



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS
GEOLOGÍA**

**IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ALARMA Y
ALERTA TEMPRANA DE ALUVIONES EN LA GESTIÓN
DEL RIESGO DE DESASTRES DE ORGANISMOS
GUBERNAMENTALES CHILENOS**

Memoria para optar al Título de Geóloga

Natalia Lorena Torres Valdés

Profesor Guía: Dr. José Luis Palma Lizana

**Profesores Comisión: Dra. Fernanda Carolina Álvarez Amado
Dr. Jorge Andrés Quezada Flory**

Concepción, 2024

RESUMEN

Ante la realidad de los desastres producto de los peligros aluvionales que han cobrado vidas en numerosas ocasiones, se ha evidenciado la necesidad de un enfoque de alerta temprana en la gestión del riesgo que permita una mayor prontitud en la reacción de las personas y autoridades con el fin de minimizar el impacto social y económico. En este aspecto, los sistemas de alerta temprana (S.A.T.) basados en el monitoreo y en un conocimiento acabado del territorio, los fenómenos y las necesidades de la población, aparecen como una alternativa para la prevención de estos desastres. Por lo anterior, en la actualidad se recomienda internacionalmente el uso de estos sistemas y, tras su implementación en varios países, se poseen numerosos ejemplos de una satisfactoria experiencia para la gestión del riesgo de distintos fenómenos naturales.

En este trabajo se realiza una revisión de los antecedentes relacionados a los sistemas de alerta temprana internacionalmente y de la situación actual en nuestro país para posteriormente diseñar un S.A.T. de aluviones en línea con las recomendaciones globales. Este sistema busca integrarse en la gestión del riesgo de desastres coordinada por SENAPRED como dictan la Ley no. 21.364 y el Decreto no. 86, con base en el monitoreo conjunto y combinado de predicción y de alarma que permita la rápida detección y reacción ante el peligro. Con este fin se propone una modificación al Ciclo de la Gestión del Riesgo de Desastres definido en el Plan Estratégico Nacional para que incluya la alerta y alarma de forma diferenciada dentro del ciclo y contemple una fase atemporal y permanente de identificación y análisis. Además, se definen las tareas fundamentales y sus responsables en cada fase de este ciclo.

Para la implementación de este sistema, en primera instancia se identifican escenarios de peligro de aluviones en el país mediante una revisión bibliográfica de eventos históricos y de distintas fuentes periodísticas y científicas. Posteriormente se proponen modificaciones a los actuales planes específicos de emergencia por remoción en masa y por amenaza volcánica, ajustando el S.A.T. propuesto para los distintos escenarios a la legislación vigente. Finalmente, se verifica el funcionamiento del sistema propuesto mediante la ejemplificación de su implementación en distintos eventos icónicos de cada escenario identificado.

ÍNDICE

	Página
RESUMEN	ii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos	2
1.1.1 Objetivo general	2
1.1.2 Objetivos específicos	3
1.2 Metodología	3
2. MARCO TEÓRICO	5
2.1 Remociones en masa	5
2.1.1 Factores condicionantes y desencadenantes	5
2.1.2 Aluviones	6
2.2 Sistemas de Alerta Temprana	8
2.2.1 Elementos de un Sistema de Alerta Temprana	9
2.2.2 Situación en Chile	13
2.2.2.1 Aluviones en la gestión del riesgo de desastres	17
3. MONITOREO EN S.A.T. DE ALUVIONES	21
3.1 Ejemplos en el mundo	25
3.1.1 Sistemas con monitoreo de predicción	25
3.1.2 Sistemas con monitoreo de alarma	28
3.2 Situación en Chile	30
4. ESCENARIOS DE PELIGRO DE ALUVIONES EN CHILE	32
4.1 Aluviones no volcánicos	34
4.1.1 Zona norte	35
4.1.2 Zona centro-sur	38
4.1.3 Zona sur	39
4.1.4 Zona austral	41
4.2 Aluviones volcánicos	41
4.2.1 Primarios	42
4.2.2 Secundarios	43
5. DISEÑO Y VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA	44
5.1 Diseño del sistema de monitoreo y alerta temprana de aluviones	44
5.1.1 Identificación y análisis	49

5.1.2 Pre evento: Mitigación	50
5.1.3 Pre evento: Preparación	51
5.1.4 Pre/Co evento: Alerta	53
5.1.5 Co evento: Alarma.....	53
5.1.6 Co evento: Respuesta.....	55
5.1.7 Post evento: Recuperación.....	55
5.2 Implementación del sistema de monitoreo y alerta de aluviones	56
5.2.1 Escenarios no volcánicos.....	56
5.2.2 Escenarios volcánicos.....	58
5.2.2.1 Sineruptivos.....	58
5.2.2.2 Post eruptivos	59
5.3 Verificación del sistema propuesto	59
5.3.1 Aluvión hidrometeorológico.....	60
5.3.2 Aluvión volcánico post eruptivo	61
5.3.3 Aluvión volcánico sineruptivo	62
6. DISCUSIÓN.....	64
6.1 Gestión del riesgo de desastres en Chile	64
6.2 Escenarios de peligro de aluviones.....	65
6.3 Implementación del sistema de alarma.....	68
7. CONCLUSIONES.....	69
REFERENCIAS	71
ANEXOS	81

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1: Clasificación simple de los procesos de remociones en masa de ocurrencia común en Chile. Modificado de Hauser (2000).	5
Figura 2: Esquema de flujos canalizados y no canalizados. Cruden & Varnes (1996) en SERNAGEOMIN, (2007).	7
Figura 3: Perfil esquemático típico de un aluvión o flujo de detritos. Pierson (1986), en SERNAGEOMIN (2007).	7
Figura 4: Elementos de un S.A.T. eficiente según la WMO. Modificado de Budimir et al. (2021)	10
Figura 5: Ciclo de Gestión del Riesgo de Desastres, compuesto por 4 fases. La alerta es parte de la fase de preparación y la fase de recuperación contempla las etapas de rehabilitación y reconstrucción. ONEMI (2020).	14
Figura 6: Esquema general del flujo de información en el Plan Específico de Emergencia por variable de Riesgo – Remoción en Masa. Modificado de ONEMI (2017).	17
Figura 7: Disposición del sistema de alarma de aluviones en Illgraben. Modificado de Badoux (2009).	29
Figura 8: Esquema general del flujo de información con el sistema de alarma.	45
Figura 9: Propuesta ciclo de Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) con la integración del monitoreo de alarma.	46
Figura 10: Integración de elementos técnicos para el desarrollo del trabajo conjunto de los sistemas de monitoreo de predicción y de alarma.	47
Figura 11: Esquema general del flujo de información del Plan Específico de Emergencia por variable de Riesgo – Remoción en Masa con la integración del sistema de alarma.	57
Figura 12: Esquema general del flujo de información del Plan Específico de Emergencia por amenaza volcánica con la integración del sistema de monitoreo de alarma de aluviones.	59
Figura 13: Distribución regional y por escenarios de peligro hidrometeorológico de víctimas fatales por remociones en masa del tipo flujo entre los años 1928 y 2017. Modificado de Marín et al. (2018).	67

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 1: Niveles de alerta y su condición de emisión en el Plan específico de emergencia por variable de riesgo: remoción en masa (ONEMI, 2017).....	18
Tabla 2: Consideraciones generales para las remociones de tipo flujo (ONEMI, Plan Nacional Específico por variable - remoción en masa, 2018)	19
Tabla 3: Algunos sensores utilizados actualmente y sus características. Modificado de Stahli et al. (2015) y Hürlimann et al. (2019).....	24
Tabla 4: Escenarios de peligro de aluviones no volcánicos	34
Tabla 5: Escenarios de peligro de aluviones volcánicos	42
Tabla 6: Organismos encargados para cada tarea definida en el nuevo ciclo de la Gestión del Riesgo propuesto.	48
Tabla 7: Número de eventos considerados por región para la definición de los escenarios	66

ÍNDICE DE ANEXOS

	Página
Anexo 1: Ejes prioritarios del Plan Estratégico Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (ONEMI, 2020)	81
Anexo 2: Algunos ejes prioritarios, objetivos estratégicos y acciones estratégicas de las políticas nacionales relacionadas a los principios comunes de un S.A.T. exitoso identificados por Golnaraghi (2012). Modificado de Golnaraghi (2012) y ONEMI (2020)	82
Anexo 3: Legislación vigente y propuestas de modificación en concordancia con los factores esenciales de un S.A.T. según WMO (2018).....	85
Anexo 4: Áreas afectadas por aluviones en los eventos con decesos humanos de la zona norte..	93
Anexo 5a: Eventos del catastro de SERNAGEOMIN considerados para la determinación de las fechas de ocurrencia en el escenario de la zona norte.	94
Anexo 5b: Eventos del catastro de SERNAGEOMIN considerados para la determinación de las fechas de ocurrencia en el escenario de la zona centro sur y de la zona sur.	95
Anexo 5c: Eventos del catastro de SERNAGEOMIN considerados para la determinación de las fechas de ocurrencia en el escenario de la zona austral.	96
Anexo 6: Características de los eventos aluvionales registrados con extensión de al menos 1 km.	97

1. INTRODUCCIÓN

En Chile, el enfoque ante la gestión de desastres ha sido mayoritariamente reactivo con énfasis en la respuesta temprana, lo cual se evidencia en el carácter exclusivo de respuesta de los Planes de Emergencia (ONEMI 2017, 2018). Sin embargo, las consecuencias ante los desastres han evidenciado la necesidad de avanzar hacia un enfoque de alerta temprana, donde, a partir de información en tiempo real levantada por sistemas de monitoreo en conjunto con un conocimiento acabado del territorio y los fenómenos, se detecte y/o pronostique con la mayor certeza y antelación posible, la ocurrencia, magnitud y áreas de afectación de los desastres (Oberli, C. et al., 2021). De esta forma se permite una mayor prontitud en la reacción de las personas y autoridades logrando minimizar el impacto social y económico (Golnaraghi, 2012).

Bajo este antecedente, en 2015 el Estado de Chile se adhiere al Marco de Sendai para la reducción del riesgo de desastres 2015-2030, y en 2016 se conforma la Comisión de Investigación, Desarrollo e Innovación para la Resiliencia frente a desastres de Origen Natural (CREDEN), cuya tarea 13 corresponde al desarrollo de sistemas de alerta temprana. En conjunto a estos compromisos adquiridos y dada la necesidad de establecer un marco rector que fortalezca la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) con meta al año 2030, en 2020 se crea la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (PNRRD) que, en su eje prioritario 4.1.1, establece la meta de desarrollar o robustecer los sistemas de monitoreo y alerta temprana multi amenazas que garanticen información oportuna y accesible. Posteriormente, en agosto de 2021 se promulga la Ley N° 21.364 que instaura una estructura para garantizar una adecuada GRD, además de sustituir la Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI) por el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) como coordinador y supervisor del Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED) establecido por la misma ley. Además, en octubre de 2023, se publica el Decreto no. 86, el cual regula los organismos técnicos para el monitoreo de amenazas, los organismos técnicos para el monitoreo sectorial, los instrumentos para la GRD y los procedimientos de elaboración de los mapas de amenaza y de riesgo.

Dentro de los desastres relacionados con los peligros geológicos, y dada la geomorfología y distribución poblacional del país, los aluviones constituyen una amenaza permanente hacia la vida y salud de las personas, así como también hacia la infraestructura crítica (Marín et al., 2018). Sin embargo, en la actualidad Chile no cuenta con sistemas especializados para el monitoreo y alerta de aluviones, por lo que la gestión del riesgo de estos fenómenos se encuentra limitada por la asociación de su probabilidad de ocurrencia con el monitoreo y acontecimiento de otros eventos naturales, típicamente volcánicos o hidrometeorológicos. Ante esta situación, se plantea la importancia y urgencia de implementar un sistema de alerta temprana basado en el monitoreo y detección oportuna de este tipo de peligro que sea complementado por una predicción previa establecida sobre un mejoramiento del sistema predictivo actual. Se propone como elemento principal la detección debido a las ventajas de este sistema frente a uno predictivo, donde se destaca el grado de certeza de ocurrencia del evento junto al reconocimiento de sus características, información que es de absoluta relevancia en materia de gestión y reducción del riesgo de desastres.

Bajo este contexto, e inserto en el proyecto FONDEF “Desarrollo Científico y Tecnológico de alto impacto para la detección, alerta temprana y gestión del riesgo de aluviones”, este trabajo busca diseñar un sistema de alerta temprana que actúe en base al monitoreo y detección de aluviones cuya implementación considere los distintos escenarios de peligro en el territorio y que se inserte en los distintos planes estratégicos y de gestión del riesgo de desastres en concordancia con las leyes y normativas vigentes en el país.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de alerta temprana de aluviones, integrado en la gestión del riesgo de desastres de organismos gubernamentales chilenos, con base en el monitoreo y detección temprana de estos fenómenos.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Definir las características del funcionamiento de los distintos sistemas de alerta temprana basados en el monitoreo de fenómenos naturales, mediante la revisión bibliográfica de documentos internacionales y de la normativa chilena. Se hace especial énfasis en los sistemas actuales de monitoreo de aluviones.
2. Determinar los distintos escenarios de peligro de aluviones en Chile, en base a la recopilación bibliográfica de eventos históricos (desde 1948), que estén diferenciados por sus principales factores condicionantes y detonantes.
3. Diseñar un sistema de alerta temprana de aluviones en línea con las recomendaciones internacionales, el cual considere los distintos escenarios definidos y se inserte en la gestión del riesgo de desastres vigente en Chile.
4. Verificar el funcionamiento del sistema propuesto mediante la formulación de situaciones representativas de los distintos escenarios definidos y la descripción de la operación del sistema en ellos.

1.2 Metodología

El trabajo a realizar se compone de 3 fases interrelacionadas que se construyen principalmente en base a la revisión de literatura científica y aplicada.

La primera etapa consiste en la recopilación de información para describir la situación actual de Chile en materia de riesgo y de gestión del riesgo de desastres para así reconocer y definir la problemática. Para ello se revisa la legislación vigente y distintos documentos gubernamentales asociados. En esta etapa además se contempla realizar una descripción de la situación global en cuanto al uso de sistemas de alerta temprana basados en monitoreo, con un apartado específico para los sistemas actuales de monitoreo de aluviones, a fin de posteriormente realizar un análisis crítico del sistema chileno.

La segunda etapa consiste en la recopilación y clasificación de información científica e histórica relacionada a eventos de aluviones en Chile para generar una caracterización de los distintos escenarios en que estos pueden ocurrir y así generar un conocimiento que contribuirá a la implementación más eficiente del sistema de alerta y monitoreo. Para ello se revisa principalmente el catastro de remociones en masa del Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) para los eventos no volcánicos y distintas fuentes científicas y periodísticas para el caso de los eventos volcánicos.

Finalmente, la tercera etapa consiste en la integración de la información adquirida anteriormente para construir un sistema de alerta temprana basado en sistemas de monitoreo de detección de fenómenos, el cual considere los distintos escenarios de ocurrencia y que se incorpore bajo las normativas vigentes dentro del SINAPRED. En esta etapa además se evaluará la funcionalidad y eficacia del diseño propuesto mediante la formulación y ejemplificación de escenarios hipotéticos de riesgo de aluviones en el país.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Remociones en masa

Las remociones en masa son procesos geológicos que tienen un importante impacto en la vida humana. En el caso de nuestro país, la situación morfológica contribuye a que los asentamientos se emplacen al pie de relieves empinados o en zonas llanas adyacentes a ríos caudalosos e incluso sobre antiguos abanicos aluviales, lo que genera un incremento de su exposición frente a remociones en masa (Hauser, 2000).

Hauser (1993; 2000) define los procesos de remoción en masa como “procesos de movilización lenta o rápida de un determinado volumen de suelo, roca o ambos, en diversas proporciones, que son generados por una serie de factores” y genera una clasificación simple, que busca agrupar la totalidad de los procesos de remoción en masa de ocurrencia común en Chile, en base a la compilación y estudio de registros históricos. Esta clasificación se puede observar en la Figura 1.

REMOCIONES EN MASA	Flujos	<ul style="list-style-type: none">-Barro (“mud flows”)-Detritos (“detritic flows”)-Lahares-Soliflucción (“solifluction”) y “creep” o reptación lenta (“soil creep”)-Asociados al colapso de depósitos de residuos mineros (“tranques de relaves”)
	Deslizamientos	<ul style="list-style-type: none">-Laminares traslacionales-Rotacionales-Multirrotacionales-Bloques rocosos (“rock bloc slide”)-Detritos (“debris slide”)
		<ul style="list-style-type: none">-Desprendimientos (“rock falls”)-Avalanchas-Aludes-Jokulhlaups-Subsidencia y hundimientos

Figura 1: Clasificación simple de los procesos de remociones en masa de ocurrencia común en Chile. Modificado de Hauser (2000).

2.1.1 Factores condicionantes y desencadenantes

La serie de factores mencionada por Hauser (2000) comprende una combinación de factores condicionantes y factores detonantes dadas por las distintas características de cada localidad en particular. Los primeros corresponden a las condiciones intrínsecas del terreno que contribuyen o influyen a la inestabilidad de una ladera o talud, pero que no constituyen el evento detonante

(SERNAGEOMIN, 2007). Para identificar estos factores es fundamental la caracterización de la geología del área (litología, permeabilidad, dureza, meteorización) junto a datos geotécnicos como el índice de fracturamiento o densidad de discontinuidades, grado y tipo de alteración, relleno de fracturas, orientación de las estructuras, entre otros (Farías et al., 2016). También es relevante la información relacionada a la geomorfología como el ángulo y curvatura de pendiente, elevación, densidad de drenaje y distancia respecto a la red hidrográfica, así como también el uso del suelo y la cobertura (Vianello et al., 2023), la cual puede mitigar la ocurrencia de remociones (Farías et al., 2016). También es relevante la disponibilidad de material asociado a depósitos recientes no consolidados; en este sentido, Morales et al., (2021) incluyen como factor en la Patagonia el tiempo transcurrido desde las erupciones más recientes y el espesor de sus depósitos piroclásticos. Particularmente, el ángulo de la pendiente es de los principales factores que condiciona la ocurrencia de remociones, mediante el control del transporte y deposición de los materiales (Farías et al., 2016; Vianello et al., 2023).

Respecto a los factores desencadenantes, estos son aquellos que generan el inicio de la remoción y por lo general son agentes externos relacionados a cambios en un tiempo definido de las condiciones ambientales. La causa primaria más común es la saturación de agua, que puede ocurrir por precipitaciones intensas, deshielo, cambios del nivel freático o del nivel superficial de cuerpos de agua o una combinación de estos elementos (Highland & Bobrowsky, 2008). Otro desencadenante son los sismos, tanto por el movimiento mismo, por la licuefacción de sedimentos, la dilatación de los materiales por la vibración o por el cambio temporal en el campo de tensión y esfuerzo de las laderas (Farías et al., 2016; Highland & Bobrowsky, 2008). De forma más localizada, también pueden generarse por erupciones volcánicas o por las alteraciones al ambiente producto de las actividades antrópicas (Highland & Bobrowsky, 2008).

2.1.2 Aluviones

Entre 1928 y 2017 se han declarado 52 eventos gatillados por lluvias o sismos que suman 1010 víctimas fatales, ocurriendo principalmente durante los meses lluviosos de otoño y siendo las remociones del tipo flujo o aluviones como se conocen comúnmente en el territorio, las que cobran la mayor cantidad de vidas (Marín et al., 2017).

Los aluviones corresponden a masas cohesivas a no cohesivas de detritos y agua que pueden fluir en pendientes muy bajas y que tienden a desplazarse por canales alcanzando altas velocidades (Martinsen, 1994). En la Figura 2 y Figura 3 se observan algunas características típicas de estos fenómenos.

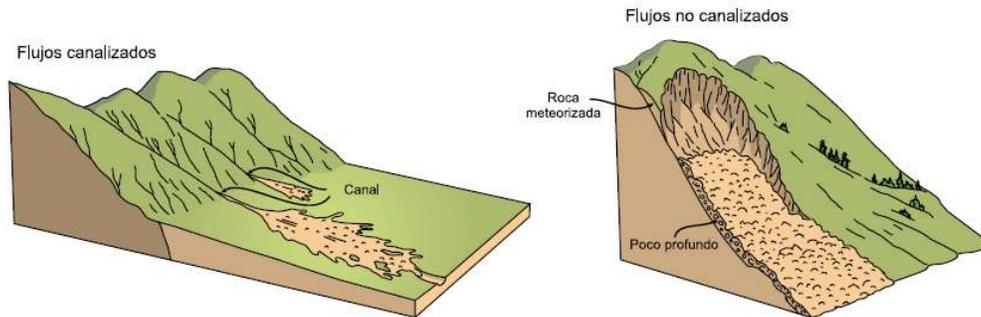


Figura 2: Esquema de flujos canalizados y no canalizados. Los aluviones o flujos de detritos son un tipo de flujo canalizado. Cruden & Varnes (1996) en SERNAGEOMIN, (2007).

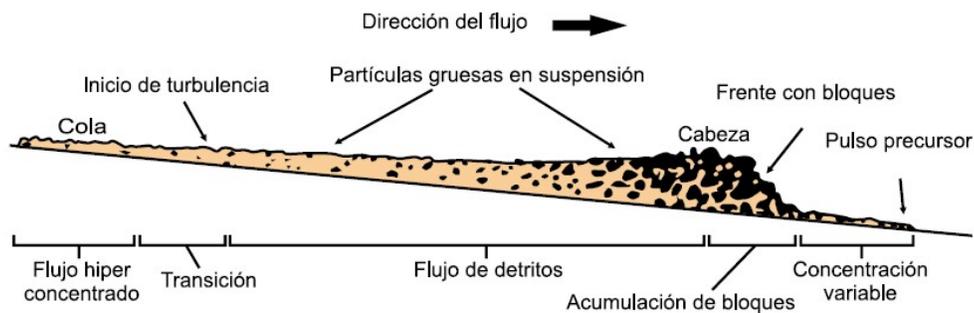


Figura 3: Perfil esquemático típico de un aluvión o flujo de detritos. Se puede observar que el frente concentra las partículas más gruesas. Pierson (1986), en SERNAGEOMIN (2007).

Este tipo de remoción en masa puede generarse en diversos ambientes en los que exista pendiente y una condición inestable del sustrato, y generalmente son gatillados por la adición de humedad típicamente debido a eventos hidrometeorológicos (lluvias, derretimiento de nieve), o por la ocurrencia de sismos y en casos particulares, por eventos volcánicos (NOAA-USGS Debris-Flow Task Force, 2005).

En cuanto a los flujos ocasionados por eventos hidrometeorológicos, se mencionan dos formas de ocurrencia que pueden además coincidir o evolucionar en el tiempo (NOAA-USGS Debris-Flow Task Force, 2005; Hürlimann et al., 2019; Pastorello et al., 2020):

1. Aluviones originados por deslizamientos: Tienen lugar cuando hay una rápida infiltración de lluvia en un sustrato relativamente competente que al saturarse e incrementar la presión de poros, su resistencia al corte decae y ocurre el colapso del material. Para que evolucione a un flujo es necesaria una cercanía o conexión con la red de drenaje.
Este mecanismo es más común en zonas perturbadas por incendios, actividad forestal, erupciones volcánicas, entre otros, que propician una pérdida de vegetación y de raíces generando una disminución de evapotranspiración y de cohesión dando lugar a un aumento de la humedad del suelo y de su inestabilidad respectivamente.
2. Aluviones originados por la movilización de depósitos: Tienen lugar por la escorrentía de lluvias o inundaciones que genera la movilización de material hacia los canales y que constituyen la fuente del sedimento de un aluvión.
Este mecanismo es más frecuente en zonas con lluvias poco recurrentes y en zonas con acumulación reciente de material por erupciones volcánicas.

2.2 Sistemas de Alerta Temprana

Desde la primera conferencia de la gestión del riesgo realizada en Yokohoma, Japón, diversos países se han mostrado interesados en la mejoría y creación de nuevas estrategias para la gestión del riesgo con el fin de disminuir las pérdidas humanas y los daños materiales. En 2005, 168 países, incluyendo a Chile, adoptan el Marco de Acción de Hyogo (MAH) 2005-2015, buscando cambiar el enfoque de reducción del riesgo de desastre desde una rápida respuesta hacia un enfoque de prevención y preparación. Dentro de las áreas prioritarias de este marco, se encuentra la necesidad de "identificar, evaluar y monitorear los riesgos de desastres y mejorar las alertas tempranas". Para ayudar a este objetivo, en 2006, durante la tercera conferencia internacional de alerta temprana realizada en Bonn, Alemania, se distribuye un Checklist para desarrollar Sistemas de Alerta Temprana (S.A.T.) (UNDRR, 2006). El cual es una lista simple de los principales elementos y acciones a considerar al desarrollar o evaluar un S.A.T. Posteriormente, ésta es actualizada en 2018 (WMO, 2018), tras la primera conferencia de alerta temprana multi peligro realizada en Cancún, México, el año 2017.

En 2015 se genera el Marco de Acción de Sendai 2015-2030, el cual es firmado por 187 países y cuya principal diferencia con su antecesor MAH, es expresar la necesidad de comprender mejor el riesgo de desastres en todas sus dimensiones relativas a la exposición, vulnerabilidad y características de las amenazas, además de la necesidad de fortalecer la gobernanza y aumentar la preparación. Finalmente, en la 27° Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático de 2022 (COP27), el secretario general llamó a asegurar que a finales de 2027 todas las personas en el planeta estuvieran protegidas por sistemas de alerta temprana, dado que estos tienen el potencial de salvar millones de vidas (UNDRR & WMO, 2023).

Todas estas instancias demuestran lo relevante que se vuelve un S.A.T. en la gestión del riesgo de desastres. La Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) los define como “El conjunto de capacidades necesarias para generar y difundir información de alerta oportuna y significativa, con el fin de permitir que individuos, comunidades y organizaciones expuestas a un peligro se preparen y actúen de manera apropiada y con suficiente tiempo para reducir la posibilidad de daño o pérdida.”, definición que también se adopta en el Reglamento que regula los Organismos Técnicos para el Monitoreo de Amenazas; Organismos Técnicos para el Monitoreo Sectorial; los Instrumentos para la Gestión del Riesgo de Desastres; y los procedimientos de elaboración de los Mapas de Amenaza y los Mapas de Riesgo (Decreto no. 86, 2023). Por otro lado, en el Plan Estratégico Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (ONEMI, 2020) se define como “La suma de las políticas, estrategias, instrumentos y acciones particulares referidos a: la identificación y monitoreo de las amenazas, vulnerabilidades y riesgo; el diseño e implementación de alertas o alarmas relacionadas con el desarrollo inminente de eventos peligrosos; y los preparativos para la respuesta ante emergencias”.

2.2.1 Elementos de un Sistema de Alerta Temprana

Evaluando los avances en su implementación y buscando la mejor forma de desarrollar un S.A.T., se han realizado revisiones a los sistemas ya implementados y, a partir de ello, en la literatura se mencionan diversos elementos con los que debe contar un sistema de alerta para su correcto desarrollo y funcionamiento. Existen cuatro que se repiten y que son clave en un sistema

integral efectivo y centrado en las personas (UNDRR, 2006; UNEP, 2012; Golnaraghi, 2012; WMO, 2018; Budimir, 2020) (ver Figura 4).

1. Conocimiento y evaluación integral del riesgo
2. Monitoreo técnico y servicio de alarma
3. Plan de comunicación y disseminación de la alarma
4. Capacidad y estrategias de respuesta de las personas en riesgo

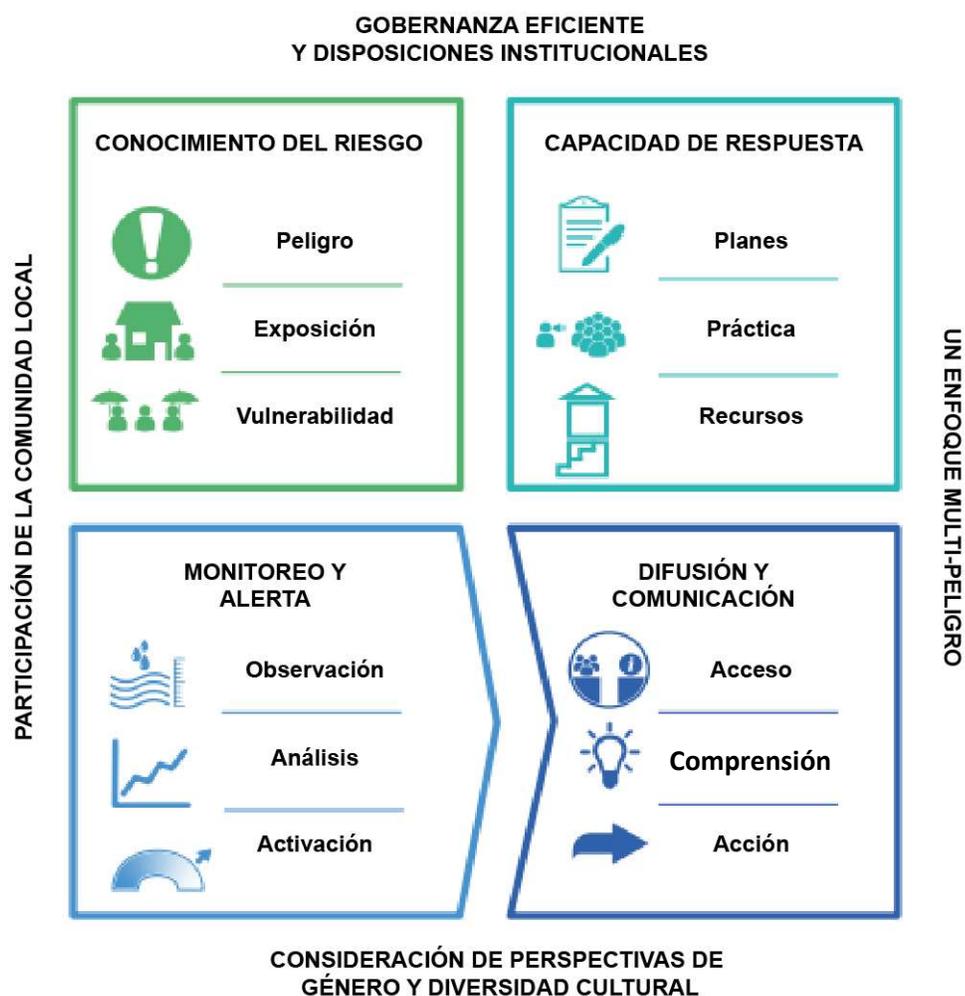


Figura 4: Elementos de un S.A.T. eficiente según la WMO. El diagrama ilustra la complejidad del sistema y la relación permanente entre todos sus elementos, los cuales además deben ser construidos en base a una gobernanza eficiente, la participación de la comunidad local, la consideración del género y diversidad cultural, y con un enfoque multi-peligro. Modificado de Budimir et al. (2021).

Golnaraghi (2012) hace una exhaustiva revisión de los S.A.T. implementados en Bangladesh, Cuba, Francia, Shanghai, Japón, USA, Italia y Alemania, tras ser estos identificados y documentados como sistemas ejemplares en los simposios internacionales ocurridos en 2006 y 2009. La documentación de las buenas prácticas en estos sistemas revela que el diseño e implementación específica de los S.A.T. en cada caso varía según los mecanismos de gobernanza, historia específica, cultura, condición socioeconómica, estructura institucional, capacidades y recursos para sostener los respectivos sistemas. Sin embargo, Golnaraghi (2012) identifica y explica los siguientes 10 principios comunes a todos ellos que permiten que los sistemas logren la efectiva reducción del impacto de los peligros:

1. Apoyo político: Existe un fuerte reconocimiento político de los beneficios de los S.A.T., que se refleja en un compromiso de las políticas, planificación, legislación y asignación presupuestaria a nivel nacional y local para la gestión del riesgo de desastres.
2. Los S.A.T. se construyen sobre cuatro componentes principales donde las capacidades operacionales para detectar y predecir peligros coinciden con la preparación de la comunidad. Estos poseen capacidades observacionales y de predicción bien desarrolladas, un sistema comunicacional confiable, planes de emergencia comprensibles y sistemas de respuesta preparados y efectivos (con los respectivos organismos encargados definidos previamente y coordinados entre ellos)
3. Los roles y responsabilidades de las partes involucradas son claras: Las partes son identificadas y sus roles, responsabilidades y mecanismos de coordinación son claramente definidos y documentados en los planes nacionales y locales.
4. Se proveen los recursos adecuados (humanos, financieros, equipamiento, etc.) en todos los niveles y el sistema es diseñado e implementado considerando factores para una sostenibilidad a largo plazo. Los programas son acompañados de una clara asignación de presupuesto de alta prioridad para su implementación y operación.

5. La información de riesgo (peligro, exposición y vulnerabilidad) es utilizada para mejorar los planes y alertas de emergencia en todos los niveles. Se estiman los impactos en las personas, infraestructura y actividades económicas y así hay seguridad en que las autoridades y el público entienden los riesgos potenciales asociados a los peligros.
6. Los mensajes de alerta son efectivos, poseen autoridad y son accionables. Estos son claros, consistentes e incluyen información del riesgo. Son diseñados asociando el nivel de amenaza con las acciones de preparación y respuesta y son entendidos por autoridades y por la población. Además, estos son desarrollados basados en las necesidades específicas del receptor, y deben ser relevantes, concisos y rápidamente entendibles.
7. La alerta debe llegar a las autoridades, involucrados y a las personas en riesgo a tiempo y de forma confiable para la toma de acción. El mecanismo para ello debe ser sostenible en el tiempo basado en los recursos disponibles en el país
8. Los planes de respuesta ante emergencia deben desarrollarse considerando el nivel de peligro o riesgo cuando corresponda, características de la comunidad expuesta y mecanismos de coordinación. Estos deben desarrollarse según las necesidades individuales de las comunidades.
9. La capacitación en conciencia del riesgo, reconocimiento de peligros y las acciones de respuesta asociada son integradas en programas educacionales formales e informales y se vincula con simulacros y pruebas realizadas regularmente en todo el sistema para garantizar estar listos operacionalmente en cualquier momento.
10. Hay retroalimentación efectiva y mecanismos de mejora en todos los niveles del S.A.T. para proporcionar evaluación sistemática y asegurar la mejora del sistema en el tiempo.

2.2.2 Situación en Chile

En nuestro país, el enfoque ante los desastres ha sido mayoritariamente de tipo reactivo, es decir, de respuesta temprana mediante acciones en la fase de emergencia cuando el peligro ya ha alcanzado y afectado a la población expuesta (ONEMI, 2017). Con el fin de minimizar los impactos y salvar la mayor cantidad posible de vidas, en el último tiempo se ha buscado redirigir el esfuerzo hacia un enfoque preventivo de alerta temprana basado en el monitoreo de los fenómenos naturales (Oberli et al., 2021).

Bajo este contexto, y con un escenario mundial de interés por reducir el riesgo de desastres, las políticas chilenas para la reducción del riesgo de desastres han tenido un desarrollo activo y en armonía con las políticas globales entre las que se cuentan la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, el Marco de Acción de Hyogo 2005-2015, el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres 2015-2030, entre otros. En concordancia, actualmente Chile cuenta con una Política Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (PNGRD), un Reglamento para regular los Organismos Técnicos de Monitoreo (Decreto no. 86, 2023) y un Plan Estratégico Nacional 2020-2030 desarrollado por la Plataforma Nacional para la RRD (PNRRD). La PNRDD está vigente desde 2012 y fue conformada a través del trabajo conjunto de diferentes instituciones incluyendo organismos públicos, privados, de la sociedad civil, académicos y científicos-técnicos, entre otras, que son lideradas y coordinadas anteriormente por ONEMI y actualmente por SENAPRED (Ley no. 21.364, 2021). Se destaca dentro de esta nueva legislación el cambio de un enfoque de respuesta a un planteamiento más integral del riesgo, definiendo el ciclo de Gestión del Riesgo de Desastres (Figura 5), compuesto por 4 etapas que se definen como sigue (Ley no. 21.364, 2021):

1. Fase de mitigación: Comprende las medidas dirigidas a reducir los riesgos existentes, evitar la generación de nuevos riesgos y limitar los impactos adversos o daños producidos por las amenazas.
2. Fase de Preparación: Comprende las capacidades y habilidades que se desarrollan para prever, responder y recuperarse de forma oportuna y eficaz de los impactos de amenazas inminentes o

emergencias. La Alerta constituye una etapa de la Fase de Preparación y consiste en un estado de monitoreo y atención permanente; a la vez que es un estado declarado cuando se advierte la probable y cercana ocurrencia de un evento adverso, con el fin de tomar precauciones y difundirlas.

3. Fase de Respuesta: Corresponde a las actividades propias de atención de una emergencia, que se llevan a cabo inmediatamente después de ocurrido el evento. Tienen por objetivo salvar vidas, reducir el impacto en la comunidad afectada y disminuir las pérdidas.

4. Fase de Recuperación: Corresponde a las acciones que tienen por objeto el restablecimiento de las condiciones normales de vida mediante las etapas de rehabilitación (recuperación a corto plazo) y reconstrucción (reparación o reemplazo a mediano y largo plazo) de la zona afectada, y evitar la reproducción de las condiciones de riesgo preexistentes.

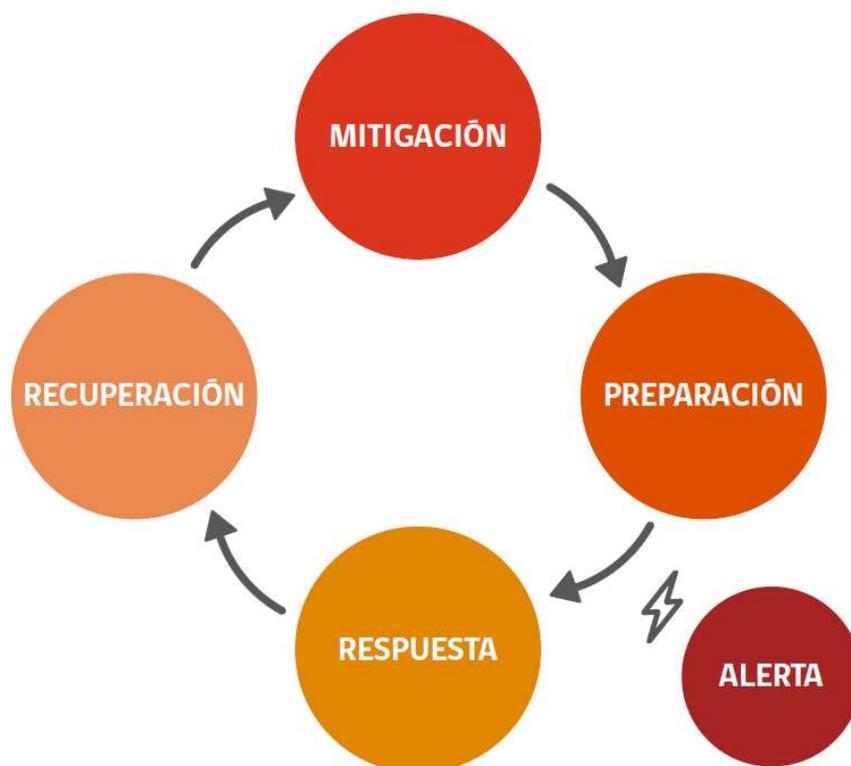


Figura 5: Ciclo de Gestión del Riesgo de Desastres, compuesto por 4 fases. La alerta es parte de la fase de preparación y la fase de recuperación contempla las etapas de rehabilitación y reconstrucción. ONEMI (2020).

Para garantizar una adecuada GRD, a partir del 2021, se establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED) conformado por el conjunto de entidades públicas y privadas con competencias relacionadas con las fases del ciclo del riesgo de desastres, que se organizan descentralizadamente y de manera escalonada (Ley no. 21.364, 2021). Dentro de este Sistema, SENAPRED actúa como mando de coordinación siendo la principal entidad a cargo de la gestión del riesgo en el país. En el monitoreo y alerta de amenazas, trabaja en conjunto con SERNAGEOMIN para operar la Red Nacional de Vigilancia Volcánica y evaluar los peligros volcánicos, con el SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada) para operar la red de boyas y mareógrafos y evaluar el peligro de tsunamis, y con el CSN (Centro Sismológico Nacional) para la detección de la ubicación y magnitud de los sismos (JICA, 2012). Recientemente, en el Decreto no. 86 de 2023 se establece que los Sistemas de Alerta Temprana estarán compuestos por las Unidades de Alerta Temprana, Los Organismos Técnicos para el Monitoreo de Amenazas, el Sistema Nacional de Comunicaciones y el Perímetro de Seguridad. Por lo anterior, ahora el Servicio trabajará con diversos Organismos Técnicos con competencias inherentes a los distintos peligros que pueden acontecer en el territorio, los cuales cuentan con responsabilidades y obligaciones para garantizar el adecuado funcionamiento del sistema. Para el interés de este trabajo se destacan los siguientes Organismos Técnicos para el Monitoreo de Amenazas:

1. Dirección Meteorológica de Chile (DMC), a cargo del monitoreo de la amenaza meteorológica y otras propias de su competencia.
2. Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN), a cargo del monitoreo de amenazas volcánicas, de remoción en masa, de emergencias mineras de gran alcance y otras de su competencia.
3. Centro Sismológico Nacional de la Universidad de Chile (CSN), a cargo del monitoreo de la amenaza sísmica y otras de su competencia.
4. Dirección General de Aguas (DGA), a cargo del monitoreo de la amenaza de inundación por crecida de ríos, lagos, embalses u otros recursos hídricos, y otras propias de su competencia.

5. Dirección de Obras Hidráulicas, a cargo del monitoreo de la amenaza de inundación o anegamiento relacionada con la alteración de la red primaria del sistema de evacuación y drenaje de aguas lluvia, la alteración del suministro de agua potable rural, entre otras propias de su competencia.
6. Bomberos de Chile a cargo del monitoreo asociado a emergencias mayores que incluyen los colapsos estructurales entre otras propias de su competencia.

Además, se menciona que también pueden definirse como organismos de monitoreo aquellos integrantes del Sistema que realicen un monitoreo permanente de una amenaza nueva, distinta a las identificadas, o aquellos Organismos Públicos que resulten competentes como resultado de una modificación en sus facultades, competencias o atribuciones.

Todos estos organismos deben comunicar a SENAPRED tanto a nivel nacional como regional, el estado de la amenaza, su nivel de peligrosidad, el alcance y amplitud de la misma. Luego con esta información, el Servicio debe declarar, en el nivel que corresponda las respectivas alertas a la población y autoridades.

En el Decreto también se establecen los Organismos Técnicos de Monitoreo Sectorial, a los cuales le corresponde la vigilancia de los servicios e infraestructuras de su competencia ante las diferentes amenazas y su posible impacto a afectación a ellos, información que deberán comunicar al Servicio. En el ámbito de este trabajo son relevantes:

1. Superintendencia de Servicios Sanitarios, a cargo del monitoreo de las alteraciones del suministro de agua potable urbana y otras materias de su competencia
2. Ministerio de Obras Públicas, a cargo del monitoreo de las alteraciones de la infraestructura de conectividad y otras de su competencia.

La coordinación de las capacidades de los distintos integrantes del Sistema se establece en los Planes de Emergencia, en este instrumento se presenta la estructura de gestión operativa de ellos

en los niveles nacional, regional, provincial y comunal. Cabe destacar que para su elaboración en los niveles regionales y provinciales se contempla el aporte de la comunidad organizada.

En la actualidad existen planes nacionales específicos de emergencia por variable de riesgo, que en cuanto a peligros naturales se abarcan los tsunamis, los incendios forestales, las erupciones volcánicas y las remociones en masa. En ellos se especifican las responsabilidades de cada institución que forma parte de la gestión y establece, indica y orienta las acciones de respuesta en las distintas fases operativas (alerta, respuesta y rehabilitación) ante situaciones de emergencia, desastre y/o catástrofe.

2.2.2.1 Aluviones en la gestión del riesgo de desastres

En el caso de los aluviones no volcánicos, estos se insertan en el Plan Específico de Emergencia por variable de Riesgo – Remoción en Masa de 2017 de ONEMI, el cual contempla eventos del tipo flujo, deslizamiento y caída por actividad antrópica o por eventos hidrometeorológicos y/o geológicos. El flujo de información del Plan se resume en la Figura 6.

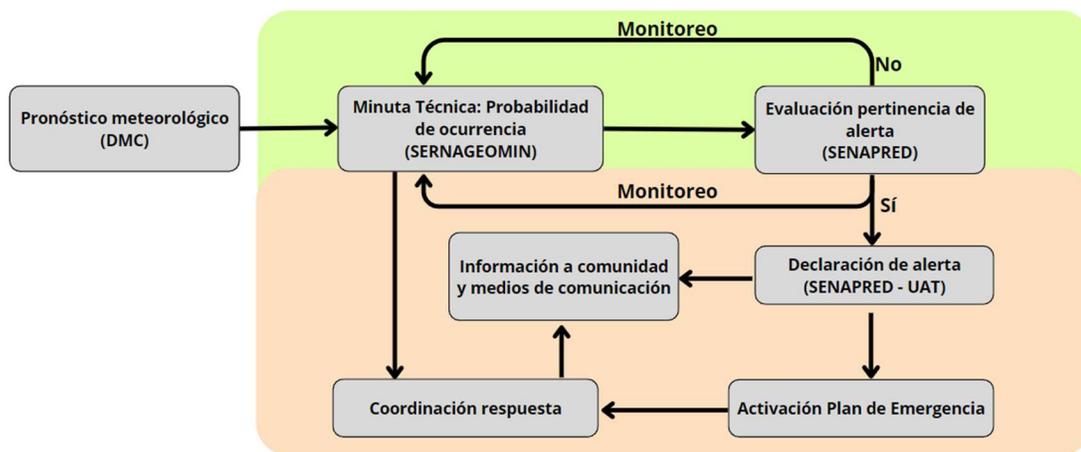


Figura 6: Esquema general del flujo de información en el Plan Específico de Emergencia por variable de Riesgo – Remoción en Masa. El color verde representa la situación sin alerta declarada y en color naranja la situación con declaración de alerta. Modificado de ONEMI (2017).

Este plan se activa ante niveles de alerta amarilla o roja (ver Tabla 1) declaradas por SENAPRED o ante eventos múltiples o súbitos de remoción en masa, o al generarse emergencias secundarias producto de ellas (ONEMI, 2017). Esta alerta es comunicada por el Servicio a través las Unidades de Alerta Temprana (Ley no. 21.364, 2021).

Tabla 1: Niveles de alerta y su condición de emisión en el Plan específico de emergencia por variable de riesgo: remoción en masa (ONEMI, 2017).

Tipo de alerta	Condiciones/Requisitos
Verde – Temprana Preventiva	<ul style="list-style-type: none"> • Condiciones meteorológicas (precipitaciones) pronosticadas para la Región, que superen los valores de referencia considerados moderados. • Antecedentes históricos de condiciones meteorológicas que hayan desencadenado eventos de remoción en masa de carácter bajo a moderado, basado en registros existentes. • Movimientos sísmicos de menor y mediana intensidad.
Amarilla	<ul style="list-style-type: none"> • Alerta meteorológica por precipitaciones emitida por la DMC. • Amenaza indirecta a centros poblados y/o infraestructura crítica cercanos a laderas, cursos de aguas o quebradas y zonas de fallas geológicas. • Antecedentes históricos de condiciones meteorológicas que hayan desencadenado eventos de remoción en masa de carácter moderado a alto, basado en registros existentes. • Movimientos sísmicos de mediana intensidad.
Roja	<ul style="list-style-type: none"> • Alerta o Alarma meteorológica por precipitaciones emitida por la DMC. • Alta probabilidad de afectación a centros poblados y/o infraestructura crítica ubicados cercanos a laderas, cursos de aguas o quebradas y zonas de fallas geológicas. • Antecedentes históricos de condiciones meteorológicas que hayan desencadenado eventos de remoción en masa de carácter alto, basado en registros existentes. • Movimientos sísmicos de mediana o mayor intensidad.

El nivel de alerta se fundamenta en minutas técnicas emitidas por SERNAGEOMIN y en las evaluaciones realizadas en los Comités para la Gestión del Riesgo de Desastres (COGRID).

Esta minuta técnica es elaborada por la Unidad de Peligros Geológicos y Oficina de Gestión de Emergencias de SERNAGEOMIN y se elabora según las condiciones meteorológicas informadas por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y los registros históricos. Es decir, considera la posibilidad de ocurrencia de remociones en masa en las distintas zonas geomorfológicas de cada región (Litoral, Cordillera de la Costa, Precordillera, etc.) a partir de aquellas condiciones según categorías de ocurrencia muy alta, alta, moderada o baja (SERNAGEOMIN, 2020). Para ello, se utiliza el catastro de eventos de remoción en masa implementado desde 2017 por SERNAGEOMIN (disponible en: <https://portalgeom.in.sernageomin.cl/>), y además se establecen

algunas consideraciones generales y de referencia para los eventos de remoción en base a la descripción realizada por Hauser (2000). En la Tabla 2 se muestran dichas consideraciones asociadas al peligro de flujos detríticos y/o de barro, y a flujos laháricos.

Tabla 2: Consideraciones generales para las remociones de tipo flujo (ONEMI, Plan Nacional Específico por variable - remoción en masa, 2018)

Amenaza	Zona de amenaza	Descripción
Flujos (detríticos y/o barro)	Altiplano	Vinculado a precipitaciones estivales altiplánicas.
	Zonas llanas aledañas a borde preandino de Chile Central (32° - 35°S)	Alto potencial de procesos aluvionales propios de la integración de importantes caudales de agua con gran carga de sólidos y considerable energía destructora. La mayoría de las cuencas hidrográficas, en torno al preandino desarrollan respuestas casi instantáneas, con breves tiempos de concentración del escurrimiento.
	Relieves graníticos meteorizados (36°- 39°S regiones del Maule a la Araucanía.)	Gruesos suelos residuales, resultan de la alteración in situ de rocas graníticas paleozoicas.
	Quebradas andinas	Quebradas con escurrimiento efímero, con depósitos coluviales con baja compacidad y por tanto sensibles a la erosión hídrica y formación de flujos.
	Quebradas asociadas a la Cordillera de la Costa (farellón costero) en el extremo norte.	Quebradas secas que se activan producto de precipitaciones intensas en el borde costero y generan flujos en dirección al mar.
	Sectores glaciales andinos, principalmente y regiones de Aysén y Magallanes.	Se asocia principalmente a extensos campos de hielo patagónico. Corresponde a un flujo aluvional o Jökulhlaup producido por el abrupto colapso de un lago glacial.
Flujos laháricos	Volcanes Llaima, Villarrica, Calbuco y Hudson (principalmente)	Flujos laháricos voluminosos se han registrado con relación a fases de erupciones volcánicas.

Las determinaciones, rangos y recomendaciones de este documento son meramente cualitativos y se basan principalmente en la susceptibilidad natural del terreno, condiciones desfavorables identificadas sobre la base de eventos previamente registrados o en modificaciones en factores condicionantes de la susceptibilidad (ONEMI, 2017).

Bajo este plan, las acciones de alerta temprana no se dan en todos los casos ya que depende del factor desencadenante de la remoción en masa. En general actualmente sólo es posible alertar los eventos desencadenados por variables hidrometeorológicas asociadas a un pronóstico de precipitación previo, las activadas por sismos o eventos volcánicos por lo general deben ser previstos en base a mapas de peligro o susceptibilidad. Por ello, para suplir esta urgente necesidad, SERNAGEOMIN está trabajando en aumentar la cantidad de este tipo de productos. Actualmente, como Organismo Técnico de Monitoreo, también puede validar mapas de amenaza y de riesgo elaborados por universidades reconocidas por el Estado de Chile o centros de investigación y estudios asociados a estas o por otras entidades privadas (Decreto no. 86, 2023, Artículo 42 y 46).

Este plan, además cuenta con un sistema de evaluación de daños y necesidades con el fin de administrar adecuadamente la información de emergencia como base para adoptar decisiones más efectivas y eficaces de respuesta. Dentro de este sistema se enmarcan los Informes Técnicos de Emergencia donde organismos técnicos y organismos del SINAPRED, entregan información dentro del marco de su competencia para la oportuna y adecuada toma de decisiones.

Por otra parte, los aluviones volcánicos primarios o lahares se gestionan a partir del Plan Específico de Emergencia por variable de Riesgo – Erupciones Volcánicas (ONEMI, 2018) y sus equivalentes regionales y comunales. Sin embargo, la única mención hacia ellos es en los planes comunales donde se establece la utilización de mapas de peligro volcánico para determinar la evacuación preventiva de las personas expuestas y la definición de vías de evacuación y perímetros de seguridad en los casos de Alerta Roja (Municipalidad de Villarrica, 2016; Municipalidad de Pucón, 2017.), además se menciona que pueden ocurrir a partir de una alerta técnica amarilla (ONEMI, 2022b)

3. MONITOREO EN S.A.T. DE ALUVIONES

Los sistemas de monitoreo y alerta de remociones en masa se han vuelto un elemento esencial a nivel mundial para la gestión integral del riesgo. Sin embargo, aún son aspectos en desarrollo, la reducción en la obtención de falsas alarmas, la complejidad técnica de obtener los umbrales que desencadenan el evento y, en cuanto a la creación de mapas de susceptibilidad, la incertidumbre y la variedad de las condiciones gatillantes (Guzzetti et al., 2020).

Por lo anterior, las tecnologías y parámetros utilizados para el monitoreo en los sistemas de alerta temprana de remociones en masa son muy amplios (ver Tabla 3), donde para cada sistema, la elección específica del instrumento depende del tipo de peligro inminente, el proceso o parámetro de interés, el área expuesta, el conocimiento técnico de las autoridades responsables, la relación entre el costo del sistema y la reducción del riesgo (Stahli et al., 2015; Hürlimann et al., 2019; Guzzetti et al., 2020). Además, para aumentar el conocimiento sobre estos fenómenos es común la complementación entre el monitoreo de advertencia/alerta y el de investigación, en cuyo caso los instrumentos adicionales variarán según el proceso de interés que puede ser el monitoreo de los mecanismos iniciadores del movimiento (pluviómetros, humedad del suelo, presión de poros, entre otros) o el monitoreo de las dinámicas del flujo (por ejemplo, medición de nivel del flujo, vibraciones del suelo) (Hürlimann et al., 2019).

En cuanto a los tipos de S.A.T., Sättele et al. (2012) clasifica los sistemas de alerta temprana en tres tipos: de alarma, de advertencia y de predicción:

1. El sistema de alarma se basa en la detección de un evento peligroso en curso tras lo cual se inicia automáticamente la alarma. La precisión de esta alarma es muy alta, pero el tiempo de reacción es bajo.
2. El sistema de advertencia se basa en la detección de cambios significativos en el ambiente producto de la inminente ocurrencia de un fenómeno o en la detección de eventos potencialmente gatillantes. La precisión de este sistema es menor que en un sistema de alarma, pero el tiempo de reacción disponible es mayor.

3. El sistema de predicción es el de menor precisión ya que se basa en el uso de modelos para la predicción de ocurrencia de un fenómeno, sin embargo, es el que mayor tiempo de reacción entrega.

Si bien cada uno de estos sistemas posee sus propias cualidades, desventajas y limitaciones, en los monitoreos de advertencia y predicción se destaca la problemática de que los sensores típicamente miden variables ambientales que afectan el proceso detonante pero no las condiciones críticas del suelo que controlan el inicio del proceso. Esto se vuelve relevante dado que estas últimas definen que el colapso del material puede ocurrir como respuesta a una gran variedad de combinaciones de dicho proceso detonante, como, por ejemplo, intensidades o duraciones de la precipitación. Por ello, el monitoreo de la precipitación, que es lo más típico de utilizar, puede inducir a una incerteza considerable en los procedimientos de alerta. (Stahli et al., 2015).

En un sistema de alerta que trabaja con la predicción, se vuelve relevante caracterizar las condiciones mínimas para la generación de aluviones, y en este sentido, la definición de umbrales de pluviosidad es un método ampliamente aceptado y utilizado. En este método se destaca su aplicación en la predeterminación de niveles de peligro al establecer umbrales que separan valores de precipitación bajo los cuales se considera muy improbable la ocurrencia y por lo tanto existe un bajo peligro, y sobre ellos se considera probable o muy probable y por lo tanto hay un mayor peligro (NOAA-USGS Debris-Flow Task Force, 2005). Esto además de la predicción de ocurrencia misma de los eventos. En particular, la utilización de umbrales intensidad-duración junto a pronósticos de lluvia y mediciones en tiempo real de datos lluvia, han sido la base de muchos sistemas operativos de alerta de aluviones en las que se cuenta Hong Kong, distintos estados de EEUU, Río de Janeiro, Taiwan, Inglaterra, Suiza, Italia, España, Francia (NOAA-USGS Debris-Flow Task Force, 2005; Huggel et al., 2010; Berenguer et al., 2015; Hürlimann et al., 2019; Guzzetti et al., 2020)

Este método, sin embargo, cuenta con la limitación de que los valores de umbral son generalmente específicos para cada área ya que dependen de una serie de factores propios y además estos pueden evolucionar en el tiempo, por lo que su aplicación puede resultar limitada para los S.A.T. A pesar de esto, se acepta que en general los valores son similares y suele ser lo

más común que los flujos de detritos se generen por lluvias de corta duración y elevada intensidad (Wieczorek & Glade, 2005).

Además, como medida para disminuir la incerteza de estos métodos, se propone la combinación de los umbrales con mapas de susceptibilidad. Esto se ha implementado experimentalmente en subdominios de los Pirineos, donde el sistema comprende la creación de mapas de susceptibilidad basados principalmente en variables de morfometría de cuencas hidrográficas complementadas en algunos casos con información geológica o de suelos. Posteriormente, ante un pronóstico meteorológico, se establece un nivel de alerta mediante la aplicación de lógica difusa que describe el comportamiento esperado para las distintas combinaciones entre susceptibilidad y pronóstico (Berenguer et al., 2015). En este mismo sistema también se plantea la posibilidad de utilizar valores de intensidad-duración para la estimación de la magnitud de la precipitación al igual que en los casos presentados anteriormente.

Otros métodos de predicción actualmente en estudio, pero menos populares por su complejidad y especificidad espacial, son modelos basados la medición del rápido aumento en la presión de poro del suelo previa a una remoción (Godt et al., 2009) o la identificación y detección del nivel crítico de escorrentía (Gregoretto et al., 2016; Capra et al., 2018).

En cuanto a los sistemas de alarma, lo más utilizado es la detección de la vibración del suelo o del infrasonido generado por el movimiento de un flujo, así como también cables de detección que perciben el flujo mismo. En algunos países también se utiliza simplemente la detección visual del fenómeno, ya sea de forma directa o mediante cámaras de video. Los instrumentos más comunes son los sismómetros, geófonos y acelerómetros, los cuales por lo general se utilizan de forma conjunta y complementaria. El más típico actualmente es el geófono debido a su bajo costo y facilidad de instalación (Hürlimann et al., 2019). Sin embargo, este posee la desventaja frente a los otros métodos de que su colocación es en las inmediaciones del canal, mientras que los sismómetros e infrasonido se instalan a cientos o miles de metros de la trayectoria del flujo, lo cual les entrega una mayor vida útil y la posibilidad de monitorear varios puntos de interés en simultáneo. Para estos instrumentos que detectan el paso o inicio del flujo, también es común la definición de un umbral que en este caso distinga una señal efectiva de otras señales de fondo o

que puedan producirse por otras circunstancias (Hürlimann et al., 2016, 2019; Abancó et al., 2014).

También, se menciona la utilización de una variación en la frecuencia de muestreo, donde se fija una frecuencia baja para la situación de vigilancia continua sin la ocurrencia del evento, y al detectar con distintos medios la posible o verdadera ocurrencia de un flujo, se cambia a un registro con alta frecuencia de muestreo. Esto permite mejorar la precisión en el registro de los datos y la optimización del almacenamiento (Hürlimann et al., 2019).

En la Tabla 3 se detalla la variedad de instrumentos utilizados actualmente, el parámetro en observación, el proceso asociado y el tipo de S.A.T. en el que se inserta típicamente.

Tabla 3: Algunos sensores utilizados actualmente en los distintos sistemas de alerta temprana y sus características. Modificado de Stahli et al. (2015) y Hürlimann et al. (2019)

Sensor	Parámetro observado	Proceso de estudio	Tipo de monitoreo
Pluviómetro	Precipitación	Mecanismo iniciador	Todos
Radar meteorológico	Precipitación	Mecanismo iniciador	Predicción
Reflectrómetro de dominio de tiempo (TDR) /frecuencia (FDR)	Contenido de agua del suelo	Mecanismo iniciador	Predicción
Tensiómetro	Presión de poro del agua	Mecanismo iniciador	Predicción
Sensor de presión	Presión de poro del agua	Mecanismo iniciador	Predicción
Piezómetro	Nivel freático	Mecanismo iniciador	Predicción
Cámara de video	Características del flujo	Mecanismo iniciador/ Dinámica del flujo	Alarma/ advertencia
Sensor de nivel	Profundidad del flujo	Dinámica del flujo	Alarma
Geófono	Vibración del suelo	Dinámica del flujo	Alarma
Sismómetro	Vibración del suelo	Dinámica del flujo	Alarma
Sensor infrasonido	Fluctuación en la presión del aire	Dinámica del flujo	Alarma/ advertencia
Radar Doppler	Velocidad superficial	Dinámica del flujo	Alarma
Sensor de arrastre	Erosión	Dinámica del flujo	Alarma
Célula de carga	Esfuerzo de impacto basal y lateral	Dinámica del flujo	Alarma

Como se mencionó anteriormente, los tipos de monitoreo no son excluyentes entre ellos, y en efecto existe la complementariedad, donde típicamente en la cabecera o zona de inicio del evento se incluyen instrumentos que ayudan a la evaluación de los parámetros hidrometeorológicos, los cuales se utilizan para estudiar las condiciones detonantes del flujo y poder establecer una predicción basada en datos empíricos. Mientras que, en otros puntos, incluyendo o no la cabecera, predomina la instalación de instrumentos que detectan el paso del flujo tanto para validar las mediciones, activar las alertas, conocer información de la dinámica del flujo y/o cambiar la frecuencia de toma de datos (Badox et al., 2009; Bel et al., 2017; Comiti et al., 2014; Huang, 2023)

Finalmente, independiente del tipo de monitoreo implementado, es necesario también considerar los mecanismos de transmisión de datos y la fuente de energía para alimentar los instrumentos, lo cual va a depender fundamentalmente de las características de la zona de instalación. Por lo general, el suministro de energía se realiza con baterías, paneles solares, o sistemas que aprovechan los flujos de agua o viento. En cuanto a la transmisión de datos, lo más común es mediante módem celular o radio y, de forma menos común, telemetría satelital o conexión por cable (Hürlimann et al., 2019). Cabe destacar que es relevante considerar que la transmisión de datos no sólo abarca el monitoreo de los fenómenos como tal, sino también la información necesaria para el monitoreo remoto del correcto funcionamiento del equipo (Hürlimann et al., 2019).

3.1 Ejemplos en el mundo

3.1.1 Sistemas con monitoreo de predicción

Este tipo de sistema se encuentra operacional en diversos países tanto a escala nacional como regional y también de forma muy local, por lo general estos se basan en información meteorológica que varía en distintas combinaciones de redes de pluviómetros, pronósticos de modelos numéricos (Huggel et al., 2010), pronósticos inmediatos de radar (Berenguer et al., 2015; Yeung, 2012) y/o estimaciones satelitales (Liao et al., 2010). Además, estos datos se utilizan en modelos para realizar pronósticos de la probabilidad de ocurrencia de un flujo, siendo

como se mencionó anteriormente, lo más común la definición de umbrales empíricos o mediante modelos físicos. También es frecuente la utilización de información relacionada a la susceptibilidad frente a las distintas remociones, la cual puede variar en forma de mapas que consideran distintos factores (Berenguer et al., 2015; Liao et al., 2010) o como opiniones de expertos. Todos estos procesos técnicos además cuentan con procesos de evaluación para determinar la efectividad de los distintos pronósticos

En cuanto al aspecto operacional, lo más común es la operación continua del monitoreo con generación de modelos e información en intervalos predefinidos por los organismos encargados, los cuales son típicamente emitidos de forma diaria con un aumento en la frecuencia en concordancia con los respectivos aumentos del nivel de alerta (Abancó et al., 2012, 2014). La transmisión de la información y de las alertas también depende en gran medida del nivel otorgado, en general esta puede estar destinada a los gestores del sistema, a las autoridades o a la población general o afectada y existe una variedad de medios y estrategias para realizar esta difusión de la información. (Guzzetti et al., 2020).

Por lo anterior, en general todos estos sistemas funcionan de manera muy similar con variaciones menores que logran un ajuste personalizado para cada área de implementación y en acuerdo con las capacidades de los organismos encargados y del territorio correspondiente.

Como ejemplo concreto del funcionamiento, se presenta el sistema de California, EEUU, en el cual la gestión del riesgo de aluviones se coordina a través de un esfuerzo conjunto principalmente entre la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA)-Servicio Meteorológico Nacional (NWS) y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). Esta alianza se establece debido a que el monitoreo utilizado es del tipo predictivo con base en la utilización de datos hidrometeorológicos entre los que se cuentan un pronóstico cuantitativo de la lluvia, estimaciones de precipitaciones y los datos de lluvia observados por las redes de alerta y otros datos calibrados específicamente en la localidad de interés.

El sistema se basa en la realización de 3 tipos de productos según el grado de certidumbre y amenaza del evento: Outlook (predicción), watches (alertas) y warnings (alarmas) de menor a

mayor amenaza respectivamente. La solicitud inicial de declaración es de la USGS hacia la oficina meteorológica local de interés, la cual genera una declaración de información pública y transmite la información mediante la radio de peligros de NOAA, este último genera el texto final, el cual se actualiza en el tiempo según la evolución del evento teniendo un tiempo de validez especificado a en el documento, el que además contiene la solicitud de activación de un sistema de alerta de emergencia apropiado al nivel de alerta indicado y una dirección hacia la página de la USGS donde se encuentran las declaraciones junto a mapas que muestran la información correspondiente. De ser de interés, la información también puede ser comunicada mediante un comunicado de prensa, pero siempre posterior a la declaración de información pública.

Para lograr una eficiente coordinación y la rápida identificación del peligro, se establece un flujo constante de datos meteorológicos principalmente hacia la USGS en un formato en el cual puedan incorporarse inmediatamente a un Sistema de Información Geográfica (SIG) y así estos pueden utilizarse rápidamente y en tiempo real en modelos hidrológicos y geológicos. Esto además está acompañado de un sistema de entrenamiento donde la USGS genera instancias para los operarios de las oficinas meteorológicas, voluntarios de la NWS y otros interesados y les enseña cómo y dónde se generan los aluviones, las condiciones propicias para su generación y qué productos utilizan como institución para la creación de los distintos productos. Luego la USGS en conjunto con la NWS generan planes informativos para cada región en la que se implementa el sistema de alerta de flujos de detritos. (NOAA-USGS Debris-Flow Task Force, 2005)

Este sistema además cuenta con evaluaciones continuas tanto de las habilidades de predicción como de la efectiva emisión de las alertas y el tiempo de aviso de ellas para generar las mejoras necesarias año a año. Para ello se realiza una evaluación interna de la gestión, revisando si las alertas llegan a las personas expuestas, y si lo hacen a tiempo, además de si las acciones tomadas son efectivas para escapar del daño inminente. En algunos estados, esto se ha realizado con evaluaciones de los organismos a cargo de la gestión mediante formularios programados como parte del plan de emergencia antes, durante y después de la temporada invernal.

3.1.2 Sistemas con monitoreo de alarma

Este tipo de sistema es relativamente más simple que el anterior y se compone de un sistema de sensores que detectan la ocurrencia efectiva de un flujo mediante la vibración del suelo (geófonos) (Badoux et al., 2009) o al detectar la altura del flujo (sensores de radar, ultrasónicos o láser) (Fathani & Legono, 2013), y que se encuentran directamente vinculados a sistemas de señales de alarma acústicas (sirenas) o visuales (luces, semáforos). Si bien estos sistemas cuentan con un escaso tiempo para reaccionar, del orden de algunos minutos, han demostrado ser exitosos en la mitigación de las consecuencias fatales (Badoux et al., 2009; Hürlimann et al., 2016).

Como ejemplo del funcionamiento de estos sistemas, a partir del año 2007 se instaura en la cuenca de Illgraben, Suiza un sistema inspirado en los utilizados para el peligro de avalanchas de nieve en la región (Badoux et al., 2009). La base técnica del sistema es la implementación de instrumentos que detectan la ocurrencia de un flujo de detritos a partir del registro de la vibración del suelo en las zonas de mayor altitud en la que puedan instalarse dentro del rango de la red telefónica pública (GSM), esto para obtener el mayor rango de tiempo posible para la respuesta sin perder la transmisión de la información. Al ocurrir la detección, el sistema envía señales por la red GSM que activa luces y sirenas ubicadas en los caminos y carreteras que cruzan por el canal de paso del flujo y también envía mensajes a los tomadores de decisiones de la comunidad. Esta alarma se activa durante 20 minutos, que es el mayor tiempo estimado de arribo del flujo hacia las zonas más bajas donde se encuentra la población, y al activarse se revisan los demás sensores cada 5 minutos para verificar la primera señal obtenida, si los sensores de cota más baja no registran la señal, la alerta se desactiva luego de 10 minutos y se evitan los problemas mayores asociados a una falsa alarma. En la Figura 7 se presenta la disposición de los sensores y de los equipos de alerta en la cuenca de Illgraben.

Los sensores además de transmitir información al activar las alertas, también envían señales diarias a los encargados de su funcionamiento para mantener el monitoreo de la salud de los sensores, es decir, que si estos mensajes no llegan, se asume que se necesita realizar una revisión y reparación de los instrumentos.

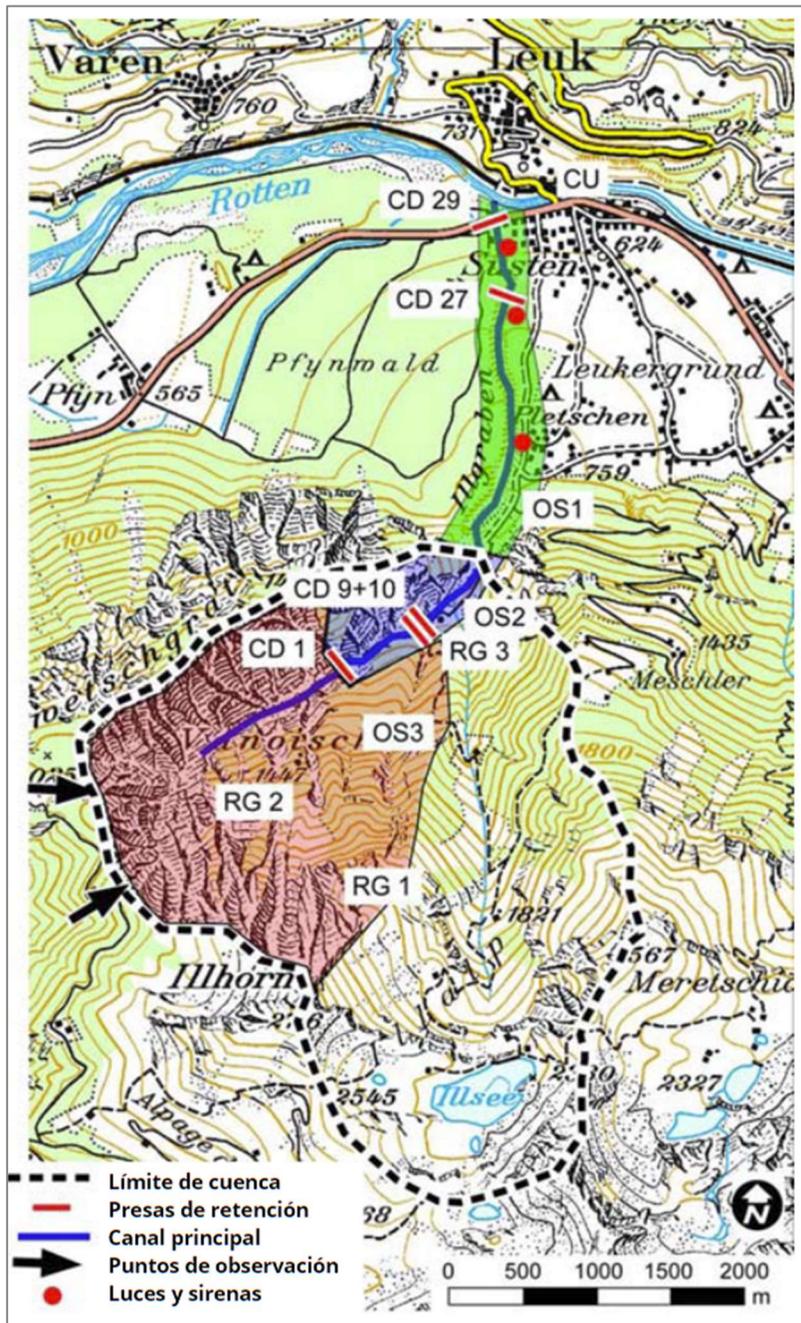


Figura 7: Disposición del sistema de alarma de aluviones en Illgraben. Se muestra el sistema de detección en las presas 1 (CD1), 9 y 10 (CD9 + 10), los pluviómetros (RG), los sectores de observación (OS), la unidad de comunicación (CU) y los puntos de alarma (puntos rojos). Modificado de Badoux (2009)

El sistema también puede activarse previamente a partir de un pronóstico meteorológico desfavorable o por la observación de alguna condición de peligro en la cuenca, en cuyo caso hay tiempo de implementar medidas de mitigación. Esto se realiza a cargo de la Unidad Cantonal de

Crisis del Cantón de Valais (CERISE), la cual monitorea las condiciones y declara alerta en caso de considerarlo necesario para que la Unidad de Crisis Municipal evalúe la situación y decida las medidas a tomar (Badoux et al., 2009)

Se hace evidente que el éxito en el manejo de la crisis en este sistema depende tanto de la experiencia de las personas a cargo como de la confiabilidad y calidad del pronóstico y de las observaciones. Cabe destacar, que este sistema además cuenta con medidas organizacionales en la comunidad, donde se realiza la diseminación de información tanto a turistas y residentes, se ha implementado la educación sobre este peligro en la escuela local y los procedimientos de alerta y alarma se han vuelto de conocimiento general. Además hay instalación de señalética permanente en las cercanías del canal, indicando el riesgo de transitar por esa zona y la petición de no permanecer en ella.

3.2 Situación en Chile

En la actualidad, en Chile el monitoreo de aluviones comprende únicamente la probabilidad de ocurrencia, a escala regional, en base a pronósticos meteorológicos y al conocimiento de eventos previos. Por esto, el tipo de sistema de monitoreo en el plan de gestión de aluviones chileno puede definirse como un sistema de predicción por pronóstico meteorológico con un alto grado de incertidumbre y poca precisión espacial.

Sin embargo, las nuevas legislaciones buscan cambiar esta situación estableciendo un enfoque preventivo (ONEMI, 2020) en el cual definen nuevas responsabilidades en el monitoreo de amenazas (Ley no. 21.364, 2021; Decreto no.86, 2023).

En el último tiempo han surgido distintas iniciativas para la implementación de un monitoreo más preciso que le otorgue un mayor grado de certeza al sistema. Johnson & Palma (2015) logran registrar exitosamente la ocurrencia, trayectoria y velocidad de lahares generados durante la erupción de Villarrica en 2015 mediante la instalación de arreglos de infrasonido y proponen su utilización como sistema de detección, seguimiento y alarma en los sistemas de alerta temprana de aluviones volcánicos o no volcánicos en el marco del proyecto FONDEF “Desarrollo Científico y Tecnológico de alto impacto para la detección, alerta temprana y gestión del riesgo de aluviones”.

El Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN) en conjunto con académicos de la Escuela de Ingeniería UC en 2016 realizan un proyecto piloto de un sistema de monitoreo de aluviones en la Quebrada Ramón en la Región Metropolitana, donde se desplegó una serie de micro estaciones hidrometeorológicas que proporcionan datos en tiempo real para obtener una estimación precisa de la elevación de la isoterma 0°C, su dinámica temporal y la magnitud y comportamiento espacial de la precipitación (Oberli, 2021). Sin embargo, este sistema fue desmantelado en 2021 debido a que ninguna institución se hizo cargo del proyecto para integrarlo en un sistema de alerta de aluviones. En este proyecto además se recomienda utilizar complementariamente estaciones fluviométricas y mediciones de transporte de sedimento y granulometría para la posterior construcción de modelos hidrológicos e hidráulicos y también de pronóstico que puedan eventualmente complementar los registros históricos (Oberli, 2021).

Farías et al., (2016) de SERNAGEOMIN, proponen una estrategia para evaluar la factibilidad técnica de un sistema de monitoreo y alerta temprana que sirva como herramienta en la GRD. En esta estrategia se contempla en primera instancia un análisis sistematizado en base a la recopilación de antecedentes para definir la necesidad de monitoreo en un área específica. Una vez identificada la necesidad, se genera un conocimiento más profundo de las características del área y del fenómeno mediante modelos del comportamiento del flujo y modelos de amenaza, para posteriormente definir zonas críticas y lugares específicos para la implementación del monitoreo, así como los parámetros de interés que serán definidos con el fin de tener una buena capacidad predictiva de la eventual ocurrencia del fenómeno. Como última etapa propone transferir la información y conocimiento adquirido a organismos públicos que apoyen la gestión, entes sociales y a la comunidad en general.

Por último, en junio de 2023 se ingresa a SERNAGEOMIN la donación de instrumentos de medición de variables físicas como la lluvia, humedad de suelo y vibraciones asociadas al paso de aluviones por parte del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) en el contexto del convenio de colaboración entre ambos servicios firmado en 1982 (SERNAGEOMIN, 2023). Esto se realiza con el fin de establecer un programa piloto de monitoreo de remociones en masa en la comuna de San José de Maipo y con ello generar una base de conocimiento sobre los factores que dan origen a estos procesos (SERNAGEOMIN, 2023).

4. ESCENARIOS DE PELIGRO DE ALUVIONES EN CHILE

Para una óptima gestión del riesgo, es relevante conocer las características de los escenarios de peligro que generan los riesgos, ya que los aluviones ocurren a lo largo de todo el territorio pero su origen varía acorde a las condiciones climáticas de cada zona. Es por ello, que a partir de la revisión del catastro de remociones en masa de SERNAGEOMIN, específicamente de los flujos de detritos, y de distintas fuentes tanto científicas como periodísticas, se distinguen escenarios de ocurrencia de aluviones en base a sus distintos patrones de factores condicionantes y detonantes, los cuales son fuertemente influenciados por las características geográficas y climáticas en las distintas latitudes del país. Para la identificación de los meses de ocurrencia se utilizan todos los eventos aluvionales del catastro (ver Anexo 5), pero con el fin de determinar la utilidad de la implementación de un sistema de alarma, para el resto de la información se utilizan sólo los eventos con una extensión reportada >1 km (ver Anexo 6). Con dicho criterio finalmente se hallan y analizan en detalle 44 eventos, de ellos 28 son no volcánicos, 14 de la zona norte, 8 de la zona centro sur, 5 de la zona sur y 1 de la zona austral. Los 16 restantes corresponden a flujos volcánicos mayoritariamente de la zona sur y uno de la zona austral, de los cuales 14 son eventos de lahares primarios y 2 de lahares secundarios. Del catastro de eventos se pueden destacar los siguientes puntos:

1. En el país hay distintos escenarios de ocurrencia de aluviones, los cuales están principalmente determinados por su latitud geográfica y el consecuente carácter climático de ella. En cuanto a los eventos no volcánicos, estos se pueden agrupar en zona norte, comprendiendo desde la región de Arica y Parinacota hasta la región de Coquimbo. Zona centro sur, comprendiendo desde la región de Valparaíso hasta la región del Bío Bío. Zona sur desde la región de la Araucanía hasta la región de Los Lagos, y finalmente la zona austral abarcando las regiones de Aysén y de Magallanes. Dentro de esta división, la zona norte además se divide en zona costera y zona pampeana y cordillerana. En cuanto a los aluviones volcánicos, estos se definen en una única zona que abarca la zona sur y la zona austral definidas anteriormente, ya que no hay registro de eventos en otras latitudes.

2. Los aluviones no volcánicos ocurren en una amplia variedad de extensiones y magnitudes, siendo más abundantes los de tipo local que abarcan una extensión menor a 1 km desde el área de origen. Estos flujos no son considerados en el análisis ya que su corta extensión y, por lo tanto, escaso tiempo de arribo a las zonas de depositación, no los hacen de interés para la implementación de un sistema de alarma. Sin embargo, para efectos de la gestión del riesgo, estos son pertinentes para la implementación de medidas estructurales de mitigación. Construcciones que, particularmente en el norte del país en los casos de mayor recurrencia y mayor afectación a la población, ya se encuentran vigentes (Falcon et al., 2014; Alfaro et al., 2015; Opazo et al., 2015). Cabe destacar, que el análisis realizado no abarca la totalidad de eventos de gran magnitud, ya que, en muchos casos la información de la extensión del flujo no se encuentra disponible y tampoco es posible extraerla de la información entregada.
3. De los eventos no volcánicos considerados, casi la totalidad son detonados por eventos climáticos adversos con fuertes precipitaciones líquidas, con algunas excepciones donde el detonante es un sismo (Naranjo et al., 2001a) o desprendimiento rocoso por pérdida de resistencia de materiales intensamente fracturados (Naranjo et al., 2001b). Además, todos los eventos coinciden con los factores condicionantes de altas pendientes y disponibilidad de material removible por distintas causas. En cuanto a las características específicas del tipo de régimen pluvial detonante, este no se puede determinar con certeza ya que la extensión de las tormentas que generan los flujos muchas veces son locales y no pueden ser medidas apropiadamente por las estaciones meteorológicas. En general, se toman los datos de la estación meteorológica más cercana, la cual puede estar en una zona con una afectación muy distinta a la zona de origen del flujo.
4. Más de la mitad de los eventos considerados son del tipo recurrente, con registros históricos previos de eventos y condiciones similares.
5. Los efectos sobre la población, en gran parte son producto directo del paso del aluvión y consisten principalmente en el daño parcial, destrucción u obstrucción de rutas y puentes que se encuentran dentro del área de transporte del flujo, lo cual también sucede con viviendas e infraestructuras de producción. También de forma directa se ha registrado el deceso y

desaparición de personas. De forma indirecta los flujos además generan daños por las inundaciones producto de las crecidas o embalsamientos parciales de ríos y esteros.

6. En la mayoría de los eventos no volcánicos detonados por lluvias ha existido una alerta previa en distintos niveles, sin embargo, no se puede establecer una relación directa entre la existencia de la alerta y una disminución del daño directo a las personas.

7. En algunos casos, y a partir de los registros de 2004, tras la ocurrencia de ciertos eventos se hace la sugerencia desde SERNAGEOMIN de implementar un monitoreo pluviográfico y definición de umbrales críticos para establecer un sistema de alerta y alarma, además de la implementación de señaléticas y zonas de evacuación (Carrasco & Ramírez, 2021; Garrido et al., 2018; Gho et al., 2016; Marín et al., 2020; Marín & Garrido, 2012; Marín & Valdés, 2012; Ramírez & Marín, 2021). En algunas quebradas, estas recomendaciones se han hecho en repetidos eventos.

4.1 Aluviones no volcánicos

En la Tabla 4 se resumen las características más relevantes de cada una de las zonas descritas a continuación. Para el detalle de los eventos, revisar el Anexo 6.

Tabla 4: Escenarios de peligro de aluviones no volcánicos

NO VOLCÁNICOS					
Zona	Descripción	Localización	Fechas	Condicionantes	Detonante
Norte (Arica y Parinacota – Coquimbo)	Flujos de detritos por arrastre de sedimentos por escorrentía.	Farellón costero	Mayo, junio, agosto	Disponibilidad y acumulación de material removible en quebradas.	Lluvias cortas e intensas principalmente invernales
		Pampa, precordillera, cordillera	Enero a mayo	Carencia de cobertura vegetal. Altas pendientes.	Lluvias intensas y cortas generalmente en periodo estival (invierno boliviano)

Centro sur (Valparaíso – Bío Bío)	Flujos de detritos a partir del arrastre de sedimentos y/o deslizamientos por saturación del suelo, que pueden evolucionar a flujos de barro al encauzarse y mezclarse con ríos	Cordillera, precordillera	Enero, febrero, abril. Junio a agosto	Disponibilidad de material sedimentario removible en quebradas Fracturamiento Altas pendientes	Lluvias intensas generalmente asociadas a isoterma 0°C alta. o a prolongados frentes invernales
Sur (Araucanía – Los Lagos)	Flujos de detritos a partir de deslizamientos por saturación del suelo que agudiza la debilidad en interfase roca-suelo	Cordillera, precordillera	Mayo a agosto Diciembre	Fracturamiento Sedimento removible de origen glacial y/o piroclástico sobre rocas impermeables Altas pendientes	Lluvias intensas generalmente asociadas a prolongados frentes invernales o a isoterma 0°C alta
Austral (Aysén y Magallanes)	Flujos de detritos a partir de deslizamientos por saturación del suelo por debilidad en interfase roca-suelo. En esta zona los deshielos se vuelven fuente de agua	Cordillera	Marzo a mayo Agosto, septiembre	Fracturamiento Erosión glacial Altas pendientes	Lluvias otoñales intensas y prologadas Deshielo

4.1.1 Zona norte

Desde un punto de vista histórico, se conoce que en esta zona hay dos escenarios geográficos en los que se producen aluviones. En primer lugar, en la zona costera donde el condicionante más relevante es el desnivel topográfico entre el Farellón Costero y la Franja Costera que genera una planicie costera compuesta de terrazas marinas escalonadas con relleno de abanicos aluviales (Vargas, 2000). Estas dos características entregan la energía y material disponible necesarios para

generar aluviones ante la presencia del factor removilizante. En este caso el factor detonante de aluviones corresponde a lluvias otoñales e invernales intensas y cortas (<13 horas) donde el inicio del evento se da desde 1 a 4 horas posterior al inicio de las lluvias intensas (Vargas, 2000). Este sistema de precipitaciones se asocia a episodios meteorológicos de El Niño (Grijalba, 2016; Vargas, 2000).

Por otra parte se reconocen los aluviones en las zonas más internas del continente, donde los condicionantes coinciden con los costeros, pero la gran diferencia es que las cuencas de captación son mayores por lo que se pueden generar aluviones más extensos (Hauser, 1991) y que el detonante son las lluvias estivales del “Invierno Boliviano” (Grijalba, 2016), evento que también se ve influenciado por los episodios de El Niño (Garreaud, 2003). Se destaca que en la parte superior de la zona predomina la ocurrencia en verano y en la parte inferior, en otoño.

En esta zona se ha determinado que los flujos de detritos se generan por el arrastre de sedimentos hacia y a lo largo de las quebradas producto de la escorrentía por rápida saturación del suelo que se genera con las lluvias (Hauser, 1991). También hay algunos registros de flujos de barro, pero estos constituyen la minoría de los eventos, probablemente debido a que los eventos se generan en cuencas hidrográficas menores (de Farellón costero) (Vargas, 2000). La alta escorrentía está muy relacionada a la escasa o ausente cobertura vegetal característica de este territorio y los flujos además están condicionados por las altas pendientes tanto de la cordillera como de los escarpes del farellón costero, por la alta cantidad de material removible en las quebradas procedente de depósitos no consolidados, tanto por la alta tasa de meteorización y fracturamiento de las rocas, como también por la deposición de residuos antrópicos en ellas.

En esta zona, el detonante más habitual es la lluvia intensa y breve pero los periodos de ocurrencia de aluviones varían dependiendo de la ubicación del territorio en que ocurren, por lo que se distinguen dos zonas. En el Farellón costero los flujos se asocian a lluvias invernales, mientras que en la Pampa, Precordillera y Cordillera se relacionan a las lluvias estivales con alta isoterma 0°C del invierno altiplánico.

Además de estos, se registra un evento en la cordillera de Arica y Parinacota, en la quebrada de Chislluma, que es gatillado por un sismo, donde las lluvias cumplen un rol relevante debido a la

saturación previa que generan, la cual permite la licuefacción del material y el colapso de un bofedal (Naranjo et al., 2001a).

En esta área, además de los efectos típicos de los flujos, los eventos considerados en la recopilación han reportado la muerte de 7 personas (Alfaro et al., 2015; Marín et al., 2020; Opazo et al., 2015) después del desastre con 91 fallecidos en Antofagasta (Hauser, 1991). Así como también el corte de servicios sanitarios y de agua potable en 3 ocasiones (Alfaro et al., 2015; Hauser, 1991; Marín et al., 2020). También se menciona de forma importante y repetidamente la ocurrencia de socavamientos.

En cuanto a los eventos con decesos humanos, destacan los aluviones en las sierras transversales andinas o precordillera del norte chico ocurridos por lluvias estivales entre el 24 y 27 de marzo de 2015. Estos generaron 31 muertos y 16 desaparecidos en toda la zona con un mayor impacto sobre la Región de Atacama (Barrera & Fernández, 2019). De este evento, y debido a la disponibilidad de informes técnicos, sólo se menciona el ocurrido en la Quebrada Mesilla que reportó 3 muertos producto de un flujo en dos pulsos ocurrido el 24 de marzo entre las 18:00 y 20:00 horas, que dejó depósitos de hasta 5m e impactó directamente sobre las viviendas (Alfaro et al., 2015).

El mismo año, pero como consecuencia de precipitaciones invernales ocurridas entre el 8 y 10 de agosto que acumularon 16 mm caídos en la zona del Farellón Costero, en numerosas quebradas colindantes con Tocopilla se generan flujos de detritos con su origen en la parte alta del Farellón. Específicamente, se generan flujos el día 9 de agosto entre las 6:30 y 7:30 que se correlacionan con 3.6 mm caídos entre las 6:00 y 7:00. En particular, se genera un flujo que desemboca directamente sobre la población 5 de octubre (ver Anexo 4), canalizándose por las calles con alturas de hasta 1.8m y afectando directamente a viviendas provocando el deceso de 3 personas. Se destaca que en esta quebrada no existían obras de contención y que en quebradas aledañas que si poseían al momento del evento, se evitaron estos grandes daños (Opazo et al., 2015).

Finalmente, y nuevamente en el norte chico, ocurren precipitaciones estivales la última semana de enero de 2020, de forma intensa y con un alta isoterma 0°C (Marín et al., 2020). Particularmente, el 27 de enero en la quebrada La Plaza en la localidad el Tránsito, se genera un flujo de barro y detritos que se canalizó por las calles buscando desembocar al río (ver Anexo 4); sin embargo, debido a una contención ante inundaciones presente en él, el flujo se desborda aún

más por el poblado (AMTC, 2021). Este flujo afectó aproximadamente 700.000 m² con olas de hasta 13m y depósitos de hasta 2m generando cortes de los servicios básicos y un gran daño en la infraestructura con daños mayores en 40 viviendas y un fallecido (Marín et al., 2020). En cuanto a las condiciones hidrometeorológicas, la información varía, Marín et al. (2020) reporta 16.4 mm en 8 horas, Toro (2020) 16 mm en 45 minutos y AMTC (2021) describe 16 mm en 30 minutos.

En la zona se destacan, en base a registros históricos documentados, como recurrentes en el dominio cordillerano la quebrada Linga y quebrada Ocharaza en Tarapacá, la quebrada La Plaza en Atacama y la quebrada marquesa en Coquimbo. Mientras que en el dominio costero son relevantes la quebrada de Las Garzas en Arica y Parinacota y las quebradas Leiva y Miraflores en Coquimbo.

4.1.2 Zona centro-sur

En esta zona entre las regiones de Valparaíso y del Bio Bio, aumentan los cursos de agua respecto al norte y los flujos de detritos, además de ser promovidos y alimentados por la removilización por escorrentía, también comienzan a iniciarse a partir de deslizamientos que se generan por la pérdida de resistencia del suelo en la interfase suelo – roca producto de su saturación asociada a las abundantes lluvias. En general se relacionan a precipitaciones invernales o de frentes con isoterma 0°C alta, siendo estos últimos más frecuentes en la región de Valparaíso y Metropolitana. Estos flujos además transportan vegetación y pueden evolucionar a flujos de barro al diluirse en su trayecto. La ocurrencia de estos eventos está condicionada por las altas pendientes cordilleranas y precordilleranas, por el fracturamiento de las rocas y por la alta disponibilidad de material removible. Hauser (2000) para estas áreas describe relieves graníticos meteorizados que generan gruesos suelos residuales en las regiones desde el Maule a la Araucanía, por lo cual el material removible comprendería principalmente este material meteorizado. Sin embargo, en general la información disponible de esta zona se concentra en la región Metropolitana, existiendo tan sólo uno en la región del Maule, dos en la región de Valparaíso y ninguno en las restantes.

En cuanto a la ocurrencia, hay registros en las estaciones veraniegas e invernales y se reconoce el deceso de 9 personas (Marín et al., 2017; Sepúlveda & Merino, 2017), la afectación a los servicios sanitarios y de agua potable en una ocasión (Sepúlveda & Merino, 2017) y dos eventos en que vehículos quedan atrapados en el flujo en movimiento (Marín & Garrido, 2012; Marín & Valdés, 2012). Cabe destacar que es la zona con mayor afectación a población turista.

En cuanto a los eventos con decesos humanos, ambos son producto del mismo evento hidrometeorológico ocurrido entre el 24 y 26 de febrero de 2017 que comprendió intensas precipitaciones con isoterma 0°C alta. El más grave ocurrió en la quebrada San José, en la comuna de San José de Maipo en la Región Metropolitana. Esta quebrada posee una amplia cuenca de 113km² que durante la noche del 25 de febrero generó un flujo de detritos con alturas de hasta 3m y clastos de hasta 2m, que al alcanzar el sector de camping Los Rulos se llevó la vida de 8 turistas. Según relatos, el flujo tardó hasta 4 horas en bajar (entre 21:30 y las 2:00 del día siguiente) y se originó tras una lluvia intensa de corta duración que inició a las 18:00, según registros, la lluvia fue de 5.7 mm/hr a las 22:57 (Marín et al., 2017).

Por otra parte, el mismo día un aluvión en el estero de Pocuro en la Región de Valparaíso se llevó la vida de una persona, también turista, que se encontraba en las cercanías del cauce al momento del flujo. Según relatos, el flujo se originó a las 17:30 y dejó depósitos de hasta 1.7 m con abundante vegetación (Sepúlveda & Merino, 2017).

En esta zona se destaca por su recurrencia registrada en los reportes, la quebrada Ñilhue en la Región Metropolitana.

4.1.3 Zona sur

En la zona sur, los flujos de detritos nacen a partir de deslizamientos que se generan por la pérdida de resistencia del suelo en la interfase suelo – roca producto de su saturación asociada a las abundantes lluvias. En general se relacionan a prolongadas precipitaciones invernales, y en menor medida a frentes de isoterma 0°C alta.

Estos flujos además transportan vegetación y pueden evolucionar a flujos de barro al avanzar en su trayecto (Garrido et al., 2018). La ocurrencia de estos eventos está condicionada por las altas

pendientes cordilleranas y precordilleranas, por el fracturamiento de las rocas y por la alta disponibilidad de material removible de origen glacial y/o piroclástico. En algunos casos, la carga vegetacional también puede actuar como factor condicionante, sobre todo en las áreas con un suelo poco desarrollado (Carrasco & Ramirez, 2021).

En esta zona, a diferencia de la centro-sur, se tienen registros de ocurrencia más habitual en las estaciones otoñales e invernales y en los pocos eventos catastrados se registra la pérdida de 31 vidas humanas (Fernández & Arenas, 2002; Garrido et al., 2018; Quiroz et al., 2020).

Estos eventos ocurren en la cordillera de las provincias de Chaitén y Palena, por el desencadenante común de intensas precipitaciones con isoterma 0°C alta y en los tres casos debido a un deslizamiento con sedimentos glaciales y/o volcánicos que al encajonarse por una quebrada e integrar agua evoluciona a un flujo. En Chaitén, el primer aluvión ocurre en la caleta Buill el 3 de mayo de 2002 cerca de las 20:30 y se produce tras precipitaciones durante dos semanas que se intensifican previo al momento de generación (Cooperativa, 2002). Este flujo, que nace del deslizamiento de una masa de sedimento glacial depositado sobre roca metamórfica (impermeable), recorre aproximadamente 1.8 km desde su origen hasta la costa y en su paso arrasa con el bosque y con dos viviendas, sepultando a 12 personas. Se estima que la altura de la ola alcanzó los 50 m en el sector más angosto de la quebrada, y sus depósitos alcanzan los 15 m. Además se producen al menos 5 flujos secundarios por el colapso gradual de la parte de la masa que quedó atrapada en la cabecera (Fernández y Arenas, 2002).

Posteriormente, el 16 de diciembre de 2017 a las 9:00 (Torrico, 2022) se produce un flujo de lodo y detritos que se origina por un deslizamiento en la cabecera del valle del río Burritos y se desplaza 12 km en total cubriendo el 50% de la localidad de villa Santa Lucía en su camino. El flujo deja depósitos de hasta 5 m, genera el deceso de 18 personas y deja 4 desaparecidos producto de su arrastre directo. El origen de este flujo está dado por la caída de material volcánico debilitado por alteración hidrotermal argílica pervasiva sobre un glaciar en retroceso y su respectivo lago glacial, lo cual generó el ingreso de agua y sedimentos morrénicos sobre el material caído y su canalización por el río Burritos (Garrido et al., 2018).

Finalmente, tras precipitaciones entre el 14 y 16 de mayo de 2020 con 73.6 – 267 mm acumulados, el día 16 cerca de las 8:00 se genera un flujo de detritos en el valle Los Turbios que recorre 2.5 km hasta las Termas El Amarillo, destruyendo las instalaciones y acabando con la

vida de una persona que cuidaba el lugar. El aluvión tiene su origen en el deslizamiento de sedimentos glaciales y volcánicos depositados sobre basamento cristalino (impermeable). Cabe destacar que para este evento existía una alerta meteorológica previa y la advertencia de SERNAGEOMIN de una posibilidad moderada a alta de remociones en masa en el lugar. Esta remoción sólo fue identificada tras un sobrevuelo, lo que permitió el rescate de los familiares de la persona fallecida (Quiroz et al., 2020).

4.1.4 Zona austral

En la zona austral, los flujos también nacen a partir de deslizamientos que se generan por la pérdida de resistencia del suelo en la interfase suelo – roca producto de su saturación asociada a la incorporación de agua (Muñoz et al., 2021). Sin embargo, en este caso la debilidad de la interfase suelo-roca es mayor debido a que la capa de suelo es más delgada que en la zona sur, siendo menor a 1m (Naranjo et al., 2007). La ocurrencia nuevamente está condicionada por las altas pendientes cordilleranas, el fracturamiento de las rocas, la erosión glacial y por la disponibilidad de material removible de origen glacial.

En general, los flujos se asocian a lluvias intensas y prolongadas en los meses otoñales y al deshielo asociado al sostenido aumento de la temperatura (Hauser, 2000; Muñoz et al, 2020), cumpliendo el mismo rol que las lluvias. Esto, sin embargo, no queda bien establecido en el análisis debido a que los eventos registrados con estas características comprendían únicamente flujos de extensión local (menor a 1km de recorrido).

Cabe destacar que sólo es uno el evento del catastro que cumple las condiciones para ser considerado en este análisis, por lo que la definición no es del todo representativa de la zona.

4.2 Aluviones volcánicos

En la recopilación de datos históricos, los flujos laháricos se registran únicamente en las zonas sur y austral definidas anteriormente.

En la Tabla 5 se resumen las características más relevantes de cada uno de los escenarios descritos a continuación, para el detalle de los eventos revisar el Anexo 6.

Tabla 5: Escenarios de peligro de aluviones volcánicos

VOLCÁNICOS					
Zona	Tipo	Descripción	Localización	Condicionantes	Detonantes
Sur y Austral (Araucanía – Aysén)	Primario	Flujos por fusión de hielo/nieve que incorporan material	Cordillera (Volcanes)	Presencia de nieve/hielo	Erupción volcánica
		Flujos de bloque y ceniza que incorporan agua			
	Secundario	Flujos por removilización de depósitos de tefra		Depósitos recientes de tefra Altas pendientes	Lluvia

4.2.1 Primarios

Los aluviones volcánicos del tipo lahares primarios, se registran sólo en las zonas sur y austral del país, esto debido a que el condicionante de su ocurrencia es la presencia de nieve y/o hielo en la caldera y/ o flancos del volcán.

Estos eventos tienen su origen en el súbito aumento de la disponibilidad de agua que genera la fusión de hielo y/o nieve producto de su interacción con los distintos productos eruptivos del volcán. Si bien en la mayoría de los volcanes de la zona hay glaciares, como fuente permanente de agua, la cantidad de nieve presente puede variar en las distintas estaciones del año, por lo tanto, aunque la ocurrencia de estos flujos no está restringida a una época en particular, esta sí afecta la magnitud de ellos.

Con esta disponibilidad de agua pueden generarse dos escenarios. En primer lugar, y de forma más común, el lahar puede tener su origen en un flujo de agua que incorpora material en su trayectoria, o puede tener su origen en un flujo de bloques y ceniza que incorpora agua en su trayectoria, ya sea del deshielo o de cursos fluviales. En cualquiera de los dos casos, por lo

general, los flujos se canalizan por los mismos valles en cada evento eruptivo y suelen superar los 10 km de extensión desde su punto de generación.

En los últimos años se destacan los eventos asociados al volcán Villarrica en la región de La Araucanía con recurrencia de lahares en los valles del río Turbio, río Pedregoso, Zanjón Seco, río Voipir y el estero Correntoso, los lahares en el valle del río Huemules relacionados al volcán Hudson en la región de Aysén, y los lahares en el valle del río Sur relacionados a la erupción del volcán Calbuco en 2015.

4.2.2 Secundarios

Por otra parte, y de relación más indirecta con las erupciones, también existen los lahares secundarios. Estos ocurren por la removilización de los depósitos de tefra en laderas pronunciadas ya sea por deshielo o de forma más común, por lluvias contemporáneas o posteriores a la erupción (hasta varios años).

Como factores condicionantes de este tipo de flujos, se menciona que los depósitos de tefra deben ser lo suficientemente impermeables para inhibir la infiltración y permitir una elevada escorrentía y rápida sedimentación, por ello, los depósitos deben tener cierto grado de espesor y estar constituidos de cenizas finas a extremadamente finas (Pierson et al., 2013; Korup et al., 2019).

Dentro de los eventos registrados en el territorio, se destaca el caso de la erupción del volcán Chaitén en 2008-2009, donde al inicio de la fase explosiva de la erupción, laderas, bosques y ríos se cubrieron con capas de entre 3 y sobre 100 cm de tefra de ceniza fina a muy fina. Esto generó que la lluvia caída días después, removilizará el material encauzándose por el río Chaitén y produciendo su agradación y posterior avulsión dentro de la ciudad homónima (Pierson et al., 2013).

También se tiene registro de lahares secundarios ocurridos en mayo de 2015 producto de la erupción del volcán Calbuco el mismo año, que se canalizaron por el río Blanco colmatando el desagüe del Lago Chapo (González et al., 2018).

5. DISEÑO Y VERIFICACIÓN DEL SISTEMA DE ALERTA TEMPRANA

5.1 Diseño del sistema de monitoreo y alerta temprana de aluviones

Comparando los elementos y las recomendaciones para la implementación de un S.A.T. efectivo con la legislación chilena y los respectivos instrumentos de gestión del riesgo de desastres revisados en la sección 2.2.2 del presente documento, se observa que actualmente existen documentos relativamente compatibles con las nuevas legislaciones que buscan construir un sistema eficiente, confiable y en línea con las recomendaciones internacionales.

En este sentido, se vuelve razonable y práctico sugerir modificaciones y actualizaciones a los planes de emergencia vigentes. Para ello, en el Anexo 3 se identifican los elementos ya existentes y las propuestas de modificación de este trabajo en cada uno de los 4 factores esenciales de los sistemas de alerta temprana según el Checklist de 2018 de la WMO.

De forma general, se destacan los siguientes puntos:

1. Desarrollo de un sistema de alarma a cargo de SERNAGEOMIN (Decreto no. 86, 2023) asociado a un sistema automático que, al detectar el inicio de un aluvión volcánico o no volcánico, active sirenas y/o semáforos en zonas afectadas por el paso del flujo. Este, además, enviará un mensaje automático a las autoridades respectivas (SENAPRED, COGRID correspondiente) para activar el Plan de Emergencia en el caso de no estar ya activo bajo una alerta del sistema predictivo, y poner en marcha las actividades de recuperación y de comunicación a la población general. Dada la posibilidad de existir falsas activaciones del sistema de alarma, también es necesario que en su diseño se presente una etapa de validación de la alarma. En la Figura 8 se presenta el flujo del sistema de alarma.

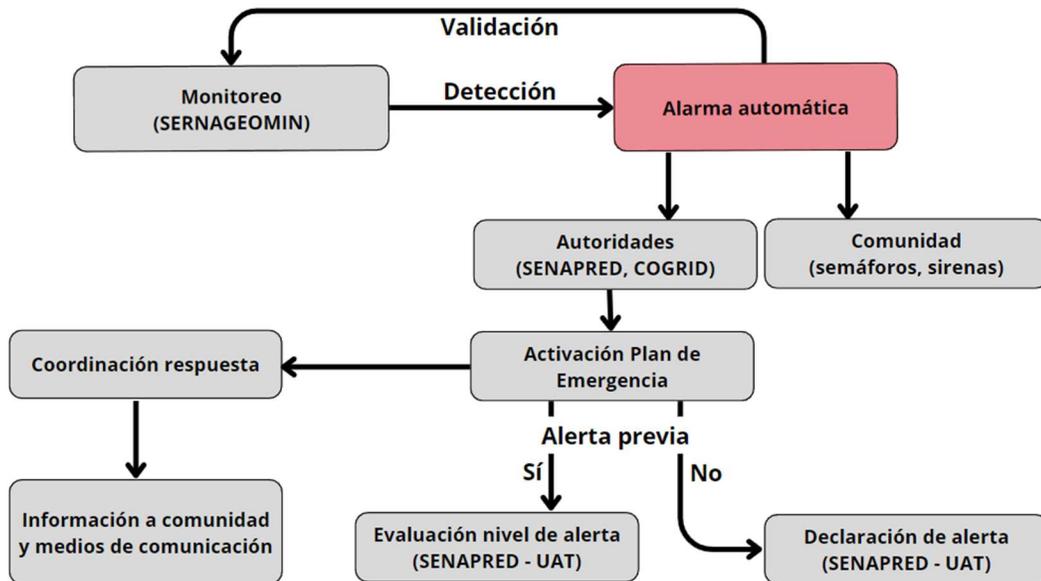


Figura 8: Esquema general del flujo de información con el sistema de alarma. En este caso al detectarse un aluvión se genera una validación automática en simultáneo a la activación de una alarma que avisa a la población expuesta y a las autoridades tomadoras de decisión para que evalúen el proseguir de la fase de respuesta.

2. Modificación del ciclo de GRD, añadiendo de forma atemporal y permanente la evaluación continua de todas las distintas fases, protocolos, estrategias, organismos e instrumentos de GRD (Figura 9). En los elementos pertinentes, se debe incorporar un mecanismo para obtener retroalimentación de la población expuesta ante el funcionamiento del sistema en todas las fases del ciclo, para mejorarlo y ajustarlo a las necesidades propias de cada comunidad.

Dado que en principio no se dispondrá de todos los instrumentos y elementos necesarios para el funcionamiento íntegro del S.A.T., inicialmente esta etapa funcionará distinto al contemplar la creación de dichos elementos.

Por otra parte, también se incluyen las alarmas en forma diferenciada de las alertas debido a su distinto flujo de información. Donde la alerta contempla parte de la etapa de preparación y sus niveles pueden ir cambiando a medida que se desarrolla el evento y las acciones de respuesta. Por otra parte, las alarmas se encuentran fuertemente relacionadas al evento y a la fase de respuesta, y pueden activarse con o sin un estado previo de alerta. Además, también pueden ir activándose distintas alarmas durante la fase de respuesta (ver Figura 9).

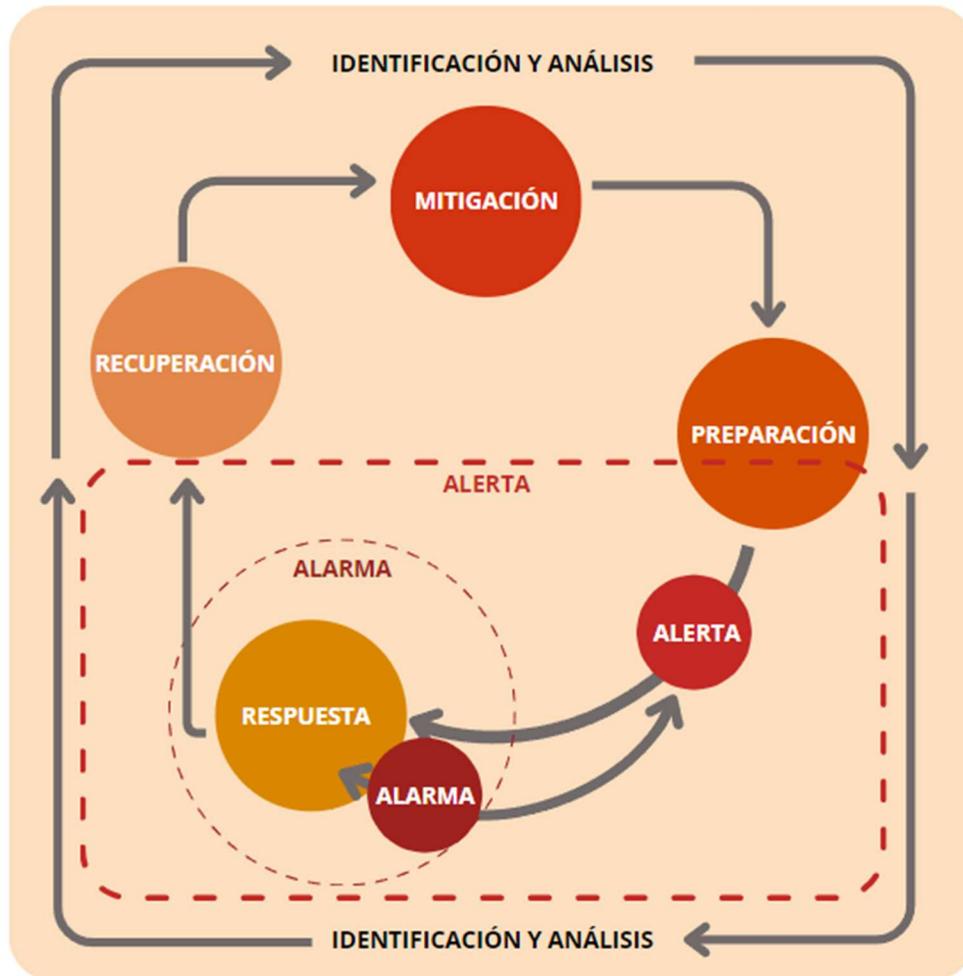


Figura 9: Propuesta Ciclo de Gestión del Riesgo de Desastres con la integración del monitoreo de alarma. La diferencia con el ciclo actual es la definición de la fase alerta por si misma y la adición de las fases alarma y la omnipresente de identificación y análisis. El diagrama además representa que la extensión en el tiempo de la alerta puede ir variando, mientras que la alarma, que se encuentra estrechamente relacionada a la fase de respuesta, puede activarse reiteradas veces.

3. Mejora del actual sistema predictivo (hidrometeorológico a cargo de la DMC y SERNAGEOMIN) con una mayor red de instrumentos, principalmente pluviómetros, ubicados en zonas estratégicas de las distintas cuencas y microcuencas para el futuro establecimiento de umbrales críticos de precipitación. Esta información luego será integrada con la información de susceptibilidad del terreno y se generarán modelos de peligro.

Este sistema funcionará en conjunto con el sistema de alarma como se ilustra en la Figura 10. Por otra parte, se vuelve relevante el establecimiento de una base de datos normalizada que sea accesible a la comunidad, la cual integre toda la información obtenida de los instrumentos, con el fin de realizar análisis, estudios y mejoras en el sistema.

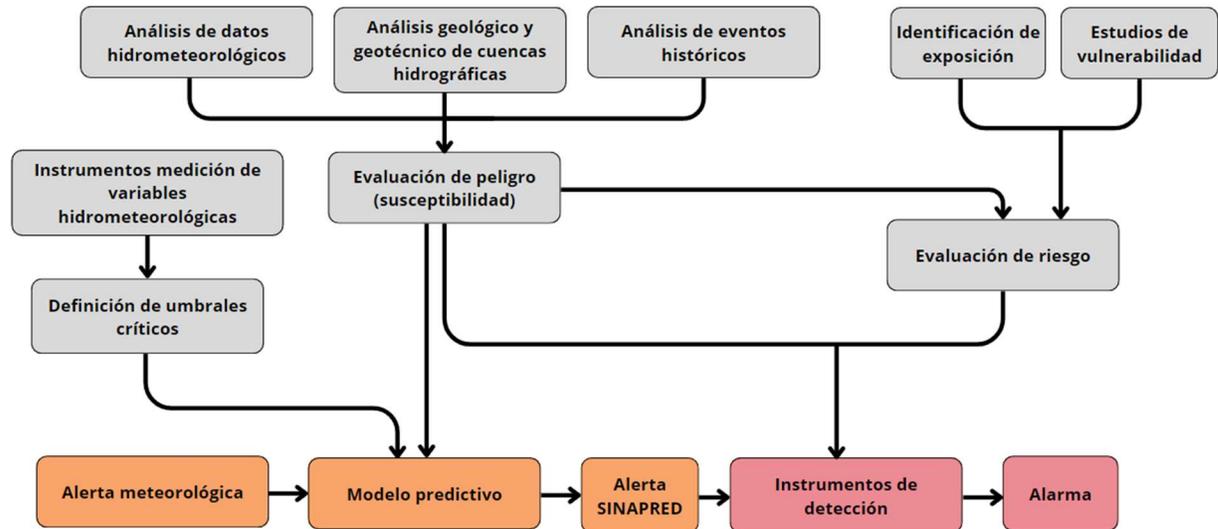


Figura 10: Integración de elementos técnicos para el desarrollo del trabajo conjunto de los sistemas de monitoreo de predicción y de alarma. En naranja las etapas contempladas en preparación y en rojo las de respuesta.

Este sistema de alerta temprana con la integración de un monitoreo de alarma es útil para todos los escenarios definidos con eventos de extensión mayores a 1 km. Se excluyen los menos extensos debido a la inherente rapidez de los flujos aluvionales que impide la activación de la alarma previo a la llegada del aluvión a zonas con infraestructura y/o personas expuestas. El sistema es especialmente relevante para los flujos que interrumpen caminos, ya que se vuelve imprescindible la instrucción de interrupción del tránsito al sonar la sirena ubicada en la zona expuesta.

En general, el sistema con sus tareas y responsables (propuestos y establecidos por la ley) funcionaría como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6: Organismos encargados de la gestión del riesgo de aluviones en cada tarea definida en el ciclo de la Gestión del Riesgo propuesto.

FASE	TAREA	ENCARGADO
Identificación y análisis	Evaluación de amenaza (susceptibilidad), y preparación de mapas	SERNAGEOMIN (Decreto no. 86, 2023) + DMC, DGA
	Evaluación de riesgo, y preparación de mapas	SENAPRED + GORE, Municipalidades, MINVU, organismos técnicos relacionados (Decreto no. 86, 2023), DOH, MOP.
Pre evento Mitigación	Educación sobre peligros de forma general y con énfasis en situación local	MINEDUC – SERNAGEOMIN - SENAPRED
	Implementación de la evaluación del peligro en los instrumentos de planificación territorial	MINVU – SENAPRED (ONEMI, 2020)
	Evaluación de actividades que aumentan y/o agravan el riesgo	MINVU, MMA, Municipalidades, GORE
	Elaboración y evaluación de planes de reducción del riesgo de desastres	SENAPRED
Pre evento Preparación	Elaboración y evaluación de planes de emergencia	SENAPRED + instituciones y organismos estipulados en la normativa (Decreto no. 86, 2023)
	Monitoreo predictivo de aluviones	DMC DGA DOH SERNAGEOMIN (Decreto no.86, 2023)
	Monitoreo de alarma	SERNAGEOMIN (Decreto no. 86, 2023)
	Elaboración de estrategias de difusión de alertas	SENAPRED
	Capacitación de personas	SENAPRED Establecidas en plan de emergencia (Decreto no. 86, 2023)
	Ejercicios/simulacros para comprobar y optimizar sistema y capacidades de respuesta	SENAPRED, organismos e instituciones que componen los COGRID (ONEMI, 2020), personas expuestas.

Pre/Co evento Alerta	Verificación de pertinencia y cambios de alerta	SENAPRED (ONEMI, 2017)
	Difusión de la alerta	SENAPRED – UAT (ONEMI, 2017; Ley no. 21.364, 2021)
Co evento Alarma	Activación, verificación y/o cancelación de alarma	SERNAGEOMIN
	Difusión de alarma	SENAPRED
Co evento Respuesta	Seguimiento de funcionamiento de los planes	SENAPRED
	Coordinación, activación y movilizaciones	SENAPRED
	Actualización del estado actual	SENAPRED, SERNAGEOMIN, DMC, municipalidades
Post evento Recuperación	Levantamiento de información	SENAPRED, SERNAGEOMIN, municipalidades
	Incorporación de experiencia adquirida en los planes	SENAPRED

5.1.1 Identificación y análisis

Etapa transversal al ciclo de la GRD que comprende la continua evaluación de todas las fases, instrumentos, protocolos y organismos pertenecientes al SINAPRED.

De forma inicial al establecimiento del sistema, en esta etapa se consideran la formulación de políticas, legislaciones y reglamentos que regulen la GRD y la elaboración de estudios, planes de monitoreo y todos los instrumentos requeridos para la comprensión del peligro. Esto es fundamental para la posterior elaboración de protocolos de preparación y respuesta.

El primer instrumento requerido en esta etapa son las evaluaciones de amenaza y riesgo que deben elaborarse a partir del estudio de la susceptibilidad del terreno, de los peligros, de la recurrencia histórica, de la determinación de la exposición de personas e infraestructura crítica y de la vulnerabilidad de dichos elementos expuestos. Para la realización de los mapas, los distintos organismos gubernamentales con conocimientos y habilidades competentes y atinentes a estos peligros deben colaborar en su elaboración. En este caso, el organismo técnico a cargo del instrumento de amenaza de remociones en masa y amenaza volcánica corresponde a SERNAGEOMIN (Decreto no. 86, 2023). Para estas evaluaciones se vuelve beneficioso el apoyo de la Corporación Nacional Forestal (CONAF) para la consideración de los efectos de los incendios y de la caracterización vegetal, de la DMC para los datos y características

hidrometeorológicas, y de la DGA para la información de las redes hidrográficas. Adicionalmente, SERNAGEOMIN tiene la facultad para validar los mapas realizados por las entidades que cumplan los requisitos establecidos en la Normativa (Decreto no. 86, 2023).

Por otra parte, los mapas de riesgo están a cargo de SENAPRED y es fundamental para la evaluación de las vulnerabilidades la cooperación del Servicio con los Gobiernos Regionales (GORE), municipalidades y el Ministerio de Vivienda y Urbanismo (MINVU) (Decreto no. 86, 2023), además de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH) y el Ministerio de Obras Públicas (MOP) para la información de infraestructura crítica.

Una vez generada la información necesaria para la implementación del S.A.T., todos los elementos que lo integren deben evaluarse durante y de forma posterior a cada evento o temporada de eventos. No obstante a lo anterior, los instrumentos elaborados deben contar con reevaluaciones y actualizaciones periódicas cada 5 años (Decreto no. 86. 2023).

5.1.2 Pre evento: Mitigación

Para la mitigación de riesgos, esta fase contempla principalmente la educación y capacitación de las personas en cuanto a la concientización y comprensión del peligro, además del reconocimiento de actividades que estén generando un aumento o agravamiento de los riesgos, y la implementación de la evaluación de los peligros en los instrumentos de planificación territorial.

Para el primer punto, el Plan Estratégico Nacional menciona la implementación de programas de capacitación en academias e instituciones de educación superior (ONEMI, 2020). Sin embargo, se considera que esto genera una limitación en la cantidad de personas que tienen acceso a dicha información, por ello se propone la incorporación de contenidos relacionados al riesgo y peligro en el curriculum escolar, con un enfoque tanto general como particular a la situación local donde se encuentre emplazado el establecimiento. En este sentido sería provechoso la colaboración de SENAPRED y SERNAGEOMIN con el Ministerio de Educación (MINEDUC) para establecer los temas más relevantes y definirlos de forma que el público general pueda comprender. Se sugiere además que se incluyan actividades simples que requieran la participación de los cuidadores en el hogar para tener un mayor alcance en la entrega de la información.

En segundo lugar, para determinar el aumento o agravamiento de riesgos se vuelve fundamental evaluar el uso de suelo de los planes reguladores y establecer un ordenamiento territorial que incluya en su metodología el análisis de estos peligros (Decreto no. 86, 2023). Se propone que una vez realizados los mapas e instrumentos de gestión del riesgo, SENAPRED trabaje en conjunto con el MINVU para realizar esta tarea. En este punto, el Plan Estratégico Nacional establece el objetivo estratégico 3.4 para fortalecer el enfoque de la RRD en los instrumentos de planificación territorial (ONEMI, 2020)

También es relevante fiscalizar el impacto de distintas industrias en zonas susceptibles a la generación de aluviones, para lo cual debería existir un trabajo conjunto entre SENAPRED, MINVU, el Ministerio de Medio Ambiente (MMA) y las municipalidades respectivas.

5.1.3 Pre evento: Preparación

Para obtener las habilidades y capacidades necesarias para prever, responder y recuperarse de forma oportuna y eficaz, esta fase comprende principalmente la elaboración de planes de operación, protocolos y estrategias para mitigar y responder ante los efectos del peligro, además de capacitaciones tanto para los organismos como para las personas para ejecutar estos instrumentos de forma eficaz. Además de todas estas acciones previas al evento, esta fase también incluye las primeras etapas de respuesta ante la inminencia del peligro, las cuales comprenden el estado activo de preparación y alerta para generar una rápida respuesta cuando corresponda.

La elaboración de los planes de emergencia debe estar fundada en los estudios de peligro y riesgo correspondientes (Decreto no. 86, 2023).

Una vez identificados los espacios geográficos donde ocurren aluviones (en base a los factores condicionantes), para la evaluación del peligro ante una probabilidad de ocurrencia, por pronóstico meteorológico de la DMC, aumento de caudales identificado por la DGA o alerta volcánica de SERNAGEOMIN, se requiere un monitoreo permanente en tiempo real tanto de los factores detonantes (monitoreo de predicción) como del inicio del flujo (monitoreo de alarma). Para ello es necesario que se posea la instrumentación adecuada para vigilar, activar o anular alertas y/o alarmas así como personal humano para generar y comunicar las actualizaciones de

los estados de alerta, y también para el estudio del origen y comportamiento del flujo para obtener una mejor preparación y respuesta ante su ocurrencia. Esto contempla instrumentos de medición de parámetros hidrometeorológicos (ver Tabla 3), a cargo de la DMC y DGA, que mediante el análisis y procesamiento de los datos junto a los estudios de susceptibilidad de SERNAGEOMIN y de eventos históricos, permitan la generación de modelos, umbrales críticos y predicciones. Para el reporte de toda esta información predictiva que es fundamental en la toma de decisiones, SERNAGEOMIN debe incluir en la minuta técnica un resumen de los datos y antecedentes junto a los modelos y pronósticos.

También se necesitan instrumentos a cargo de SERNAGEOMIN con apoyo de las autoridades locales, que generen la detección y alarma automática de un evento en curso (ver Tabla 3).

Estos dos monitoreos deben ser complementarios, donde el predictivo genera un estado de alerta previo para establecer un estado de preparación que propicie la rápida reacción de todas las partes una vez activada la alarma automática por la detección. También es relevante considerar la ocurrencia de emergencias secundarias dadas por la afectación del fenómeno sobre otros elementos como los servicios sanitarios o los cursos de agua que pueden dar lugar a inundaciones o sobre la conectividad que puede generar accidentes de tránsito o interrumpir vías de evacuación. Por lo anterior, también debe existir un monitoreo permanente de estas infraestructuras a cargo de los organismos correspondientes (MOP, DOH, DGA), principalmente tras recomendaciones de SERNAGEOMIN o del decreto de alertas y/o alarmas.

Para que esto funcione correctamente, es necesaria la coordinación entre las autoridades, los distintos organismos técnicos relacionados a la generación de aluviones, y los organismos a cargo de las distintas infraestructuras críticas, así como también un sistema central normalizado y de fácil acceso para el almacenamiento sistemático de la información obtenida.

Por otra parte, los planes de emergencia que integran toda esta información técnica son creados y actualizados por SENAPRED, en coordinación con distintas instituciones y organismos definidos en la normativa (Decreto no. 86, 2023). Estos deben considerar estrategias de evacuación seguras en base a los mapas de amenaza, teniendo también en cuenta la vulnerabilidad y la capacidad de la comunidad para responder ante la alerta. Además deben contemplar protocolos, estrategias e instrumentación para dar avisos y actualización de la información en tiempo real a los distintos

integrantes del sistema, a la población, autoridades, fuerzas de seguridad y servicios críticos. Para este punto, la Ley no. 21.364 establece a cargo de SENAPRED el Sistema de Información para la GRDD, el cual además de garantizar el acceso a la información (Decreto no. 86,2023), debe contar con sistemas de comunicación y difusión adaptadas a las necesidades de cada parte y poseer sistemas auxiliares en caso de fallo así como evaluaciones periódicas de su funcionamiento.

Los planes además deben ser de conocimiento general para que las personas y organismos sepan como reaccionar ante un evento, en este sentido es necesario también generar estrategias de difusión y capacitación. Al igual que con el monitoreo, es relevante generar protocolos para la realización de ejercicios periódicos que permitan comprobar y optimizar la eficiencia del sistema en todas sus partes, lo cual además contribuye a difundir los planes a la población y mantener la preparación de los distintos integrantes.

5.1.4 Pre/Co evento: Alerta

Respecto a las alertas basadas en el monitoreo predictivo, estas deben integrar información más precisa en los informes técnicos realizados por SERNAGEOMIN, idealmente integrando la información hidrometeorológica local con las evaluaciones de susceptibilidad para obtener una mejor y más específica delimitación de las zonas de amenaza, y con ello permitir una óptima toma de decisiones por parte del COGRID u organismos correspondientes, y de SENAPRED para la evaluación de pertinencia de los niveles de alerta (ONEMI, 2017). El correcto funcionamiento de la difusión y del flujo de información de estas alertas también es responsabilidad de SENAPRED, específicamente de las Unidades de Alerta Temprana (ONEMI, 2017; Ley no. 21.364, 2021; Decreto no. 86, 2023).

5.1.5 Co evento: Alarma

Esta fase consiste fundamentalmente en la detección del inicio del peligro y la difusión del aviso de forma eficaz y oportuna con un mensaje de alerta claro que proporcione la orientación para suscitar la reacción de los receptores. Para el caso de los aluviones, que son eventos que dejan poco tiempo de reacción, se hace necesaria la implementación de un sistema automático ligado al monitoreo de alarma mencionado anteriormente. Esta alarma automática enlazada a instrumentos

de aviso como sirenas y semáforos en zonas expuestas (caminos, puentes, poblados), debe además enviar mensajes predeterminados a las autoridades respectivas (Municipalidad, GORE, SENAPRED) y contar con dos elementos adicionales, un procedimiento de verificación y uno de anulación.

El primero de ellos consiste en una estrategia mediante la cual se confirme que la detección es efectivamente de un aluvión, para ello se pueden utilizar una serie de metodologías, la utilización de un arreglo de distintos instrumentos que detecten variados parámetros del flujo, el uso de cámaras de video en las zonas de generación de aluviones, el posicionamiento de instrumentos de detección adicionales aguas abajo respecto al equipo principal, o de forma menos deseable por la no automatización, la verificación visual in situ del fenómeno. Idealmente el sistema debe ser automático y el funcionamiento recaer en las mismas personas encargadas del monitoreo (SERNAGEOMIN), en conjunto con autoridades locales del lugar afectado (voluntarios, municipalidad, junta de vecinos) instruidas por el organismo, lo cual además será beneficioso para la constante y rápida mantención de los equipos.

En segundo lugar, debe generarse un procedimiento de anulación de la alarma, ya sea porque se ha generado una falsa detección o porque el peligro ya ha culminado. Para ello debe considerarse la detención del funcionamiento de los instrumentos de aviso y un nuevo mensaje a las autoridades para la evaluación del impacto y la toma de decisiones respecto al proceder de la situación.

En cuanto a la evaluación del funcionamiento del flujo de información de estos avisos, SENAPRED debe ser el organismo encargado de garantizar que la información y alertas lleguen a todas las personas, organismos e instituciones involucradas.

Es necesario que estos sistemas cuenten con protocolos para la realización de pruebas periódicas de funcionamiento y evaluaciones de la calidad y mantención de los datos a fin de minimizar al máximo las falsas alarmas. Además, dado que la utilidad primaria de las alarmas es anunciar un proceso en curso, estas también deben contar con evaluaciones y verificaciones periódicas de su sistema y de la efectividad del aviso.

5.1.6 Co evento: Respuesta

En esta etapa se ejecutan todos los protocolos, planes y estrategias definidas en las etapas anteriores y se verifica realmente su funcionamiento. SENAPRED debe ser el organismo encargado de hacer el seguimiento general del sistema además de coordinar la actividad de los distintos entes pertenecientes al sistema. Por otro lado, cada uno de los otros integrantes del sistema debiera también realizar un seguimiento del funcionamiento específico de sus capacidades y responsabilidades dentro del sistema. Es relevante en ambos casos contar con un registro normalizado y sistematizado para en el futuro evaluar la situación y determinar la necesidad de realizar mejoras. Independiente a lo anterior, también se propone revisiones y actualizaciones periódicas de los instrumentos de gestión del riesgo de desastres, que en consonancia con el tiempo establecido para los mapas (Decreto no. 86, 2023), también podría ser cada 5 años.

Otro elemento relevante de esta etapa es la evaluación constante de la situación para generar actualizaciones del estado actual y determinar cuándo decretar el fin de la alerta o emergencia y comenzar la desmovilización y recuperación de la zona afectada. Estas decisiones las establece el COGRID y, para ello, SENAPRED debe garantizar el flujo de información entre los distintos organismos, instituciones y autoridades, y posteriormente dar aviso a la población de las decisiones adoptadas, ambas tareas mediante el Sistema de Información (Decreto no.86, 2023).

5.1.7 Post evento: Recuperación

En esta etapa se realizan las acciones para el restablecimiento de las condiciones normales y se genera el conocimiento para evitar las condiciones de riesgo preexistentes identificadas. Esta fase también debe incluir todo lo correspondiente a la evaluación de daños y a la retroalimentación del funcionamiento del sistema durante las etapas co evento para generar todas las mejoras y cambios necesarios para volver más eficiente el sistema. En este sentido, cada organismo involucrado debe generar una evaluación de su desempeño y debe también generarse una evaluación de los daños producto del peligro, a cargo de SENAPRED y las autoridades correspondientes (municipalidades, GORE). El organismo técnico, además, debe incluir en su informe de efectos geológicos toda la información obtenida de los flujos, su área de generación, su extensión y características de desplazamiento, así como la información hidrometeorológica previa y durante

su activación. Esto será fundamental para la mejora en los modelos predictivos, en la ubicación de los instrumentos de detección, y también para la evaluación en los cambios que puedan producirse en su generación como consecuencia del cambio climático.

Finalmente, toda esta información debe almacenarse de forma sistemática y normalizada para incorporar la experiencia adquirida en los eventos en los futuros planes y, de esta forma, obtener cada vez una mejor predicción y respuesta.

5.2 Implementación del sistema de monitoreo y alerta de aluviones

5.2.1 Escenarios no volcánicos

Ante un evento aluvional por detonante hidrometeorológico, la DMC genera un Informe de Amenaza Meteorológica y se genera una Alerta Meteorológica, en consecuencia, SERNAGEOMIN elabora una minuta técnica estableciendo la probabilidad de ocurrencia de remociones en masa (incluyendo flujos de detritos, deslizamientos y/o caídas de roca) para cada zona geográfica (litoral, cordillera de la costa, precordillera, cordillera, etc) en un rango de baja posibilidad, moderada posibilidad o alta posibilidad. Cuando se tiene la información, esto se realiza en base a la altura de la isoterma 0°C y en el pronóstico de precipitaciones diario, el cual es contrastado con los antecedentes y datos históricos de cada región.

Esta minuta técnica es revisada por la Unidad de Alerta Temprana de SENAPRED, la cual determina si es pertinente o no declarar una alerta, y qué nivel de alerta sería el correspondiente. Según la alerta declarada, se realizan distintas acciones, y a partir de la amarilla se activan los planes de emergencia.

A modo general, con alerta amarilla hay una preparación de los recursos a movilizar en caso de ocurrir el evento, una preparación del proceso de evacuación y se determina un área de restricción si corresponde (a cargo de SENAPRED). Con alerta roja, indicando la inminencia del peligro, se procede a la movilización de los recursos, se ejecutan las evacuaciones pertinentes, se comunica a la población de ello mediante mensajería SAE (Sistema de Alerta de Emergencias) y se realiza un seguimiento de la evolución del peligro aluvional, de la situación hidrometeorológica y de los peligros secundarios (a cargo de SERNAGEOMIN, DMC, DGA, DOH). Estas evacuaciones se realizan ante la alta probabilidad de ocurrencia de un aluvión

definida por SERNAGEOMIN o posterior a la ocurrencia de un aluvi3n por la probabilidad de generaci3n de m1s eventos en la misma zona (ONEMI, 2017).

Con el sistema propuesto, la principal diferencia con el actual, aparece en la preparaci3n y respuesta con la implementaci3n del monitoreo de alarma a cargo de SERNAGEOMIN, el cual puede detectar y alertar de eventos para generar una acci3n inmediata y eficaz de las personas expuestas (previamente educadas en temas de peligro y respuesta ante emergencias) ante un evento en curso. Este sistema funcionar1a en conjunto con el sistema predictivo, pero no pasar1a por un comit3 que eval1a la pertinencia de la alerta, sino m1s bien le avisa al comit3 de un evento en curso para que puedan definir las acciones siguientes. Adem1s, la primera evaluaci3n de peligro estar1a fundado en an1lisis y mapas de susceptibilidad y la predicci3n ante el pron3stico meteorol3gico ser1a en base a umbrales cr1ticos a niveles de cuenca o microcuenca cuando corresponda.

En la Figura 11 se muestra como funcionar1a el flujo de informaci3n con la integraci3n del sistema de alarma.

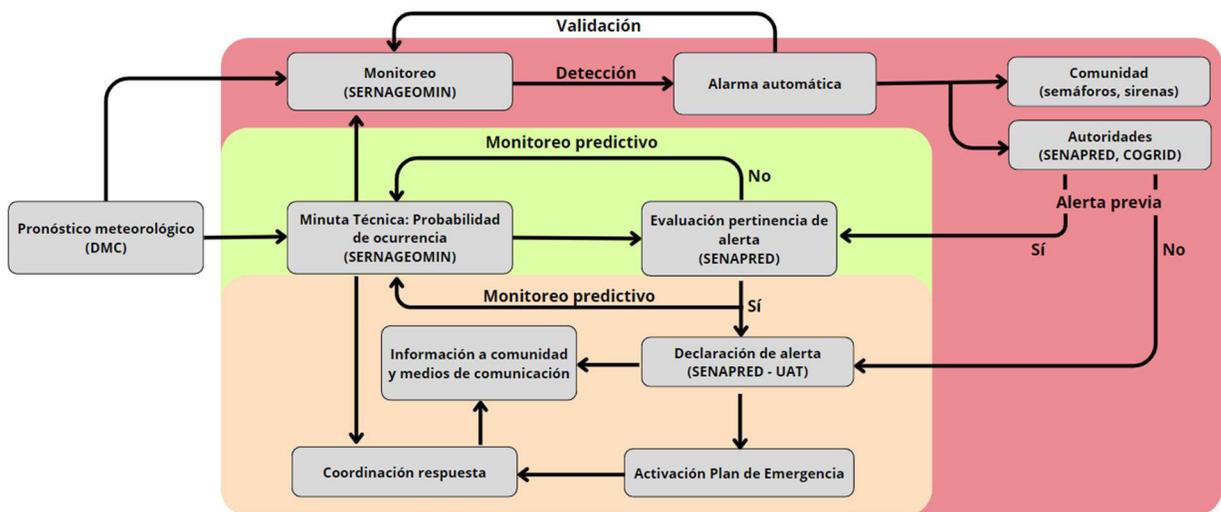


Figura 11: Esquema general del flujo de informaci3n del Plan Espec1fico de Emergencia por variable de Riesgo - Remoci3n en Masa con la integraci3n del sistema de alarma. El monitoreo de alarma funciona junto al predictivo pero la activaci3n de su alarma es independiente, ya que al ser autom1tica no hay una validaci3n humana de por medio. Sin embargo, si puede generar la revisi3n de la declaraci3n de alertas de SINAPRED. El color verde representa la situaci3n sin alerta declarada, el color naranja la situaci3n con declaraci3n de alerta y el color rojo la situaci3n con activaci3n de alarma.

5.2.2 Escenarios volcánicos

5.2.2.1 Sineruptivos

Respecto a los lahares simultáneos a una erupción, ya sean primarios o secundarios (en el caso de que existan precipitaciones al momento de la erupción volcánica), su peligrosidad es ampliamente conocida, por lo que al ser observados, conllevan evacuaciones de las zonas expuestas tanto al lahar, como a las inundaciones que estos puedan provocar (Ciudadano, 2015)

A modo general, en el caso de los aluviones volcánicos, estos se gestionan con la emergencia volcánica, donde la primera alerta corresponde a una alerta técnica emitida por SERNAGEOMIN fundada en el monitoreo del estado de actividad del volcán. Con dicha información SENAPRED declara la alerta correspondiente del Sistema Nacional de Alerta e informa preliminarmente a la comunidad de las zonas afectadas y eventuales emergencias, así como las instrucciones necesarias. Esta alerta también provoca el monitoreo de la DMC de las condiciones meteorológicas en la zona de emergencia, y además genera proyecciones de la nube de ceniza (ONEMI, 2018).

Con el sistema propuesto, la principal diferencia en la preparación y respuesta es la implementación del monitoreo de alarma a cargo de SERNAGEOMIN, el cual puede detectar y alertar de eventos para generar una acción inmediata de las personas expuestas ante un evento en curso. Esto se vuelve relevante sobre todo cuando el radio de las alertas decretadas es menor a la extensión del lahar, ya que estos podrían alcanzar zonas más allá de las definidas, pudiendo sorprender a las personas que se encuentren en una zona expuesta. Otra ventaja de este sistema contra la verificación visual de ocurrencia de lahares, es que no siempre es fácil observar que se están produciendo estos fenómenos, en la erupción del Calbuco de 2015 por ejemplo, estos se identificaron debido a sobrevuelos (Ciudadano, 2015). Otra diferencia es que las personas expuestas son avisadas de forma más rápida con un sistema automático que con uno dado por las autoridades de forma posterior a la verificación de la ocurrencia del evento. En la Figura 12 se muestra como funcionaría el flujo de información con la integración del sistema de alarma.

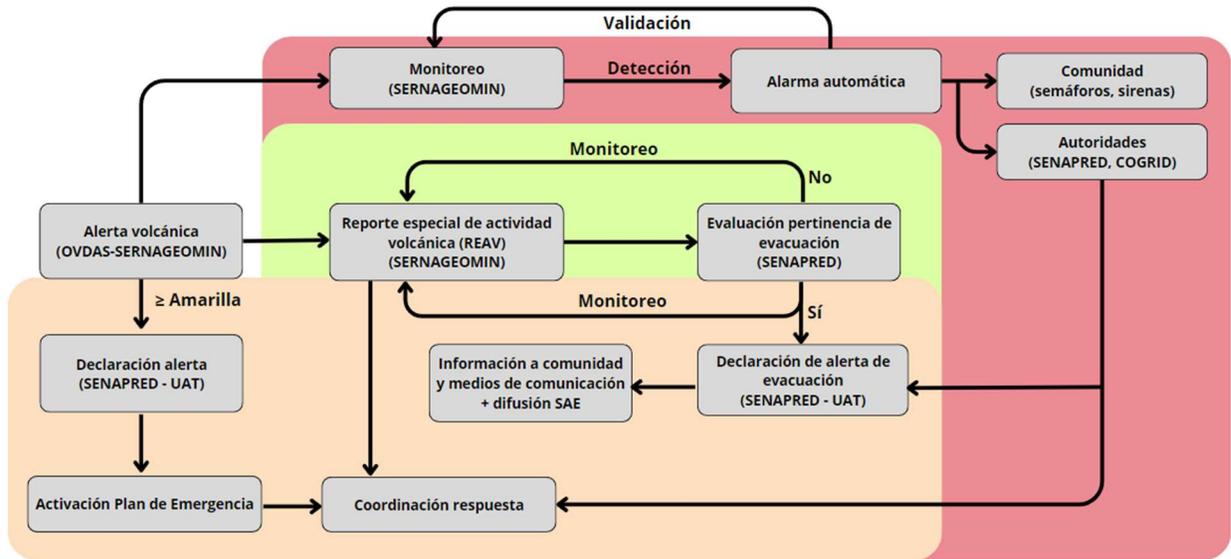


Figura 12: Esquema general del flujo de información del Plan Específico de Emergencia por amenaza volcánica con la integración del sistema de monitoreo de alarma de aluviones. El monitoreo de alarma y su activación es independiente, ya que al ser automática no hay una validación humana de por medio. El color verde representa la situación sin alerta declarada, el color naranja la situación con declaración de alerta y el color rojo la situación con activación de alarma.

5.2.2.2 Post eruptivos

En este caso, el sistema se puede configurar de la misma forma que los no volcánicos hidrometeorológicos, con la adición de la realización de un estudio posterior o en simultáneo a la ocurrencia de una erupción volcánica, a cargo de SERNAGEOMIN. Este estudio determinará en detalle las características de los nuevos depósitos, con especial énfasis en los generados por la caída de tefra, con el fin de ajustar la susceptibilidad e identificar los nuevos lugares propensos a la generación de aluviones ante las eventuales lluvias. En base a esta evaluación, debe mantenerse una revisión periódica del estado de dichos depósitos, esencialmente previo a la época lluviosa de la zona afectada.

5.3 Verificación del sistema propuesto

Para ejemplificar el funcionamiento del sistema propuesto, a continuación se presentan 3 situaciones históricas y su contraparte hipotética con el sistema propuesto.

5.3.1 Aluvión hidrometeorológico

La situación usual ante un peligro de aluvión hidrometeorológico es que en primera instancia la DMC emite un aviso meteorológico, luego de la cual, generalmente se emite una Alerta Temprana Preventiva. Una vez iniciadas las precipitaciones, se evalúa la situación y cuando empiezan a ocurrir desbordes y eventos de remoción en masa menores, suele aumentar la alerta.

Para ejemplificar como se suceden los pasos de la gestión del riesgo de desastres ante una emergencia, se presenta el caso de aluviones hidrometeorológicos en febrero de 2017 en San José de Maipo.

En 2017, el 24 de febrero, la DMC emitió una alerta para los días 25 a 27 en base a un pronóstico meteorológico desfavorable, con una consecuente Alerta Temprana Preventiva por parte de ONEMI la mañana del 25. Ésta evolucionó a una alerta Amarilla, y con ello se activó el plan de emergencia la noche del mismo día tras la ocurrencia de deslizamientos y la necesidad de realizar evacuaciones preventivas en la zona (24 Horas, 2017). Finalmente, se eleva a una Alerta Roja el 26 de febrero tras numerosos deslizamientos, miles de personas aisladas, cientos albergadas y 7 desaparecidas (turistas) producto directo de un aluvión en el estero San José (Gobierno de Chile, 2017). Posteriormente el 28 de febrero la alerta baja a Amarilla para comenzar la etapa de recuperación (Resolución exenta no. 230, 2017). Culminada la emergencia, SERNAGEOMIN procede a realizar un informe técnico evaluando los efectos geológicos del evento hidrometeorológico, en el cual incluye los registros de precipitación y temperatura de las estaciones pluviométricas disponibles en la cuenca y un análisis de dichos datos. Además de observaciones de terreno de las zonas afectadas identificando distintas remociones e inundaciones y sus efectos. Finalmente presentan recomendaciones a las autoridades (Marín et al., 2017).

Con la adición del sistema de alarma, basado en el registro histórico de eventos aluvionales en el estero San José y sus efectos en la población, existiría un sistema en la parte alta de la cuenca cercano a la zona de generación de los flujos que estará vinculado a sirenas y luces de alarma cauce abajo en zonas de cruce del estero, y en zonas de camping o habitacionales aledañas a él.

La primera alerta estaría fundada en los análisis de susceptibilidad de SERNAGEOMIN acorde a una alerta meteorológica de la DMC, pero con este sistema, y la existencia de una concientización de las personas respecto al peligro, a los instrumentos de gestión del riesgo (mapas, vías de evacuación, zonas seguras) y del significado de las alarmas, ante un flujos se

activarían las alarmas y las personas expuestas procederían a responder rápidamente evacuando la zona de amenaza hacia una zona segura. Simultáneamente se enviaría un mensaje a SERNAGEOMIN para la evaluación del flujo, y a SENAPRED metropolitano y la municipalidad de San José de Maipo para decretar alerta roja y proceder con las acciones de apoyo gubernamentales de respuesta del plan de emergencia respectivo.

Una vez identificado el fin del peligro por los entes encargados (mediante observación visual, criterios expertos y de las señales de los instrumentos de monitoreo), el aviso se apagará según un protocolo establecido por SERNAGEOMIN, el ente local encargado dará aviso a las personas que evacuaron y se informará a SENAPRED y a la municipalidad las consecuencias del evento para evaluar el accionar y/o si mantener o cambiar el nivel de alerta.

Finalmente, cada organismo involucrado revisará su accionar y otra información relevante tanto para generar un registro completo como para identificar posibles falencias del sistema. SERNAGEOMIN, además, deberá generar un estudio de el o los eventos ocurridos (informe de efectos geológicos) para identificar sus características, cambios respecto a eventos previos y obtener información para ajustar la susceptibilidad o los modelos predictivos si corresponde.

En cuanto a la localización específica del instrumento de detección, este podría situarse en una localización estratégica permitiendo la observación no sólo del estero San José, sino también de otras quebradas cercanas a él.

5.3.2 Aluvión volcánico post eruptivo

No se encuentra en los registros históricos ni planes de emergencia un procedimiento ante un evento de emergencia de este escenario. En el caso de la posibilidad de ocurrencia de lahares secundarios del volcán Calbuco en abril y mayo de 2015 debido al pronóstico de lluvias mientras aún persiste la alerta roja por actividad volcánica, sólo se menciona que SERNAGEOMIN mantiene especial atención a su ocurrencia en los cauces que descienden del volcán y en una franja de 200 m de ancho a cada costado de ellos, zonas de las cuales también se recomienda a la población mantener distancia (Barría, 2015; T13, 2015).

Con la implementación del sistema propuesto, en primer lugar, SERNAGEOMIN apoyado por las proyecciones de la nube de ceniza de la DMC, determinará por los medios correspondientes los espesores y volúmenes de los depósitos de tefra. Estos datos se almacenarán y serán utilizados

para ajustar la susceptibilidad de aluviones ante precipitaciones y con ello los modelos predictivos. Con esta información y el conocimiento de la ocurrencia de lahares secundarios en los cauces, existiría un sistema de alarma en la parte más alta posible no expuesta a peligros directos del volcán, y en las zonas donde la evaluación de susceptibilidad muestre un peligro hacia las personas. La detección estaría vinculada a sirenas y luces de alarma en zonas cauce abajo donde exista exposición de caminos para la detención del tránsito o exposición de viviendas para la evacuación de las personas. Dado que el material será permanentemente removilizado, es necesario ajustar la susceptibilidad de forma continua para mantener actualizado su estado.

Las demás partes del sistema funcionarían de la misma manera que los aluviones hidrometeorológicos, con una primera alerta fundada en los análisis de SERNAGEOMIN con base a una alerta meteorológica de la DMC.

5.3.3 Aluvión volcánico sineruptivo

En base a los eventos registrados, la situación usual ante un peligro de aluvión volcánico sineruptivo es que en primera instancia el Observatorio Volcánico de los Andes del Sur (OVDAS), perteneciente a SERNAGEOMIN, emite una alerta técnica en base al aumento de actividad volcánica del volcán respectivo, con lo cual SENAPRED con apoyo del organismo técnico emite la alerta respectiva del SINAPRED y se generan radios de seguridad y evacuaciones cuando corresponde.

Para ejemplificar como se suceden los pasos de la gestión del riesgo de desastres ante una emergencia, se presenta el caso de lahares primarios por la erupción del volcán Villarrica en 2015. En este evento, SERNAGEOMIN emitió un reporte especial de actividad volcánica (REAV) donde decreta alerta técnica amarilla el 6 de febrero y fija un radio de seguridad. Tras evaluar la situación, ONEMI declara alerta amarilla el 1 de marzo (El Mostrador, 2015). Con el alza de actividad, OVDAS aumenta la alerta técnica a naranja el 2 de marzo. Finalmente, la madrugada del 3 de marzo comienza la erupción, y se declara alerta roja iniciando la evacuación de miles de personas ubicadas en las cercanías del volcán (24 Horas, 2023). Esta evacuación se realiza hacia zonas seguras definidas por poseer bajo riesgo de afectación por lahares y/o lava (Municipalidad de Pucón, 2017), pero que sin embargo tiene cruces por zonas de alto peligro.

Posterior a la erupción, la alerta roja se mantiene por prevención en un radio de 10 km (Ojeda, 2015) y se mantienen cortes preventivos en rutas expuestas (Cooperativa, 2015).

En esta erupción, y también en las anteriores, se generaron lahares que descendieron por 4 valles de los flancos del volcán hacia el lago Villarrica, Zanjón Seco, Correntoso, Pedregoso y Turbio (Vera, 2018).

Con la adición del sistema de alarma, fundado en el conocimiento histórico de repetidos lahares en los valles mencionados y sus efectos en la población, existiría un sistema en la parte más alta posible no expuesta a peligros directos del volcán, el cuál esté vinculado a sirenas y luces de alarma en zonas valle abajo donde existan puentes, y en zonas habitacionales aledañas a ellos.

En este caso, dado el contexto general de alerta volcánica, el sistema de alertas de SINAPRED continuaría fundamentalmente de la misma forma actual. Sin embargo, con este sistema, y la existencia de una concientización de las personas respecto al peligro y al significado de las alarmas, ante la ocurrencia de flujos, se activarían las alarmas indicando la inmediata detención del tránsito, en vez de cerrar preventivamente los caminos, lo cual, sobre todo en el caso de la configuración de las ciudades alrededor de este volcán, obstaculiza de gran forma la movilidad de las personas durante las evacuaciones. Simultáneamente, se enviaría un mensaje a SERNAGEOMIN para la evaluación del flujo, y a SENAPRED Araucanía y Los Ríos y/o SENAPRED nacional, junto a la municipalidad respectiva para proceder con las acciones de apoyo gubernamentales de respuesta del plan de emergencia respectivo.

Una vez identificado el fin del peligro por los entes encargados (mediante observación visual, criterio experto y de las señales de los instrumentos de monitoreo) los aparatos de aviso se apagarán según un protocolo establecido por SERNAGEOMIN y, además, se avisará a SENAPRED, y a la municipalidad correspondiente las consecuencias del evento para evaluar el accionar. En el caso de evacuación de personas, SENAPRED, aconsejado por el organismo técnico, deberá evaluar si mantener la evacuación o si permitir a las personas retornar a sus domicilios.

Finalmente, cada organismo involucrado hará una revisión de su accionar y otra información relevante tanto para generar un registro como para identificar posibles falencias del sistema.

En cuanto a la localización específica del instrumento de detección, este podría situarse en una localización estratégica permitiendo la observación de múltiples valles y así optimizar su uso.

6. DISCUSIÓN

6.1 Gestión del riesgo de desastres en Chile

El cambio hacia un enfoque de alerta temprana en la gestión del riesgo de desastres es una necesidad identificada por CIGIDEN (Oberli et al., 2021) y observada también en este trabajo al revisar el catastro de eventos históricos y definir los ejemplos en el diseño. Si bien, tanto ONEMI en su momento (Decreto de Ley no. 369, 1974) como SENAPRED (Ley no. 21.364, 2021) actualmente, tienen en su definición la labor de prevención, en la realidad se observa que las alertas (ver Tabla 1), cuya función es prevenir desastres, son activadas o elevadas de nivel tras la ocurrencia de daños y grave afectación a la población (ver Capítulo 5.3).

Ante esta situación, los sistemas de alerta temprana y el monitoreo de alarma constituyen una valiosa herramienta para avanzar en ese camino tal como se ha evidenciado de forma internacional (Badoux et al., 2009; Golnaraghi, 2012; Hürlimann et al., 2016; UNDRR & WMO, 2023), y que la legislación chilena ha avanzado en su integración (ONEMI, 2020; Ley no. 21.364, 2021; Decreto no. 86, 2023).

Pese a lo anterior, la mayoría de los instrumentos de GRD del país se generaron previo a la PNGRD y al Decreto no. 86, por lo que tienen varias falencias si se contrastan con los principios comunes identificados por Golnaraghi (2012). En el Anexo 2 se contrastan los principios de un S.A.T. efectivo con los respectivos ejes, objetivos y acciones estratégicas, según corresponda, del Plan Estratégico Nacional para la RRD. Por ejemplo, no se menciona ninguna retroalimentación específica asociada al monitoreo o a características técnicas del evento ni tampoco al almacenamiento y análisis de dicha información para en el futuro realizar mejoras en el sistema y hacer más confiable y eficiente la declaración de las distintas alertas, lo cual se menciona repetidamente en la literatura que debe ser algo permanente en un buen S.A.T. Sin embargo, en el Plan Estratégico Nacional (ver ejes prioritarios en el Anexo 1), en el Decreto no. 86 y, en consecuencia, en los Planes Regionales para la Reducción del Riesgo de Desastres, se abarcan muchos de estos puntos para ser implementados. Por lo anterior, en el futuro debiera existir una mejora en el sistema en línea con las recomendaciones internacionales. Por esto mismo, es que en este trabajo se determina que los planes de emergencia existentes son adaptables para la integración de un sistema de alarma y por ello se propone su modificación en lugar de un diseño completamente nuevo. Sin embargo, para ello se vuelve necesario modificar también la

definición del ciclo de gestión del riesgo (Figura 5) para que incluya de forma separada las alertas y alarmas y considere una fase omnipresente de análisis permanente (Figura 9). Esto, para ajustarse de mejor forma a las recomendaciones internacionales y lograr que el sistema de alarma se integre de forma armónica dentro del sistema.

6.2 Escenarios de peligro de aluviones

Un elemento que inicialmente se consideró relevante para la óptima implementación fue la identificación y definición de los distintos escenarios de peligro de aluviones en base a sus factores condicionantes y desencadenantes; esto, para determinar en cuáles de ellos sería útil la utilización del sistema de alarma. Sin embargo, de los 6 escenarios definidos, debido a su similitud de factor desencadenante, finalmente se agrupan en sólo 2 sistemas de alerta temprana. Queda para el futuro, una vez implementado el S.A.T., evaluar si es efectivo para cada escenario, o si se vuelve necesaria una especificación para cada uno de ellos. De la misma forma, queda evaluar si 1 km de extensión es una distancia de corte apropiada para la implementación del sistema, dado que según la velocidad del flujo, el tiempo que tarda el instrumento en detectar y generar la alarma, podría ser menor al tiempo en el que el aluvión arriba a las zonas pobladas o de infraestructura crítica. Por otra parte, la alarma podría generarse antes del arribo, pero con un tiempo tan escaso (menor a decenas de segundos) que este no sea útil para la evacuación de las personas; sin embargo, en este último caso, el sistema podría ser viable para detener el tránsito peatonal y/o vehicular en caminos.

Es por este mismo desafío del escaso tiempo de respuesta, que en este trabajo se sugiere la combinación con un sistema predictivo, ya que una alerta previa generará un estado de alerta en las personas y autoridades, lo que podría ser beneficioso para favorecer el rápido actuar ante una alarma.

Del trabajo realizado, es importante considerar el número limitado de eventos aluvionales utilizado en la definición de los escenarios (ver Tabla 7), debido en primera instancia a la restricción de aluviones con extensión mayor a 1 km y, en segunda instancia, a la falta de esta información en los informes de eventos hidrometeorológicos del catastro de SERNAGEOMIN. En muchos casos esto requirió ser inferido de la información e imágenes entregadas y en otros

fue imposible obtener la información. Esto genera que los escenarios puedan carecer de representatividad y que posean discordancia con lo usualmente descrito en las zonas correspondientes o con las características que tendrán los aluviones en el futuro. Por otra parte, en el caso de los aluviones volcánicos, la información es aún más escasa, sobre todo en el caso de los lahares secundarios, de los cuales sólo se menciona que ocurrieron, pero no se reporta bajo qué condiciones ni sus características.

Tabla 7: Número de eventos considerados por región para la definición de los escenarios

Zona	Norte					Centro sur						Sur			Austral	
Región	XV	I	II	III	IV	V	RM	VI	VII	XVI	VIII	IX	XIV	X	XI	XII
Eventos hidrometeorológicos	1	2	5	3	3	2	5	0	1	0	0	1	1	3	1	0
Total	14					8						5			1	
Eventos volcánicos	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	0	5	1	0
Total	0					0						15			1	

Esta escasa información junto a la escasez de instrumentos de monitoreo a nivel de cuenca y subcuencas no permite el estudio de la posibilidad de otros escenarios aún no observados en el contexto del cambio climático. En este sentido, la implementación de monitoreo de distintas variables y la recopilación sistemática de dicha información se vuelve fundamental para entender la evolución de los fenómenos en el territorio en línea con los efectos del cambio climático. En el caso de implementarse el uso de umbrales críticos de lluvia, estudiar su variación asociado a distintos eventos (flujo previo, incendios, erupciones, sismos, activación de fallas, etc) puede ser relevante para identificar zonas de peligro futuras asociadas al cambio climático o al cambio en las condiciones del terreno.

Por todo lo anterior, se sugiere que en el futuro las minutas técnicas e informes elaborados por SERNAGEOMIN, contemplen no sólo las características de afectación de los aluviones, sino también las características de la zona de generación de ellos y su recorrido, así como los parámetros hidrogeológicos específicos del lugar de generación cuando la instrumentación existente lo permita. Esto, además de mejorar la comprensión del fenómeno, es de gran relevancia para la óptima implementación de la instrumentación para el monitoreo de alarma, ya que permite su ubicación de forma que detecte el aluvión en su zona de origen y así se logra

entregar la alarma con la mayor antelación posible dando el máximo tiempo de respuesta a la población. Finalmente, poseer y almacenar de forma estandarizada y sistemática dicha información será importante para la elaboración de los modelos predictivos y para evaluar la evolución en el tiempo, ligado al cambio climático, de las condiciones de generación de aluviones.

Dentro de los escenarios definidos se destaca que en los hidrometeorológicos el norte y centro sur son más propensos a aluviones, posiblemente por las características del suelo poco desarrollado y la escasa vegetación, lo que favorece la inestabilidad y erosión de las laderas además de la presencia de abundante material suelto removible.

Particularmente, tras la revisión de eventos con pérdida de vidas humanas, en general, éstas se producen cuando el aluvión impacta directamente las viviendas habitadas (ver Anexo 6). Además, el norte es el escenario hidrometeorológico más crítico al presentar más eventos registrados (ver Tabla 7), más eventos catastróficos y más muertes (ver Figura 13). Al mismo tiempo, es la zona con más estudios e información de las características generadoras de aluviones. Esto podría estar relacionando tanto a las condiciones climáticas del área, como a la alta exposición y a la alta vulnerabilidad de las personas de las poblaciones afectadas.

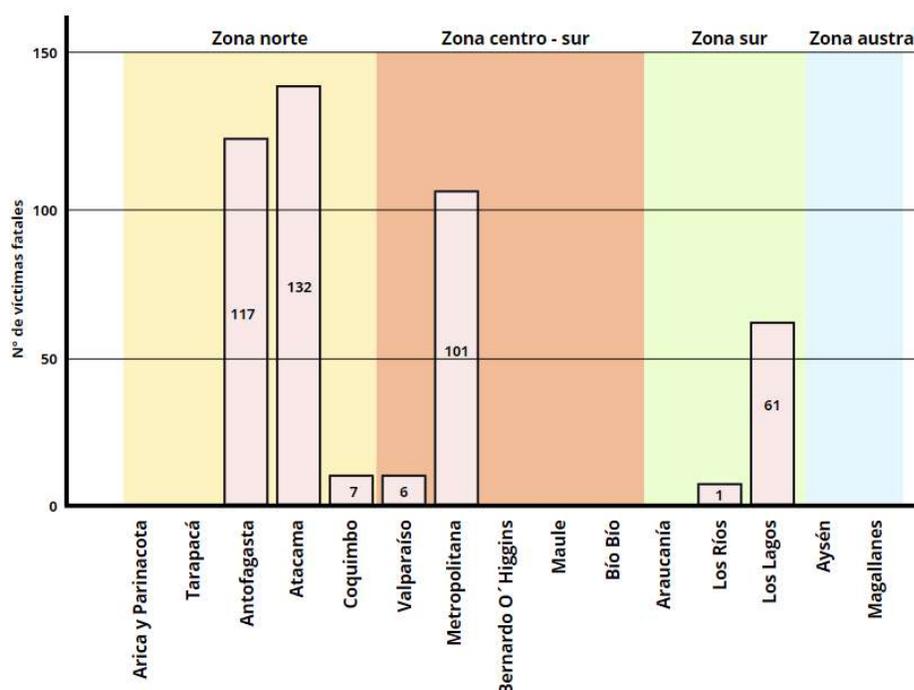


Figura 13: Distribución regional y por escenarios de peligro hidrometeorológico de víctimas fatales por remociones en masa del tipo flujo entre los años 1928 y 2017. Modificado de Marín et al. (2018).

Cabe destacar que, en consecuencia, la zona norte es la zona con mayores medidas de mitigación estructurales (piscinas decantadoras, muros de gaviones, disipadores de energía); sin embargo, hay una gran falta de educación de las personas y fiscalización gubernamental, ya que es usual el uso de estas estructuras como basurales y para la construcción de viviendas irregulares, donde se destaca el caso de las obras construidas en Antofagasta tras el catastrófico aluvión de 1991 (CIGIDEN, 2023).

Esta situación, es el ejemplo ideal para mostrar la importancia de la educación y concientización del peligro en las personas.

6.3 Implementación del sistema de alarma

Para la implementación, se podría argumentar que en eventos no volcánicos es viable considerar sólo los escenarios hidrometeorológicos con zonas de recurrencia y zonas con alta susceptibilidad que expongan a personas o infraestructura crítica. Debido a que los ocasionados por colapso de estructuras y caída de rocas es difícil determinar previamente dónde ocurrirán y con ello decidir instalar instrumentación de monitoreo. En cuanto a los escenarios volcánicos, la instrumentación para los post eruptivos debería estar sujeta a la evaluación de susceptibilidad y al registro histórico de encauzamientos. Mientras que los lahares sin eruptivos, según el registro histórico suelen encauzarse tanto primarios como secundarios por las mismas zonas, por lo que debieran instalarse instrumentos según el registro histórico. Por lo anterior, se vuelve relevante que los mapas de amenaza elaborados por los organismos técnicos según lo establecido en el Decreto no. 86, tengan su base en el estudio de la susceptibilidad del terreno a remociones en masa.

Respecto a los instrumentos a utilizar, lo más relevante es la utilidad y eficacia de ellos, así como su adaptabilidad al entorno de su ubicación. Es también importante considerar en su elección que se pueda garantizar el acceso a repuestos y sea posible un mantenimiento local. Esto es clave para permitir la continuidad del sistema.

Finalmente, de resultar efectiva la implementación del sistema, este podría extenderse a otros peligros como las inundaciones o incendios con la instrumentación y organismos técnicos adecuados.

7. CONCLUSIONES

Chile es un territorio que por sus características posee una importante exposición de la población hacia los fenómenos naturales, donde los aluviones adquieren relevancia por su recurrencia y afectación a las personas. Sin embargo, estos también constituyen un peligro evitable mediante la correcta planificación territorial, o mitigable mediante distintas estrategias. En este sentido, por medio de una revisión bibliográfica se ha evidenciado que los sistemas de alerta temprana son una valiosa herramienta en la gestión del riesgo de desastres con enfoque preventivo y representan una oportunidad accesible en nuestro país para la mejora en la calidad de vida de las personas.

En particular, tras la caracterización del funcionamiento de los distintos sistemas de alerta temprana, se define que los sistemas basados en el monitoreo de alarma pueden ser de gran utilidad para los aluviones que poseen recorridos mayores a 1 km desde su origen hasta zonas de afectación, ya que permiten el aviso de ocurrencia de un flujo previo a su llegada y así posibilitan un mayor tiempo de respuesta para la reacción. Sin embargo, para que estos sean efectivos, es fundamental la concientización de las personas y autoridades respecto al peligro y al riesgo

Para una óptima implementación del sistema, se define la necesidad de conocer las características de los distintos escenarios posibles, ya que si bien los aluviones ocurren a lo largo de todo el territorio, su origen varía acorde a las condiciones climáticas, siendo este, junto a la geomorfología, el principal motivo de los factores condicionantes y detonantes de los flujos. De esta forma, tras la revisión de registros históricos a partir de 1948 (Anexo 6), se definen 6 escenarios, 4 no volcánicos (Tabla 4) y 2 volcánicos (Tabla 5). Posteriormente, estos se organizan en 3 grupos producto de la coincidencia de los factores gatillantes (lluvias intensas y erupción volcánica), resultando en escenarios hidrometeorológicos, volcánicos sineruptivos y volcánicos post eruptivos. De esta forma, finalmente se obtienen los escenarios hidrometeorológicos e hidrometeorológico post eruptivo insertos en un S.A.T. asociado a un plan de emergencia de remoción en masa (Figura 11) y un escenario sineruptivo para un S.A.T. relacionado a un plan de emergencia por erupción volcánica (Figura 12). Siendo estos planes modificados para ajustarse a las recomendaciones internacionales.

Adicionalmente, se determina que para los aluviones gatillados por fenómenos hidrometeorológicos, sería aún más beneficiosa la integración del sistema de alarma al actual sistema con monitoreo predictivo, ya que esto permite generar el estado de alerta en las personas para obtener una mejor respuesta al ser activada la alarma. Sin embargo, este sistema debe mejorarse con una mayor red de instrumentos de medición que permitan la correcta identificación de los umbrales críticos de precipitación.

Por otra parte, para la inclusión armónica del S.A.T. en el sistema gubernamental chileno, se propone la modificación del ciclo de gestión del riesgo de desastres (Figura 5), con la inclusión de una etapa omnipresente y permanente de identificación y análisis del peligro y de todas las componentes del sistema. Así como también con la definición de forma diferenciada de las alertas y alarmas, tanto por las diferencias en su funcionamiento como por el tiempo y periodo de activación de cada una (Figura 9).

Este sistema diseñado a partir de la modificación de la estructura vigente para contemplar las recomendaciones internacionales, y de la integración de la información de los escenarios para ajustarla a la realidad del país, se verifica a través de ejemplificaciones con eventos históricos importantes y se concluye que puede ser una gran herramienta que contribuya al objetivo de cambiar el actual enfoque de respuesta temprana hacia uno preventivo de alerta temprana. Sin embargo, se destaca que además del desarrollo de los sistemas de monitoreo, es fundamental dar una mayor relevancia a las medidas de mitigación con el uso de la información del peligro en los proyectos de planificación territorial y con una fuerte educación y concientización de la población y las autoridades.

REFERENCIAS

- 24 Horas. (2017, 25 de febrero). Al menos cuatro desaparecidos dejan aluviones en la zona central. *24 Horas*. <https://www.24horas.cl/nacional/al-menos-cuatro-desaparecidos-dejan-aluviones-en-la-zona-central-2312371>
- 24 Horas. (2023, 25 de septiembre). Volcán Villarrica: así fue la erupción del 2015. *24 Horas*. <https://www.24horas.cl/tendencias/tecnologia-y-ciencias/volcan-villarrica-asi-fue-erupcion-2015->
- Abancó, C., Hürlimann, M., Fritschi, B., Graf, C. & Moya, J. (2012). Transformation of ground vibration signal for debris-flow monitoring and detection in alarm systems. *Sensors*, 12, 4870–4891. <https://doi.org/10.3390/s120404870>
- Abancó, C., Hürlimann, M. & Moya, J. (2014). Analysis of the ground vibration generated by debris flows and other torrential processes at the Rebaixader monitoring site (Central Pyrenees, Spain). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, 929–943. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-929-2014>
- Advanced Mining Technology Center (AMTC). (2021, 29 de enero). A un año del aluvión de El Tránsito, investigadores del AMTC enfatizan la necesidad de mejorar criterio de planificación territorial en zonas de riesgo aluvional. *AMTC*. <https://www.amtc.cl/noticia-general/a-un-ano-del-aluvion-de-el-transito-investigadores-del-amtc-enfatizan-la-necesidad-de-mejorar-criterio-de-planificacion-territorial-en-zonas-de-riesgo-aluvional/>
- Agencia de Cooperación Internacional del Japón. (2012). Estudio de recopilación de datos para el sistema integral de información de desastre y sistema de alerta temprana. República de Chile. Recuperado de https://openjicareport.jica.go.jp/pdf/12080305_01.pdf
- Alfaro, A., Fuentes, F. & Murillo, I. (2015). *Efectos geológicos del evento meteorológico de marzo de 2015 en la comuna de Alto del Carmen: Descripción de los aluviones y áreas propuestas para evacuación, campamentos de emergencia y acopio de sedimentos en los valles de los ríos Del Carmen y El Tránsito* (INF-ATACAMA-06). Servicio Nacional de Geología y Minería. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2015-21.pdf
- Amigo, A. (2013). Estimation of tephra-fall and lahar hazards at Hudson Volcano, southern Chile: Insights from numerical models. En W. Rose, J. Palma, H. Delgado, & N. Varley (Eds.), *Understanding open-vent volcanism and related hazard* (Vol. 498, pp. 177-199). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2013.2498\(11\)](https://doi.org/10.1130/2013.2498(11))
- Badoux, A., Graf, C., Rhyner, J., Kuntner, R., & McArdell, B. W. (2009). A debris-flow alarm system for the Alpine Illgraben catchment: design and performance. *Natural hazards*, 49(3), 517-539. <https://doi.org/10.1007/s11069-008-9303-x>

Barrera, B. & Fernández, Y. (2019, 24 de marzo). A cuatro años del Aluvión de Atacama: la tragedia olvidada de las temporeras de La Capilla. *Diario UChile* <https://radio.uchile.cl/2019/03/24/a-cinco-anos-del-aluvion-de-atacama-la-tragedia-olvidada-de-las-temporeras-de-la-capilla/>

Barría, D. (2015, 1 de mayo). Volcán Calbuco: posibles lahares secundarios concentran atención de autoridades. *Bío Bío Chile*. <https://www.biobiochile.cl/noticias/2015/05/01/volcan-calbuco-posibles-lahares-secundarios-concentran-atencion-de-autoridades.shtml>

Bel, C., Liébault, F., Navratil, O., Eckert, N., Bellot, H., Fontaine, F. & Laigle, D. (2017). Rainfall control of debris-flow triggering in the Réal Torrent, Southern French Prealps. *Geomorphology*, 291, 17–32. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.04.004>

Berenguer, M., Sempere-Torres, D., & Hürlimann, M. (2015). Debris-flow forecasting at regional scale by combining susceptibility mapping and radar rainfall. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(3), 587-602. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-587-2015>

Budimir, M. (2020). Transforming lives through ingenuity: Practical Action and early warning systems, Rugby, UK: *Practical Action Publishing*. Recuperado de [EWS Vision_web.pdf;jsessionid=4CE297166329103D77F10A7530AC00A6 \(practicalaction.org\)](https://www.practicalaction.org/~/media/PracticalAction/Files/EWS_Vision_web.pdf?jsessionid=4CE297166329103D77F10A7530AC00A6)

Budimir, M., Dharam, R.U., Arestegui, M., Svensson, A. (2021, 28 de septiembre). ¿Cómo se construye un sistema de alerta temprana eficiente? *Infoinundaciones*. <https://infoinundaciones.com/noticias/%C2%BFcomo-se-construye-un-sistema-de-alerta-temprana-eficiente/>

Candia, J., & Herrera, A. (2017). *Catastro Remociones en masa a nivel Nacional*. [Memoria para optar al título de Cartógrafo y al grado de Licenciado en Ciencias Cartográficas, Universidad Tecnológica Metropolitana]. Santiago de Chile.

Capra, L., Coviello, V., Borselli, L., Márquez-Ramírez, V.-H. & Arámbula-Mendoza, R., (2018). Hydrological control of large hurricane-induced lahars: evidence from rainfall runoff modeling, seismic and video monitoring. *Natural Hazards Earth System Sciences*. 18, 781–794. <https://doi.org/10.5194/nhess-18-781-2018>

Carrasco, F. & Ramirez, P. (2021). *Caracterización de remociones en masa del 31 de mayo de 2021, en la ribera sur del lago Calafquén, sobre la ruta CH-201, comuna de Panguipulli, Región de Los Ríos*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2021-13.pdf

Castruccio, A., Clavero, J., & Rivera, A. (2010). Comparative study of lahars generated by the 1961 and 1971 eruptions of Calbuco and Villarrica volcanoes, Southern Andes of Chile. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 190(3-4), 297-311. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.12.005>

Centro de Investigación para la Gestión Integrada del Riesgo de Desastres (CIGIDEN). (2023, 30 de junio). A 32 años del aluvión de 1991 en Antofagasta expertos recalcan la urgencia de un sistema de alerta temprana. *CIGIDEN*. <https://www.cigiden.cl/a-32-anos-del-aluvion-de-1991-en-antofagasta-expertos-recalcan-la-urgencia-de-un-sistema-de-alerta-temprana/>

Ciudadano (2015). Nueva evacuación por volcán Calbuco: Lahares amenazan con inundaciones en sector de Chamiza. *El Ciudadano*. <https://www.elciudadano.com/medio-ambiente/nueva-evacuacion-por-volcan-calbuco-lahares-amenazan-con-inundaciones-en-sector-de-chamiza/04/24/>

Comiti, F., Marchi, L., Macconi, P., Arattano, M., Bertoldi, G., Borga, M., Brardinoni, F., Cavalli, M., D'Agostino, V., Penna, D. & Theule, J. (2014). A new monitoring station for debris flows in the European Alps: first observations in the Gadria basin. *Natural Hazards*, 73, 1175–1198. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1088-5>

Cooperativa. (2002, 15 de mayo). Finalizó la búsqueda de los siete desaparecidos por aluvión en Buill. *Cooperativa*. <https://www.cooperativa.cl/noticias/pais/finalizo-la-busqueda-de-los-siete-desaparecidos-por-aluvion-en-buill/2002-05-15/160700.html>

Cooperativa. (2015, 3 de marzo). Las rutas que están interrumpidas tras la erupción en volcán Villarrica. *Cooperativa*. <https://cooperativa.cl/noticias/pais/region-de-la-araucania/las-rutas-que-estan-interrumpidas-tras-la-erupcion-en-volcan-villarrica/2015-03-03/073647.html>

CREDEN. (2016). *Hacia un Chile Resiliente frente a Desastres: Una Oportunidad. Estrategia Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación para un Chile Resiliente frente a Desastres de Origen Natural*. Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID).

El Mostrador (2015, 1 de marzo). Actividad de Volcán Villarrica decreta alerta amarilla para las comunas de Villarrica, Pucón, Curarrehue y Panguipulli. *El Mostrador*. <https://www.elmostrador.cl/noticias/pais/2015/03/01/actividad-de-volcan-villarrica-decreta-alerta-amarilla-para-las-comunas-de-villarrica-pucon-curarrehue-y-panguipulli/>

Falcón, F., Arenas, M., Carrasco, R., Fernández, J., Gajardo, A., Huerta, S., Marín, M., Merino, A., Mourgues, F., Pérez, Y & Vaccaro, H. (2014). *Geología para el ordenamiento territorial: área de Antofagasta, Región de Antofagasta*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Ambiental 19. 6 mapas escala 1:50.000. Santiago. Recuperado de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2014-14.pdf

Farías, V., Escobar, P., Marín, M., Alfaro, A., Ole, P., Fernández, J., Arenas, M & Ramírez, P. (2016). *Estudio exploratorio para el diseño de un sistema de monitoreo de remociones en masa, en las cuencas de San Ramón, Macul y Lo Cañas, Región Metropolitana*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-16-64: 92p. Santiago

Fathani, T. F., & Legono, D. (2013). The application of monitoring and early warning system of rainfall-triggered debris flow at Merapi Volcano, Central Java, Indonesia. En *Progress of Geo-Disaster Mitigation Technology in Asia*, (pp. 263-275).

Fernández, C. & Arenas, M. (2002). *El flujo de detritos del 3 de mayo de 2002 Caleta Buill, comuna de Chaitén, X Región, a una semana del desastre*. Servicio Nacional de Geología y Minería. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RLAG-002.pdf

Garreaud, R., Vuille, M., Clement, A.C. (2003). The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 194 (1-3):5-22. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(03\)00269-4](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(03)00269-4)

Garrido, N., Mella, M., Fernández, J., Sepúlveda, V., Quiroz, D., Hermosilla, G., Moreno, H. & Duhart, P. (2018). *Origen y efectos de la remoción en masa del 16.12.2017 que afectó la localidad de Villa Santa Lucía, comuna de Chaitén, Región de Los Lagos*. Informe Técnico. Servicio Nacional de Geología y Minería. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2018-19.pdf

Gho, R., Jara, C. & Amigo, A. (2016). *Observaciones geológicas del estado del deslizamiento ocurrido en el Estero La Mina, comuna San Clemente, Región del Maule*. Asistencia Técnica – 2016/001. Servicio Nacional de Geología y Minería. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2016-03.pdf

Gobierno de Chile. (2017, 26 de febrero). Se cancela Alerta Amarilla para la comuna de San José de Maipo y declara Alerta Roja para la provincia de Cordillera por precipitaciones. <https://www.gob.cl/noticias/se-cancela-alerta-amarilla-para-la-comuna-de-san-jose-de-maipo-y-declara-alerta-roja-para-la-provincia-de-cordillera-por-precipitaciones/>

Godt, J.W., Baum, R.L., Lu, N., (2009). Landsliding in partially saturated materials. *Geophysical Research Letters*, 36, L02403. <https://doi.org/10.1029/2008GL035996>

Golnaraghi, M. (Ed.). (2012). *Institutional partnerships in multi-hazard early warning systems: a compilation of seven national good practices and guiding principles*. Springer Science & Business Media.

González, M., Escobar, E., Becerra, R., & Gosálvez, R. U. (2018). Erupción del Calbuco en 2015 y su repercusión en la vegetación del entorno. Lahares en río Blanco y Correntoso (Región de los Lagos, Chile). En *Bosque mediterráneo y humedales: paisaje, evolución y conservación: aportaciones desde la biogeografía* (pp. 646-655). Almud, Ediciones de Castilla-La Mancha.

Grijalba Gómez, V. (2016). *Geología y análisis histórico-meteorológico del aluvión de marzo de 2015 en Chañaral, Atacama*. [Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile]. Repositorio académico de la Universidad de Chile <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/140039>

Guzzetti, F., Gariano, S. L., Peruccacci, S., Brunetti, M. T., Marchesini, I., Rossi, M., & Melillo, M. (2020). Geographical landslide early warning systems. *Earth-Science Reviews*, 200, 102973. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102973>

Hauser, A. (1991) *Aluviones que afectaron a la ciudad de Antofagasta, II Región, el día 18 de junio de 1991*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. Recuperado de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RANT-007.pdf

Hauser, A. (2000) *Remociones en masa en Chile*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Boletín no 59, versión actualizada 2000, 89p. Santiago. Recuperado de https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RAR-002.pdf

Highland, L., & Bobrowsky, P. T. (2008). *The landslide handbook: a guide to understanding landslides* (p. 129). Reston: US Geological Survey.

Huang, Y. M. (2023). Characteristics of debris flows recorded in the Shenmu area of central Taiwan between 2004 and 2021. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 23(7), 2649-2662. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2649-2023>

Huggel, C., Khabarov, N., Obersteiner, M., & Ramírez, J. M. (2010). Implementation and integrated numerical modeling of a landslide early warning system: a pilot study in Colombia. *Natural Hazards*, 52, 501-518. <https://doi.org/10.1007/s11069-009-9393-0>

Hürlimann, M., Abancó, C., Moya, J., Berenguer, M., & Vilajosana, I. (2016). Debris-Flow Monitoring for the Set-Up of a Warning and Alarm System-Experiences from the Pyrenees. *International Journal of Erosion Control Engineering*, 9(3), 107-113.

Hürlimann, M., Coviello, V., Bel, C., Guo, X., Berti, M., Graf, C., Hubl, J., Miyata, S., Smith, J. B. & Yin, H. Y. (2019). Debris-flow monitoring and warning: Review and examples. *Earth-Science Reviews*, 199, 102981. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102981>

Intendencia Región Metropolitana (28 de febrero de 2017) Resolución exenta no. 230 de 2017. *Por la cual se levanta alerta roja en la Provincia Cordillera. Declara alerta amarilla para la comuna de San José de Maipo Provincia de Cordillera*. <https://www.interior.gob.cl/transparenciaactiva/doc/ActosTerceros/1/3704220.pdf>

Johnson, J. B., & Palma, J. L. (2015). Lahar infrasound associated with Volcán Villarrica's 3 March 2015 eruption. *Geophysical Research Letters*. <https://doi.org/10.1002/2015GL065024>

Jones, R. J. (2016). *The Initiation of Rain-triggered Lahars* [Disertación doctoral, University of Leeds].

Korup, O., Seidemann, J., & Mohr, C. H. (2019). Increased landslide activity on forested hillslopes following two recent volcanic eruptions in Chile. *Nature Geoscience*, 12(4), 284-289. <https://doi.org/10.1038/s41561-019-0315-9>

Liao, Z., Hong, Y., Wang, J., Fukuoka, H., Sassa, K., Karnawati, D. & Fathani, F. (2010). Prototyping an experimental early warning system for rainfall-induced landslides in Indonesia using satellite remote sensing and geospatial datasets. *Landslides*, 7, 317-324. <https://doi.org/10.1007/s10346-010-0219-7>

Marco de Acción de Hyogo para 2005-2015: Aumento de la Resiliencia de las Naciones y las Comunidades ante los Desastres. Conferencia Mundial Sobre la Reducción de Desastres, 18 al 22 de enero de 2005, Kobe, Hyogo, Japón.

Marín, M., Contreras, J. & Olea, P. (2017). *Efectos geológicos del sistema frontal en la zona central del país, el 25 y 26 de febrero de 2017. Región Metropolitana, comuna de San José de Maipo.* Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2017-23.pdf

Marín, M.; Farias, V. & Pantoja, G. (2020). *Efectos geológicos del evento meteorológico del norte de Chile de enero 2020: Observaciones entre los sectores El Tránsito y Valeriano, comuna de Alto del Carmen, Región de Atacama.* Informe técnico. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2020-04.pdf

Marín, M. & Garrido, N. (2012). *Remociones en masa ocurridas el 15 de enero de 2012 en el camino interior del Parque Cordillera Yerba Loca, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana de Santiago.* Informe técnico. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2012-14.pdf

Marín, M., Muñoz, A.A. & Naranjo, J.A. (2018). *Víctimas fatales causadas por remociones en masa en Chile (1928-2017).* XV Congreso Geológico Chileno, Concepción, Chile.

Marín, M & Valdés, A. (2012). *Aluvión ocurrido el 17 de junio de 2012 en el kilómetro 4,5 de la Ruta G-21, comuna de Lo Barnechea, Región Metropolitana, y observaciones en la Ruta G-21 hasta el km 32.* Informe final. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2012-01.pdf

Martinsen, O. (1994). Mass movements. En *The geological deformation of sediments* (pp. 127-165). Dordrecht: Springer Netherlands.

Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (4 de agosto de 2017). Decreto no. 1.434. *Aprueba Plan Nacional de Emergencia.* <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1106167>

Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (7 de agosto de 2021). Ley no. 21.364. *Establece el sistema nacional de prevención y respuesta ante desastres, sustituye la oficina nacional de emergencia por el servicio nacional de prevención y respuesta ante desastres, y adecúa normas que indica.* D.O. No. 43.022. <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1163423>

Ministerio del Interior y Seguridad Pública. (17 de octubre de 2023). Decreto no. 86. *Reglamento que regula los Organismos Técnicos para el Monitoreo de Amenazas; Organismos Técnicos para el Monitoreo Sectorial; los Instrumentos para la Gestión del Riesgo de Desastres; y los procedimientos de elaboración de los Mapas de Amenaza y los Mapas de Riesgo.* D. O. no. 43.678 <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1196971>

Morales, B., Lizama, E., Somos-Valenzuela, M. A., Lillo-Saavedra, M., Chen, N., & Fustos, I. (2021). A comparative machine learning approach to identify landslide triggering factors in northern Chilean Patagonia. *Landslides*, 18(8), 2767-2784. <https://doi.org/10.1007/s10346-021-01675-9>

Moreno, H. & Clavero, J. (2006). *Geología del área del volcán Villarrica, Regiones de la Araucanía y de los Lagos*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No., p.21, 1 mapa escala.

Municipalidad de Pucón (2017). Plan de Emergencia Volcánica, comuna de Pucón.

Municipalidad de Villarrica (2016). Plan Emergencia, erupción volcánica Villarrica.

Muñoz, A., Opazo, E. & Gálvez, V. (2020). *Evaluación geológica por el aumento de sedimentos en la desembocadura del río Las Minas entre el 23 y 25 de septiembre de 2019, comuna de Punta Arenas, región de Magallanes y la Antártica Chilena*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 24 p. Santiago.

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*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-21-91: 151 p. Santiago. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2021-26.pdf

Naranjo, J.A; Arenas, M.; Clavero, J. & Lara, L. (2007). *Estudio preliminar de peligros por remociones en masa por el sismo -Mw 6,2-del 21 de abril de 2007, Región de Aisén*. Servicio Nacional de Geología y Minería. Santiago. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RAY-008.pdf

Naranjo, J., Moreno, R., & Banks, N. (1993). *La erupción del volcán Hudson en 1991 (46° S), región XI, Aisén, Chile*. Boletín SERNAGEOMIN.

Naranjo, J. & Clavero, J. (2001a). *Informe sobre el aluvión del 23 de junio de 2001 en el río Chislluma, Provincia de Parinacota, I Región*. Departamento de Geología Aplicada, Subdirección Nacional de Geología. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2001-04.pdf

Naranjo, J.A., Fernández, J. & Antinao, J. (2001b). *Estudio de peligros de flujos de detritos en el área de El Alfalfa, cuenca del río Colorado, comuna San José de Maipo*. Departamento de Geología Aplicada, Subdirección Nacional de Geología. Servicio Nacional de Geología y Minería. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2001-01.pdf

Navarrete, P. (2017). *Volcán Llaima: Antecedentes, amenaza volcánica y evaluación de la gestión del riesgo*. [Memoria para optar al título de Geógrafo, Universidad de Chile]. Repositorio académico de la Universidad de Chile <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/144212>

NOAA-USGS Debris Flow Task Force (2005). *NOAA-USGS debris-flow warning system - Final report*: U.S. Geological Survey Circular 1283, 47 p. Recuperado de <http://pubs.usgs.gov/circ/2005/1283/>

Oberli, C., Gironás, J., Escauriaza, C., & Cienfuegos, R. (2021). Sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT), un elemento esencial en la gestión de desastres de origen hidrometeorológico. CIGIDEN. *Policy Papers*.

Ojeda, A. (2015, 3 de marzo). Onemi mantiene alerta roja en radio de 10 kms. en torno del cráter del volcán Villarrica. *Diario UChile*. <https://radio.uchile.cl/2015/03/03/onemi-mantiene-alerta-roja-en-radio-de-10-kms-en-torno-del-crater-del-volcan-villarrica/>

ONEMI (2017). Plan específico de emergencia por variable de riesgo: remoción en masa. Recuperado de https://www.onemi.gov.cl/wp-content/uploads/2018/09/PEEVR_REMOCION-EN-MASA_01.02.18.pdf

ONEMI (2018). Plan específico de emergencia por variable de riesgo: erupciones volcánicas v0.0.

ONEMI. (2020). Política nacional para la reducción del riesgo de desastres. Plan estratégico nacional 2020-2030.

ONEMI (2022a). Plan regional para la reducción del riesgo de desastres, Región del Ñuble. Versión 0.0

ONEMI (2022b). Plan por amenaza volcánica: Complejo volcánico Nevados de Chillán, Región del Ñuble. Versión 0.2

Opazo, E., Sepúlveda, N. & Marín, M. (2015). *Efectos geológicos del evento meteorológico del 8 al 10 de agosto de 2015. Observaciones de los flujos detríticos en la comuna de Tocopilla, Región de Antofagasta* (INF-TOCOPILLA-01). Servicio Nacional de Geología y Minería. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2015-17.pdf.

Pastorello, R., D'Agostino, V., & Hürlimann, M. (2020). Debris flow triggering characterization through a comparative analysis among different mountain catchments. *Catena*, 186, 104348. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104348>

Pierson, T. C., Major, J. J., Amigo, A., & Moreno, H. (2013). Acute sedimentation response to rainfall following the explosive phase of the 2008–2009 eruption of Chaitén volcano, Chile. *Bulletin of Volcanology*, 75, 1-17. <https://doi.org/10.1007/s00445-013-0723-4>

Quiroz, D., Duhart, P. & Sepúlveda, V. (2020). *Remoción en masa en valle Los Turbios – Termas El Amarillo, provincia de Palena, Región de Los Lagos*. Informe técnico INF – Los Lagos-04.2020. Servicio Nacional de Geología y Minería. Puerto Varas. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2020-16.pdf

Ramírez, F & Marín, M. (2021). *Aluviones ocurridos el 30 y 31 de enero de 2021 en el sector El Arrayán y en la Ruta G-21 vía a Farellones. Comuna de Lo Barnechea. Región Metropolitana de Santiago*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Técnico (Inédito): 38 p. Santiago. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2021-06.pdf

Sepúlveda, N. & Merino, R. (2017). *Efectos geológicos del sistema frontal en la zona central del país, 24-26 de febrero de 2017. Región de Valparaíso, comunas de Calle Larga y Putaendo*. INF-Valparaíso-02. 2017. Servicio Nacional de Geología y Minería. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2017-13.pdf

SERNAGEOMIN (2007). Proyecto Multinacional Andino: Geo ciencias para las comunidades andinas. *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. Recuperado de <https://repositorio.segemar.gov.ar/handle/308849217/2792;jsessionid=1AE973824D9E99359F1258AAA46FC71D>

SERNAGEOMIN (2020). *Minuta técnica por peligro de remociones en masa para las regiones de Atacama y Coquimbo según pronóstico meteorológico de precipitaciones*. <https://sangeronimo.files.wordpress.com/2020/01/2020-01-28-minuta-tecc81cnica-por-pronostico-de-lluvias-atacama-y-coquimbo.....pdf>

SERNAGEOMIN (2023, 3 de junio). Servicio geológico de Estados Unidos realiza transferencia científico-tecnológica para programa piloto de monitoreo de remociones en masa. *Servicio Nacional de Geología y Minería*. <https://www.sernageomin.cl/servicio-geologico-de-estados-unidos-realiza-transferencia-cientifico-tecnologica-para-programa-piloto-de-monitoreo-de-remociones-en-masa/>

Silva, N. (2020). Identificación de los Factores Subyacentes del Riesgo de Desastres en el Nivel Comunal en Chile. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 4(1), 21-34. <https://doi.org/10.55467/reder.v4i1.39>

Stähli, M., Sättele, M., Huggel, C., Mc Ardell, B. W., Lehmann, P., Van Herwijnen, A., Berne, A., Schleiss, M., Ferrari, A., Kos, A., Or, D. & Springman, S. M. (2015). Monitoring and prediction in early warning systems for rapid mass movements. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(4), 905-917. <https://doi.org/10.5194/nhess-15-905-2015>

T13 (2015, 26 de abril). Sernageomin advierte sobre “alta probabilidad” de formación de lahares secundarios en Calbuco. *T13*. <https://www.t13.cl/noticia/nacional/sernageomin-advierte-sobre-alta-probabilidad-de-formacion-de-lahares-secundarios-en-calbuco>.

Toro, D. (2020, 28 de enero). Subsecretario de OO.PP. por aluvión en El Tránsito: "Dejó prácticamente a todo el pueblo con barro en sus casas". *El Mercurio Online*. <https://www.emol.com/noticias/Nacional/2020/01/28/974936/Aluvion-Atacama-Lluvias.html>

Torrico, L. (2022, 16 de diciembre). Efemérides: El 16 de diciembre de 2017 se produjo en Chaitén el aluvión de la Villa Santa Lucía. *Bio Bio Chile*.

<https://www.biobiochile.cl/biobiotv/programas/efemerides/2022/12/16/efemerides-el-16-de-diciembre-de-2017-se-produjo-en-chaiten-el-aluvion-de-la-villa-santa-lucia.shtml>

UNDRR (2006): *Developing Early Warning Systems: a checklist*. Recuperado de <https://www.unisdr.org/2006/ppew/info-resources/ewc3/checklist/English.pdf>

UNDRR. (2015). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030, Geneva, Switzerland

UNDRR & WMO (2023). *Global Status of Multi-Hazard Early Warning Systems*. Geneva, Switzerland. Recuperado de <https://www.undrr.org/media/91954/download?startDownload=true>

Vargas, G., Ortlieb, L. & Ruttlant, J. (2000). Aluviones Históricos en Antofagasta y su relación con eventos El Niño/Oscilación del Sur. *Revista Geológica de Chile*, p.155-174. <http://dx.doi.org/10.4067/S0716-02082000000200002>.

Vera, F. (2018). *Origen, transporte y emplazamiento de lahares y avalanchas mixtas generadas en la erupción del 3 de marzo de 2015 en el volcán Villarrica, regiones de la Araucanía y Los Ríos, Chile*. [Memoria para optar al título de Geólogo. Universidad de Concepción]. Repositorio bibliotecas Udec <http://repositorio.udec.cl/jspui/handle/11594/3142>

Vianello, D., Vagnon, F., Bonetto, S., & Mosca, P. (2023). Debris flow susceptibility mapping using the Rock Engineering System (RES) method: a case study. *Landslides*, 20(4), 735-756. <https://doi.org/10.1007/s10346-022-01985-6>

Wieczorek, G.F. & Glade, T. (2005). Climatic factors influencing occurrence of debris flow. En Jakob, M., Hungr, O. (Eds.), *Debris-Flow Hazards and Related Phenomena*. Springer, Berlin, pp. 325–362. https://doi.org/10.1007/3-540-27129-5_14

WMO (2018). *Multi-hazard early warning systems: a checklist*. In *Outcome of the first Multi-hazard Early Warning Conference* (Vol. 22). Recuperado de https://library.wmo.int/viewer/55893?medianame=MHEW_03091808_#page=1&viewer=picture&o=bookmarks&n=0&q=

Yeung, H.Y. (2012). Recent developments and applications of the SWIRLS nowcasting system in Hong Kong. En *The 3rd WMO International Symposium on Nowcasting and Very Short-Range Forecasting (WSN12)*. 6–10 August 2012, Rio De Janeiro. pp. 6–10.

ANEXOS

Anexo 1: Ejes prioritarios del Plan Estratégico Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (ONEMI, 2020)

Eje		Resultado esperado al 2030
1	Comprender el riesgo de desastres.	Chile poseerá una estructura que le permita a la sociedad chilena comprender su entorno, el riesgo de éste y sus potenciales impactos, de forma prospectiva y multidimensional.
2	Fortalecer la gobernanza de la gestión del riesgo de desastres.	Chile contará con una institucionalidad que promueva la colaboración y coordinación de los distintos sectores, así como la participación activa de los actores nacionales, para una eficiente y efectiva GRD que aporte al desarrollo sostenible del país.
3	Planificar e invertir en la reducción del riesgo de desastres para la resiliencia.	Chile poseerá mecanismos permanentes y eficientes que promuevan la inversión y protección financiera, pública y privada, para aumentar la resiliencia.
4	Proporcionar una respuesta eficiente y eficaz.	Chile fortalecerá su capacidad de preparación a fin de dar una respuesta eficiente y eficaz ante desastres.
5	Fomentar una recuperación sostenible.	Chile promoverá la RRD en sus procesos de recuperación integrales como estrategia para la sostenibilidad del desarrollo nacional.

Anexo 2: Algunos ejes prioritarios, objetivos estratégicos y acciones estratégicas de las políticas nacionales relacionadas a los principios comunes de un S.A.T. exitoso identificados por Golnaraghi (2012). Modificado de Golnaraghi (2012) y ONEMI (2020)

Principios comunes de un S.A.T. exitoso		Plan Estratégico Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (ONEMI, 2020)
1	Apoyo político	<p>Eje prioritario 2</p> <p>2.1. Fortalecer institucionalidad pública</p> <p>2.1.4. Creación de instancias permanentes en el poder legislativo en materias de GRRD</p> <p>2.2.2. Capacitación de gobiernos regionales en materias de RRD</p> <p>2.3.1. Incorporación de GRD en políticas sectoriales</p>
2	<p>S.A.T. construido sobre cuatro componentes</p> <p>a. Detección, monitoreo y predicción del peligro</p> <p>b. Análisis de riesgos</p> <p>c. Alertas oportunas y con autoridad</p> <p>d. Preparación y planificación de la comunidad</p>	<p>a. Eje prioritario 1:</p> <p>1.2.2 Generar y disponibilizar data e información relacionada a la RRD bajo estándares comunes</p> <p>Eje prioritario 4:</p> <p>4.1.1 Desarrollar o robustecer los sistemas de monitoreo y alerta temprana multi amenazas que garanticen información oportuna y accesible</p> <p>b. Eje prioritario 1:</p> <p>1.3.1 Desarrollar escenarios de riesgo de desastres</p> <p>1.3.2 Desarrollar escenarios de afectación e impacto por desastres o catástrofes</p> <p>Eje prioritario 3:</p> <p>3.4.1 Implementar la evaluación del riesgo de desastres en los instrumentos de Planificación Territorial.</p> <p>3.4.2 Incorporar la estimación del riesgo de desastres en los Planes Regionales de Ordenamiento Territorial.</p> <p>c. Ver principios 6 y 7</p> <p>d. Ver principio 9</p>

3	Roles y responsabilidades claras	<p>Eje prioritario 2:</p> <p>2.4.1 Definir roles y responsabilidades de los actores del sistema en las distintas fases</p> <p>Eje prioritario 4:</p> <p>4.5.1 Definir actividades de los estándares nacionales para la respuesta a emergencia en los instrumentos atingentes</p>
4	Se proveen los recursos adecuados	<p>Eje prioritario 2:</p> <p>2.5.1. Incorporar cuentas públicas de GRD</p> <p>Eje prioritario 3:</p> <p>3.2.5 Generar iniciativa presupuestaria en presupuesto anual de instituciones que necesiten asignar recursos a iniciativas de RRD</p> <p>3.3.1 Marco normativo que asigne responsabilidades estatales a la gestión financiera del riesgo de desastres</p> <p>Eje prioritario 5:</p> <p>5.1.3 Generar metodología que permita analizar y difundir la relación entre inversión en prevención y gasto en respuesta y recuperación según origen de amenaza</p>
5	Información de riesgo utilizada para mejorar el sistema	<p>Eje prioritario 4:</p> <p>4.3.2 Fomentar caracterización de la población afectada y damnificada, directa e indirectamente</p> <p>Eje prioritario 5:</p> <p>5.1.1 Diseñar y validar metodología para cuantificación de pérdidas económicas causadas directa e indirectamente por desastres en relación al PIB</p>
6	Mensajes de alerta son efectivos, accionables y de autoridad	<p>Eje prioritario 4:</p> <p>4.2.1 Generar instancias y espacios de colaboración y coordinación con los actores del territorio que participan del proceso de respuesta</p> <p>4.3.1 Potenciar instancias de integración de información intersectorial</p>

		para mejorar coordinación y accionar en respuesta
7	Alerta llega a tiempo y de forma confiable	Eje prioritario 4: 4.1.3 Desarrollar y actualizar sistemas de comunicación para emergencias
8	Respuesta considera nivel de peligro, características de la comunidad y mecanismos de coordinación	Eje prioritario 4: 4.4.2 Diseñar e implementar actividades de entrenamiento de capacidades individuales y comunitarias 4.5.2 Crear y actualizar protocolos de actuación y coordinación entre organismos de respuesta y de intervención
9	Programas de capacitación en consciencia del riesgo, reconocimiento de peligros y acciones de respuesta	Eje prioritario 1: 1.1 Promover la concientización y educación sobre la RRD 1.1.2 Incorporar contenido de RRD en curriculum escolar 1.1.3 Programas de capacitación que fortalezcan competencias en RRD para tomadores de decisiones y otros funcionarios. 1.1.5. Generar estrategias comunicacionales de divulgación de información de RDD apropiadas al contexto y público objetivo. 1.2.1 Promover investigaciones en temáticas de RRD 1.3.1 Comunas con capacitación en identificación, priorización de amenazas y vulnerabilidades
10	Retroalimentación efectiva y mecanismos de mejora	Eje prioritario 5: 5.5.1 Establecer mecanismos de incorporación de lecciones aprendidas en todas las fases del ciclo GRD para asegurar la mejora continua de procesos, procedimientos e instrumentos

Anexo 3: Legislación vigente y propuestas de modificación en concordancia con los factores esenciales de un S.A.T. según WMO (2018)

ELEMENTOS S.A.T. (WMO, 2018)	VIGENTE	MODIFICACIÓN PROPUESTA
<p style="text-align: center;">CONOCIMIENTO Y COMPRENSIÓN DEL RIESGO</p> <p>1. Definición de peligros y amenazas</p> <p>1.1 Monitoreo permanente para conocer y entender el peligro</p> <p>1.2 Mapas de peligro</p>	<p>1.1 DMC monitoreo de amenaza meteorológica (ONEMI, 2017; Decreto no. 86, 2023, Artículo 4). SERNAGEOMIN monitoreo remociones en masa ante pronóstico meteorológico y monitoreo de amenaza volcánica (Decreto no. 86, 2023, Artículo 4)</p> <p>1.2 SERNAGEOMIN elabora mapas de amenaza según priorización de localidades establecidas por SENAPRED (Decreto no. 86, 2023, Artículo 41a). También pueden validar mapas elaborados por entidades reconocidas en el reglamento. Los mapas serán de uso y publicación gratuita, además serán revisados cada 5 años (Decreto no. 86, 2023, Artículo 4)</p>	<p>1.1 Integrar instrumentos que permitan conocer y estudiar las características de los flujos que se producen</p> <p>1.2 Mapas con base en la susceptibilidad</p>
<p style="text-align: center;">2. Evaluación del riesgo</p> <p>2.1 Determinación de exposición de personas, infraestructura crítica</p> <p>2.2 Estudios de vulnerabilidad para adecuar medidas (género, discapacidad, acceso, desigualdades, etc)</p> <p>2.3 Capacitación y educación a las personas</p> <p>2.4 Involucración de la comunidad y sus saberes y necesidades</p> <p>2.5 Determinación de actividades que aumentan o agravan los riesgos (uso de suelo, urbanización, etc)</p>	<p>2.1 Ministerio de energía para impacto en infraestructura crítica relacionada. Ministerio de obras públicas para impacto en conectividad (ONEMI, 2017)</p> <p>2.2 Análisis de vulnerabilidad para confección de mapas (Decreto no. 86, 2023, Artículo 48)</p> <p>2.6 SENAPRED en conjunto con organismos relevantes confecciona mapas de riesgo integrando análisis de amenaza (mapa debe estar confeccionado) y de vulnerabilidad (Decreto no. 86, 2023, Artículo 48)</p>	<p>2.1 Integrado en los mapas de peligro y riesgo</p> <p>2.3 Incorporación de temáticas de riesgo y peligro en el curriculum escolar</p> <p>2.5 Evaluar usos de suelo, integrar análisis de peligros en el ordenamiento territorial y fortalecer fiscalización a empresas que impacten la susceptibilidad</p>

<p>2.6 Integración de evaluación del riesgo en los planes y mensajes de alerta</p> <p>2.7 Evaluación de normas culturales y legislación para detectar lagunas que puedan aumentar vulnerabilidad.</p>		
<p>3.Funciones y responsabilidades</p> <p>3.1 Legislación que exija elaboración de evaluaciones de peligro, vulnerabilidad, capacidad.</p> <p>3.2 Definición de organismos que intervienen en evaluaciones de riesgo</p> <p>3.3 Proceso para implicar activamente a la comunidad</p>	<p>3.1 Decreto no. 86 (2023)</p> <p>3.2 SENAPRED en conjunto con organismos relacionados (Decreto no. 86, 2023)</p>	<p>3.3 Mecanismo para obtener retroalimentación de las personas afectadas tras un evento</p>
<p>4. Consolidación de información</p> <p>4.1 Archivo central normalizado para almacenar toda esta información (SIG y otros)</p> <p>4.2 Normas nacionales para recopilación, difusión y evaluación sistemática de la información y datos</p> <p>4.3 Proceso para mantener, examinar y actualizar los datos (riesgos, peligros, vulnerabilidades, etc)</p>	<p>4.3 Revisión cada al menos 5 años de los mapas realizados (Decreto no. 86, 2023)</p>	<p>4.1 Generación de base de datos normalizada y de libre acceso</p> <p>4.3 Añadir evaluaciones durante y posterior a cada evento</p>
<p>5. Incorporación de la información en el sistema de alerta temprana</p>		<p>3.3 Mecanismo para obtener retroalimentación posterior a cada evento de todos los organismos y de las personas expuestas</p>

<p align="center">MONITOREO Y ALERTA</p> <p>(Detección, vigilancia, análisis y predicción de peligros y consecuencias posibles)</p> <p align="center">1.Sistema de monitoreo</p> <p>1.1 Instrumentación adecuada para seguimiento de peligros</p> <p>1.2 Documentación de parámetros de medición y especificación de cada peligro</p> <p>1.3 Recepción, procesamiento y facilitación de datos en tiempo real o casi real</p> <p>1.4 Personas capacitadas para utilización y mantención del equipo</p> <p>1.5 Datos son conservados sistemáticamente y son accesibles</p> <p>1.6 Sistema permite intercambiar datos entre países</p>	<p>1.3 Monitoreo volcánico por el OVDAS y meteorológico por la DMC</p> <p>1.4 Organismos técnicos definidos en Decreto no. 86, (2023)</p> <p>1.5 Monitoreo volcánico en página web de SERNAGEOMIN</p>	<p>1.1 Implementación de sistema de detección para trabajo conjunto con sistema predictivo. Ampliar red de pluviómetros</p> <p>1.2; 1.5 Generación de base de datos normalizada y de libre acceso</p> <p>1.4 Capacitación de autoridades locales para apoyar labor</p>
<p align="center">2. Servicios de predicción y aviso</p> <p>2.1 Se efectúan análisis y procesos de datos, modelizaciones, predicciones y avisos</p> <p>2.2 Centro de aviso funciona permanente</p> <p>2.3 Mensaje de alerta claro, coherente y con información relevante</p> <p>2.4 Difusión de avisos eficaz y oportuno.</p> <p>2.5 Se efectúan pruebas o ejercicios</p>	<p>2.1 Predicciones y avisos meteorológicos por la DMC.</p> <p>2.2 UAT con labor las 24 horas del día, durante todos los días de año (Ley no. 21.364, 2021, Artículo 43)</p> <p>2.7 Desactivación de planes y acciones de rehabilitación (ONEMI, 2017, 2018)</p>	<p>2.1 Análisis de susceptibilidad y de umbrales críticos para la generación de modelos, predicciones y avisos</p> <p>2.4; 2.5; 2.8 Pruebas periódicas del funcionamiento del sistema de alarma y de la efectividad del aviso.</p> <p>2.6 Mecanismo para obtener retroalimentación de las personas afectadas tras un</p>

<p>periódicos al sistema</p> <p>2.6 Procesos para verificar que avisos lleguen a partes interesadas y/o en peligro.</p> <p>2.7 Mecanismos para cuando cese amenaza.</p> <p>2.8 Seguimiento y evaluación del proceso operativo (calidad de datos y efectividad de aviso)</p> <p>2.9 Estrategias para fomentar credibilidad y confianza en aviso.</p> <p>2.10 Reducción al mínimo de falsas alarmas</p> <p>2.11 Procesos y sistemas de archivo de los avisos y predicciones</p>		<p>evento</p> <p>2.7 Procedimiento de anulación de alarma</p> <p>2.10 Estrategia de validación de la alarma activada</p>
<p>3. Mecanismos institucionales</p> <p>3.1 Planes y documentos relativos a red de monitoreo</p> <p>3.2 Procesos normalizados y funciones y responsabilidades de organizaciones que elaboran y emiten avisos.</p> <p>3.3 Acuerdos y protocolos interinstitucionales nacionales para intercambio de datos y garantizar coherencia en mensajes</p> <p>3.4 Estrategia de coordinación para riesgos múltiples</p>	<p>3.4 En alerta roja, hay seguimiento del peligro y análisis de peligros secundarios a cargo de SERNAGEOMIN, DMC, DGA y DOH. (ONEMI, 2017)</p>	

<p style="text-align: center;">CAPACIDAD DE PREPARACIÓN Y RESPUESTA</p> <p style="text-align: center;">1. Planes de preparación</p> <p>1.1 Elaboración participativa de planes normalizados de operación, se difunden, ponen en práctica y se sustentan en legislación</p> <p>1.2 Se consideran necesidades de distintos grados de vulnerabilidad</p> <p>1.3 Estrategias de evacuación seguras ante riesgos múltiples</p> <p>1.4 Evaluación de capacidad de comunidad para comunicarse en respuesta a alertas tempranas</p> <p>1.5 Apoyo financiero en materia de medidas tempranas y respuesta</p> <p>1.6 Estrategias para mantener preparación</p> <p>1.7 Protocolos de aviso a servicios sanitarios y de emergencia para responder rápido.</p> <p>1.8 Protocolos para movilización de operadores</p> <p>1.9 Ejercicios periódicos para comprobar y optimizar eficacia de difusión y alertas, preparación y respuesta.</p>	<p>1.1 Consulta pública para elaboración del Plan Regional para la RRD y del Plan Regional y Provincial de Emergencia (Decreto no. 86, 2023, Artículo 17, 23 Y 24). Para elaboración de Planes de Emergencia se realiza consulta con obligación de informar a instituciones especificadas en el Decreto no. 86, además de una consulta pública para la comunidad organizada (Decreto no. 86, 2023, Artículos 22, 23 y 24)</p> <p>1.5 Creación del Programa de Gestión del Riesgo de Desastres en el presupuesto del SINAPRED para financiar los instrumentos de GRD (Ley no. 21.364, 2021, Artículo 41)</p> <p>1.6; 1.9 Realización de simulacros y simulaciones de los Planes de Emergencia (Decreto no. 86, 2023, Artículo 52)</p>	<p>1.2 Mecanismo para obtener retroalimentación de las personas afectadas y ajustar planes a sus necesidades</p> <p>1.4 Evaluar capacidad de respuesta de la comunidad</p>
--	--	--

<p>2. Educación y concientización del público</p> <p>2.1 De forma permanente en planes de estudio (ed. Primaria a universitaria), sobre peligros, vulnerabilidades, exposición, mitigación</p> <p>2.2 Capacitación para reconocer señales de peligros</p> <p>2.3 Informa sobre manera de difusión de avisos, fuentes fiables y cómo reaccionar</p> <p>2.4 Uso de medios de comunicación</p> <p>2.5 Campañas de educación adaptadas a necesidades específicas</p>	<p>2.2 Realización de material educativo por SENAPRED (ver https://web.senapred.cl/recomendaciones/)</p> <p>2.4 Uso de redes sociales para presentar contenido educativo y comunicar los avisos</p>	<p>2.1; 2.5 Incorporación de temáticas de riesgo y peligro en el curriculum escolar con énfasis en peligros locales.</p> <p>2.3 Junto a lo anterior, también educar sobre el funcionamiento del sistema en la localidad.</p>
<p>3. Análisis de concientización y respuesta del público</p> <p>3.1 Incorporación de experiencia adquirida en casos previos en planes de preparación y respuesta y en estrategias de capacitación</p> <p>3.2 Evaluación periódica y actualización de estrategias y planes de concientización.</p>		<p>3.1 Mecanismo para obtener retroalimentación posterior a cada evento</p> <p>3.2 Evaluaciones durante y posterior a cada evento</p>
<p>DIFUSIÓN Y COMUNICACIÓN DE AVISOS</p> <p>Alertas accesibles, adaptadas, claras, comprensibles, útiles y accionables</p> <p>1. Procesos de organización y toma de decisiones</p> <p>1.1 Funciones y responsabilidades de cada agente del proceso en legislación</p>	<p>1.1 Decreto no. 86, 2023 y Planes de Emergencia.</p> <p>1.2 SENAPRED mantendrá un Sistema Nacional de Comunicaciones que contemple los mecanismos de aviso y comunicación a la población (Ley no. 21.364, 2021, Artículo 38)</p>	<p>1.4 Mecanismo para obtener retroalimentación de los organismos y de las personas afectadas tras un evento</p>

<p>1.2 Estrategias de comunicación de avisos en todos los niveles</p> <p>1.3 Redes de profesionales y voluntarios para recibir y difundir avisos</p> <p>1.4 Mecanismos de comunicación de comentarios para verificar recibo de avisos</p> <p>1.5 Mecanismos de actualización de información</p>		
<p>2.Sistemas y equipos de comunicación</p> <p>2.1 Confianza entre partes interesadas</p> <p>2.2 Sistemas de comunicación y difusión adaptados a las necesidades de distintos grupos (comprensión de su conectividad,etc)</p> <p>2.3 Sistema de comunicación y difusión llega a toda la población</p> <p>2.4 Acuerdos para utilizar recursos del sector privado cuando proceda</p> <p>2.5 Sistemas auxiliares y de refuerzo en caso de fallos</p> <p>2.6 Evaluación con antelación de resiliencia de canales de comunicación y equipo físico del sistema de alerta</p>	<p>2.4 Obligatoriedad de entrega de información al ser solicitada (Decreto no. 86, 2023, Artículo 33)</p>	

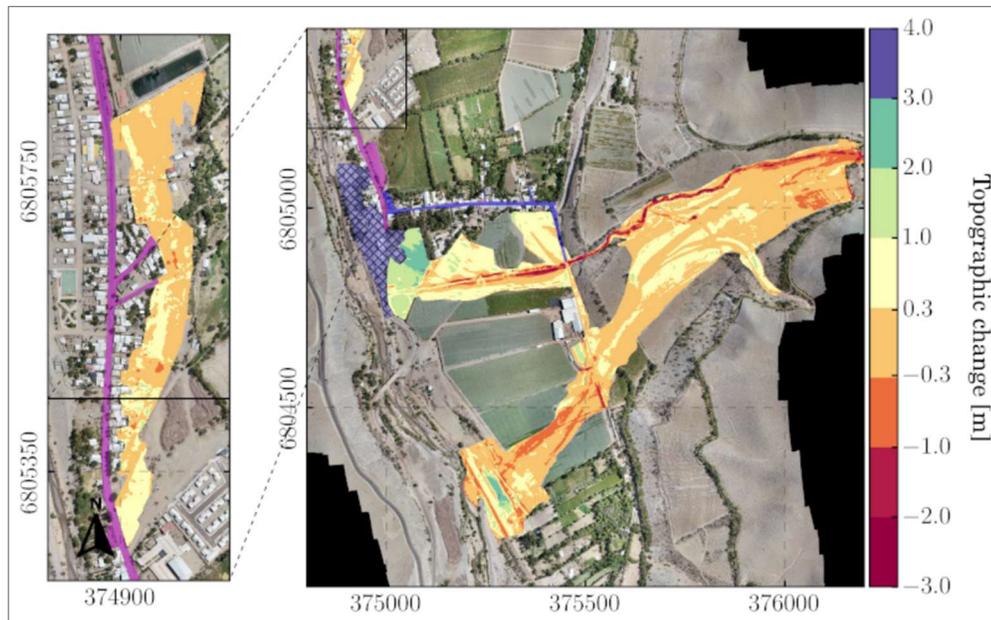
<p>3. Comunicación eficaz para rápida acción</p> <p>3.1 Mensajes de alerta proporcionan orientación clara para suscitar reacciones</p> <p>3.2 Sistemas automáticos en caso de fenómenos que dejan poco tiempo para reaccionar</p> <p>3.3 Alertas consideran necesidades y vulnerabilidades de subpoblaciones</p> <p>3.4 Público y partes interesadas saben qué autoridades emiten avisos y confían en el mensaje</p>		<p>3.2 Envío de mensajes y utilización de sirenas y semáforos o luces, asociadas al sistema de detección. Particularmente en zonas con afectación directa del paso de aluvión (caminos, puentes, poblados)</p> <p>3.3 Mecanismo para obtener retroalimentación de las personas afectadas y ajustar planes a sus necesidades</p>
---	--	---

*Los puntos no tratados en legislación vigente son elementos no presentes actualmente o cuya información no fue encontrada durante la realización de este trabajo. Los no mencionados en propuestas son elementos no tratados en este trabajo.

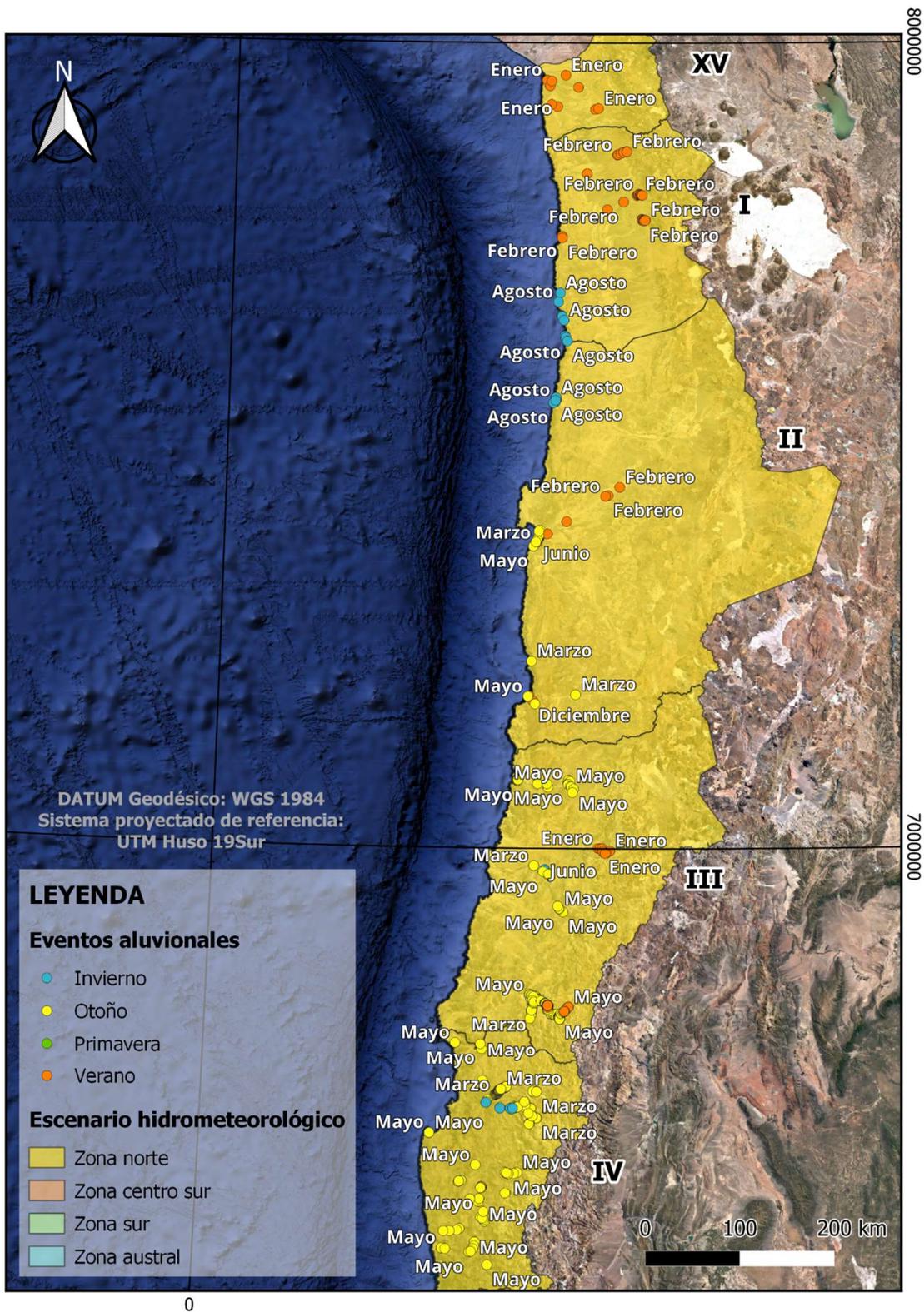
Anexo 4: Áreas afectadas por aluviones en los eventos con decesos humanos de la zona norte



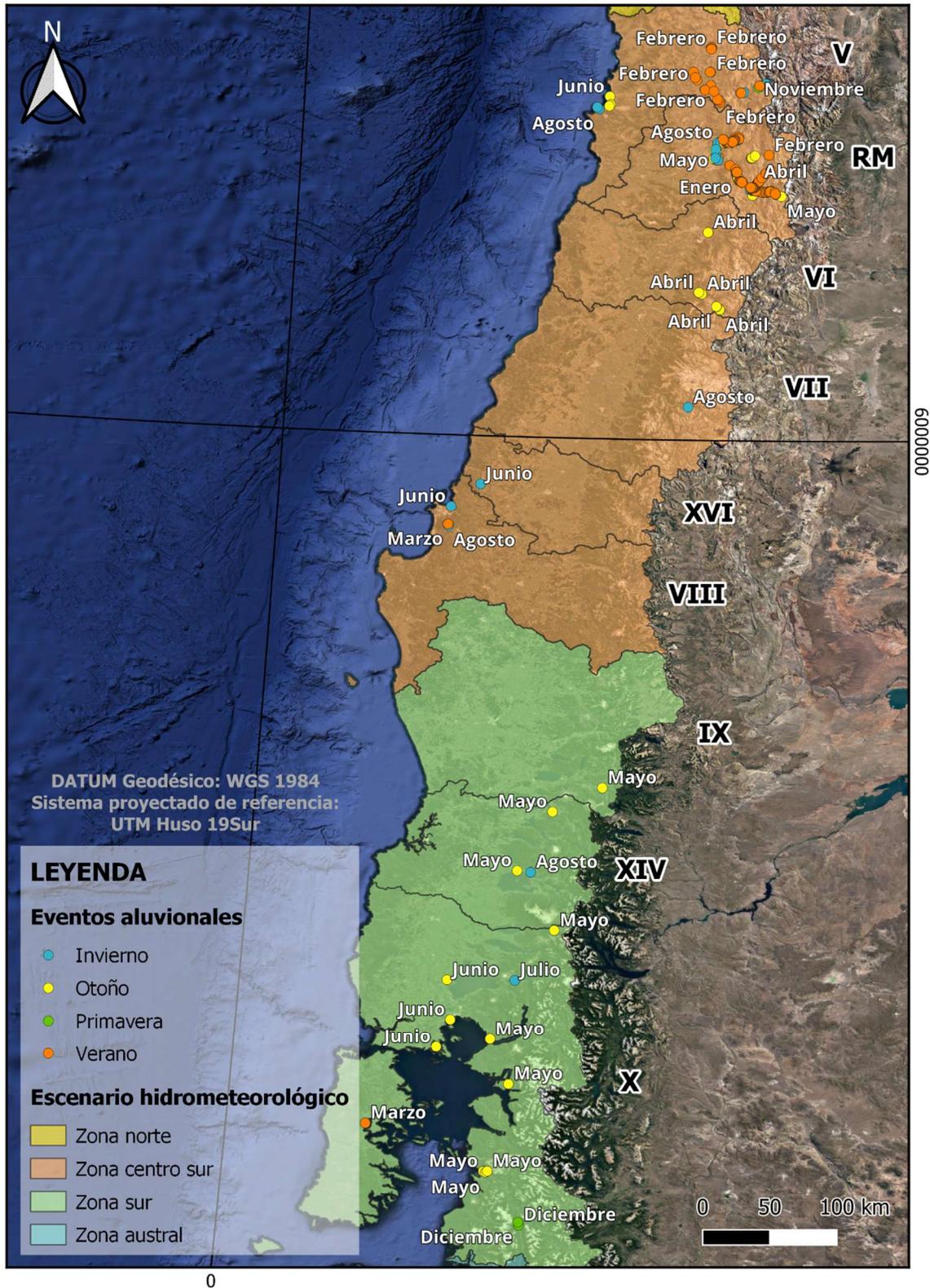
Áreas afectadas en el centro de Tocopilla por el aluvión ocurrido el 5 de agosto de 2015 (Opazo et al., 2015)



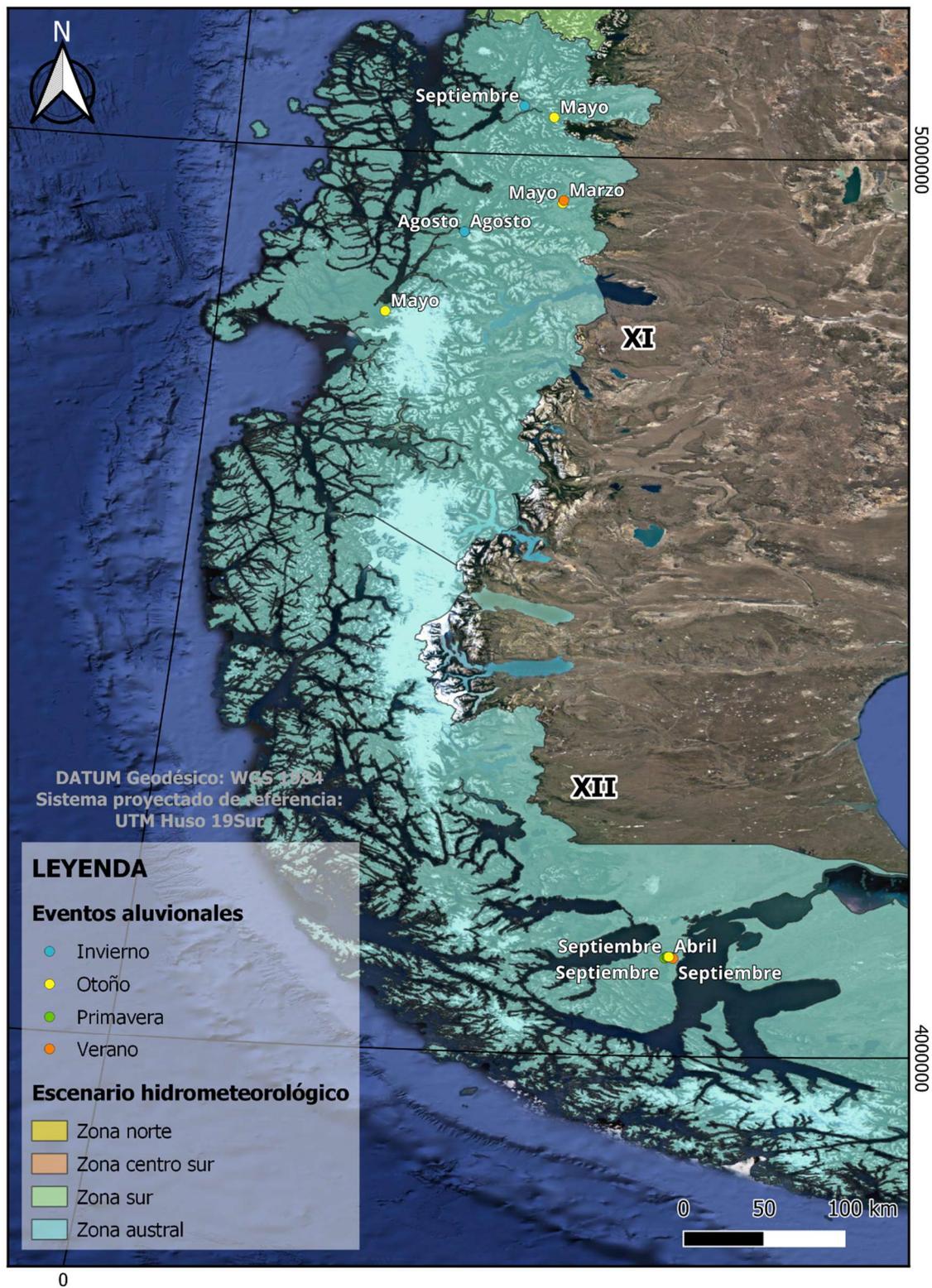
Anexo 5a: Eventos del catastro de SERNAGEOMIN considerados para la determinación de las fechas de ocurrencia en el escenario de la zona norte. Datos disponibles en <https://www.plataformadedatos.cl/datasets/es/0bc9d61f943fb69f>



Anexo 5b: Eventos del catastro de SERNAGEOMIN considerados para la determinación de las fechas de ocurrencia en el escenario de la zona centro sur y de la zona sur. Datos disponibles en <https://www.plataformadedatos.cl/datasets/es/0bc9d61f943fb69f>



Anexo 5c: Eventos del catastro de SERNAGEOMIN considerados para la determinación de las fechas de ocurrencia en el escenario de la zona austral. Datos disponibles en <https://www.plataformadedatos.cl/datasets/es/0bc9d61f943fb69f>



Anexo 6: Características de los eventos aluvionales registrados con extensión de al menos 1 km.

Localización	Fecha	Descripción	Extensión	Afectación	Recurrencia	Condicionantes	Detonantes	Referencias
NO VOLCÁNICOS								
Arica y Parinacota Cordillera Quebrada Chislluma	23.06.01	Flujo de pasto licuado por colapso de bofedal debido a licuefacción por sismo	15 km	Directa. Muerte de camélidos Daños vía ferrocarril	-	Invierno altiplánico muy lluvioso que incrementó saturación del bofedal	Sismo	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2001-04.pdf
Tarapacá. Farellón costero Puerto Patillos	08.08.15 – 09.08.15	Flujo de barro	2 km	Directa. Corte de ruta, socavones y erosión de ruta. Inundaciones de barro. Afectación vehículos e inmuebles	-		Lluvia costera (0.6 – 10.6 mm/día)	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2015-12.pdf
Tarapacá Farellón costero Ruta 1	08.08.15 – 09.08.15	Flujos de barro de variada extensión en diversas quebradas adyacentes a la Ruta 1.	*1 - 2.5 km	Directa. Corte de ruta, destrucción parcial de vía. Inundaciones. Afectación a inmuebles	-	-	Lluvia costera (0.6 – 10.6 mm/día)	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2015-12.pdf
Antofagasta. Farellón costero	6:30- 7:30	Flujos detríticos que varían a	*1 - 2 km	Directo Afectación	Sí Presencia de	Pendientes fuertes por farellón	Lluvias (3.6 mm caídos)	https://portalgeo. sernageomin.cl/

Tocopilla norte	09.08.15	flujos de barro y flujos de barro. Encauzados y con generación de abanicos en parte distal.		población Tres Marías	obras de mitigación (canaletas). Daño en quebradas sin ellas	costero (>45°) Fracturamiento y meteorización de rocas ígneas	entre 6:00-7:00)	nformes_PDF_Nac/RM-2015-17.pdf
Antofagasta. Farellón costero Tocopilla centro	6:30-7:30 09.08.15	Flujo de detritos y de barro que al arribar a ciudad se canaliza por las calles	2 - 2.5km	Directo Daño a infraestructura Pérdida de vidas humanas	Sí Presencia de obras de mitigación (piscinas decantadoras). Daño en quebradas sin ellas	Pendientes fuertes por farellón costero (>45°) Fracturamiento y meteorización de rocas ígneas	Lluvias (3.6 mm caídos entre 6:00-7:00)	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2015-17.pdf
Antofagasta Farellón costero Quebrada El Buitre y Julia	13.02.06 - 15.02.06	Flujos de barro	*3 km	Directo Socavamiento y deformación de rutas		Depósitos no consolidados en quebradas, abanicos y llanos aluviales. Falta de drenaje de agua en terraplenes	Lluvias intensas	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2006-05.pdf
Antofagasta Farellón costero Quebrada del	0:40 18.06.91	Flujos de detritos por alta escorrentía	*2 – 3 km	Directo Pérdida de vidas humanas.	Sí. Actualmente cuentan con	Desnivel topográfico fuerte (escarpe-planicie	Lluvias esporádicas de corta duración	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2006-05.pdf

Carmen, Cadenas, Baquedano y El Toro		producto de escasa infiltración en litología		Daños en vía y ciudad. Daño a matrices de agua potable	obras de mitigación (disipadores de energía, piscinas decantadoras , muros de gaviones)	costera). Alta disponibilidad de material movilizable. Intenso Fracturamiento. Manteo oeste de Fm La Negra. Extracción de áridos	y gran intensidad (>20mm/día); viento fuerte (incrementa energía de caída del agua).	ac/RM-2014-14.pdf https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-1991-01.pdf https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-1997-03.pdf https://www.cigiden.cl/a-32-anos-del-aluvion-de-1991-en-antofagasta-expertos-recalcan-la-urgencia-de-un-sistema-de-alerta-temprana/
Antofagasta Cordillera costa Quebrada Tal	24.03.15 - 25.03.15	3 pulsos de flujos de barro de menor a	*63 km	Directo Corte de rutas. Corte de servicios	Sí Presencia de obras de		Lluvias	https://www.sernageomin.cl/pdf/mapa-

Tal		mayor magnitud respectivamente que rebalsan y/o bordean obras de mitigación		básicos de agua potable y sanitarios. Afectación a viviendas	mitigación (7 piscinas aluvionales)			geo/Efecto%20geol%C3%B3gico%20del%20evento%20meteorol%C3%B3gico%20del%2024%20y%2025%20de%20marzo%20de%202015%20en%20la%20regi%C3%B3n%20de%20Antofagasta%20(3).pdf http://www.regio%20n2.cl/se-declara-alerta-roja-para-la-comuna-de-taltal-por-precipitaciones/ https://ellibero.cl/actualidad/los-errores-en-el-manejo-de-la-emergencia-en-el-norte-segun-
-----	--	---	--	--	-------------------------------------	--	--	---

								ex-directora-de-la-onemi-en-antofagasta/
Atacama Sierras transversales andinas Quebrada Chollay	19:00 - 20:00 23.01.17	Inundación y crecida de detritos por apresamiento de río producto de flujo de detritos	*Al menos 3 km	Indirecto Destrucción de casas en el valle Daños en poblado Chollay.	Sí	Quebrada principal de valle estrecho con laderas de alta pendiente y abundantes quebradas laterales que aportan material detrítico y agua.	Lluvia intensa y breve	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2017-26.pdf
Atacama Sierras transversales andinas Quebrada Mesilla	24.03.15 - 27.03.15	2 flujos de detritos que además provocan el embalsamiento del río y con ello un flujo de barro e inundaciones.	*1.5 km	Directo Muerte de 3 habitantes Indirecto Inundación de casas	Sí. Actualmente cuentan con obras de mitigación que reducen efectos en 2017	-	Lluvia	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2015-21.pdf
Atacama Sierras transversales andinas Quebrada La	Posterior a las 17:00 del 27.01.20	Flujo de detritos que baja por quebrada y luego se desplaza 570m	2 km	Directo Pérdida de una vida humana. Gran afectación a localidad El	Sí (2015, 2017)	Escorrentía y erosión superficial en laderas (muy erodables) que genera material	Intensas lluvias e isoterma 0°C alta (4700-4800 ms.n.m.)	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2020-04.pdf

Plaza		longitudinalmente hasta desembocar en el río el Tránsito donde genera embancamiento y su consecuente inundación		Tránsito (>50 viviendas, corte de suministro de agua y electricidad). Destrucción de obra de canalización. Erosión de la terraza aluvial Indirecto Inundación		removible. Presencia de material sedimentario suelto.		
Coquimbo Cordillera costa Quebrada Leiva	25.03.15	3 pulsos de flujos de detritos. 07:00, 14:00 y 22:00 (lugareños)	*2.5 km	Directo Afectación a ruta	Sí (1997, 2004, 2017)	Relieves escarpados. Material acumulado en quebradas por meteorización y/o acumulación de depósitos antrópicos (basura)	Lluvias e isoterma 0°C alta	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2015-04.pdf
Coquimbo Cordillera costa Quebrada Miraflores	Mañana del 25.03.15	Flujo de detritos que baja por quebrada y continúa por río Elqui hasta quebrada Leiva	*4 km	Directo Afectación a ruta. Colmatación de cauce	Sí (1997, 2004, 2017)	Relieves escarpados. Material acumulado en quebradas por meteorización y/o	Lluvias e isoterma 0°C alta	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2015-04.pdf

						acumulación de depósitos antrópicos (basura)		
Coquimbo Cordones transversales Quebrada Marquesa	11.05.17 - 13.05.17	Flujo de detritos canalizado en la parte alta que evoluciona a una crecida de detritos que al alcanzar el río Elqui genera represamiento y una inundación. Gran parte de los depósitos se componen de arena de relaves.	*5 km (flujo de detritos) *15 km (crecida de detritos)	Directo Cortes de camino. Afectación a viviendas. Erosión de tranques de relave. Represamiento del río Elqui Indirecto Inundación de poblado Pelicana;	Sí (1997, 2004, 2015)	Relieves escarpados. Presencia de relaves	Lluvias	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2017-04.pdf
Valparaíso Precordillera Estero de Chalaco	16:30 25.02.17	Flujo de barro canalizado por estero	*Al menos 10 km	Directo Inundaciones. Corte de suministro de servicios básicos. Obstrucción de ruta			Intensas lluvias e isoterma 0°C alta (4680 m s.n.m.)	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2017-13.pdf
Valparaíso Precordillera	17:30 25.02.17	Flujo de barro canalizado por	*30 km	Directo Muerte de una			Intensas lluvias e	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2017-13.pdf

Estero Pocuro		estero que se mezcla con agua del curso fluvial y arrastra vegetación		persona. Inundación de ruta. Afectación de sectores agrícolas. Destrucción de puente. Erosión del cauce y desprendimiento de ladera. Crecida del estero			isoterma 0°C alta (4680 m s.n.m.)	nformes_PDF_Nac/RM-2017-13.pdf
R.Metropolitana Precordillera Quebrada El Cañaveral	17.06.12	Flujo de detritos y de barro que se encauza por vía.	Máximo 2.5 km	Directo Afectación a ruta. Camión de anglo america atrapado por flujo.		Cuenca con pendientes de 25 a 35° en sus partes más altas. Material disponible. Inestabilidad de laderas	Lluvia	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2012-01.pdf
R.Metropolitana Cordillera Quebradas en San José de Maipo	30.01.21 - 31.01.21	Numerosos flujos de detritos que se canalizan por calles. Algunos evolucionan a de barro o hiperconcentrados por adición	0.3 – 1.3 km	Directo Afectación a ruta Destrucción e inundación de viviendas	Sí		Lluvia intensa, isoterma 0°C alta	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2021-03.pdf

		de agua de esteros/canales.						
R.Metropolitana Cordillera Quebrada San José	21:30 25.02.17 - 2:00 26.02.17	Flujo de detritos	*10 km	Directo Pérdida de 8 vidas humanas y una desaparecida (principalmente turistas) Daño e inundación de viviendas		Pendientes pronunciadas. Material sedimentario suelto	Lluvia intensa y breve (>5.7 mm/hr), isoterma 0°C sobre los 4500m s.n.m.	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_N ac/RM-2017- 23.pdf
R.Metropolitana Cordillera Quebrada Morales	25.02.17 - 26.02.17	Flujo de detritos	*5 km	Directo Destrucción de puentes. Personas aisladas	Sí	Pendientes pronunciadas. Material sedimentario suelto	Lluvia intensa y breve (>5.7 mm/hr), isoterma 0°C sobre los 4500m s.n.m.	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_N ac/RM-2017- 23.pdf
R.Metropolitana Cordillera Estero Parraguirre	10:33 29.11.87	Deslizamiento de masa rocosa a 4.500m de altura de ladera con pendiente de 45° que cae 1500m y evoluciona a flujo de detritos	15 km	Directo Obstrucción de embalse que luego colapsa. Crecida del río. Daños graves en El Alfalfal		Rocas inestables en lugares elevados (disposición subvertical de Fm. Lo Valdés con rumbo paralelo al eje del valle y de manteo 70-80°W expuesta en ladera de fuerte	Pérdida de resistencia al corte a lo largo de superficie de ruptura coincidente con estratificación	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_N ac/RM-2001- 01.pdf

						pendiente y afectada por fracturas y fallas). Presencia de yeso en estratos y como relleno. Degradación y erosión por procesos crioclásticos. Acumulación mayor a la usual de nieve caída		
Maule Cordillera Valle La Mina	Madrugada 29.08.15	Desprendimiento de cima de ladera por lluvias que genera flujo de detritos	Al menos 4 km	Directo Afectación a ruta Obstaculización parcial de parte baja de puentes	Sí (1980)	Cordones montañosos fuertemente erosionados, de alta pendiente y rocas muy fracturadas (material removible disponible)	Lluvias intensas previas del 25 y 28	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2016-03.pdf
Araucanía Cordillera Quebrada Pulongo	16:20 28.05.05	Flujo de detritos por saturación de suelo con arrastre de	*Máximo 2 km	Directo Gran afectación a ciudad de Currehue. Daño en tendido		Quebrada encajonada con paredes casi verticales y rocas	Lluvias intensas de 10 a 15 min generan	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2005-

		vegetación. Habitantes logra huir por estruendo que genera.		eléctrico. Corte de ruta. Desplome de vegetación emplazada sobre suelo volcánico. Desvío del estero por relleno de cauce		plegadas y fracturadas además cubiertas por depósitos piroclásticos sueltos	saturación e inestabilidad de cobertura de tefra y roca subyacente	02.pdf
Los Ríos Precordillera Quebradas laterales del valle del río Caunahue	21:30 28.08.04	Flujo de detritos por desprendimiento que se canaliza por ruta. Con arrastre de vegetación	1 km	Directo Destrucción de casas. Daño a personas. Corte de ruta		No se pudo observar zona de origen, pero es probable un gran espesor de suelo. Esteros de alta pendiente	Lluvias intensas los días previos y mismo día	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2004-02.pdf https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2007-07.pdf
Los Lagos Cordillera Valle río Burritos	16.12.17	Deslizamiento que incorpora hielo, nieve, agua y sedimentos. Evoluciona a flujo de detritos y flujo de lodo	12 km (8,6 hasta Villa Santa Lucía)	Directo Afectación a ruta Cobertura del 50% de villa Santa Lucía 18 fallecidos. 4 desaparecidos. Generación de dos lagos confinados		Escarpes de alta pendiente. rocas volcánicas fracturadas subvertical y con grietas (>1m de ancho) debilitadas por alt.	Lluvias intensas con isoterma 0°C alta	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2018-19.pdf

		más distalmente				Hidrotermal (arcillas). Disponibilidad de detritos por retroceso de glaciar. Presencia de lago glacial. Periodo previo anormal de T° medias y extremas altas. Año con superávit de precipitaciones (saturación de suelo)		
Los Lagos Cordillera Valle Los Turbios/río Amarillo	08:00 16.05.20	Deslizamiento de cubierta de suelo y vegetación que al incorporar sedimentos saturados en su desplazamiento evoluciona a flujo de detritos	2.5 km	Directo Destrucción Termas El Amarillo, viviendas y parte de la ruta. Desaparición de persona		Ladera de fuerte pendiente (>60°). Presencia de sedimentos de origen glacial (remanentes morrénicos y sedimento volcánico)	Lluvias intensas, isoterma 0°C alta	https://portalgeo. sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2020-16.pdf
Los Lagos	20:30	Deslizamiento	1.8 km	Directo		Sedimentos no	Lluvias	https://portalgeo.

Cordillera Caleta Buill	03.05.02	de masa de sedimento glacial que genera flujo de detritos		Destrucción de dos viviendas. Sepultación de 12 personas		consolidados de origen glacial sobre rocas metamórficas impermeables. Fuerte pendiente de ladera	intensas	sernageomin.cl/Informes_PDF/R_LAG-002.pdf
Aysén Cordillera Quebrada en camino a la Tapera km 5	01:00 - 03:00 30.05.14	Deslizamiento rotacional de suelo y árboles que evoluciona a flujo de detritos.	1.3 km	Directo Corte de camino		Fracturamiento del macizo. Alteración hidrotermal. Altas pendientes	Lluvias intensas y prolongadas por isoterma 0°C alta. Viento que bota árboles y ayuda a desestabilizar	https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF_Nac/RM-2014-22.pdf
VOLCÁNICOS								
Araucanía Vn. Villarrica Río Turbio	Madruga da 3.03.15	Avalancha mixta que al erosionar glaciar del flanco incorpora hielo/nieve y evoluciona a lahar.	*25 km		Sí (1948- 1949, 1971)	Presencia de hielo/nieve (poca por ser marzo). Presencia de lavas meteorizadas	Erupción con avalancha mixta	Vera (2018) https://rnvv.sernageomin.cl/infografia-no-004-2023/ https://rnvv.sernageomin.cl/infografia-no-002-
Araucanía Vn. Villarrica Río Pedregoso			*20 km		Sí (1948- 1949)			
Araucanía Vn. Villarrica Zanjón Seco			*13 km		Sí (1948- 1949, 1964, 1971)			
Araucanía			*23 km		Sí (1948-			

Vn. Villarrica Estero Correntoso					1949, 1971)			2023/ https://rnmv.serna.geomin.cl/infogr afia-no-003- 2023/ Moreno, H. & Clavero, J. (2006).
Araucanía Vn. Villarrica Estero Seco/Chaillupén Río Voipir	23:45 29.12.71	Flujo de agua al incorporar material evoluciona a lahar con textura entre flujo de detritos y flujo hiperconcentrad o	Al menos 18 km (Chaillupé n) Al menos 22km (Voipir)		Sí (1948 - 1949) Voipir en 1949 alcanza 45 km	Abundante material morrénico en los flacos superiores del volcán. Presencia de nieve/hielo	Liberación súbita de agua por erupción paroxismal	Castruccio, A., Clavero, J., & Rivera, A. (2010). https://rnmv.serna geomin.cl/infogr afia-no-004- 2023/ https://rnmv.serna geomin.cl/infogr afia-no-002- 2023/ https://rnmv.serna geomin.cl/infogr afia-no-003- 2023/ Moreno, H. &

								Clavero, J. (2006).
Araucanía Vn. Villarrica Río Huichatío Río Molco	Octubre 1948- febrero 1949	Lahar						https://rnvv.sernageomin.cl/infograpia-no-004-2023/ https://rnvv.sernageomin.cl/infograpia-no-002-2023/ https://rnvv.sernageomin.cl/infograpia-no-003-2023/ Moreno, H. & Clavero, J. (2006).
Araucanía Vn. Villarrica Estero Diuco	Marzo 1964	Lahar		Directo Destrucción parcial de Coñaripe. >20 muertes				Moreno, H. & Clavero, J. (2006).
Araucanía Vn. Llaima Río El Manzano	1946	Lahar		Directo Aislación de localidad Santa María de Llaima				Navarrete (2017).
Araucanía Vn. Llaima	12:15 17.05.94	Lahares por fusión de	10 km	Directo Destrucción de		Presencia de nieve	Erupción: Flujo de lava	Navarrete (2017).

Quebradas laterales		glaciar oeste debido al paso de lava bajo él. Habitantes ven su paso durante 15 minutos		puentes y cortes de camino			que funde glaciar	
Araucanía Vn. Llaima Río Captrén y río Calbuco	01.01.08 - 03.04.09	Lahares por fusión de glaciar y nieve al interactuar con lavas clastogénicas	*11 km			Presencia de glaciares y nieve	Erupción: Caída de lavas clastogénicas	Navarrete (2017).
Los Lagos Vn. Calbuco Río Tepu, río Blanco sur, río Blanco este	05:00 01.02.61	Flujos de bloques y ceniza que evolucionan a lahar al mezclarse con agua del río y de derretimiento de hielos/nieve	14.5 km			Cursos de agua permanentes Presencia de nieve/hielo	Erupción	Castruccio, A., Clavero, J., & Rivera, A. (2010).
Los Lagos Vn. Calbuco Río Sur	22.04.15	Lahar generado por derretimiento de nieve en los	19.8 km con visible abanico en boca del	Directo Destrucción de puente. Afectación a ruta.		Presencia de nieve. Cursos de agua permanentes	Erupción: Fusión de nieve por corrientes de	Jones, R. J. (2016)

		flancos del volcán al interactuar con PDC	río	Afectación a granja pesquera			densidad piroclástica (PDC)	
Los Lagos Vn. Calbuco Río Blanco	25.05.15	Lahar secundario		Directo Colmatación de área de desagüe del Lago Chapo		Presencia de material piroclástico acumulado		González et al., (2018)
Los Lagos Vn. Chaitén Río Blanco	12.05.08	Lahar		Directo Afectación a ciudad de Chaitén				Lara, L. E. (2009).
Los Lagos Vn Chaitén Río Chaitén	12.05.08- 20.05.08	Lahares secundarios por removilización de depósitos de tefra que generan agradación en el río y una avulsión por el centro de la ciudad.	Al menos 10 km (distancia Volcán – Ciudad Chaitén)	Indirecto Modificación de cauce del río, avulsiona en el centro de la ciudad de Chaitén	-	Depósitos de tefra recientes. Pendientes escarpadas	Lluvias	Pierson et al. (2013)
Aysén Vn. Hudson Río Huemules	08.08.71	Al menos tres lahares por fuentes de lava que erosionan y funden glaciar	Al menos 9 km	Directo	Sí, de menor tamaño en 1973 y 2011	Presencia de glaciar en flanco y hielo en caldera	Erupción: Fusión de glaciar por lava	Naranjo et al. (1993) https://biblioteca.digital.ciren.cl/handle/20.500.1308

		<p>en la caldera. Escurren sobre el ventisquero huemules y al pasar además lava bajo él, se acumula agua que luego al liberarse genera un violento jokulhlaup (21- 22 hrs)</p>						<p>2/15896 Amigo, A. (2013)</p>
--	--	---	--	--	--	--	--	---

(* Inferido del documento referenciado