CIGIDEN

SERIE POLICY PAPERS CIGIDEN

Sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT), un elemento esencial en la gestión de desastres de origen hidrometeorológico

Christian Oberli · Jorge Gironás · Cristián Escauriaza · Rodrigo Cienfuegos

Sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT), un elemento esencial en la gestión de desastres de origen hidrometeorológico

© CIGIDEN.

ISBN: 978-956-14-2800-3

Derechos reservados.

Primera edición, enero 2021.

Autores

Christian Oberli [1, 3]
obe@uc.cl

Jorge Gironás [2, 3, 4]
jgironas@ing.puc.cl

Cristián Escauriaza Mesa [2, 3]
cescauri@ing.puc.cl

Rodrigo Cienfuegos Carrasco [2, 3]
racienfu@ing.puc.cl

[1] Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

[2] Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental,
Pontificia Universidad Católica de Chile.

[3] CIGIDEN.

[4] CEDEUS.

Agradecimientos a: Francisca Roldán; Felipe Sánchez; Fernando González; Felipe Aron.

Edición y coordinación Serie Policy Papers CIGIDEN
Leila Juzam P.
leila.juzam@cigiden.cl

Asistente de edición
Katherine Campos K.
kvcampos@uc.cl

Diseño
Sebastián Saldaña A.
hola@sebastiansaldana.cl

Esta publicación forma parte de la Serie Policy Papers CIGIDEN.

SERIE POLICY PAPERS CIGIDEN

Sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT), un elemento esencial en la gestión de desastres de origen hidrometeorológico

SERIE POLICY PAPERS **CIGIDEN**

Sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT), un elemento esencial en la gestión de desastres de origen hidrometeorológico

Christian Oberli
Jorge Gironás
Cristián Escauriaza
Rodrigo Cienfuegos

RESUMEN EJECUTIVO

Chile está expuesto continuamente a diversas amenazas naturales, incluyendo terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, aluviones, inundaciones y sequías. La supresión o mitigación de sus potenciales impactos en el país es rol primordial de la gestión del riesgo de desastres, particularmente en el caso de eventos frente a los cuales no es posible controlar el riesgo limitando la exposición a la amenaza, como es el caso de los terremotos. Sin embargo, el grado de avance en la preparación y reducción de impactos de amenazas de origen hidrometeorológico es bastante menor, debido principalmente a (1) la menor exposición frente a estas amenazas, las cuales tienen un carácter típicamente más local, y (2) la dualidad recurso/amenaza propia del agua. Este último factor ha significado que, frente a la expansión urbana, las precipitaciones significan paradójicamente un problema más que una situación deseable. Adicionalmente, existe una ambigüedad institucional con respecto al monitoreo y pronóstico de los impactos generados por exceso de agua (crecidas), puesto que estas actividades requieren de instrumentos, capacidades y recursos distintos a los utilizados en el monitoreo meteorológico y de recursos hídricos desarrollado por la Dirección General de Aguas y la Dirección Meteorológica de Chile.

Las inundaciones y los aluviones son los fenómenos más destructivos asociados al exceso de agua. Estos eventos pueden afectar a una cantidad considerable de personas y producir grandes pérdidas económicas. La gestión y normativa actual relacionadas con el monitoreo y pronóstico de estas amenazas no se ha podido consolidar, existiendo debilidades por abordar. El enfoque de gestión ha sido más bien reactivo, con acciones adoptadas durante la fase de emergencia (es decir, un enfoque de *respuesta temprana*), existiendo entonces una necesidad por avanzar hacia un enfoque de *alerta temprana* donde, a partir de la información levantada por sistemas de monitoreo, en conjunto con un conocimiento acabado del territorio, se pronostique con la mayor certeza posible tanto la ocurrencia como la magnitud y las áreas de afectación de aluviones e inundaciones. Este cambio de paradigma permitiría anticipar muchas de las acciones propias de la gestión de emergencias, y minimizar los impactos sobre las personas y la propiedad pública y privada.

El presente documento propone lineamientos a seguir para mejorar la gestión del riesgo asociado a eventos de origen hidrometeorológico, con un foco en el monitoreo y alerta temprana. Luego de dar cuenta de las características de estos eventos y los factores detonantes, se presenta una breve revisión histórica centrada en los impactos de estos eventos y las oportunidades de mejora en su control. Luego, se discuten los elementos centrales de las iniciativas actuales de monitoreo y alerta temprana, así como la normativa y política pública vigente, para posteriormente presentar una experiencia reciente desarrollada por CIGIDEN, relacionada con la incorporación de nuevas tecnologías en sistemas de monitoreo y sistemas de alerta temprana (SMAT). Finalmente se proponen las recomendaciones que emanan de nuestro análisis y experiencia en la temática.

Dra. Scarlett Vásquez Paulus
Directora Ejecutiva (s)
Instituto Nacional de Hidráulica
www.inh.cl

PRÓLOGO

La forma en que se ha ido ocupando el territorio y que, en definitiva, ha determinado la relación de las comunidades con su entorno y las potenciales amenazas naturales asociadas a estas condiciones, nos presentan un desafío ineludible como país, al que debemos responder adecuadamente, avanzando hacia una gestión del riesgo de desastres que permita actuar preventivamente para salvar vidas y minimizar impactos, además de una correcta toma de decisiones antes y durante el desarrollo de las emergencias.

Los autores realizan la importante labor de abordar distintas dimensiones que definen este tema, enfocándose en la reducción de impactos de amenazas de origen hidrometeorológico las que, por su naturaleza, se producen en forma localizada y demandan soluciones bastante exigentes en materia de gobernanza, tecnología, conocimiento y capital humano.

En este documento, se proponen recomendaciones para un sistema de monitoreo y alerta temprana de crecidas, destacando la experiencia desarrollada en la Quebrada de Ramón donde, en un trabajo colaborativo entre la Pontificia Universidad Católica – CIGIDEN y el Instituto Nacional de Hidráulica, se desarrolló una metodología que se tradujo en instrumentación para la medición de variables hidrometeorológicas diseñada especialmente para la caracterización de crecidas y en la implementación de un sistema de monitoreo y pronóstico que proporcionaba además, información acerca de la potencial inundación en zonas urbanas asociada a las frecuencias de cada evento pronosticado. Este proceso demandó generar muchas soluciones específicas durante su diseño, lo que en sí constituye un conocimiento muy valioso que debiese ser rescatado, adecuado y replicado en otras cuencas. Esto además nos pone en relieve otro tipo de interrogantes que requieren de otros desarrollos focalizados en el monitoreo de escurrimiento de flujos detríticos pero que, sin duda, se alimentan de los avances que se tiene en materia de crecidas.

Los autores aportan al necesario debate desde su conocimiento, experiencia y visión del escenario general, en miras de avanzar decididamente a disponer de las capacidades necesarias para fortalecer la gestión de riesgo para a este tipo de eventos.

SERIE POLICY PAPERS CIGIDEN

Sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT), un elemento esencial en la gestión de desastres de origen hidrometeorológico

1. INTRODUCCIÓN

Chile, con su situación geográfica particular, está expuesto a una variedad de amenazas naturales recurrentes, tales como terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, sequías, crecidas y aluviones. En particular, las amenazas hidrometeorológicas típicamente asociadas a precipitaciones importantes se han incrementado en el último tiempo, tal como se presenta en la Figura 1. En ella se muestra la cantidad acumulada de desastres derivados de eventos extremos de la naturaleza en Chile entre los años 1906 y 2019. Este aumento se explica por la variabilidad y las manifestaciones del cambio climático, así como por las modificaciones de uso de suelo que aumentan los caudales y volúmenes escurridos, e incrementan la población expuesta frente a estos fenómenos.

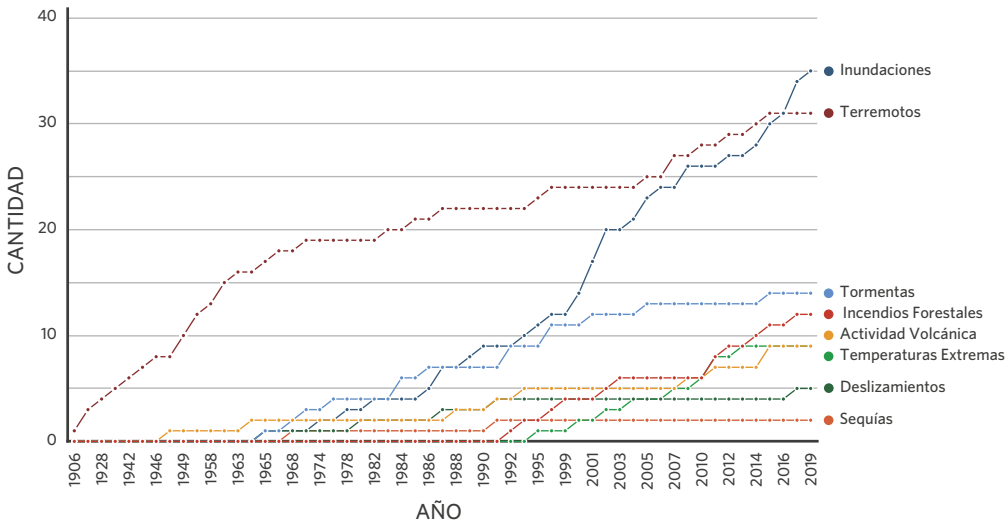

Figura 1. Cantidad acumulada de desastres de origen natural en Chile a través del tiempo.

Fuente: EM-DAT: The Emergency Events Database - Universite Catholique de Louvain (UCL) - CRED, D. Guha-Sapir[1].

Tipo de desastre	Clase de desastre	Nº eventos	Totales		
			Muertes	Afectados	Daños (USD MM 2019)
Sequía	Climatológico	2	0	120.000	255.000
Terremoto	Geofísico	31	59.543	9.921.984	35.512.070
Temperatras extremas	Meteorológico	9	8	86.100	1.020.00
Inundación	Hidrológico	35	1.245	1.1657.667	2.297.600
Deslizamiento	Hidrológico	5	251	82.983	6.00
Tormentas	Meteorológico	14	273	504.479	9.300
Actividad volcánica	Geofísico	9	110	86.650	615.000
Incendios forestales	Climatológico	12	42	21.722	1.464.00

Tabla 1. Estadísticas relacionadas con los distintos tipos de desastres en Chile, periodo 1900 - 2019.

Fuente: EM-DAT- The International Disaster Database - Centre for Research on the Epidemiology of Disasters (CRED), Université Catholique de Louvain (UCL).

El análisis de los daños causados por eventos naturales muestra que sólo en los años 2014 y 2015, las amenazas socio-naturales en Chile generaron pérdidas económicas estimadas en $195 MM CLP, equivalente al 2,5% del presupuesto en educación y el 5,2% del presupuesto en Salud. Luego de los terremotos, los eventos hidrológicos son los eventos que más afectan al país en términos económicos y de vidas humanas (Tabla 1), particularmente en ciudades con contextos geoclimáticos que propician crecidas fluviales, aluviones y deslizamientos de tierra (Gironás y Sandoval, 2017).

2. REMOCIÓN EN MASA, ALUVIONES E INUNDACIONES

Un aluvión es un flujo de un material detrítico, generalmente compuesto por arena, grava, arcilla o limo, arrastrado por el escurrimiento de agua, que tiene directa relación con crecidas fluviales donde hay un incremento del caudal respecto a las condiciones normales. Adicionalmente, el poder de daño de estos aluviones se relaciona directamente con la presencia de material erosionado y la pendiente del terreno, los que amplifican el riesgo de crecidas y aluviones de alto impacto, pudiendo afectar también a ambientes planos rodeados de topografías con dichas características (e.g., precordillera, cerros, quebradas).

Las causas directas de estos eventos son principalmente los fenómenos climatológicos intensos, como pueden ser lluvias de larga duración, lluvias intensas de duraciones cortas, o lluvias con una isoterma 0°C (H_o) alta, siendo esta elevación la que delimita las zonas que reciben nieve (sobre Ho) de las que reciben lluvia (bajo Ho). Por lo tanto, un alza en la elevación de Ho significa un mayor volumen de agua líquida disponible para escurrir, lo que se traduce en mayores volúmenes, caudales y concentraciones de sólidos removidos y transportados por el flujo. Ahora bien, el comportamiento de Ho difiere durante las horas en las que está lloviendo según si la tormenta es cálida o fría (i.e. con temperaturas mayores o menores a 10,5°C en la estación Quinta Normal) (Garreaud, 2013). Esto se visualiza en los diagramas de "caja-bigote" de la Figura 2, donde se resume estadísticamente el comportamiento de la ubicación de la cota Ho los días con lluvia durante el periodo septiembre 2016 a agosto 2018, medida in-situ por CIGIDEN. Los extremos de cada bigote muestran los valores mínimos y máximos, mientras que la caja azul muestra donde se encuentra el 50% central de los valores. Finalmente, la línea roja corresponde a la mediana de estas observaciones. Este resumen estadístico muestra que, durante las tormentas frías, la isoterma en promedio tiende a estar levemente bajo los 2.000 metros de elevación, mientras que durante los eventos cálidos ésta tiende a ubicarse aproximadamente a los 2.500 metros de elevación. Más aún, la elevación de Ho puede ser muy fluctuante durante estos eventos cálidos, pudiendo superar incluso los 4.000 metros de altura.

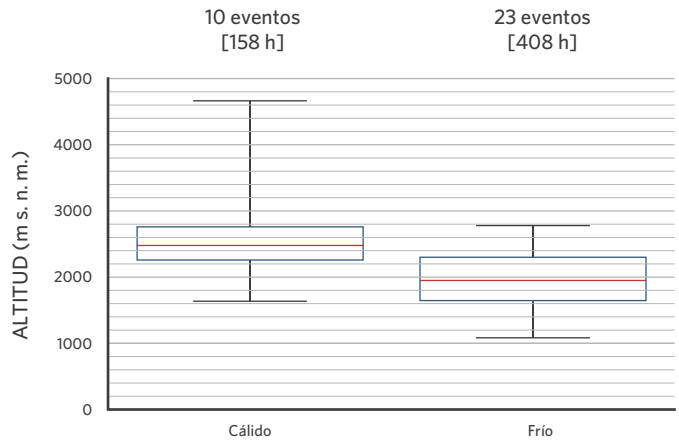

Figura 2. Altitud de la isoterma 0°C durante los eventos de precipitación cálidos y fríos en el periodo septiembre 2016 a agosto 2018. Se indican las horas involucradas en cada tipo de tormenta.

Fuente: adaptado de Ibañez et al., 2020

2.1 ACONTECIMIENTOS HISTÓRICOS Y APRENDIZAJES

En épocas recientes han ocurrido crecidas y aluviones de distinta magnitud en Chile, los que han producido daños considerables. En general, estos eventos tienen en común la concurrencia de una precipitación importante y una isoterma 0°C a gran altura. Ejemplo de estos eventos son los aluviones de Antofagasta y Taltal del 18 de junio de 1991. En aquella ocasión cayeron entre 14 y 42 mm durante aproximadamente 3 horas, en el contexto del clima árido y desértico de la zona. Estos aluviones dejaron 91 víctimas fatales, 19 personas desaparecidas y cerca de 70 mil damnificados. Las pérdidas económicas se estiman en cerca de USD 80 millones (SERNAGEOMIN, 2015). Otro evento es el ya mencionado aluvión del 3 de mayo de 1993 ocurrido en las Quebrada de Macul y Quebrada de Ramón en la Región Metropolitana, afectando principalmente las comunas de La Reina, Peñalolén y La Florida. Este evento produjo un saldo de 26 muertos, 8 desaparecidos y cerca de 30.000 damnificados (BCN, 2015) y se originó producto de precipitaciones con una isoterma 0 °C muy elevada, por sobre los límites de las cuencas de ambos cauces. Este hecho detonó la modificación del Plan Regulador de la Comuna de La Florida, incluyéndose zonas de restricción y riesgo según se muestra en la Figura 3. Otros eventos de relevancia histórica en la Región Metropolitana han sido las inundaciones en Quebrada de Ramón de 2005, los aluviones en Lo Barnechea de 2009 y el Cajón del Maipo en el año 2013), y las crecidas del río Mapocho de los años 1982, 1987 y 2016.

Uno de los eventos recientes con gran impacto sobre la comunidad, fueron los aluviones de Atacama del 25 de marzo del 2015, donde una de las zonas más afectadas fueron los poblados existentes a lo largo del cauce del río Salado (El Salado, Diego de Almagro, y Chañaral). En el evento fallecieron 31 personas y otras 16 desaparecieron; hubo cerca de 35.000 damnificados y las pérdidas económicas se estiman cercanas a USD 1.500 millones (SONAMI, 2016). Este evento generó más de 70 mm de precipitación en las zonas más altas de la cuenca (Figura 4) y una isoterma 0°C ubicada entre los 3.500 y 4.000 msnm (Wilcox et al., 2016).

Estos aluviones han motivado la implementación en muchos lugares de medidas estructurales de mitigación, en particular la construcción de piscinas decantadoras, las que disminuyen la velocidad y el poder destructivo del flujo. A pesar del positivo impacto en el control aluvional, estas obras pueden tener también algunos efectos negativos. Por una parte, la sensación de seguridad asociada a estas obras puede motivar un aumento de la exposición y magnificar los impactos de una

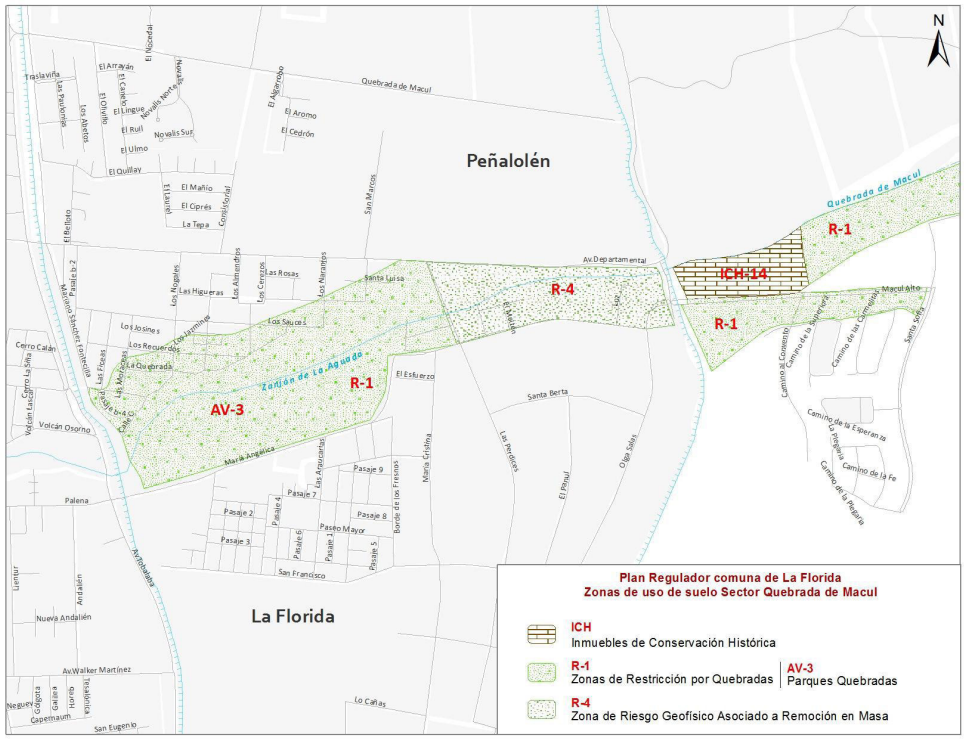

Figura 3. Zonas de uso de suelo Sector Quebrada de Macul de acuerdo al Plan Regulador de la comuna de La Florida (2015).

Fuente: BCN, 2015.

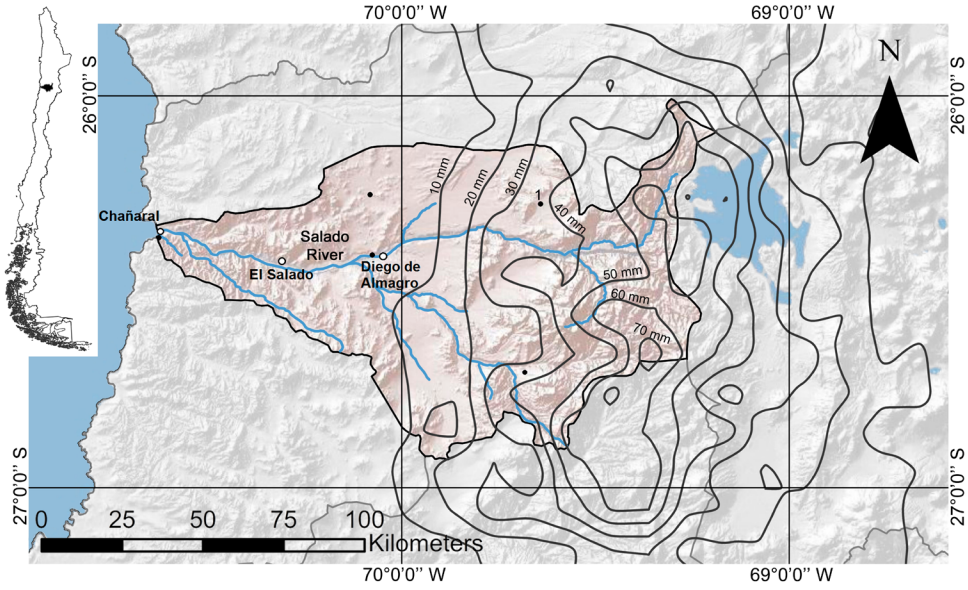

Figura 4. Distribución de precipitaciones en la cuenca del Salado para el aluvión del 25 de marzo de 2015.

Fuente: Wilcox et al. (2016).

eventual falla. Por otra parte, particularmente en cauces y ríos perennes, puede haber una importante afectación del régimen fluvial y los ecosistemas dependientes de este. Finalmente, en muchas ocasiones este tipo de soluciones no se integran bien con el territorio urbano, pues solo buscan reducir los impactos del fenómeno físico, pero no necesariamente se alinean a otros objetivos de sustentabilidad y conservación ambiental.

Por lo tanto, es relevante ampliar el espectro de medidas de mitigación de modo de incluir no sólo las medidas estructurales (ME), sino también las medidas no estructurales (MNE) las cuales, con un enfoque de anticipación, buscan reducir los daños y costos más que modificar las propiedades físicas de los eventos naturales. Adicionalmente, las MNE pueden responder a objetivos adicionales, como son la conservación del medioambiente, el uso sostenible de recursos, y la integración con otros servicios en el medio urbano. La relevancia de las MNE se ilustra en la representación esquemática de reducción del riesgo mediante distintas medidas, propuesto por el National Research Council de Estados Unidos (2013) (Figura 5). En esta representación, las MNE (e.g, zonificación, normas de construcción, comunicación del riesgo y planes de evacuación) implementadas por el gobierno local, regional o nacional son esenciales y debieran ser consideradas en un primer lugar, previo a las ME (e.g. obras de protección fluvial), las que más bien debieran focalizarse en el control del riesgo remanente luego de la correcta implementación de MNE. Es muy importante tener en cuenta que la implementación de cualquier medida requiere de datos confiables y del entendimiento lo más completo posible de la comunidad, la cuenca y cauces involucrados, así como del comportamiento histórico y en tiempo real de las variables hidrometeorológicas en el sistema. Con esta información es posible pronosticar la ocurrencia y el comportamiento de crecidas y aluviones, y sus potenciales impactos.

Una de las medidas no estructurales (MNE) de importancia para el control de los efectos de inundaciones y aluviones son los sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT), los que permiten controlar los impactos a través de comunicación del riesgo y la planificación y gestión de la evacuación (Figura 5). Estos sistemas permiten anticipar y pronosticar la ocurrencia de un fenómeno y su magnitud a partir de información capturada ya sea in-situ o remotamente, procesada en tiempo real. En la próxima sección describiremos las prácticas de monitoreo actual en el país, los organismos y normativas involucrados, y las necesidades y oportunidades que se presentan a futuro.

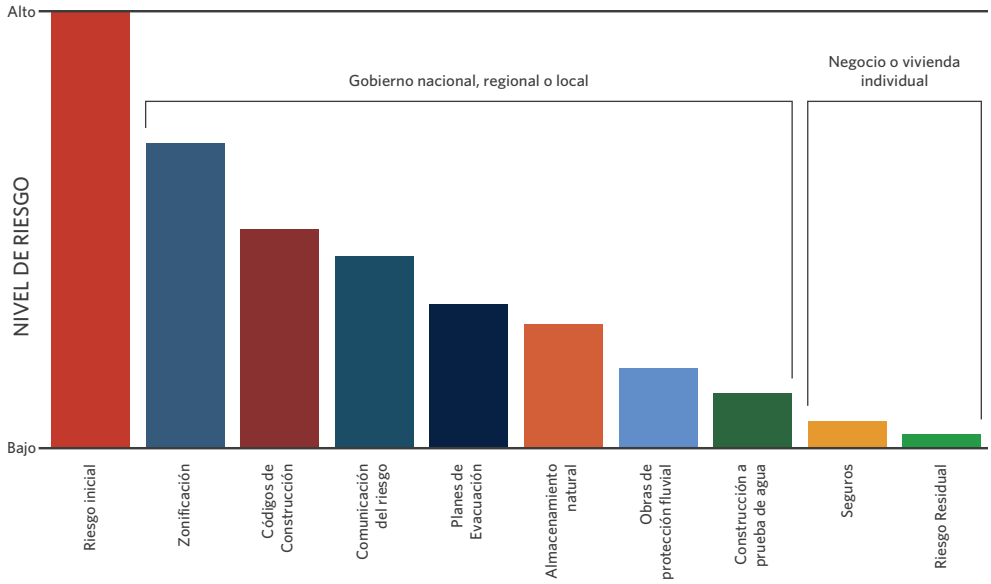

Figura 5. Ejemplos de herramientas y medidas de reducción del riesgo de inundación, que incorpora gestión y obras.

Fuente: adaptado de National Research Council, 2013.

3. GESTIÓN DEL RIESGO ASOCIADO A EVENTOS HIDROMETEOROLÓGICOS

3.1 ORGANISMOS INVOLUCRADOS

La principal entidad a cargo de la gestión del riesgo en el país es la ONEMI (Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública)[2]. La ONEMI trabaja en conjunto con SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería) cuyo principal foco en cuanto a gestión del riesgo es mantener la Red Nacional de Vigilancia Volcánica. Además, cuenta con el apoyo del SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada) que se encarga de mantener la red de boyas y mareógrafos, además de evaluar la amenaza de tsunamis en las costas de Chile. Por otra parte, la ONEMI se vincula con CONAF (Corporación Nacional Forestal), entidad perteneciente al Ministerio de Agricultura dedicada a administrar la política forestal del país y, entre otras funciones, prevenir la ocurrencia de incendios forestales. El CSN (Centro Sismológico Nacional), opera y mantiene estaciones sísmicas y geodésicas y evalúa la ubicación y magnitudes de los sismos ocurridos en territorio nacional. Ninguno de estos organismos tiene por misión específica reducir el riesgo de desastres frente a crecidas y aluviones.

Si bien la labor de SERNAGEOMIN se relaciona con este tipo de eventos, sus recursos se han enfocado principalmente en entender y monitorear la actividad volcánica del país, y alertar acerca de posibles erupciones. Sin embargo, la institución ha dedicado esfuerzos en aspectos que se vinculan con las amenazas hidrometereológicas (Figura 6), siendo ejemplo de esto la inclusión de deslizamientos y aluviones con altas concentraciones de sólidos en el catastro de eventos peligrosos de carácter geológico ocurridos en entre 1980 y 2015 (SERNAGEOMIN, 2015) y el desarrollo del Catastro de Remociones en Masa a Nivel Nacional.

En el año 2012 se crea la Plataforma Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (PNRRD), conformada a través del trabajo conjunto de diferentes instituciones, lideradas y coordinadas por ONEMI, incluyendo organismos públicos y privados y de la sociedad civil, académicos y científicos-técnicos, fuerzas armadas, agencias del Sistema de Naciones Unidas en Chile, entre otras. El PNRRD no cuenta actualmente con capas de información de zonas susceptibles a flujos aluvionales, pero si cuenta con "Planos de Evacuación" definidos en el Plan "Chile Preparado" elaborados por diferentes entidades tales como ONEMI, SERNAGEOMIN, Municipalidades, y Comités Comunales de Protección Civil. Sin embargo, la caracterización y el monitoreo de este tipo de eventos debe mejorar significativamente, sobre todo dadas las características locales que puede tener un flujo aluvional dadas las propiedades de cada cuenca (e.g., morfométricas, geológicas, sedimentológicas, climáticas, vegetacionales). Otras acciones necesarias incluyen el aumento y actualización de los estudios de inundación y remoción en masa en todo el país, la mejora del instrumental del Plan de Monitoreo, el desarrollo de Protocolos de Emergencia en conjunto con la comunidad y el fortalecimiento de los Planes de Educación sobre la temática en cuestión.

3.2 MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

El Centro de Alerta Temprana (CAT)[3] de ONEMI gestiona el tráfico de datos relacionados con el Sistema Nacional de Protección Civil, y monitorea las variables de interés para las distintas amenazas que puedan derivar en desastres dentro del país. A partir de este monitoreo es posible emitir una alerta o estado de vigilancia, definido en 4 niveles: Alerta Verde, Temprana Preventiva, Amarilla y Roja[4]. Estos estados permiten gestionar y movilizar los recursos necesarios para disminuir el riesgo de pérdida de vidas humanas y daños a la población.

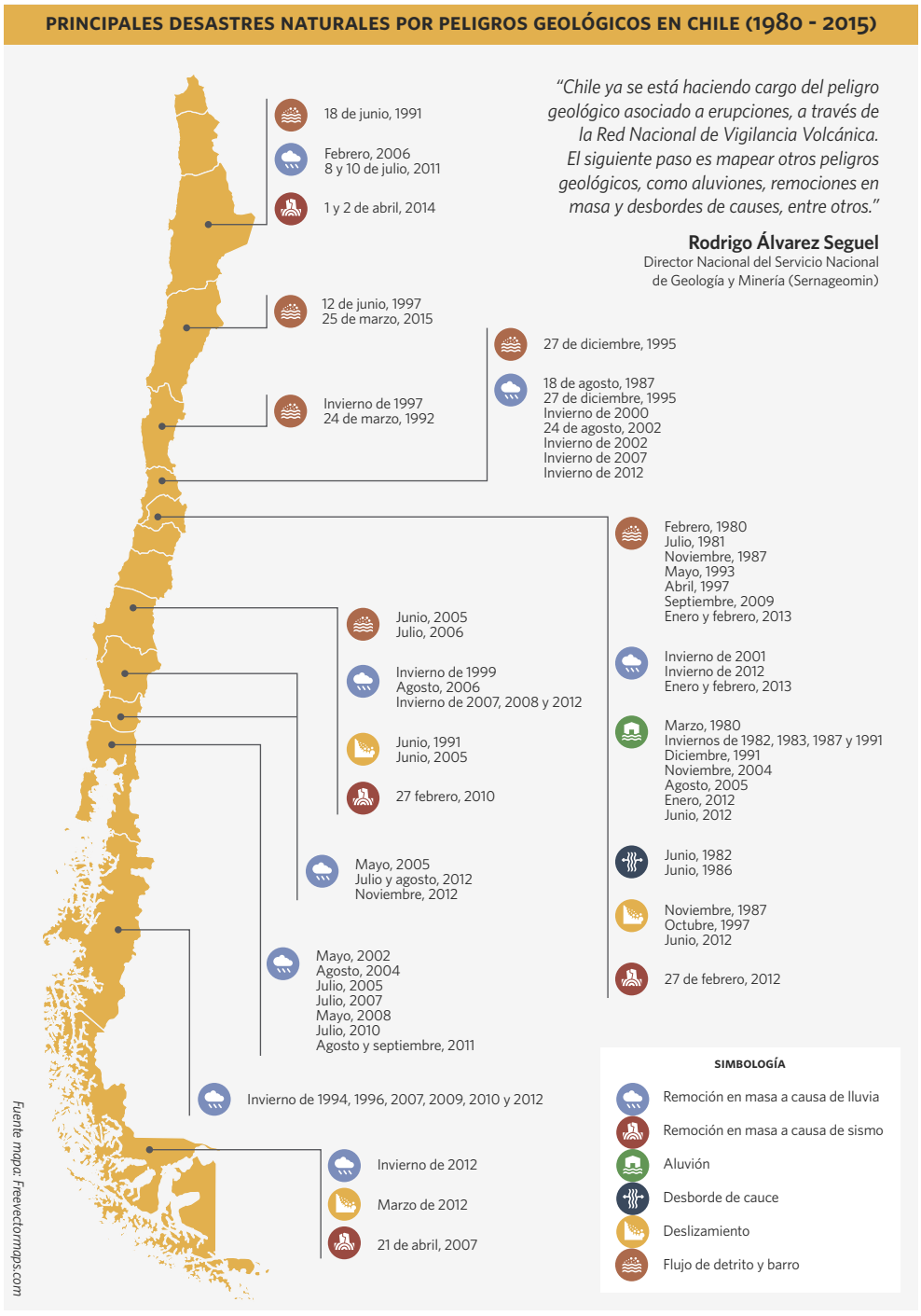

Figura 6. Principales desastres por peligros geológicos en Chile (1980-2015), Servicio Nacional de Geología y Minería, Junio 2015. (Reversión)

Fuente: https://www.flickr.com/photos/85510814@N06/18830195422

En el Plan Específico de Emergencia por Variable de Riesgo – Remoción en Masa de 2017 (ONEMI, 2017), se establece que una condición necesaria para activar una alerta en aquellos eventos desencadenados por una precipitación es la existencia de un pronóstico previo. En dicho caso, se activa el Plan Regional de Emergencia por Variable de Riesgo por Remoción en Masa, según el cual el Comité Regional de Operaciones de Emergencia (COE Regional) debe tomar decisiones acordes a lo informado y establecer los niveles de alarma definidos por el CAT, tomando en consideración las siguientes fuentes de información:

1. Pronóstico meteorológico suministrado por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC).

2. Antecedentes históricos entregados por SERNAGEOMIN, indicando probabilidad de ocurrencia. Estos antecedentes no siempre existen para todo el territorio nacional, habiendo cuencas susceptibles a este tipo de fenómenos sin caracterizar.

3. Registro de precipitaciones suministrado por la Dirección General de Aguas (DGA) u otra fuente.

4. Reportes cualitativos de quebradas levantados en terreno por patrullas del Ejército de Chile y personal de la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH). Estos reportes requieren de un alto nivel de experiencia, preparación y capacitación.

Considerando los antecedentes acá descritos, se identifican una serie de necesidades y posibles mejoras a abordar, particularmente en el monitoreo y definición de alertas:

- **Cobertura de monitoreo hidrometeorológico en línea, con foco en la caracterización de la amenaza hidrometeorológica:** existen extensiones importantes del país que no cuentan con una densidad suficiente de estaciones meteorológicas plenamente operativas que estén midiendo y reportando datos en línea con una frecuencia horaria mayor, y se ubiquen principalmente sobre la cota 1.000 msnm. Esto impide registrar adecuadamente los eventos de lluvia complejos donde ocurren, y no donde se ven sus efectos posteriores. Adicionalmente, existen limitaciones para caracterizar la ubicación de la isoterma 0°C a partir de mediciones, variable clave que controla la cantidad de agua líquida disponible para escurrir.

- **Cobertura y resolución de monitoreo hidrológico y fluviométrico:** la información de variables hidrometeorológicas, caudales, y sedimentos, es clave para el estudio de las amenazas de inundación, y para realizar una gestión adecuada de los cauces con una perspectiva que considere la cuenca completa. La Dirección General de Aguas (DGA) cuenta con una red de estaciones hidrometeorológicas y de monitoreo de caudales y sedimentos, pero la resolución de sus datos y las variables sedimentológicas medidas no se encuentran orientadas al estudio de aluviones y crecidas. El propósito de la red actual es el registro y cuantificación de los recursos hídricos del país, a partir de las aproximadamente 500 estaciones de monitoreo de la DGA con conectividad GPRS o satelital distribuidas a lo largo del país[5]. Estas estaciones reportan información utilizada principalmente en la toma de decisiones en aquellos sectores donde el agua es un recurso o insumo (sector agrícola, hidroeléctrico, industrial, etc). Por lo tanto, estos sistemas de monitoreo tradicionales tienen un objetivo distinto al de un SMAT, el cual debe proveer información a escalas espaciales y temporales más finas y en tiempo real. Las crecidas y aluviones son eventos que ocurren en minutos u horas, razón por la cual el carácter puntual e instantáneo de las mediciones es fundamental, no sólo para la alerta y toma de decisiones durante el evento mismo, sino también para la construcción de modelos que busquen estimar con mayor precisión los caudales y zonas de inundación con objetivos de planificación. A partir de los pronósticos meteorológicos a corto plazo de la Dirección Metereológica de Chile (DMC) se emiten alertas meteorológicas en casos de potenciales eventos de alta precipitación, temperatura extrema, o similares. Sin embargo, estas alertas meteorológicas tienen una escala regional, y no incorporan una alerta hidrológica a escala de cuencas o subcuencas. En palabras simples, se pronostica una lluvia importante, pero no una posible crecida o aluvión en una cuenca o río en particular, ni mucho menos los posibles caudales que podrían resultar. Un ejemplo que ilustra notoriamente la diferencia entre un pronóstico meteorológico y otro hidrológico -así como las implicancias de no contar con este último- es la crecida del Río Mapocho del 16 de abril del 2016 (Figura 7).

Figura 7. Inundación en Santiago producida por el desborde del río Mapocho durante la crecida del 16 de abril de 2016

Fuente: www.24horas.cl.

Para este evento existió un pronóstico meteorológico con días de anticipación que auguraba precipitaciones importantes, sin embargo, no existía un pronóstico hidrológico que permitiera estimar la magnitud y momento de ocurrencia de la crecida, de manera de actuar de forma preventiva y temprana coordinando acciones con las obras que se estaban desarrollando en el lecho del río en ese periodo. Conocidos son los daños que provocó esta crecida en la ciudad (Gironás et al., 2020).

3.3 ACTUALIDAD Y FUTURO DE LA POLÍTICA PÚBLICA EN MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

Es importante evaluar las falencias previamente identificadas a la luz de la política pública actual y las correspondientes mejoras que se proponen. La actual legislación de Chile en el manejo del riesgo de desastres se ha ido construyendo a la par con las grandes catástrofes que han ocurrido en el tiempo, incorporando periódicamente mejoras y nuevas aristas de acción. Uno de los últimos grandes cambios ocurrió en 2015 bajo el Marco de Sendai (UNDRR, 2015), en donde el Estado de Chile se comprometió a mejorar la estructura gubernamental para la resiliencia en la gestión del riesgo de desastres. En particular, se explicita la necesidad de inversiones públicas y privadas para la prevención y reducción del riesgo de desastres mediante ME y MNE, de modo de aumentar la resiliencia económica, social, sanitaria y cultural de las personas, las comunidades, los bienes y el medio ambiente. Adicionalmente,

se destaca lo fundamental que es trabajar por un paradigma centrado en la *alerta temprana* que permita disminuir el riesgo al que se enfrenta el territorio, más que en la *respuesta temprana* posterior a un evento potencialmente peligroso. Por lo tanto, se hace imprescindible una mejor preparación previa y un conocimiento anticipado de la posibilidad de ocurrencia de un evento y de sus características. Haciendo eco de esto, una de las tareas de la estrategia presentada por Comisión para la Resiliencia ante Desastres Naturales (CREDEN) es precisamente incorporar sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT) que permitan anticipar la ocurrencia de un fenómeno a partir de información instrumental desplegada en terreno (CREDEN, 2016).

Por último, uno de los ejes de trabajo definidos en el reciente Plan Estratégico Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres 2015-2018 (ONEMI, 2016), es el eje prioritario 2 "Fortalecimiento de Sistemas de Monitoreo y Alerta Temprana". Este plan busca fortalecer los sistemas de monitoreo para detectar oportunamente las amenazas, además de tener un sistema estadístico y de registro centralizado para perfeccionar modelos de pronóstico. Se consideran 2 acciones estratégicas orientadas a (1) fortalecer sistemas de monitoreo y SMATs que operen de manera continua, y (2) velar por la asignación financiera necesaria para el financiamiento de este fortalecimiento. Lamentablemente, en una reciente modificación se suprimió la meta de asegurar el financiamiento del plan de fortalecimiento del 50% de los organismos de monitoreo y alerta a Diciembre de 2018, dejándose solo informes de iniciativas de fortalecimiento dirigidos a la DIPRES[6], sin clarificar si habrá financiamiento de SMATs. Es importante notar que la implementación del plan estratégico requiere del desarrollo de sistemas de monitoreo y de un capital humano especializado capaz de mantener y utilizar los datos de forma correcta. Esto implica la necesidad de invertir también en formación y retención de profesionales especialistas para abordar estas tareas.

Los SMATs pueden resultar bastante costosos, y hasta ahora no ha existido un esfuerzo contundente por comprometer financiamiento para su desarrollo, implementación y mantenimiento. Para abordar los desafíos del país en temas de resiliencia y sustentabilidad, se hace necesario, sin embargo, contar con sistemas de alerta y monitoreo robustos, económicos, confiables, y de fácil operación y mantenimiento. Los esfuerzos en este sentido deben ser potenciados para al corto plazo poder contar con la experiencia suficiente como para desarrollar un plan de consolidación de SMATs en aquellas cuencas y localidades más expuestas a los efectos de aluviones e inundaciones.

4. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO PARA SISTEMAS DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA

La tecnología para implementar SMATs robustos, económicos, confiables y de fácil operación es son una realidad. A modo de ejemplo recientemente tomó lugar un esfuerzo colaborativo en la cuenca de la Quebrada de Ramón, entre el Laboratorio de Tecnologías Inalámbricas de la Pontificia Universidad Católica de Chile (LatinaUC), el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la misma casa de estudios,el Instituto Nacional de Hidráulica del MOP, y CIGIDEN.. En esta cuenca se han desplegado una serie de microestaciones hidrometeorológicas (Figura 8) que conforman una red inalámbrica de sensores esquematizada en la Figura 9, la cual proporciona datos en tiempo real para operar un SMAT. Dada su distribución espacial, estas microestaciones permiten una estimación precisa de la elevación de la isoterma 0°C y su dinámica temporal, así como de la magnitud y comportamiento espacial de la precipitación. La significancia de esta capacidad de la red de monitoreo se ilustra en la Figura 10, la cual compara las áreas aportantes de escorrentía directa cuando la isoterma 0°C se ubica aproximadamente a los 3.500 msnm (tormenta cálida, el area total de la cuenca capta agua líquida que escurre inmediatamente) y a los 2.000 msnm (tormenta con temperatura típica de invierno, el 50% de la cuenca capta agua líquida que escurre, el restante 50% es precipitación en forma de nieve que no escurre inmediatamente). Por lo tanto, la medición precisa de la ubicación de la isoterma 0°C es crucial.

Figura 8. Ejemplos de micro-estaciones meteorológicas desplegadas en la Quebrada de Ramón, Región Metropolitana, instaladas a elevaciones de (a) 878 msnm, (b) 1.338 m snm y (c) 2.627 m snm.

Fuente: Laboratorio de Tecnologías Inalámbricas UC

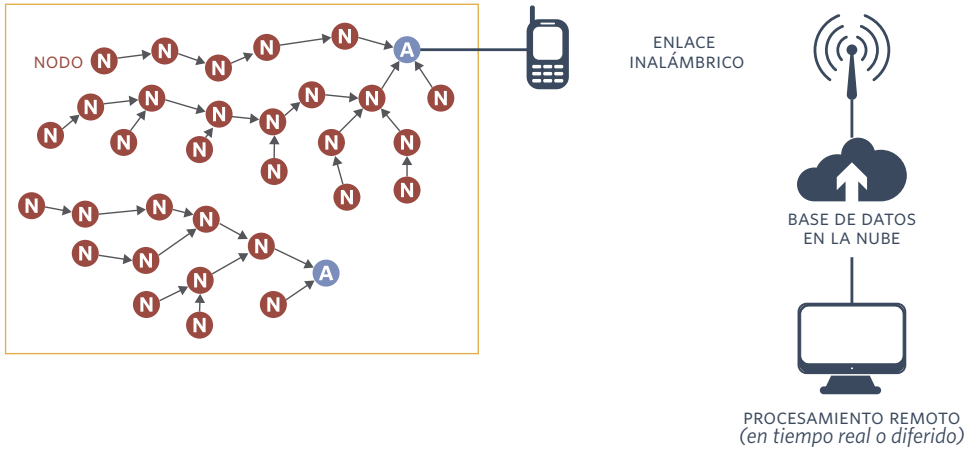

Figura 9. Representación de la tecnología de redes inalámbricas de sensores. Los distintos sensores corresponden a nodos dentro de una red, a través de la cual se transfiere información hacia un nodo acumulador que sube la información a una base de datos en la nube. Esta base de datos puede ser consultada en tiempo real para la operación de un Sistema de Monitoreo y Alerta Temprana (SMAT), o en general para la obtención de datos.

Fuente: Laboratorio de Tecnologías Inalámbricas UC.

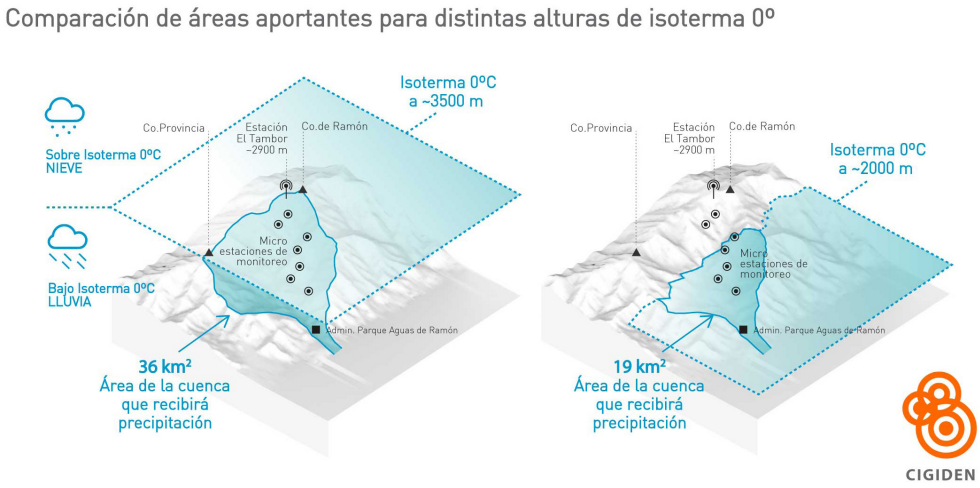

Figura 10. Monitoreo de eventos hidroclimáticos en la pre-cordillera de Santiago, y elevación de la isoterma 0°C como factor fundamental en la generación de eventos hidrometeorológicos extremos e inundaciones en la Quebrada de Ramón.

Fuente: CIGIDEN (2016).

Las microestaciones que conforman este sistema de monitoreo están diseñadas para desplegarse donde se genera la amenaza, y no necesariamente donde se manifiesta el riesgo con los correspondientes impactos. Por tal motivo son livianas, de rápida instalación, y acondicionadas para su instalación en distintas condiciones topográficas y superficies; adicionalmente están diseñados para conectarse en red con otras microestaciones, hacer uso de redes móviles o contar con conexión satelital, lo que ofrece una amplia posibilidad de adaptación al entorno en que se encuentren. Todas estas características las diferencian de estaciones tradicionales no acondicionadas para zonas remotas, de alto costo de construcción, instalación, operación y mantención.

4.1 RECOMENDACIONES PARA UN SISTEMA DE MONITOREO Y ALERTA TEMPRANA DE CRECIDAS.

A partir de lo analizado en el presente documento, y dada la importancia de tener un mejor manejo en eventos de origen hidrometeorológico que involucran riesgo para el territorio nacional, se considera esencial contar con SMATs en cuencas expuestas a los efectos de inundaciones y aluviones. A continuación, presentamos las principales acciones a tomar en el desarrollo de estos sistemas:

A. Monitoreo de variables hidrometeorológicas

Los lugares idóneos para implementar un sistema de monitoreo y alerta basado en el registro y transmisión en línea de información hidrometeorológica como el presentado, son aquellos sujetos a crecidas rápidas detonadas por la concurrencia de elevadas precipitaciones y altas temperaturas. Ejemplos de estos lugares son los ubicados en sectores precordilleranos o de topografía compleja, con cuencas aportantes de alta pendiente que cubren en poca área un rango elevado de elevaciones (600 - 4.000 m aproximadamente). En particular son de interés las cuencas que desembocan en sectores urbanizados o con asentamientos humanos históricamente afectados por inundaciones y aluviones. Ejemplos de estas ubicaciones son la cuenca del río Salado en la Región de Atacama, las distintas quebradas cercanas a la ciudad de Antofagasta, las cuencas precordilleranas en el sector de El Arrayán, Lo Cañas, Las Vertientes, El Manzano, y las quebradas de Macul y Ramón en la Región Metropolitana, y la cuenca del río Las Minas en Punta Arenas.

En estos lugares se debe implementar una cantidad de micro-estaciones que permita identificar la ubicación de la isoterma 0°C y caracterizar la distribución espacial de la pre-

cipitación y su magnitud. Si bien el número y ubicación definitiva de las estaciones dependerá de las condiciones locales, se propone desplegar estaciones meteorológicas sobre la cota 600 msnm, con una densidad de al menos 1 estación por cada 5 km^2, y con al menos 1 estación cada 200 m de elevación.

Adicional al monitoreo meteorológico, es altamente recomendable contar con estaciones fluviométricas o de aforo localizadas en distintos puntos de la red de drenaje, particularmente en los cauces tributarios principales, complementadas con mediciones de transporte de sedimentos y granulometría. Esta información de caudales sirve para la construcción de modelos hidrológicos/hidráulicos y de pronóstico, y eventualmente puede complementar los registros meteorológicos usados en la detonación de una alarma o alerta temprana.

Finalmente, cabe destacar la importancia que los sistemas de monitoreo que se instalen en terreno cuenten con una dotación de personal y fondos de mantenimiento operativo suficientes para garantizar que el sistema de monitoreo esté reportando confiablemente cuando se presenten las amenazas hidrometeorológicas.

B. Creación y fortalecimiento de las capacidades de respuesta temprana basadas en sistemas de monitoreo

El desarrollo de un plan estratégico enfocado en disminuir el riesgo, requiere contar con un capital humano avanzado que sea capaz de generar y utilizar información a partir de los datos hidrometeorológicos levantados por redes de monitoreo. De esta manera se puede asesorar a las autoridades con insumos claros, y con la correspondiente incertidumbre bien caracterizada, para responder de forma temprana e informada frente a situaciones de riesgo. Del mismo modo, la disponibilidad de financiamiento y la dispersión de competencias en relación a la gestión del agua, son una brecha que debe abordarse.

Las recomendaciones entregadas en el informe CREDEN proponen un camino para lograr este objetivo. Elementos esenciales de esta hoja de ruta son la generación de incentivos para aumentar la cantidad de personas calificadas que se dediquen a I+D+i (Investigación, Desarrollo e innovación), y la formación de capital humano avanzado mediante programas de postgrados especializados, y convenios con universidades e instituciones de investigación internacional. Además, es necesario fomentar el financiamiento en investigación y desarrollo de nuevas tecnologías, o la aplicación de las ya existentes en nuevos sistemas de monitoreo. Así, será posible que el capital humano capacitado pueda desarrollar y ejecutar sus conocimientos en la creación de SMATs.

C. Coordinación inter-institucional

Además del mejoramiento de las capacidades de monitoreo y predicción, así como del capital humano asociado, es importante que el país avance hacia un nuevo modelo de coordinación entre las instituciones que permita contar con herramientas efectivas de toma de decisión frente a eventos hidrometeorológicos extremos, de manera de integrar el análisis de riesgo en los instrumentos de planificación territorial, y potenciar el desarrollo, implementación y correcta operación de SMATs. Junto al análisis de riesgo otras dimensiones deben abordarse conjunta y coordinadamente, como el desarrollo sustentable y el cambio global, puesto que se debe velar por lograr diagnósticos y soluciones que integren todas estas temáticas, en vez de abordarlas separadamente. Solo así habrá una capacidad real de adaptación continua, a la vez que se implementa una visión de planificación de largo plazo en el uso del agua y los riesgos asociados. El gran desafío es que esta coordinación efectivamente se plasme en una gestión integrada de cuencas, que involucre no solo la gestión del riesgo, sino también del uso del suelo, agua y otros recursos, a la vez que se preserva y restaura el valor ambiental de los sistemas fluviales y naturales en general.

5. CONCLUSIONES

Chile es un país expuesto a amenazas de origen natural, en el que las inundaciones, remociones en masa, y aluviones son los eventos más frecuentes en el territorio. La frecuencia e intensidad de estos eventos podría aumentar en el futuro producto del cambio climático, particularmente en cuencas de relieve complejo y precordilleranas, donde la ubicación de la isoterma 0°C concurrente con la precipitación es clave en la ocurrencia y magnitud de las crecidas que se originan.

La gestión de estos eventos para reducir el riesgo asociado requiere de medidas estructurales y no estructurales, destacando entre estas últimas los sistemas de monitoreo y alerta temprana (SMAT); éstos permiten la anticipación, acciones preventivas conducentes a salvar vidas y minimizar los impactos, y la correcta toma de decisiones antes y durante el desarrollo de las emergencias. Estos sistemas utilizan sensores inalámbricos con conexión a redes móviles o satelitales, desplegados donde se originan los eventos de carácter hidrometeorológico, y no donde estos se manifiestan. Por lo tanto, permiten anticipar con suficiente tiempo la ocurrencia de estos eventos y comenzar a reaccionar antes de que el aluvión o inundación se origine. Estos sistemas deben integrar modelos de predicción hidrológicos e hidráulicos confiables

y robustos, estando su implementación supeditada no sólo a la instalación de equipos de monitoreo y la transmisión de datos, sino también a un mantenimiento y operación adecuados, efectuado por parte de un equipo especializado y coordinado al alero de una institucionalidad especialmente preparada para este propósito.

La tecnología base de los SMAT existe en Chile y ya ha sido implementada de manera experimental en la cuenca de la Quebrada de Ramón. Es esencial entonces expandir esta experiencia inicial a otras cuencas con características físicas y climáticas distintas, de manera de transitar a un estado de madurez en lo referido a SMATs operativos en Chile. Desgraciadamente, en la actualidad no hay claridad con respecto a las responsabilidades institucionales en el monitoreo de inundaciones y aluviones. Por el contrario, las medidas se han tomado durante el evento mismo o posteriores a él, existiendo entonces un enfoque más bien de respuesta temprana y no de alerta temprana. Se hace crucial un cambio de paradigma, de manera de avanzar en la institucionalidad y la gestión preventiva del riesgo. Sólo así se podrá desarrollar una política de largo plazo que promueva la implementación y operación de los SMATs.

NOTAS AL FINAL

[1] EM-DAT: Emergency Events Database. https://www.emdat.be/. Según EM-DAT, un desastre o evento cumple con al menos uno de los siguientes criterios: 10 o más personas fallecidas, 100 o más personas afectadas, el país declaró estado de emergencia o recurrió a ayuda internacional.

[2] ONEMI. https://www.onemi.gov.cl/presentacion/

[3] CAT - ONEMI. https://www.onemi.gov.cl/cat/

[4] Estados de alerta del Sistema Nacional de Protección Civil. https://www.onemi.gov.cl/tipos-de-alertas/

[5] https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_main/dgasat_main.htm

[6] DIPRES: Dirección de Presupuestos. Ministerio de Hacienda

BIBLIOGRAFÍA

Biblioteca del Congreso Nacional de Chile – BCN (2015). *Sistema Integrado de Información Territorial. Zona de riesgo en la Quebrada de Macul, Comuna de la Florida*. Disponible en: https://www.bcn.cl/siit/actualidad-territorial/zona-de-riesgo-en-la-quebrada-de-macul/document_view2

Centre for Research on the Epidemiology of Disasters – CRED (2019). *Emergency Events Database - EM-DAT*. Disponible en: https://www.emdat.be/

CIGIDEN. 2016. *Monitoreo de eventos hidroclimáticos en la pre-cordillera de Santiago.*

Comisión Nacional para la Resiliencia Frente a Desastres de Origen Natural – CREDEN (2016). *Hacia un Chile Resiliente Frente a Desastres: Una Oportunidad*. Disponible en: http://www.cnid.cl/home-cnid/que-hacemos-en-el-cnid/orientaciones-estrategicas-periodo-2014-2018/comision_desastres_naturales/

Garreaud, R. (2013). Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology, 14*(5), 1515-1534. https://doi.org/10.1175/JHM-D-12-0135.1

Gironás, J., Sandoval, J. (2017) *Riesgo de Origen Hidrometeorológico en la Ciudad de Santiago*. Santiago Resiliente, mayo de 2017.

Gironás, J., Bunster, T., Chadwick, C., Fernández, B. (2020). *Floods. Water Resources of Chile*. Edited by Fernández, B. and Gironás, J. World Water Resources Collection, Springer International Publishing. ISBN 978-3-030-56900-6.

Ibañez M, Gironás J,Oberli C, Chadwick C, Garreaud RD. (2020). Daily and seasonal variation of the surface temperature lapse rate and 0°C isotherm height in the western subtropical Andes. *Int J Climatol*. 2020;1–20. https://doi.org/10.1002/joc.6743

National Research Council (2013). *Levees and the National Flood Insurance Program: Improving Policies and Practices*. Washington, DC: The National Academies Press. https://doi.org/10.17226/18309

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública - ONEMI (2017). *Plan específico de emergencia por variable de riesgo: remoción en masa*. Disponible en: https://www.onemi.gov.cl/wp-content/uploads/2018/09/PEEVR_REMOCION-EN-MASA_01.02.18.pdf

Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior y Seguridad Pública - ONEMI (2016). *Plan Estratégico Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres 2015-2018*. Disponible en: https://siac.onemi.gov.cl/documentos/PLAN_ESTRATEGICO_BAJA.pdf

Servicio Nacional de Geología y Minería - SERNAGEOMIN (2015). *Primer Catastro Nacional Desastres Naturales*. Disponible en: http://sitiohistorico.sernageomin.cl/pdf/presentaciones-geo/Primer-Catastro-Nacional-Desastres-Naturales.pdf

Sociedad Nacional de Minería de Chile – SONAMI (2016). *25M Atacama: Aluvión en el desierto*. Disponible en: https://www.sonami.cl/v2/publicaciones/25-m-atacama-aluvion-en-el-desierto/

United Nations Office for Disaster Risk Reduction – UNDRR (2015). *Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030)*. Disponible en: https://www.preventionweb.net/files/resolutions/N1516720.pdf

Wilcox, A.C., Escauriaza, C., Agredano, R., Mignot, E., Zuazo, V., Otarola, S., Castro, L., Gironas, J., Cienfuegos, R. and Mao, L. (2016). An integrated analysis of the March 2015 Atacama floods. *Geophysical Research Letters, 43*(15), 8035-8043.

CIGIDEN

CONICYT
Ministerio de Educación

Gobierno de Chile

A. SOBRE CIGIDEN

CIGIDEN es un centro de excelencia FONDAP-CONICYT creado en 2011 e integrado por cuatro universidades de Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad Técnica Federico Santa María, Universidad Andrés Bello y Universidad Católica de Norte, más la colaboración de investigadores de otras instituciones académicas y gubernamentales tanto nacionales como internacionales.

Investigadores de diferentes disciplinas —ciencias de la tierra, ingenierías, ciencias sociales, geografía, economía, diseño, arquitectura, urbanismo y comunicaciones—, trabajan en CIGIDEN para generar conocimiento que permita evitar que los eventos extremos de la naturaleza se transformen en desastres.

Esta mirada interdisciplinaria ha promovido una profunda transformación académica, avanzando desde el estudio de las amenazas naturales y la respuesta de emergencia, hacia una perspectiva integral centrada en la reducción del riesgo de desastres y la construcción de resiliencia.

Universidad Andrés Bello

UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

CIGIDEN, es una institución de excelencia FONDAP-CONICYT creada en 2011 e integrada por cuatro universidades chilenas. La Serie Policy Papers CIGIDEN tiene como objetivo traducir la investigación que se realiza en el centro, en documentos cortos y direccionados estratégicamente a la política pública, para así posicionar la temática de gestión del riesgo en el mundo de los tomadores de decisiones.

CIGIDEN

www.cigiden.cl