, directa o indirectamente, una tasa de deformación a largo plazo (incluyendo el Holoceno) mayor o igual a 0.1 mm/año
- Deforma o desplaza elementos morfológicos del terreno como abanicos aluviales, terrazas fluviales, campos dunarios de edad holocena, o a morfologías más antiguas si su desplazamiento acumulado permite estimar directa o indirectamente una tasa de deformación a largo plazo (incluyendo el Holoceno) mayor o igual a 0.1 mm/año
- Presenta un escarpe de falla o deformación en superficie asociada a su trazado que cumpla con alguno de los dos puntos anteriores

Lo anterior se propone como criterios mínimos para poder considerar a una falla como una falla activa. Si bien, en algunos países existen legislaciones o normas que señalan una definición de falla activa en función de su última actividad, por ejemplo, en Italia se considera activa una falla cuya última actividad ha ocurrido en los últimos 40 mil años (Technical Commission for Seismic Microzonation, 2017b) y en California se considera activa una cuya última actividad ha ocurrido en el Holoceno (Act, Alquist-Priolo. E. F. Z. 1999). En otros países según la recurrencia de su actividad, por ejemplo, en Nueva Zelanda se distinguen aquellas fallas que registran movimientos en los últimos 120 mil años y su actividad se clasifica según rangos determinados de la recurrencia promedio de su ruptura (Kerr et al., 2003). En el caso chileno, que comprende diversos ambientes tectónicos (Convergencia oblicua desde la península de Taitao al norte, régimen transcurrente en Magallanes y Tierra del Fuego, por ejemplo) no es recomendable establecer una definición de actividad en falla solamente considerando su último registro de actividad debido a que existen diferentes tasas y estilos de deformación que no necesariamente se manifiestan mediante evidencias en un período geológico y terminaría siendo una definición arbitraria y se recomienda considerar los criterios previos a falta de una definición consensuada.

Para poder determinar la zona afecta a una ruptura superficial es necesario determinar la traza de la falla a una escala adecuada a la planificación urbana, particularmente a una escala 1:10.000 o de mayor detalle. Según numerosos trabajos, por ejemplo, SEREMI Minvu RM (2012), Technical Commission for Seismic Microzonation (2017b), Boncio et al. 2018, es importante reconocer la falla a partir de antecedentes y fotointerpretación de imágenes satelitales y/o fotografías aéreas, y con ello hacer una recopilación de estudios geofísicos y geotécnicos en el entorno de la falla, estudios de análisis paleosismológico y radiometría para establecer la edad de la actividad de la falla.

Teniendo los insumos mencionados y en base a la propuesta metodológica de Morgenstern y VanDissen (2021) se debe proceder a:

- Identificar todo lo relacionado al conocimiento de la traza de la falla y sus características.
- Cartografiar y definir la ubicación de la traza de la falla.
- Clasificar las partes de la falla en términos de la complejidad de la superficie de ruptura de la falla.
- Definir la zona de exclusión/prohibición alrededor de la falla.
- Determinar el intervalo de recurrencia promedio de la ruptura superficial de la falla.

Respecto a la zona de exclusión/prohibición a determinar alrededor de la falla, en el mundo existen experiencias donde varía el ancho de estas franjas, las cuales se configuran a partir de las últimas fallas secundarias observadas. En países como Estados Unidos y algunas zonas de Nueva Zelanda, el ancho de la franja varía entre 15 y 20 metros a cada lado de la traza. En zonas de este último país donde la franja establecida no ha sido suficiente frente a algunos eventos, se amplía su ancho entre 20 y 300 m a cada uno de los lados de la traza. Para el caso de Japón, la infraestructura crítica se prohíbe en una franja de 100 m a cada lado de la traza. Finalmente, en el caso de Chile, SEREMI Minvu RM (2012) han recomendado una franja de 300 m (diferenciada a cada lado de la traza) para la falla de San Ramón. Cabe destacar que estudios han registrado, para sismos con ruptura en superficie, deformación en el terreno por sobre 1 km de distancia respecto a la falla (Boncio et al., 2018).

El estilo y distribución de la deformación cortical asociada a la ruptura superficial de la falla dependerá de varios factores, como el tipo de falla (normal, inversa o de rumbo), si es zona de relevo o corresponde a la misma falla, el tipo de suelo, la relación de la geometría de la falla con respecto a la disposición de la superficie del terreno.

Las rupturas superficiales de fallas, debido a que implican el desplazamiento del terreno a lo largo de la traza de la falla, son conducentes a daños extremos sobre las edificaciones que se encuentran emplazadas sobre ella. En aquellos sectores que no están sobre la franja de la traza, los efectos de una activación están dados por las aceleraciones sísmicas (efecto de sitio), y no por la ruptura superficial del terreno. A su vez, la magnitud del desplazamiento del terreno es altamente impredecible, y por lo tanto, no es posible establecer rangos de desplazamiento que se asocien a mayores o menores daños sobre las estructuras. Es decir, la intensidad de esta amenaza tiene 2 niveles posibles: o es de intensidad extrema (si se está sobre la franja de la traza de la falla) o es de intensidad despreciable (si no se está sobre ella).

La zonificación para una falla activa se realiza mediante la delimitación de una franja asociada a la traza de la falla, cuya extensión también debe ser acordada entre los OAE con competencias técnicas en la materia, pero que puede oscilar entre los 150 m y 1 km de distancia a la traza (dependiendo del grado de conocimiento que se tenga sobre la misma). Se considera que a mayor conocimiento de la falla es más factible establecer una faja de restricción más acotada.

1.4.3 Efecto de sitio

Para este subtipo de amenaza se requiere una recopilación inicial de antecedentes relacionados a la geología superficial para así identificar las unidades cuaternarias y depósitos más recientes, información geofísica como mediciones Vs30, frecuencia/período fundamental del suelo (f_0 y T0) y mediciones gravimétricas, inventario de sismos pasados y sus efectos.

Con ello y de acuerdo con la metodología propuesta por Olivares et al. (2023) se recomienda,

- Obtener información litoestratigráfica de la zona de estudio que esté disponible.
- Inventariar los pozos existentes para poder caracterizar la estructura del suelo y sus propiedades.
- Usar la técnica HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*, por sus siglas en inglés) para caracterizar el espesor de la cobertura sedimentaria y su respuesta de sitio a partir de microtemblores.
- Reconstruir, dentro de lo posible, la ubicación del techo de la roca caja sísmica a través de la inversión de las curvas H/V, acorde a la información geológica y litológicas disponible y con un criterio de mínima variabilidad lateral de los parámetros físicos y geométricos.
- De ser posible incluir métodos geofísicos como refracción sísmica, tomografías de resistividad eléctrica y radares de penetración del suelo para obtener información adicional de las propiedades del subsuelo.
- Realizar pozos para obtener muestras de suelo y testearlas en un laboratorio para medidas de velocidad de ondas de corte.
- Usar toda la información disponible para crear un mapa de microzonificación sísmica.

Cabe señalar que la norma NCh 433 establece una relación entre la Vs30 y el tipo de suelo existente bajo la superficie.

Un caso particular de efecto de sitio corresponde al proceso de "licuefacción", en que los suelos arenosos de poca densidad saturados de agua pierden su resistencia y se comportan como un líquido durante un terremoto u otra carga dinámica intensa. Para la evaluación de este proceso se tienen diversas metodologías, cuyos rasgos generales se expresan en metodología propuesta por Beroya y Aydin (2010):

- Reconocer y agrupar geológica y geomorfológicamente zonas con una distribución uniforme del tamaño de grano e inserto en ambientes proclives a inundarse como llanuras de inundación, cauces de río, deltas y barreras de arena costera.
- Identificar en superficie evidencias de licuefacción como volcanes de arena, estructuras de desplazamiento lateral, sectores de subsidencia, etc.
- Asignar una susceptibilidad preliminar a cada una de las unidades establecidas previamente.
- Recopilar información sobre la densidad y espesor de los depósitos que componen el subsuelo por medio de perfiles de resistividades, pozos o el uso de microtemblores con la técnica HVSR.
- Generar un mapa de clasificación de sitio utilizando los registros de microtemblores y otros, el cual puede servir también como un mapa de amenaza por onda sísmica.
- Integrar el mapa de susceptibilidad de amenaza por licuefacción preliminar con el mapa de clasificación de sitio para obtener unidades que por su espesor, densidad y capacidad de amplificación de la onda sísmica estén propensas generar procesos de licuefacción.

Las intensidades asociadas a este fenómeno están en directa relación con las aceleraciones sísmicas locales: mayores aceleraciones son conducentes a mayores daños. En caso de contar con datos, se puede tomar en cuenta el factor de amplificación de las ondas sísmicas para definir distintos niveles de amenaza. En aquellos casos donde solo se cuente con información geológica, las características de los suelos pueden entregar una definición genérica de la respuesta de los suelos, donde los suelos más finos tienden a tener peores respuestas sísmicas que los suelos más gruesos, y estos, a su vez, peores respuestas que los macizos de roca fresca.

1.5 AMENAZAS ANTRÓPICAS

1.5.1 Amenazas por suelos contaminados

a) Suelos abandonados con presencia o identificación de sustancias contaminantes o peligrosas, por actividades humanas extinguidas

La presencia de contaminantes en el suelo puede generar importantes riesgos a los componentes del medio ambiente y la salud de las personas, debido a que los contaminantes del suelo pueden escurrir superficialmente y también permear a las capas inferiores del subsuelo, transportando sustancias químicas a las aguas subterráneas, produciendo efectos nocivos sobre el ecosistema y la salud de las personas (MMA, 2012).

Esta amenaza será abordada según lo dispuesto en el Decreto que modifica la Ley General de Urbanismos y Construcción, inciso 2, letra j)¹⁷, la cual considera como área de riesgo a aquellas "áreas o terrenos deteriorados por actividades humanas extinguidas con suelos abandonados con presencia o identificación de sustancias contaminantes o peligrosas".

En Chile, existe un marco normativo e instrumentos de gestión asociados a la presencia de contaminantes en el suelo, según se puede sintetizar en el siguiente cuadro:

Cuadro 1.17: Marco normativo e instrumentos de gestión asociados a suelos abandonados con presencia o identificación de sustancias contaminantes o peligrosas

Marco normativo	Instrumentos de gestión
Ley 20.417 que modifica la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente: establece en el art 70, letra g) que es deber del Ministerio de Medio Ambiente "proponer políticas y formular normas, planes y programas en materia de residuos y suelos contaminados, así como la evaluación del riesgo de productos químicos, organismos genéticamente modificados y otras sustancias que puedan afectar el medio ambiente".	Política Nacional para la Gestión de Sitios con Presencia de Contaminantes, (2009): su objetivo es establecer las bases de un Sistema de Gestión de Sitios Contaminados en el país, que permita reducir los riesgos asociados a la salud de la población y medio ambiente a través de una gestión coordinada, sustentable y costo eficiente.
Decreto 40, del Ministerio del Medio Ambiente: establece en el art. 3 los tipos de proyectos susceptibles de causar impacto ambiental, letra O.11): reparación o recuperación de áreas que contengan contaminantes, que abarquen, en conjunto, una superficie igual o mayor a diez mil metros cuadrados (10.000 m ²), salvo que se trate de medidas que formen parte de una propuesta de plan de reparación a que se refiere el art. 43 de la Ley Orgánica de la Superintendencia del Medio Ambiente, cuyo texto fue fijado por el art. 2 de la Ley 20.417, caso en el cual se aplicará lo dispuesto en dicha disposición y en su Reglamento.	Guía de evaluación de impacto ambiental. Riesgo para la salud de la población en el SEIA, (2012): se define el concepto de contaminante, peligro, riesgo y exposición según el art. 11 de la Ley 19.300.
Decreto 148, del Ministerio de Salud: establece las condiciones sanitarias y de seguridad a que deberá someterse la generación, tenencia, y disposición de residuos peligrosos.	
Resolución Exenta 1.690, que aprueba la Metodología para la Identificación y Evaluación Preliminar de Suelos Abandonados con Presencia de Contaminantes: se define el procedimiento que debe desarrollarse cuando se investiga un suelo de estas características, para ser aplicado por el MMA en el territorio nacional.	
Resolución Exenta 406, que aprueba la Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes: define	

¹⁷ Modifica Decreto Supremo N° 47, de Vivienda y Urbanismo, de 1992, Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones en el sentido de adecuar sus normas a la Ley N° 20.582, en materia de Normas para la Reconstrucción (Inédito).

Marco normativo	Instrumentos de gestión
los procedimientos para estandarizar la investigación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes en el país, para lo cual se describen las etapas y procedimiento requeridos.	

Fuente: Elaboración propia en base a CONAMA, (2007); MMA, (2012); SEA, (2012); MMA, (2016).

A partir de las definiciones emitidas por la Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (2012), es posible señalar que el análisis del riesgo de los suelos abandonados con presencia o identificación de sustancias contaminantes¹⁸ se circunscribe a un lugar o territorio específico de evaluación:

- Suelos con Presencia de Contaminantes (SPC): *Lugar delimitado geográficamente que mediante una evaluación de riesgo ambiental se ha determinado que existe nivel de riesgo relevante para las personas o al medio ambiente.*
- Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC): *Lugar o terreno delimitado geográficamente en el que se desarrollan o han desarrollado actividades potencialmente contaminantes. Incluye a suelos abandonados y activos o en operación.*
- Suelos Abandonados con Potencial Presencia de Contaminantes (SAPPC): *Lugar o terreno delimitado geográficamente que ha sido impactado ambientalmente por una actividad potencialmente contaminante que ha cesado sin la implementación de una adecuada fase de cierre.*
- Suelos Abandonados con Presencia de Contaminantes (SAPC): *Lugar o terreno delimitado geográficamente, donde, mediante una evaluación de riesgo ambiental se ha determinado que existe un nivel de riesgo relevante, comprometiendo el orden público, respecto del cual no es posible hacer efectiva la responsabilidad de quien lo causó.*

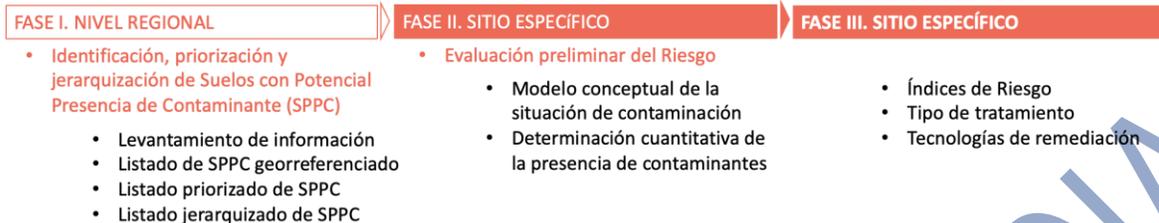
También cabe señalar el concepto de contaminante como "todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o biológico, energía, radiación, vibración, ruido, o una combinación de ellos, cuya presencia en el ambiente, en ciertos niveles, concentraciones o períodos de tiempo, pueda constituir un riesgo a la salud de las personas, a la calidad de vida de la población, a la preservación de la naturaleza o a la conservación del patrimonio ambiental", debido a que en el presente estudio se analizará solamente la potencial presencia de sustancias químicas, entendiéndose para dicho efecto "todo elemento, compuesto, sustancia, derivado químico o una combinación de ellos presente en el suelo".

i) Metodología para determinar la amenaza

Para determinar la amenaza de suelos deteriorados por actividad humana, se considerará la metodología brindada por la "Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes", (2012), del Ministerio de Medio Ambiente, correspondiente a la Fase 1, "Identificación, Priorización y Jerarquización de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC)", Fase 2, "Evaluación Preliminar Sitio-Específica del Riesgo de SPPC", y pero solo hasta la actividad de investigación preliminar, ya que la metodología a utilizar busca un análisis básico que permita delimitar Suelos con Presencia de Contaminantes (SPC) en función la presencia de fuente(s) de contaminación.

¹⁸ (Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, Título I, art. 2 letra d)

Ilustración 1-2: Fases metodológicas para la gestión de suelos contaminados.



Fuente: Elaborado de la Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes", (2012), del Ministerio de Medio Ambiente

A continuación, se indica la metodología propuesta por la Guía, sobre la base de la "Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes", (2012) o la que la reemplace, sintetizando las actividades y principales productos en el siguiente cuadro:

Cuadro 1.18: Metodología para determinar amenaza antrópica por Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC)

Fase	Actividades	Principales productos
1. Regional: Identificación, priorización y jerarquización	1.1 Levantamiento de información	Actividades potencialmente contaminantes por región.
	1.2 Identificación y georreferenciación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes	Base de datos georreferenciada de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, y mapa de localización de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes.
	1.3 Inspección de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes	Elaboración de un Estudio Histórico y Geográfico.
2. Sitio específico: evaluación preliminar	2.1 Investigación Preliminar:	Mapa de zonificación de la amenaza antrópica por Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, a nivel regional y comunal.

Fuente: Elaboración Propia en base a Ministerio del Medio Ambiente, (2012).

La primera fase de la metodología considera cuatro actividades a) levantamiento de información, b) identificación y georreferenciación de SPPC, c) priorización de SPPC, y d) Inspección de SPPC.

El **levantamiento de información** tiene por objetivo determinar aquellos lugares donde se ha realizado alguna actividad productiva definida como potencialmente contaminante. Para ello, se realiza una recopilación bibliográfica de los sectores, rubros o actividades productivas donde se producen, utilizan, manipulan, almacenan o disponen sustancias o residuos peligrosos que pueden o pudieron derivar en la generación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC): actividades mineras, refinerías de petróleo, fundiciones, termoeléctricas y metalúrgicas, almacenamiento de plaguicidas, industrias manufactureras potencialmente contaminadoras, industrias artesanales potencialmente contaminadoras, rellenos y/o vertederos, botaderos clandestinos y confinamiento de residuos industriales, zonas de derrames o accidentes químicos ambientales, almacenamiento transitorio de residuos peligrosos, aserraderos y cepilladura de madera, y otros.

Adicionalmente, la "Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes", (2012) brinda un listado con fuentes de información disponibles y entrega los nombres de las principales instituciones a ser consultadas (Ver Cuadro 1.19).

Cuadro 1.19: Listado de fuentes con información disponible

Institución	Documento	Descripción	Año
Instituto Nacional de Estadísticas	Directorio Industria Manufacturera	Base de datos de industrias manufactureras por región.	2009
Servicio de Evaluación Ambiental	Servicio de Evaluación Ambiental	Levantamiento de información de empresas que han presentado proyectos al sistema.	-
Seremi de Salud	Identificación de generadores de residuos peligrosos	Sin descripción	-
Servicio Agrícola y Ganadero	Almacenamiento de plaguicidas	Sin descripción	-
Servicio Nacional de Geología y Minería	Actualización Catastro de Faenas Mineras Abandonadas y Paralizadas 2010: Análisis Preliminar de Riesgos	Sin descripción.	2010
Ministerio de Medio Ambiente	Listado de Ecosistemas Hídricos Priorizados	Sin descripción.	-
Ministerio de Medio Ambiente	Reportes del Registro de Emisiones y Transferencia de Contaminantes (2005-2008)	Base de datos nacional y regional que incluye información asociada a los siguientes componentes: - Aire: inventarios de fuentes fijas atmosféricas, y móviles del sector transporte. - Agua: registro del cumplimiento de las normas vigentes. - Residuos: registro de la naturaleza, volumen y destino de los residuos sólidos generados. Convenios internacionales: inventarios de sustancias agotadoras de ozono, cambio climático, sustancias químicas.	2005-2010
Superintendencia de Servicios Sanitarios	Boletín de Sanciones a Establecimientos Industriales	Boletín que informa los tipos de infracciones (calidad del servicio, incumplimiento de instrucciones y riles) en que incurren las empresas sanitarias y establecimientos industriales.	2010-2011
Ministerio del Medio Ambiente, (ex Conama)	Catastro de Industrias Químicas XII Región	Sin descripción.	-
Ministerio de Medio Ambiente, (ex Conama), Región de Magallanes y la Antártica Chilena	Diagnóstico y propuesta de recuperación en antiguos sitios de disposición final de residuos	Sin descripción.	2006

Fuente: Ministerio del Medio Ambiente, (2016).

Con los datos obtenidos a partir del levantamiento de información, se identificarán aquellas áreas con Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes y se elaborará una base de datos con la siguiente información que se lista en siguiente cuadro:

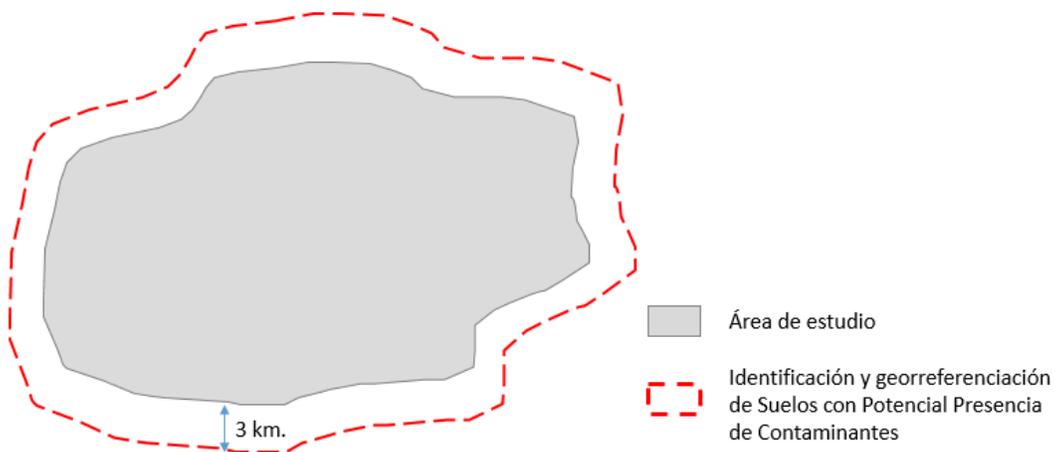
Cuadro 1.20: Información para elaboración de base de datos de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes

Ítem	Descripción
Código Región	Número identificador de la región.
Código Comuna	Número identificador de la comuna.
Glosa de la Comuna	Nombre de la comuna.
Coordenada X	Coordenada Este.
Coordenada Y	Coordenada Norte.
Coordenada UTM	Coordenada UTM según MOP (2011)
Razón Social y/o Nombre Asignado al SPPC	Para Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes activos generalmente corresponde al nombre de la empresa. En el caso de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes abandonados puede corresponder al nombre de la empresa que lo originó, titular, localidad, entre otros. Debe seleccionarse un nombre con el que se identificará al SPPC dentro del proceso.
Descripción de la Actividad. Glosa CIUU Rev.3 (SPPC activos)	Nombre de la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIUU) a la cual pertenece la actividad.
Clase CIUU Rev.3 (SPPC activos)	Número identificador de la actividad dada por la Clasificación Industrial Internacional Uniforme (CIUU).
Actividad(es) Potencialmente Contaminante(s)	Nombre de la(s) actividad(es) que se sospecha pueden provocar la contaminación.
Dirección y/o referencia	Dirección de la actividad productiva que incluya, de ser posible, al menos nombre de calle y numeración.
Teléfono	Número de teléfono de la Empresa o Persona Natural.
Observaciones	Campo destinado a complementar la información recopilada con otra información relevante.

Fuente: MMA, (2012).

La información obtenida de los Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes será georreferenciada y agregada a la base de datos predial (obtenida en la etapa de Diagnostico), siendo localizados aquellos Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes en un rango de hasta 3 km después del límite del área de estudio a planificar (Ver Ilustración 1-3: Identificación y georreferenciación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes):

Ilustración 1-3: Identificación y georreferenciación de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes



Fuente: DESE UC 2018

La Guía define un radio de 3 km a partir de la priorización señalada en la “Guía Metodológica para la Gestión de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes” (2012), donde se define que, en un radio de 2 a 3 km existe una prioridad media, dada la proximidad de las fuentes emisoras contaminantes a los centros poblados (exposición a la fuente contaminante).

Por otro lado, en el caso que las personas, independiente su número, den al suelo un uso residencial, en un radio igual o inferior a 2 km, se considera como prioridad alta. La Guía utilizará como valor de referencia la prioridad media, ya que su radio (3 km) contendría la prioridad alta (2 km)

Posteriormente, se realizará una “Inspección de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes” a través de la aplicación de una “Ficha de Inspección”, la cual permite orientar el levantamiento de información hacia la determinación de la presencia de fuente(s) de contaminación, de vía(s) de exposición y de población humana eventualmente expuesta a contaminantes, permitiendo corroborar la existencia de los tres elementos básicos para el análisis del riesgo asociado a esta amenaza (fuente-ruta-receptor) (MMA, 2012).

La ficha está compuesta por ocho ítems, y en términos generales su llenado contempla tres etapas: a) recopilación bibliográfica, b) levantamiento de información en terreno y c) revisión de toda la información disponible y llenado de todos los campos para calcular el nivel preliminar de riesgos.

Cabe destacar la relevancia de llenar aquellos ítems secundarios asociados a puntajes, ya que a partir de ellos se determinará la categorización preliminar de la amenaza de Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes.

A continuación, en el Cuadro 1.21, se presenta de manera sintética el contenido de la Ficha de Inspección:

Cuadro 1.21: Ficha de inspección

Ítem principal	Ítem secundario	Antecedentes solicitados
Información General	A. Identificación del SPPC	Nombre del SPPC, otro (s) nombre(s) asignado(s) al SPPC, nombre(s) de la empresa(s) (pasada o actual), dirección de referencia, comuna, región.
	B. Información de la inspección	Fecha, datos del evaluador: nombre, institución, cargo, correo electrónico y fono.
	C. Información de los entrevistados	Datos del entrevistado: nombre, relación con el SPPC, institución, cargo, función, correo electrónico, y fono.
	D. Características generales del SPPC	Tipo de propiedad, nombre de lo(s) propietario(s), área aproximada, estatus del SPPC, tamaño de la empresa, descripción general de la(s) actividad(es) productiva(s) que se han desarrollado en el SPPC, identificación de instalaciones existentes, y existencia de denuncias, inspecciones, accidentes y/o derrames.
Información de la Actividad Industrial	A. Proceso productivo potencialmente contaminante	Tipo de actividad(es) que se ha(n) desarrollado en el SPPC, identificación del(los) proceso(s) industrial(es) potencialmente contaminante(s), e identificar y describir el o los procesos productivos que poseen una mayor probabilidad de ser considerados una Fuente Sospechosa Contaminación.
Información Específica de la(s) Potenciale(s) Fuente(s) de Contaminación	A. Respecto de las(s) potencie(s) fuentes(s) de contaminación	Nombre de las(s) potencie(s) fuentes(s) de contaminación, coordenadas del punto central de las potencie(s) fuentes(s) de contaminación.
	B. Respecto de los materiales utilizados o generados en la(s)	Materias primas e Insumos, los productos/subproductos, y los residuos (estableciendo si existen se considera un residuo peligroso, sustancia

Ítem principal	Ítem secundario	Antecedentes solicitados
	fuentes(s) de contaminación	peligrosa o plaguicida de uso agrícola). Cumplimiento de normativas, y cumplimiento de instrumentos de gestión y normativos.
	C. Sospecha de fuentes (s) contaminante(s)	Sospecha de fuentes contaminantes y grupos de contaminantes que podrían estar presentes en el SPPC. <ul style="list-style-type: none"> • Si no existe sospecha: 0 puntos. • Si existe sospecha de fuente(s) contaminante (s): 0,5 puntos. • Cada grupo de contaminantes señalados en la Ficha (5) tienen asociado 0,1 puntos, los cuales deben ser adicionados en forma consecutiva de acuerdo al(los) grupo(s) de contaminantes que se encuentre(n) en el SPPC.
Información Específica de la(s) Ruta(s) de Exposición	A. Ruta de exposición de suelos	Uso(s) anterior(es) del terreno (cuales), suelo potencialmente impactado (ha), suelo con recubrimiento impermeable (%), suelo erosionado (%).
	B. Ruta de exposición agua subterránea	Presencia de agua subterránea en el SPPC, profundidad de agua subterránea y cómo fue establecida. Pozos de extracción de agua subterránea, su distancia al sitio en estudio y el uso que se le da al agua.
	C. Ruta de exposición agua superficial	Presencia de agua superficial, distancia al curso de agua superficial más cercano (en metros), tipo de cuerpo de agua, y uso del agua.
	D. Ruta de exposición aire	Sospechas de emisiones al aire provenientes de la(s) fuente(s) contaminante(s) y si estas corresponden a material particulado (MP) y/o Gases.
	E. Otras potenciales rutas de exposición	En un radio de 3 km. Identificar si existen actividades agrícolas, pesqueras, pecuarias u otras.
	F. Resumen de las rutas de exposición identificadas	Identificación de medios potencialmente impactados. El puntaje máximo de esta sección es 1 punto y está distribuido según el nivel de exposición preliminar que se estima a partir de cada uno de los medios potencialmente impactados (A-E): <ol style="list-style-type: none"> 1) Agua de consumo humano (superficial y/o subterránea): 0.2 puntos. 2) Aire: 0.2 puntos. 3) Suelo: 0.15 puntos. 4) Agua otros usos (recreacional, riego, industrial): 0.15 puntos. 5) Frutas y Hortalizas: 0.1 puntos. 6) Peces: 0.1 puntos. 7) Lácteos y Carnes: 0.05 puntos. 8) Sedimentos: 0.05 puntos.
Información Específica de los Potenciales Receptores Expuestos	A. Receptores: actividades desarrolladas en las cercanías	Accesibilidad al SPPC, población humana potencialmente expuesta en un radio de 3 km. En el caso de existir residentes, señalar el nombre del poblado, distancia a la fuente potencial de contaminación (m.) y número de habitantes. En el caso que existan trabajadores, indicar la actividad que desarrollan, la distancia al sitio, número aproximado de trabajadores, jornada laboral y el equipo de protección personal utilizado. Describir información sintomatológica (si existiese) o enfermedades laborales asociadas a la potencial fuente de contaminación. Finalmente, indicar la presencia de al menos una especie vegetal o animal en alguna categoría de conservación, de áreas protegidas por parte del Estado y/o de ecosistemas de alta relevancia.

Ítem principal	Ítem secundario	Antecedentes solicitados
	B. Resumen de las rutas de exposición identificadas	El puntaje máximo de éste ítem es de 1 punto y está dado por la distancia de los receptores humanos más cercanos y la cantidad total de población humana potencialmente afectada: Distancia de personas expuestas: 0-2 km.: 0.6 puntos. 2-3 km.: 0.4 puntos. Cantidad de personas expuestas: > 100.000: 0.4 puntos. 100.000 – 10.000: 0.3 puntos. 10.000 – 1.000: 0.2 puntos < 1.000: 0.1 puntos.
Esquemas	A. Croquis esquemático	Bosquejo en el que se indique la fuente de contaminación, las vías de exposición y los receptores o bienes a proteger.
	B. Modelo conceptual preliminar	Identificación de la fuente de contaminación>componente(s) ambiental(e)s con potencial presencia de contaminantes>vías de exposición>Receptores.
Puntajes	A. Cálculo de puntaje	Puntaje total = (fuentes + ruta de exposición+ receptores) *100/3

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA, (2012)

Como se señaló anteriormente, a partir de la sospecha de fuentes contaminantes, de la ruta de exposición y de la cantidad de receptores humanos más cercanos a la fuente de contaminación se obtendrá un valor final, el cual permitirá asignar una magnitud a los Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, estableciendo una priorización en base al porcentaje obtenido (Cuadro 1.22), relacionándose a su vez con el riesgo preliminar de la salud humana (MMA, 2012). Los puntajes obtenidos son categorizados según su nivel de importancia o urgencia de investigación, por lo que valores más cercanos al 0% tendrán una baja jerarquía de investigación y valores más cercanos al 100 % tendrá una mayor jerarquía para una posterior investigación.

Cuadro 1.22: Categorización del riesgo preliminar

Puntaje (%)	Descripción
0 – 30	Baja jerarquía
30 – 60	Mediana Jerarquía
60 - 100	Alta Jerarquía

Fuente: Elaboración en base a MMA, (2012)

Posteriormente, en la Fase II, se realizará una investigación preliminar, en función de aquellos suelos que necesitan comprobar de manera prioritaria la presencia de contaminación de suelos (alta jerarquía).

Se realizará una recopilación bibliográfica de nuevos antecedentes y el levantamiento de información adicional, con el objetivo de concluir de manera más precisa la presencia de fuentes contaminantes asociadas a Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes, según se visualiza en el siguiente cuadro:

Cuadro 1.23: Contenidos de la Investigación Preliminar.

Estudios requeridos	Objetivos	Principales aspectos a considerar
Estudio Histórico	<p>Confirmar los indicios previos que hacen sospechar la presencia de contaminantes. Acotar las zonas a investigar para dirigir de forma más eficientes los recursos disponibles.</p> <p>Definir, en la medida de lo posible, la naturaleza de la fuente de contaminación.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Usos del suelo: Actividades productivas, evolución y situación del sector que permita la detección de cambios en el uso del suelo; permisos/licencias de ejecución de actividades económicas; uso de acuerdo a instrumentos de planificación territorial; propietarios anteriores y actuales; características y uso del suelo aledaño; entre otros. Plano del suelo con potencial presencia de contaminantes: Localización de edificios e instalaciones actuales y pasadas a nivel superficial y subterráneo; localización de redes de abastecimiento; superficie de la zona ocupada; material y estructura de construcción de edificios e instalaciones, entre otras. - Historial cronológico del terreno: Períodos en los que se desarrollaron las actividades productivas y el respectivo uso/vertido/disposición de materias primas y residuos. - Descripción de los procesos productivos más relevantes: Diagramas de flujo, productos y residuos. - Materias primas y residuos: Tipos, estado físico, composición química, toxicidad, cantidades, procedencia, forma de almacenamiento o disposición, entre otras. Localización en el plano, a nivel superficial y subterráneo, e indicación de las medidas de protección ambiental aplicadas. - Sistemas de protección: Zonas pavimentadas, drenajes, zanjas, entre otras. - Puntos de vertido: Al alcantarillado, a cauce superficial o infiltración a napa subterránea. - Antecedentes de incidentes ambientales: Derrames, vertidos, accidentes, denuncias, inspecciones anteriores, entre otros.
Estudio Geográfico	<p>Considera la información relativa a la localización del Suelo con Potencial Presencia de Contaminantes en estudio, por medio de mapas a una escala adecuada, indicándose la localización exacta de la instalación o de la zona de estudio y todos aquellos aspectos que puedan ser relevantes.</p>	<p>El uso de fotografías aéreas e imágenes satelitales es una herramienta que ayuda a visualizar el entorno y los límites del suelo en estudio.</p> <p>Además de la consulta a fuentes cartográficas existentes, es deseable la creación de mapas propios que faciliten la localización del emplazamiento y su ubicación en el contexto geográfico regional y local.</p>

Fuente: Elaboración Propia en base a MMA, (2012)

Finalmente, la información recopilada en torno a los Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) será agregada a la base de datos predial (obtenida en la etapa de Diagnostico) y se zonificarán como amenaza aquellos Suelos con Potencial Presencia de Contaminantes (SPPC) priorizados y caracterizados en esta etapa.

La escala de representación cartográfica sugerida para la zonificación de la amenaza por inestabilidad de suelo producto de la actividad humana por extracción de áridos será de 1:5.000 para el Plan Regulador Comunal y de 1:25.000 para el Plan Regulador Intercomunal o Metropolitano.

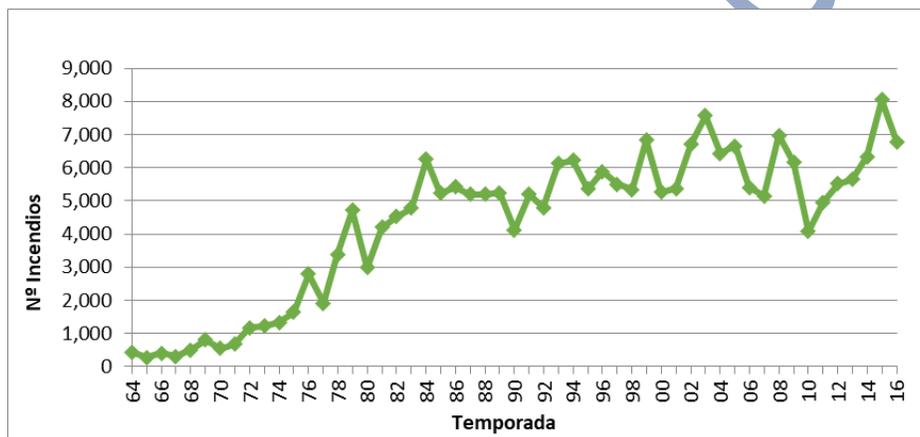
1.5.2 Amenaza de incendio forestal

a) Descripción

Un incendio forestal es un fuego que, cualquiera sea su origen, se propaga de manera descontrolada a través de vegetación rural o urbana (árboles, matorrales y pastizales, verdes y/o secos), poniendo en peligro la vida y seguridad de las personas, los bienes y/o el medio ambiente (CONAF, s-fa). En este mismo sentido, la Ley 20.283 del Ministerio de Agricultura señala que un incendio forestal es toda destrucción de la vegetación, por intermedio de fuego y cuando éste se propaga libremente y sin control en terrenos denominados forestales.

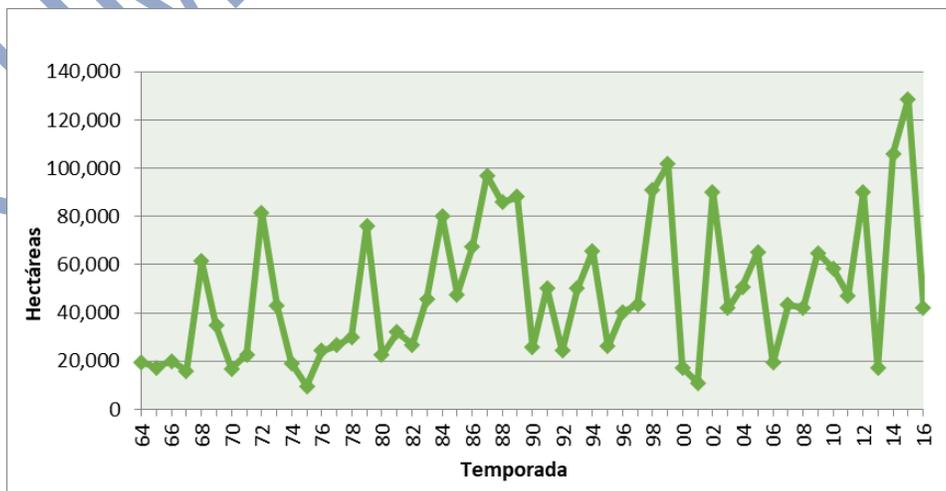
En Chile, la ocurrencia de incendios ha ido aumentando progresivamente según datos de CONAF (Ilustración 1-4) . A comienzos de los años 90 existía un promedio de 5 mil incendios anuales, ya a comienzos del 2.000 la cifra llega a los 6 mil anuales. Este aumento progresivo de la ocurrencia también se ve reflejado en la superficie afectada donde de 43 mil hectáreas afectadas de promedio anual en la primera mitad de los 90 se llega a 92 mil hectáreas de promedio las últimas 3 temporadas (Ilustración 1-4).

Ilustración 1-4: Ocurrencia de Incendios en Chile. 1964-2016



Fuente. CONAF

Ilustración 1-5: Daño Nacional Histórico (ha)1964-2016

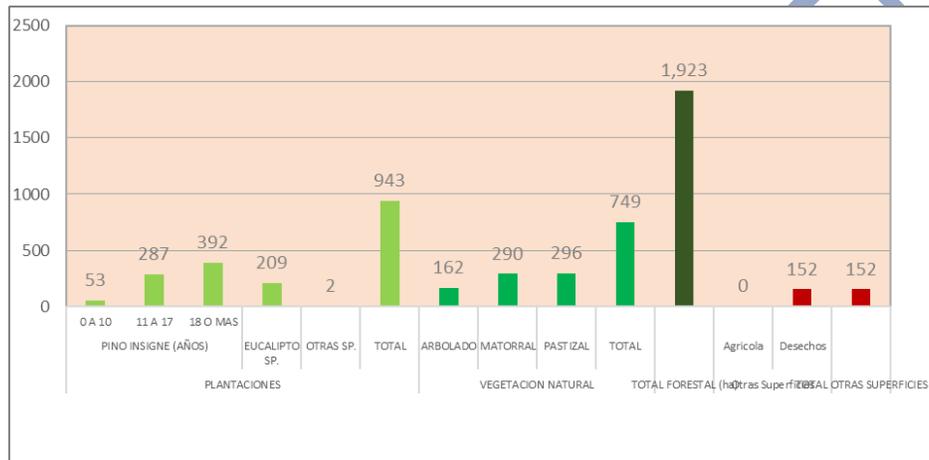


Fuente. CONAF

Un aspecto que se debe considerar, además de la ocurrencia de incendios, es la superficie afectada por estos eventos y las características de esta. Entre 2002 y 2016 han sido afectadas aproximadamente 2000 hectáreas, promediando por temporada 148 hectáreas.

En cuanto al tipo de superficie afectada (en el mismo periodo de tiempo entre 2002 y 2016) se puede clasificar en Plantaciones (Pino Insigne, Eucaliptos y otras), Vegetación natural (Arbolado, Matorral y pastizal) y otras superficies (Agrícola y desechos), según se puede visualizar en la Ilustración 1-6.

Ilustración 1-6: Tipo de superficie afectada.



Fuente. CONAF

Según CONAF, los principales factores desencadenantes de los incendios obedecen a causas accidentales (55.5%), intencionales (32%), desconocidas (12.2%) y naturales (0.3%).

b) Metodología para determinar niveles de amenazas

Conforme los antecedentes de CONAF, las dimensiones, factores y variables para determinar la amenaza de incendios se indica en la siguiente ilustración:

Ilustración 1-7: Dimensiones, factores y variables para determinar la amenaza de incendio forestal.



Fuente: CONAF.

Según los resultados del cálculo de la amenaza por incendios forestales realizado por CONAF, aplicando método multicriterio de los factores y variables indicados, se obtiene que del total de superficie nacional equivalente a 56.145.937 Há, el 35% presenta una amenaza media, un 10% una amenaza alta y solo el 1% esta categorizada con una amenaza muy alta (Cuadro 1.24). Las regiones con superficie mayormente amenazada por presencia de plantaciones forestales expuestas a incendios por acción humana, son Biobío, Valparaíso, Metropolitana de Santiago, Ñuble, Araucanía y Los Ríos. La distribución de superficie por nivel de amenaza se indica en el siguiente cuadro.

Cuadro 1.24: Porcentaje de superficie afectada por incendios forestales por región.

Región	Superficie Total (ha)	Amenaza					Muy Alto
		Sin Riesgo	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	
Atacama	7.551.937	80%	2%	2%	13%	3%	0%
Coquimbo	4.057.410	29%	2%	6%	45%	18%	0%
Valparaíso	1.595.700	18%	4%	8%	40%	27%	2%
Metropolitana	1.539.785	31%	4%	8%	28%	27%	2%
O'Higgins	1.634.041	20%	8%	14%	33%	23%	1%
Maule	3.030.613	17%	6%	22%	42%	12%	1%
Ñuble	1.309.798	5%	6%	26%	45%	16%	2%
Biobío	2.400.234	5%	5%	21%	47%	19%	3%
Araucanía	3.182.471	5%	8%	25%	46%	15%	2%
Los Ríos	1.822.260	8%	6%	23%	43%	18%	2%
Los Lagos	4.824.775	7%	4%	16%	30%	5%	1%
Aysen	10.550.636	27%	9%	29%	47%	2%	0%
Magallanes	12.746.277	32%	9%	22%	53%	6%	0%
Nacional	56.245.937	30%	7%	19%	35%	10%	1%

Fuente: CONAF.

c) Metodología nivel comunal e intercomunal

La metodología para evaluar la amenaza de incendios que se propone a continuación, se realizará por medio de evaluación multicriterio y análisis espacial.

Las variables utilizadas se asocian a la ocurrencia de incendios en el área de estudio, índice de vegetación, cobertura de suelo, pendientes, cercanía a centros poblados y cercanía a caminos.

Para el caso de la variable ocurrencia de incendios, se deben localizar los incendios del área a estudiar a partir de un catastro de CONAF. Posteriormente, se debe realizar, a través de un SIG, una extrapolación de los datos usando las superficies afectadas como parámetro de expansión. El método que se propone es Kernel, dando como resultado un raster de ocurrencia de incendios.

Con respecto al índice de vegetación, se debe calcular de la siguiente manera

$$NDVI = \frac{(\text{Rojo} - \text{IFC})}{(\text{Rojo} + \text{IFC})}$$

Donde:

Rojo es la banda roja visible y IFC es la banda infrarroja cercana.

Para que el fuego pueda formarse y avanzar hasta ser un incendio necesita de cierta cantidad de combustible, por esta razón, un índice NDVI menor a 0,1 tiene muy pocas probabilidades de generar incendio, mientras que un NDVI entre 0,1 y 0,6 representa una mayor probabilidad.

Ya sobre los 0,6 si bien es probable la ocurrencia de incendios, esta disminuye significativamente por la cantidad de humedad presente en la cobertura y la menor temperatura que existe (Altamirano, Salas, Yaitul, Smith-Ramirez, & Ávila, 2013) (y Lopez, 2012).

En cuanto a la variable cobertura del suelo, se obtendrá a partir del catastro de usos de suelo y vegetación de CONAF.

La variable pendiente se obtendrá por medio de un modelo de elevación (DEM) y se reclasificará en función de las condiciones geográficas de cada área a estudiar.

Finalmente, la variable distancia a centros poblados y distancia a carreteras, se generaron buffers de distancia. Para los centros poblados se tomó la distancia euclidiana que fue de 3 km desde el límite para zonas urbanas y un kilómetro para los poblados de menor tamaño (y Lopez, 2012). Para los caminos se crearon dos Buffer, uno a 250 metros y el otro a un kilómetro.

3 BIBLIOGRAFÍA

A. A., S. C., Y. V., S.-R. C., & Á. A. (2013). Influencia De La Heterogeneidad Del Paisaje En La Ocurrencia De Incendios Forestales En Chile Central. *Revista de Geografía Norte Grande*, 157-170.

Arenas, M., & Opazo, E. (2017). Guía metodológica para la elaboración de Mapas de Susceptibilidad a las remociones en masa a escala regional. Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial. Puerto Varas. 65pp., Servicio Nacional de Geología y Minería.

Act, A. P. E. F. Z. (1999). Earthquake Fault-rupture hazard zones in California.

Boncio, P., Liberi, F., Caldarella, M., & Nurminen, F. C. (2018). Width of surface rupture zone for thrust earthquakes: implications for earthquake fault zoning. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(1), 241-256.

Bonadonna, C., Connor, C., Houghton, B., Connor, L., Byrne, M., Laing, A., & Hincks, T. (2005). Probabilistic modeling of tephra dispersal: Hazard assessment of a multiphase rhyolitic eruption at Tarawera, New Zealand. *Journal of Geophysical Research*, 1-21. doi:doi: 10.1029/2003JB002896.

Brantt, C., Pantoja, G., & Muñoz, A. (2021). Peligro de remociones en massa en el sector sur de la región de Coquimbo Sur. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago.: IR-21-88: 107p. 1 mapa escala :250.000.

Díez-Herrero, A., Lain-Huerta, L., & Llorente-Isidro, M. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones. Guía metodológica para su elaboración. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Esaki, T., Thapa, P., Mitani, Y., & Ikemi, H. (2005). Landslide and debris flow characteristics and hazard mapping in mountain hillslope terrain using GIS, Central Nepal. Vancouver: En: Eberhardt, E., Hungr, O., Fell, R., Couture, E. (eds), *Proceedings, International Conference on Landslide Risk Managment*, p. 657-669.

Hungr, O., Leroueil, S., & Picarelli, L. (2013). The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167-194.

INN. (2016). NCh 3394 Suelo salino - Requisitos geotécnicos y de instalaciones sanitarias para diseño y ejecución de obras. Santiago, Chile: Instituto Nacional de Normalización.

Jorquera, C. (2018). Análisis de peligro volcánico por flujos de lava y corrientes de densidad piroclástica en los estratovolcanes activos Callaqui, Llaima, Lonquimay, Tolhuaca, Villarrica y Mocho-Choshuenco, Chile. Universidad de Concepción, Facultad de Ciencias Químicas, Departamento de Ciencias de la Tierra.

JTC-1. (2008). Guidelines for Landslide Susceptibility, Hazard and Risk Zoning for land use planning. *Engineering Geology*, 102(3-4), 85-98.

Kelfoun, K., & Druitt, T. (2005). Numerical modeling of the emplacement of Socompa rock avalanche, Chile. *Journal of Geophysical Research*, 110. doi:doi: 10.1029/2005JB003758.

Kerr, J., Nathan, S., Van Dissen, R., Webb, P., Brunsdon, D., & King, A. (2003). Planning for development of land on or close to active faults. Wellington: Ministry for the Environment.

Malin, M., & Sheridan, M. (1982). Computer-assisted Mapping of Pyroclastic Surges. *Science*, 217, 637-639.

Maranzoni, A., D'Oria, M., & Rizzo, C. (2022). Quantitative flood hazard assessment methods: A review. *Flood Risk Management*, 31. doi:10.1111/jfr3.12855

MIAVITA. (2012). Handbook for Volcanic Risk Management. Prevention, Crisis management, Resilience. (C. Bignami, V. Bosi, L. Costantini, C. Cristiani, F. Lavigne, & P. Thierry, Edits.) Orleans, Francia: MIAVITA Project.

Ministerio del Medio Ambiente. (2019). Volumen 1: Amenazas en "Determinación del riesgo de los. (P. Winckler, M. Contreras-López, S. Vicuña, C. Larraguibel, J. Mora, C. Esparza, . . . A. Pica, Edits.) Santiago, Chile.

Mossoux, S., Saey, M., Bartolini, S., Poppe, S., Canters, F., & Kervyn, M. (2016). Q-LAVHA: A flexible GIS plugin to simulate lava flows. *Computers and Geosciences*, 97, 98-109. doi:doi: 10.1016/j.cageo.2016.09.003.

Mudashiru, R., Sabtu, N., & Abustan, I. (2021). Quantitative and semi-quantitative methods in flood hazard/susceptibility mapping: a review. *Arabian Journal of Geosciences*, 24. Obtenido de <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07263-4>

Muñoz, A., Pérez, L., Gálvez, V., Sánchez, B., & Opazo, E. (2021). Remociones en masa y crecidas fluviales en la cuenca del río Las Minas de Punta Arenas, región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Informe Registrado IR-21-91. 151p., Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago.

Ogburn, S., Charlton, D., Norgaard, D., Wright, H., Calder, E., Lindsay, J., . . . Tajima, Y. (2023). The Volcanic Hazard Maps Database: an initiative of the IAVCEI Commission on Volcanic Hazards and Risk. *Journal of Applied Volcanology* , 12(1), 2.

PMA. (2007). Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Publicación Geológica Multinacional*, no. 4, 432p., 1cd-room.

Proyecto Multinacional Andino: geociencias para las comunidades andinas. (2007). Movimientos en masa en la región andina: una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería. *Publicación Geológica Multinacional*, no. 4, 432p., 1cd-room.

Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J., & Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177-192.

Safeland. (2011). Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk assessment and zoning. Deliverable D2.4. The Seventh Framework Programme for Research and Technological Development (FP7). Comisión Europea.

Schilling, S. (1998). LAHARZ; GIS programs for automated mapping of lahar-inundation hazard zones. U.S. Geological Survey, Open-File Report, 96-638. doi:doi: 10.3133/ofr98638.

Secretaría Ministerial Metropolitana de Vivienda y Urbanismo (SEREMI Minvu RM), 2012. Estudio Riesgo y Modificación PRMS Falla San Ramón (ID N°640-27LP10; 2011-2021), Informe Etapa 3, Santiago, 77 p.

Servicio Geológico Colombiano (SGC) 2017. Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por Movimientos en Masa, escala 1:25.000. Dirección de Geoamenaza, Grupo de Evaluación de Amenaza por Movimientos en Masa.

SERNAGEOMIN (2017). Arenas, M., & Opazo, E. Guía metodológica para la elaboración de Mapas de Susceptibilidad a las remociones en masa a escala regional. Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial. Puerto Varas. 65pp., Servicio Nacional de Geología y Minería.

Brantt, C., Pantoja, G., & Muñoz, A. (2021). Peligro de remociones en masa en el sector sur de la región de Coquimbo Sur. Servicio Nacional

SHOA. (1992). Glosario de Marea y Corrientes (3ra Edición (solo en formato PDF) ed.). Valparaíso, Chile.

SHOA. (2015). Especificaciones técnicas para la elaboración de Cartas de Inundación por Tsunami (CITSU). Instrucciones oceanográficas N°4, Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.

SIGMA (2021) González, G., Jensen, E., Aron, F., Roldán, F., Sáez, E., Díaz, F., Candia, G., Gironás, J., Escarriaza, C., Saldías, J., Aranguiz, R., Gilabert, H., De la Barra F., Zúñiga, A. Guía Metodológica para la Caracterización de la Multiamenaza de la Cuenca del Río Maipo. Proyecto FONDEF 19i10021.

Tomás, R., Herrera, G., Delgado, J., & Peña, F. (2009). Subsistencia del terreno. Enseñanza de las Ciencias de la Tierra, 17(3), p. 295-302. doi:10.5327/1132-9157

Technical Commission for Seismic Microzonation (2017b) Land Use Guidelines for Areas Affected by Active and capable faults (ACF), version 1.0. Department of Civil Protection of the Presidency of the Council of Ministers. Rome. <https://www.centromicrozonazioneismica.it/it/download/category/20-seismic-microzonation-land-use-guidelines-for-areas-with-active-and-capable-faults-acf>

Varnes, D. (1984). Hazard Zonation: A Review of Principal and Practice. Commission of Landslide of IAEG, UNESCO. Natural Hazards, 3, 1-61.

Vera, F., Flores, F., Toloza, V., Jara, G., Perales, C., Bono, L., . . . Jorquera, C. (2023). Avances y desafíos en la evaluación de peligros volcánicos en la Red Nacional de Vigilancia Volcánica de Chile. Libro de Resúmenes IX Foro Internacional de Peligros Volcánicos – IX FIPVO (págs. 206-211). Lima: Instituto Geológico Minero y Metalúrgico.

WSL. (2013). Rapid mass movements simulation (RAMMS): User Manual v1.5 Debris Flow. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Swiss Federal Institutes of Technology.

Lopez, F. d. (2012). Diseño de un Modelo de Riesgo Integral de Incendios Forestales Mediante Técnicas Multicriterio y su Automatización en Sistemas de Información Geográfica. Una Aplicación en la Comunidad de Valencia. Benicassin.