

ANÁLISIS DE PRECIPITACIONES ESTIVALES CAUSANTES DE REMOCIONES EN MASA PARA LOS ANDES DE CHILE CENTRAL

Sergio Carvajal-Arias^{1,2*}, Luis F. Robledo¹, Xaviera Palma-Castro² y Ignacio Carvajal-Arias²

RESUMEN

Las precipitaciones en Chile han sido uno de los principales factores desencadenantes de remociones en masa en su historia. Su ocurrencia ha dejado más de un centenar de personas fallecidas y daños a la infraestructura urbana. Ante este escenario, nuestra investigación da a conocer nuevos antecedentes sobre la distribución espacio-temporal de remociones en masa en San José de Maipo, Chile Central, así como también sus umbrales críticos por precipitación para los meses de enero a junio entre los años 2012 y 2017, periodo donde se identificaron 20 remociones en masa distribuidas entre las estaciones de verano (45%) y otoño (55%). Como principal resultado se estableció que la probabilidad de ocurrencia de una remoción en masa es mayor al 50% si existe una acumulación de 10 mm en menos de 24 hrs. Conforme a esto, concluimos que existe un mayor control de las lluvias de corto plazo para la generación de remociones en el periodo indicado. En cuanto a su distribución espacial, se evidencian tendencias de generación en zonas de laderas modificadas estructuralmente, acumulándose el material transportado al pie de las mismas. Adicionalmente, la metodología propuesta resultó ser eficaz para la estimación de umbrales en una región con registros pluviométricos escasos.

PALABRAS CLAVES

Remoción en masa; Estival; Umbral crítico; Lluvia acumulada; Lluvia acumulada antecedente; Chile

ANALYSIS OF ESTIVAL RAINFALL CAUSING LANDSLIDE IN THE CENTRAL ANDES OF CHILE

ABSTRACT

Precipitation in Chile has been one of the main triggers of landslides in its history. Their occurrence has left more than a hundred people dead and damage to urban infrastructure. Given this scenario, our research provides new information on the spatio-temporal distribution of landslide in San Jose de Maipo, Central Chile, as well as its critical thresholds for precipitation for the months of January to June between 2012 and 2017, a period where 20 landslides were identified, distributed between the summer (45%) and autumn (55%) seasons. As a main result, it was established that the probability of occurrence of a landslide is greater than 50% if there is an accumulation of 10 mm in less than 24 hrs. According to this, we conclude that there is a greater control of short-term rainfall for the generation of landslides in the indicated period. As for their spatial distribution, there was evidence of generation tendencies in areas of structurally modified slopes, with the accumulation of transported material at the foot of the slopes. In addition, the proposed methodology proved to be effective for the estimation of thresholds in a region with scarce pluviometric records.

KEYWORDS

Landslide; Summer season; Critical threshold; Accumulated rain; Antecedent accumulated rain; Chile

1. Universidad Andrés Bello,
Facultad Ingeniería, Santiago,
Chile.

2. Universidad de Chile,
Facultad de Ciencias Físicas y
Matemáticas, Santiago, Chile.

*Autor de correspondencia:
sergiocarvajal@ug.uchile.cl

DOI:
[https://doi.org/10.55467/
reder.v10i1.213](https://doi.org/10.55467/reder.v10i1.213)

RECIBIDO
5 de agosto de 2024

ACEPTADO
7 de agosto de 2024

PUBLICADO
1 de enero de 2026

Formato cita
Recomendada (APA):
Carvajal-Arias, S., Robledo,
L.F., Palma-Castro, X. &
Carvajal-Arias, I. (2026).
Análisis de Precipitaciones
Estivales Causantes de
Remociones en Masa
para Los Andes de Chile
Central. *Revista de Estudios
Latinoamericanos sobre
Reducción del Riesgo de
Desastres REDER*, 10(1),
148-162. [https://doi.org/10.55467/
reder.v10i1.213](https://doi.org/10.55467/reder.v10i1.213)



Todos los artículos
publicados en REDER siguen
una política de Acceso
Abierto y se respaldan en una
Licencia CreativeCommons
Atribución-NoComercial 4.0
Internacional.

*Revista de Estudios
Latinoamericanos sobre
Reducción del Riesgo de
Desastres (REDER)*

INTRODUCCIÓN

El territorio chileno ha experimentado en múltiples ocasiones desastres de diferente índole. Dentro de éstos, eventos de remociones en masa han afectado gravemente a la población en cuanto a pérdidas de vida e infraestructura. Solo en la zona oriente del Gran Santiago, desde 1950 hasta el año 2017, se tiene registro de la ocurrencia de más de un centenar de remociones en masa (Oficina Nacional de Emergencia del Ministerio del Interior (ONEMI), 2017), siendo San José de Maipo la principal localidad afectada (Figura 1). Sus impactos más frecuentes se relacionan con contaminación de aguas, destrucción de viviendas y bloqueos de vías.

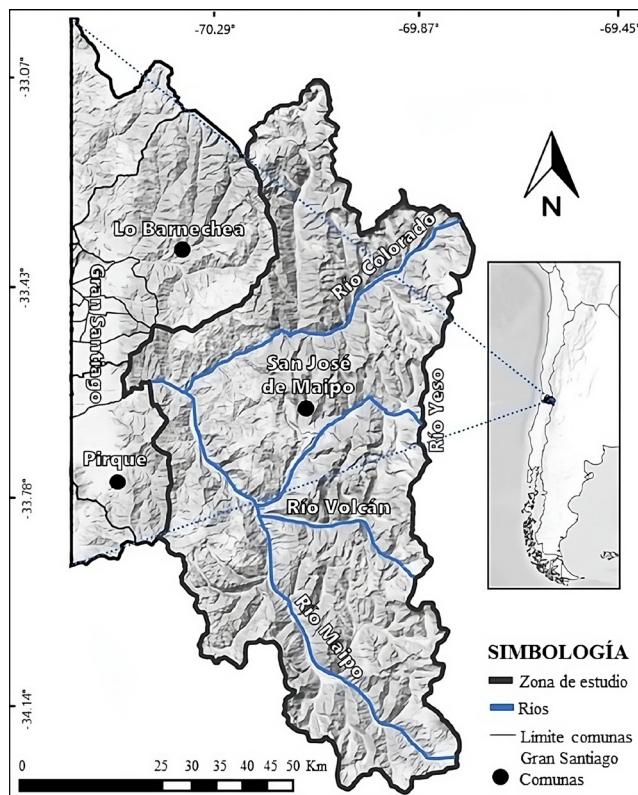


Figura 1. Mapa de relieve de la zona de estudio

Fuente: Autores, 2026.

Para mitigar los daños generados por estos eventos, los esfuerzos científicos se han centrado en estimar umbrales críticos de lluvia que permitan anticipar su desencadenamiento ante la presencia de un sistema frontal (Sepúlveda et al., 2006a; Sepúlveda et al., 2006b; Sepúlveda & Padilla, 2008; Mergili et al., 2015; Ramos et al., 2015; Albornoz, 2018). Un umbral corresponde al punto en el cual existe un cambio significativo en la propiedad o estado de un proceso. Para el caso particular de las remociones en masa, éste puede ser definido como el valor mínimo o máximo de una cantidad de lluvia requerida para iniciar un proceso de este tipo (Reichenbach et al., 1998; Guzzetti et al., 2008).

En orden ascendente de tiempo, los primeros trabajos en esta área datan de la década de 1970 (Onodera et al., 1974; Campbell, 1975). En 1974, Onodera et al. (1974) propone para la ciudad de Chiba, Japón, un umbral crítico de 8 mm/hrs para el desencadenamiento de remociones en masa, donde tal valor fue establecido relacionando intensidades de lluvias máximas por hora con el registro de remociones en masa. Por su parte, Campbell (1975) para la ciudad de California, Estados Unidos, logró establecer que los orígenes de las remociones en masa en la región no solo tenían relación con la cantidad de lluvia acumulada (LA) caída durante o inmediatamente previo el inicio del proceso, sino que además a la lluvia acumulada antecedente (LAA). Este último concepto hace referencia a “(...) la cantidad de lluvia caída los días precedentes a los considerados en la lluvia acumulada” (Pradenas, 2014, 6).

Durante la década de 1980, un estudio realizado en Hong Kong (Brand et al., 1984), logró estimar el umbral crítico de lluvia para el inicio de remociones en masa en esta región, estableciendo

dicho valor en 70 mm/hrs (Brand et al., 1984). Además, se identificó que en gran medida las remociones en masa en esta zona dependían de la magnitud e intensidad de las lluvias de corto periodo y que los patrones anteriores no tenían mayor significancia en su desarrollo (Brand et al., 1984).

Por su parte, Guzzetti et al. (2007) realizó una completa revisión a las investigaciones previas de forma global, proponiendo nuevos umbrales de lluvia para la región centro-sur de Europa, abarcando con ello una extensión de terreno más amplia que estudios anteriores. Su metodología se basó en graficar valores de intensidad-duración de eventos de lluvia para luego inferir mediante estadística bayesiana las curvas de umbrales críticos (Guzzetti et al., 2007). Sus resultados permitieron establecer que para climas de montaña se necesita de una menor intensidad de lluvia para gatillar remociones en masa que en una zona caracterizada por climas mediterráneos (Guzzetti et al., 2007).

Dentro de los trabajos más recientes, Mergili et al. (2015) ofrece una comparación de los eventos de remoción en masa acontecidos en áreas contrastantes andinas, tomando como ejemplo distintas regiones de Colombia y Argentina (Mergili et al., 2015). En éste, se describe como las remociones en masa pueden estar controlados por el fenómeno de La Niña (Colombia) y El Niño (Argentina), y las implicancias socioeconómicas que pueden generar al tener ocurrencia en zonas pobladas, siendo una amenaza para las vías de comunicación, infraestructuras y vidas humanas (Mergili et al., 2015).

En el caso particular chileno, existen estudios que relacionan eventos de lluvia con remociones en masa en distintas regiones y localidades del país. Sepúlveda et al. (2006a) analizó flujos de detritos en las ciudades de Antofagasta y Santiago (norte y centro de Chile) y en un área rural cerca del lago Ranco en el centro-sur de Chile en 1991, 1993 y 2004, respectivamente. En esta investigación, al igual que lo propuesto por Mergili et al. (2015), se evidenció una clara relación entre la generación de flujos de detritos y el fenómeno de El Niño para las ciudades de Antofagasta y Santiago.

Por su parte, Sepúlveda et al. (2006b) y Sepúlveda & Padilla (2008) centraron su investigación en la ciudad de Santiago, dejando a disposición una completa evaluación de la peligrosidad por remociones en masa de la zona oriente de la ciudad, incluyendo la estimación de umbrales críticos, caracterización geotécnica de roca y suelo, y el desarrollo de una metodología de evaluación de la amenaza adaptada a las condiciones regionales. La metodología utilizada corresponde a un estudio estadístico multivariante basado en el método de regresión logística. Sus resultados muestran una fuerte relevancia de la precipitación el día del evento de remoción en masa sobre los demás factores.

Otros estudios se concentran en la Región del Biobío (Chile centro-sur), principalmente en las ciudades de Concepción (Naranjo et al., 2006; Pradenas, 2014; Bravo et al., 2018) y Talcahuano (López, 2015). En el caso de la provincia de Concepción, se destaca que la condición natural del suelo asociado a un material meteorizado de baja cohesión sumado a intensas precipitaciones en pocas horas, son los principales factores que influyen en la ocurrencia de remociones en masa (Naranjo et al., 2006). El umbral crítico establecido corresponde a precipitaciones acumuladas mayores a 100 mm en un periodo de hasta 10 días, lo cual fue estimado a partir de 99 eventos de remoción en masa ocurridos en la provincia de Concepción entre los años 1960 y 2015 (Bravo et al., 2018).

Para el caso particular de laderas urbanizadas en la ciudad de Talcahuano, López (2015) estimó que “(...) la precipitación concentrada en un tiempo menor a 4 hrs sería el umbral crítico de desestabilización, con intensidades del orden de 26.5 mm” (López, 2015, 93), parámetro cuyo valor fue generado a partir del establecimiento de relaciones intensidad-duración de registros históricos de precipitación asociados al desencadenamiento de remociones en masa entre 1990-1999 y 2000-2013 (López, 2015).

Es importante destacar que, tanto a nivel nacional como internacional, no existe una metodología o un proceso estándar para la estimación de umbrales críticos de lluvias asociado a remociones en masa. En ese sentido, Segoni et al. (2018) destaca que la mayoría de los trabajos carecen de una descripción clara de la metodología utilizada. Conforme a esto y en conocimiento de los avances actuales, se logró identificar dos áreas donde nuestro trabajo busca generar nuevos

antecedentes. En primer lugar, realizar una estimación de umbrales críticos para los meses de otoño y verano en un ambiente cordillerano y, además, proponer una metodología adaptada a la información local disponible para la estimación de dichos umbrales, buscando disminuir o eliminar los principales gaps identificados en la literatura (Segoni et al., 2018).

ZONA DE ESTUDIO

Ubicación, geología y geomorfología local

La comuna de San José de Maipo se ubica en el sector oriente de la Región Metropolitana, en plena Cordillera Principal de Chile Central, abarcando un área aproximada de 500.000 ha (Figura 1). Su geomorfología es del tipo cordillerano compuesta por múltiples valles fluvioglaciares y altos topográficos. De estos últimos nacen importantes cursos de agua como el río Maipo y sus tributarios; río Volcán, Yeso y Colorado, quienes suministran más del 70% del recurso hídrico (Dirección General de Aguas (DGA), 2004) al Gran Santiago, en donde residen más de 7 millones de personas.

Su geología está compuesta principalmente por secuencias de rocas volcánicas y sedimentarias estratificadas, las cuales se encuentran intruidas regularmente por cuerpos intrusivos. Según Alfaro (2022), "las edades de estos depósitos van desde el Jurásico hasta el cuaternario, y la disposición estructural en que se presentan se va haciendo cada vez más compleja hacia el sector occidental" (Alfaro, 2022). Además de lo anterior, destacan múltiples depósitos gravitacionales asociados a procesos de remoción en masa en laderas a lo largo de los principales valles fluvio-glaciares. Para conocer en mayor detalle la geología local de la zona de estudio, se recomienda revisar los trabajos de Thiele (1980) y Charrier (1981).

Clima y precipitaciones históricas

La comuna de San José de Maipo se caracteriza por presentar un clima mediterráneo de carácter templado cálido con una marcada diferencia estacional entre inviernos fríos y períodos estivales secos prolongados (7 a 8 meses del año) (Díaz, 2018). En cuanto a las precipitaciones, para una ventana de tiempo entre 1980 y 2017, la media anual de la comuna alcanza en promedio los 594 mm, siendo los meses más lluviosos junio y julio con montos aproximados de 150 mm/mes (Díaz, 2018). En contraparte, los meses de enero y diciembre son aquellos en donde se registra la menor acumulación de lluvia, alcanzando valores no superiores a los 4 mm/mes (Díaz, 2018).

La evolución histórica de las precipitaciones a lo largo de las últimas dos décadas refleja un notorio descenso en la cantidad de lluvia desde el año 2010 en adelante, pasando de un promedio de 665,9 mm/año durante la década del año 2000, hasta 326,2 mm/año para la década del año 2010, es decir, un déficit de precipitaciones en el orden un 50% (Figura 2).

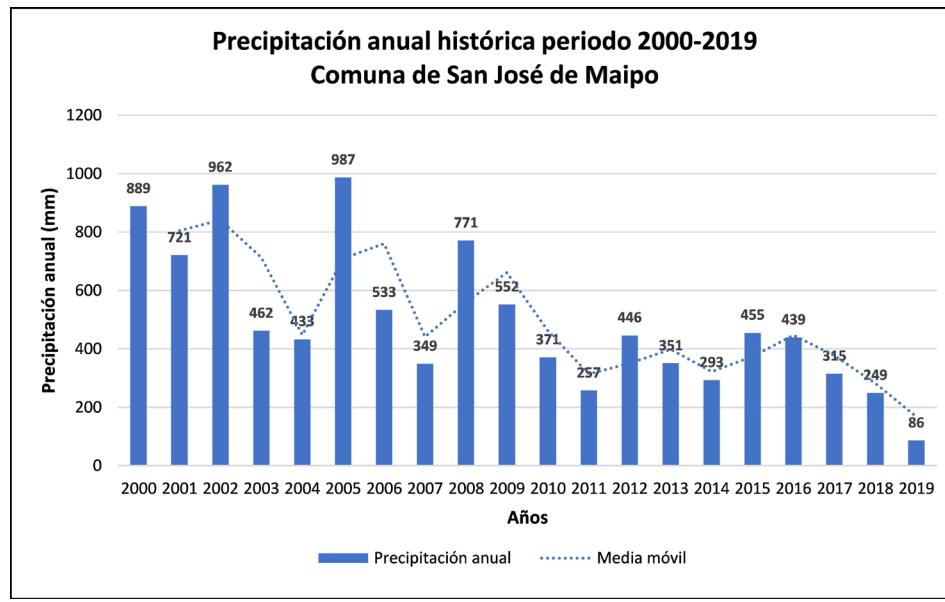


Figura 2. Gráfico que representa la precipitación anual histórica para el periodo 2010-2019 en la comuna de San José de Maipo

Fuente: Autores, 2026, a partir de bases de datos recopiladas desde CR², Universidad de Chile.

Este notorio descenso en las precipitaciones coincide con el periodo de mega-sequía definido por distintos autores para Chile Central. En esta temática, destacan los trabajos de Garreaud et al. (2019), Masotti et al. (2018), González et al. (2018), Garreaud et al. (2017), en donde el primero de ellos discute la mega-sequía desde una perspectiva de la dinámica climática, mientras que los restantes, sus principales impactos en la disponibilidad de agua, la vegetación y los incendios forestales.

Como antecedente general, Garreaud et al. (2019) destaca déficits anuales de precipitaciones para la región de Chile Central en un orden del 25 y el 45% para el periodo entre 2010 y 2018, vinculando dicho fenómeno tanto a la variabilidad natural como el forzamiento antropogénico, siendo la variabilidad natural el componente aparentemente dominante a través de la dinámica oceánica.

En cuanto a los mayores impactos destaca la reducción de caudales en ríos y la disminución del transporte de nutrientes al océano, generando desequilibrios en la ecología costera (Masotti et al., 2018), el aumento sustancial (~60%) del área afectada por incendios forestales (González et al., 2018) y la disminución de la capa de nieve andina, los volúmenes de los embalses y los niveles de agua subterránea en todo el centro de Chile (Garreaud et al., 2017).

METODOLOGÍA

Proveniencia de datos de eventos de remoción en masa

Los registros de eventos de remoción en masa se encuentran disponibles como catastrós en formato digital en las páginas de entidades estatales del Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) (ex ONEMI) y en el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN). El documento base utilizado en este estudio lleva por título “Plan específico de emergencia por variable de riesgo – remoción en masa” (ONEMI, 2017), en el cual se detalla cada uno de los registros de este tipo de eventos a nivel nacional hasta el año 2017 con la siguiente información: región, comuna, tipo de remoción en masa, factor desencadenante, fecha del evento, coordenadas geográficas y cota (m s.n.m).

Selección de eventos de remoción en masa

Para efectos de esta investigación, solo se consideraron los eventos de remoción en masa que cumplían con las siguientes condiciones: ocurrencia en la comuna de San José de Maipo, factor desencadenante asociado a lluvia, conocimiento de la fecha específica del evento (día/mes/año), y distancia entre el punto de inicio de la remoción en masa y una estación meteorológica menor o igual a 8 km (radio de influencia puntual) activa al momento de ocurrencia del evento (Tabla 1).

Nº	Nombre	Altura (msnm)	Ubicación geográfica		Periodo de observación	
			Latitud	Longitud	Inicio	Fin
1	Río Colorado antes Junta Río Olivares	1500	-33.49	-70.1342	01-04-2013	09-03-2018
2	Maítenes Bocatoma	1143	-33.5311	-70.2617	01-02-1988	31-05-2017
3	Río Maipo en El Manzano	850	-33.5939	-70.3792	01-03-2010	09-03-2018
4	La Obra Recinto EMOS	796	-33.5914	-70.4853	01-06-1995	31-05-2017
5	San José de Maipo Retén	943	-33.6361	-70.3531	02-08-1971	31-05-2017
6	Río Maipo en San Alfonso	1092	-33.7347	-70.0008	01-01-2010	28-02-2017
7	San Gabriel	1266	-33.7825	-70.2394	01-12-1977	31-05-2017
8	Río Volcán en Queltehués	1365	-33.8056	-70.2089	01-05-2014	09-03-2018
9	Glaciar San Fco. Aguas Panimavida	2220	-33.8056	-70.068247	28-05-2013	09-03-2018
10	El Yeso Embalse	2475	-33.6767	-70.0886	01-04-1962	31-05-2017

Tabla 1. Estaciones meteorológicas en la comuna de San José de Maipo

Fuente: Autores, 2026, a partir de información recopilada desde CR², Universidad de Chile.

Esta última condición se planteó con el objetivo de lograr estimar la cantidad de lluvia caída previo al desencadenamiento de un evento bajo la actual disponibilidad y distribución de estaciones meteorológicas en el área de estudio. Para el caso de que un registro de remoción en masa cumpliera esta condición para dos o más estaciones meteorológicas (distancia menor o igual a 8 km) se calculó y consideró la media aritmética de la cantidad de lluvia caída registrada entre las distintas estaciones en cuestión. La postulación del punto anterior tiene como referencia el estudio realizado por Pizarro et al. (2003), quien luego de un análisis a cinco técnicas empleadas para la estimación de precipitaciones; Media Aritmética, Polígonos de Thiessen, Isoyetas, Thiessen Modificado e Inverso de la Distancia al Cuadrado, dedujo que para la Cordillera de los Andes era eficaz la aplicación de cualquier método a excepción de esta última (Pizarro et al., 2003), por lo que para efectos de este trabajo se estimó conveniente la utilización de la Media Aritmética, dado su simple empleo y manejo de datos.

Por otro lado, de existir más de un evento con iguales antecedentes, es decir, mismo día de ocurrencia y solo una estación meteorológica de referencia para la obtención de los datos, se consideró solo una de ellas con el objetivo de no sobreestimar un evento de lluvia por la ocurrencia de una o más remociones en masa. Con los filtros antes mencionados, se logró identificar la ocurrencia de 20 procesos de remoción en masa del tipo flujo de detritos y caída de roca (Tabla 2), distribuidos entre los años 2012 y 2017.

Nº de evento	Subcuenca	Tipo de remoción en masa	Fecha de ocurrencia	Consecuencias	Ubicación geográfica		Estación meteorológica
					Latitud	Longitud	
1	Base del Cerro Divisadero	Caída de roca	12-06-2012	Caídas de rocas sobre distintas rutas	-70.3476	-33.6502	3 y 5
2		Caída de roca	13-06-2012		-70.346	-33.645	3 y 5
3		Caída de roca	16-06-2012		-70.2784	-33.7583	6 y 7
4		Caída de roca	17-06-2012		-70.2782	-33.7592	6 y 7
5	San Alfonso y otras cuencas	Flujo	21-01-2013	Incorporación de sedimentos al cauce del río Maipo	-70.2103	-33.5127	2
6		Flujo	21-01-2013		-70.4081	-33.5807	3 y 4
7		Flujo	21-01-2013		-70.3011	-33.7341	6 y 7
8		Flujo	08-02-2013		-70.3006	-33.7339	6 y 7
9	Múltiples microcuenca	Flujo	14-04-2016	Interrupción del suministro de agua potable en Santiago, corte de caminos, destrucción de vivienda y pérdida de vidas humanas	-70.3354	-33.6921	5
10		Flujo	14-04-2016		-70.2039	-33.5105	1 y 2
11		Flujo	15-04-2016		-70.1976	-33.8581	8
12	Estero las Cucas y otras	Flujo	16-04-2016	8 personas fallecidas y 1 desaparecido. Cortes de ruta en varios puntos, daños en la infraestructura pública y privada. Corte masivo del suministro de agua potable	-70.1745	-33.4927	1
13		Flujo	17-04-2016		-70.1411	-33.7361	10
14	Múltiples microcuenca	Flujo	18-04-2016		-70.1285	-33.8221	8 y 9
15		Flujo	18-04-2016		-70.1108	-33.8294	9
16	Más de 15 microcuenca activadas	Flujo	25-02-2017		-70.3498	-33.6567	3 y 5
17		Flujo	25-02-2017		-70.3333	-33.707	5 y 6
18		Flujo	25-02-2017		-70.3006	-33.7339	6 y 7
19	Múltiples microcuenca	Flujo	26-02-2017		-69.9849	-33.8515	9
20		Flujo	26-02-2017		-70.1618	-33.8168	8

Tabla 2. Catastro de remociones en masa gatilladas por eventos de lluvia para la localidad de San José de Maipo

Fuente: Autores, 2026, a partir de datos obtenidos de ONEMI (2017).

Vínculo remoción en masa – estación meteorológica

Para lograr establecer desde que estación meteorológica se debían obtener los registros de lluvia para cada remoción en masa, se elaboró un mapa mediante el software ArcMap 10.7.1 con la localización de ambos elementos y se empleó la herramienta buffer para un radio de 8 km a partir de cada estación pluviométrica. Este trabajo permitió que cada remoción en masa quedara al menos vinculada con una estación meteorológica para su obtención de datos. A la vez, el mapa también fue de utilidad para conocer la distribución espacial de las remociones en masa y su posterior análisis (Figura 3).

Datos de precipitación

Los registros históricos de precipitación contemporánea a los eventos de remoción en masa, provienen de los recursos que ofrece el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) de la Universidad de Chile, quienes periódicamente almacenan en bases de datos registros de estaciones pluviométricas pertenecientes a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y de Dirección General de Aguas (DGA).

En el Apéndice A.1 se detalla los registros de precipitación para cada uno de los eventos de remoción en masa de la Tabla 2.

Estimación de umbrales críticos

Para la estimación de los umbrales críticos se utilizaron los valores de precipitación de la Tabla en Apéndice A.1, de tal forma de expresar en gráficos de Hexbin la lluvia acumulada (o de corto plazo) de 1, 3, 5 y 7 días, y la lluvia acumulada antecedente (o de largo plazo) de 5, 10, 15, 30 días para cada remoción en masa. Un gráfico de Hexbin es un tipo de visualización de datos utilizado para representar la distribución de puntos en un plano. A diferencia de los gráficos de dispersión, en lugar de representar cada uno de los puntos de forma individual, los puntos se agrupan en hexágonos regulares. La densidad de puntos en cada hexágono se representa mediante una escala de colores, permitiendo visualizar las zonas donde hay mayor o menor concentración de datos. Para su construcción, se utilizó el ambiente de programación R en ggplot2.

Con las gráficas disponibles, se estableció de forma visual el polígono de mayor concentración de datos, siendo sus límites, los umbrales críticos para dicha combinación de precipitación (Figura

4). Con los umbrales críticos definidos, se calculó la probabilidad de ocurrencia (Ecuación 1) de remociones en masa para cada combinación de lluvia mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 1

Probabilidad de ocurrencia = (Número de eventos dentro del polígono x 100)/ Número total de eventos)

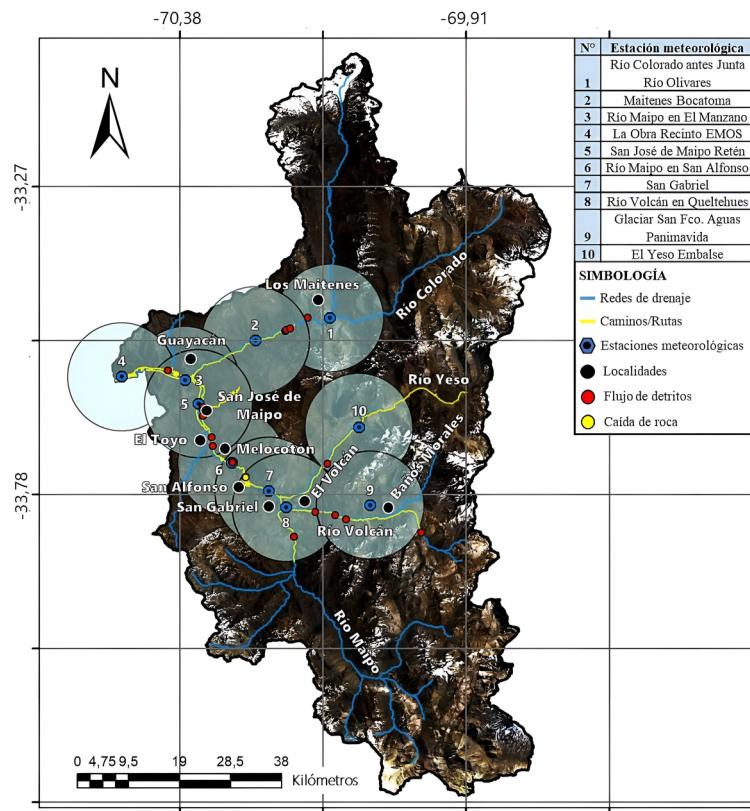


Figura 3. Mapa de los eventos de remoción en masa acontecidos en la localidad de San José de Maipo para el período entre 2012 y 2017

Fuente: Autores, 2026, a partir de Tablas 1 y 2.

Nota: Círculos alrededor de estaciones meteorológicas representan su radio de influencia puntual de 8 km.

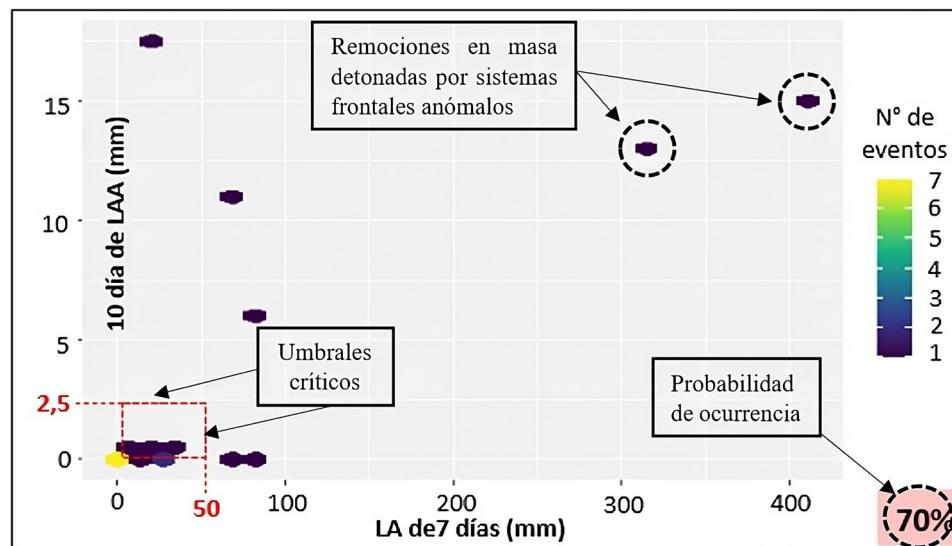


Figura 4. Ejemplo de metodología utilizada para la estimación de umbrales críticos mediante comparación de LA v/s LAA

Fuente: Autores, 2026.

En las gráficas, las líneas segmentadas representan los umbrales críticos estimados, mientras que los hexágonos, los eventos de remoción en masa. En la esquina inferior derecha, se encuentra la probabilidad de ocurrencia estimada.

En cuanto a los plazos propuestos de comparación, se consideró que el análisis en una ventana de tiempo de uno a 30 días es lo suficientemente amplia para estimar la influencia que tiene una lluvia a corto y largo plazo en la ocurrencia de remociones en masa. Por otro lado, se planteó útil utilizar la escala de trabajo en días, considerando que con frecuencia los datos de precipitación se almacenan bajo este intervalo de tiempo, sobre todo cuando se trata de información de años o décadas anteriores. Por lo tanto, y tal como destaca Pradenas (2014), esta metodología resulta ser la más factible y rigurosa de aplicar para combinaciones de lluvia diarias (Pradenas, 2014).

RESULTADOS

Distribución espacio - temporal de remociones en masa

Del total de los eventos de remociones en masa (20), existe una clara tendencia a su generación en el valle del río Maipo, concentrando más del 50% de este tipo de eventos. La ribera y terrazas de este río son lugar de asentamiento de distintas localidades, entre ellas, San José de Maipo, El Toyo, Melocotón, San Alfonso y San Gabriel (Figura 3). Los demás registros lo completan los valles del río Colorado (20%), río Volcán (20%) y río Yeso (5%).

Por otro lado, el tipo de remoción en masa de mayor ocurrencia corresponde a eventos tipo flujo (80%), seguidos de caídas de roca (20%). En tanto, su distribución temporal marca una clara tendencia hacia los meses 'secos', es decir meses de otoño (55%) y verano (45%).

Umbrales críticos de lluvia para temporada verano-otoño

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a los umbrales críticos de lluvia para la temporada de verano-otoño asociados al desencadenamiento de remociones en masa en la comuna de San José de Maipo durante los años 2012 y 2017.

Las Figuras 5, 6, 7 y 8 corresponden a la representación gráfica de los valores de precipitación acumulada para las distintas combinaciones de lluvia que dieron origen a eventos de remoción en masa (Apéndice A.1).

En los gráficos de la Figura 5, existe una clara tendencia de acumulación de datos en el origen y a lo largo del eje de las abscisas, el cual es representado por la cantidad de lluvia acumulada el mismo día de ocurrencia de los procesos de remoción en masa. Para estas combinaciones se estimó un umbral de lluvia máximo de 10 mm para el día de ocurrencia del evento y 50 mm si se consideran los siguientes 5 días (Figura 5A), 10 días (Figura 5B), 15 días (Figura 5C) y 30 días (Figura 5D). Ante estas condiciones, la probabilidad de ocurrencia de un evento de remoción en masa es igual al 55% para las combinaciones de lluvia a corto y mediano plazo (de 1 a 15 días), e igual al 50% para la combinación de lluvia que considera 30 días de acumulación.

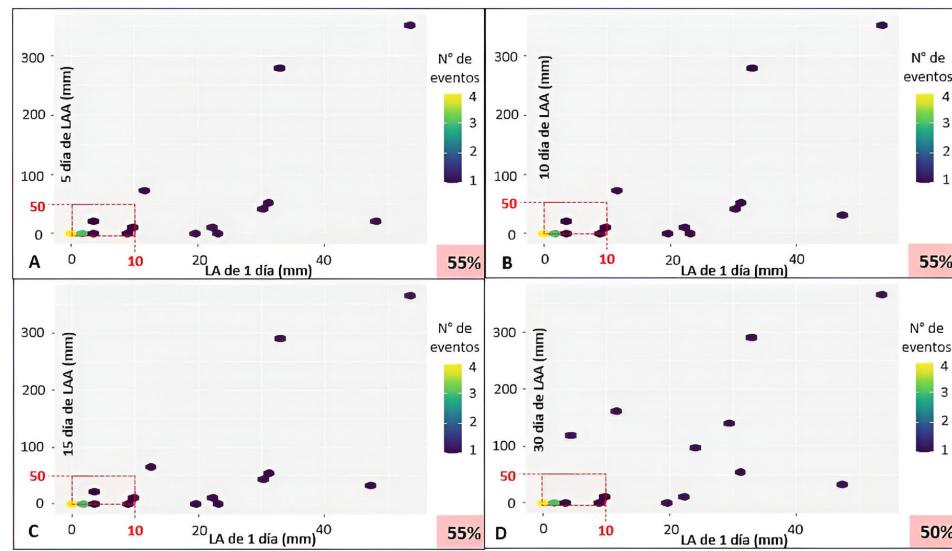


Figura 5. Gráficos de Hexbin de LA de 1 día v/s combinaciones de LAA de 5 (A), 10 (B), 15 (C) y 30 días (D), por cada remoción en masa

Fuente: Autores, 2026.

En contraparte, la dispersión de los datos en los gráficos de la Figura 6, evidenciaron un aumento en la lluvia acumulada y una disminución en la lluvia acumulada antecedente,

estableciendo como umbral crítico 25 mm para una lluvia acumulada de 3 días y la misma cantidad de precipitación para la lluvia acumulada antecedente de 5 días (Figura 6A), 10 días (Figura 6B), 15 días (Figura 6C) y 30 días (Figura 6D).

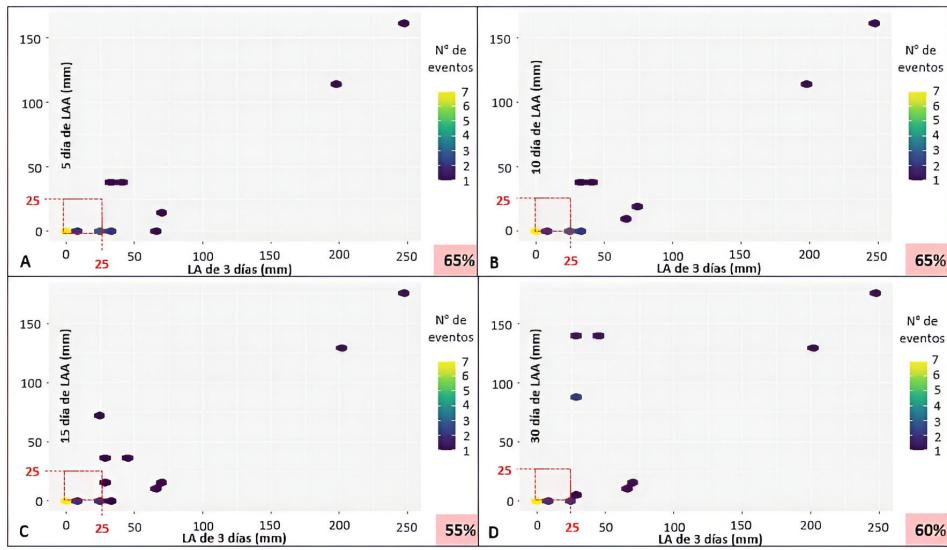


Figura 6. Gráficos de Hexbin de LA de 3 días v/s combinaciones de LAA de 5 (A), 10 (B), 15 (C) y 30 días (D), por cada remoción en masa

Fuente: Autores, 2026.

Para las combinaciones de precipitación que consideran 5 días de lluvia acumulada, los resultados varían significativamente a medida que aumentan los días de lluvia acumulada antecedente (Figura 7). La Figura 7A muestra una clara acumulación de datos sobre el eje de las abscisas, es decir, la mayoría de los eventos de remoción en masa acontecen bajo la influencia de los 5 días de lluvia inmediatamente previos al desencadenamiento del evento (75 %). Para este caso en particular, los umbrales establecidos de lluvia acumulada y lluvia acumulada antecedente fueron 50 mm y 5 mm, respectivamente. La Figura 7B mantiene la misma tendencia de acumulación sobre ambos ejes. Un cambio significativo en la distribución de los datos ocurre cuando ésta última abarca una mayor cantidad de días de acumulación de lluvia. Con 15 días de lluvia acumulada antecedente (Figura 7C), existe un aumento considerable del umbral crítico establecido, pasando de 5 mm a 12,5 mm en 5 días. Para los siguientes 15 días, es decir, 30 días de lluvia acumulada antecedente (Figura 7D), el umbral crítico alcanza un valor de 25 mm. Para estas últimas dos combinaciones de lluvia, la probabilidad de que una remoción en masa sea gatillada es igual al 50% y 60%, respectivamente.

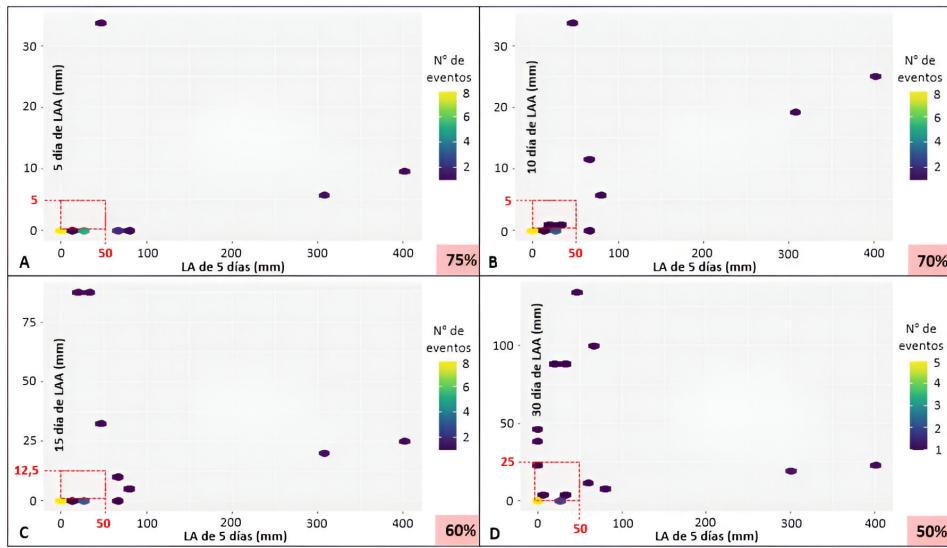


Figura 7. Gráficos de Hexbin LA de 5 días v/s combinaciones de LAA de 5 (A), 10 (B), 15 (C) y 30 días (D), por cada remoción en masa

Fuente: Autores, 2026.

Este comportamiento de un constante aumento en los valores de lluvia acumulada antecedente, también se ve reflejado en los gráficos de dispersión que consideran 7 días de lluvia acumulada (Figura 8). Para este grupo de combinaciones los umbrales estimados de lluvia acumulada son de 50 mm, mientras que los de lluvia acumulada antecedente aumentan a medida que se amplía el rango de días, pasando de 1,5 mm para una lluvia de 5 días (Figura 8A), 2,5 mm para lluvias de 10 días (Figura 8B) y 12,5 mm para una lluvia de 15 (Figura 8C) a 30 días (Figura 8D).

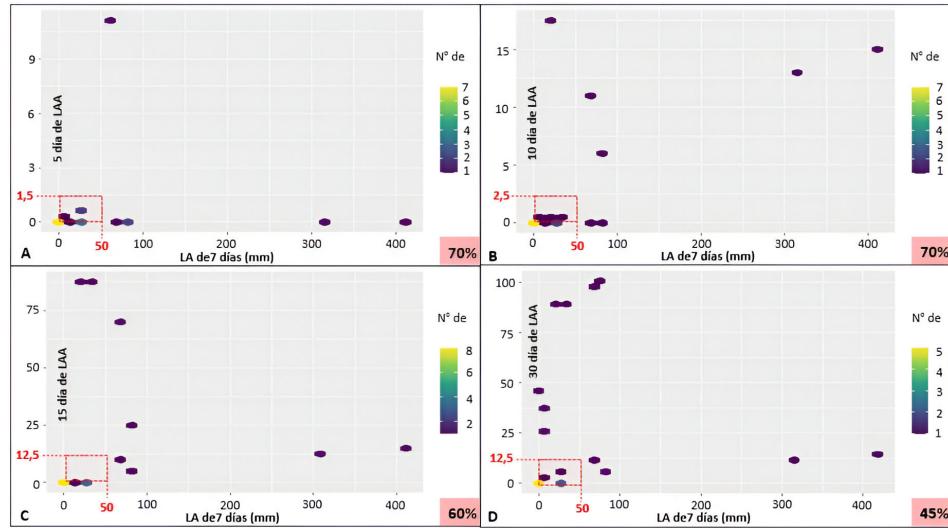


Figura 8. Gráficos de Hexbin de LA de 7 días v/s combinaciones de LAA de 5 (A), 10 (B), 15 (C) y 30 días (D), por cada remoción en masa

Fuente: Autores, 2026.

De forma general, en todas las combinaciones estudiadas existen eventos de remoción en masa que se alejan considerablemente de la zona de mayor acumulación como también una importante concentración de datos en el origen, los cuales comienzan a desplazarse en dirección al eje de las ordenadas a medida que aumenta la lluvia acumulada antecedente. En el caso de las lluvias de corto plazo (LA), se logra evidenciar un patrón constante de aumento para el desencadenamiento de remociones en masa, pasando de 10 mm en 24 hrs hasta 50 mm en 5 días, logrando su estabilización durante séptimo día con la misma cantidad de lluvia caída. En el caso de la lluvia acumulada antecedente, no se evidencia un patrón definido.

DISCUSIÓN

Metodología

El proceso metodológico propuesto se evaluó de forma positiva considerando que su aplicación permitió tener una primera aproximación sobre las características de los eventos de lluvia estivales que terminaron por iniciar procesos de remoción en masa en la localidad de San José de Maipo durante los años 2012 y 2017, lo anterior, expresado en términos de umbrales críticos. Vale destacar que para este tipo de investigaciones Segoni et al. (2018) concluye que existe una falta de rigurosidad importante que aquí fue mejorada estableciendo un proceso paso a paso y mencionando claramente la fuente de datos, escalas de tiempo, el número y los tipos de remociones en masa considerados, la descripción en detalle de los distintos filtros empleados a las base de datos, la extensión del área de estudio, el número de estación pluviométricas consideradas y su método de selección.

Distribución espacio - temporal de las remociones en masa

La distribución espacial de los eventos de remoción en masa en la zona de estudio evidenció una clara tendencia hacia los valles del río Maipo y sus afluentes. Se postula que esta acumulación de eventos en laderas de alta pendiente se ve favorecida principalmente por dos factores: los grandes volúmenes de material no consolidado depositados a lo largo de los valles y el alto nivel de intervención antrópica que afecta a las laderas en estas zonas de alta montaña.

El primer factor es una característica común de ambientes cordilleranos, en donde existe un alto nivel de erosión-depositación de material detrítico producto de agentes de transporte como

ríos y glaciares. En el caso particular de los valles de San José de Maipo, González (2010) destaca que este tipo de depósitos está ampliamente distribuido en toda la zona, con mayor extensión y potencia en la ladera norte del valle del río Maipo, en ambas laderas del valle del río Volcán (Figura 3) y en la ladera poniente del valle del río Yeso. Vale destacar que las observaciones de estos depósitos coinciden con la distribución de los eventos de remoción en masa aquí estudiados.

El segundo factor aquí mencionado tiene directa relación con las modificación estructural y geométrica que constantemente afectan las laderas de los valles a causa de la intensa actividad antrópica. Un claro ejemplo de lo anterior es como producto de la presión turística, la expansión de infraestructura vial a afectado directamente la estabilidad de laderas en distintas zonas a lo largo de los valles fluviales de la región. Esta acción incrementa considerablemente la probabilidad de iniciar un proceso de remoción en masa ante una mínima perturbación externa como puede ser un evento de lluvia dada la modificación del ángulo de reposo de la ladera y los grandes volúmenes de material no consolidado depositados sobre la misma. En este mismo contexto, González-Muzzio & Rozas (2020) destaca que esta forma de planificación turística puede ser irresponsable al no considerar, por una parte, “(...) el efecto de ella sobre el medio ambiente y por otra, las amenazas que pueden afectar el desarrollo económico y social que se busca fomentar, así como también a los propios trabajadores y a los turistas” (González-Muzzio & Rozas, 2020, 1).

Finalmente, resulta interesante ver cómo la distribución temporal de los eventos de remoción en masa en la zona de estudio tiende a concentrarse en las estaciones del año menos lluviosas, es decir, verano y otoño. Se postula que dicha distribución tiene directa relación con la continua carga o sobrecarga de material detritico sobre una ladera. Durante estaciones secas o menos lluviosas el agua deja de ser el principal agente de transporte y liberación de carga de taludes o laderas, por lo que durante un periodo prolongado sin precipitaciones se genera una mayor acumulación de material no consolidado en las mismas, el cual puede ser transportado pendiente abajo ante una mínima perturbación como un evento sísmico o meteorológico.

Umbrales críticos de lluvia

La discusión sobre los umbrales críticos aquí establecidos se centró en dos ejes. En primer lugar, se buscó interpretar la particular distribución gráfica de los eventos de remoción en masa, incluyendo un análisis en torno a los umbrales críticos estimados, para luego realizar una discusión de aquellos eventos fuera de las zonas de mayor probabilidad.

Visualmente, todas las combinaciones de lluvia evidencian un conjunto importante de datos agrupados en el origen o sobre el eje positivo de las abscisas, lo cual es interpretado como una fuerte dominancia de las lluvias de corto plazo en el desencadenamiento de los eventos de remoción en masa en la región. Un antecedente que apoya dicha hipótesis tiene relación con que, durante los meses menos lluviosos (periodo donde existe la mayor ocurrencia de remociones en masa) el promedio acumulado máximo de lluvia no supera los 4 mm/mes (Díaz, 2018), por lo que una lluvia que logró acumular 10 mm en 24 hrs, puede tener la capacidad de desestabilizar el material no consolidado depositado sobre las laderas. Por otro lado, se propone que el umbral máximo de lluvia caída para la generación de remociones en masa es igual a 50 mm en 5 días, dado que posterior a dicha cantidad de días el umbral tiende a estabilizarse. Se postula que este comportamiento tiene relación con que 50 mm son suficientes para retransportar y disminuir la carga del material no consolidado sobre las laderas durante los meses ‘secos’.

Otro rasgo característico en cada una de las combinaciones son eventos de remoción en masa que se alejan considerablemente de la zona de mayor concentración de datos. Estos eventos son vinculados a precipitaciones extremas caracterizadas por una gran acumulación de agua caída en un periodo relativamente corto de tiempo. Para el periodo donde estos eventos extremos acontecieron (año 2016), otras regiones también fueron afectadas por este tipo de fenómeno climático. Casos como el aluvión en Villa Santa Lucía el año 2017, en la Región de Los Lagos (Duhart, 2019), o el evento ocurrido en Alto Patache el año 2015, en la Región de Tarapacá (Orellana, 2017), son solo algunos de los eventos más recientes de este tipo gatillados por cortas pero intensas lluvias. Si bien el foco de esta investigación no se centra en discutir el origen de este comportamiento o patrón de lluvias cada vez más común, se considera relevante avanzar con esta temática, sobre todo cuando existe evidencia de que uno de los principales efectos vinculados al cambio climático son las modificaciones de los patrones de lluvia (Oficina de Cambio Climático, 2014; Centro de Cambio Global, 2013; Centro de Cambio Global, 2012; Intergovernmental Panel

on Climate Change, 2012), lo cual aquí se prevé tendrá un efecto directo sobre el desarrollo de eventos de remoción en masa.

CONCLUSIONES

Los procesos de remoción en masa continúan siendo fenómenos ampliamente estudiados. Sus impactos a nivel local pueden llegar a ser devastadores si no se tiene conocimiento sobre su mecánica y factores que contribuyen a su desencadenamiento. Es precisamente en este último punto donde la presente investigación suma nuevos antecedentes mediante el empleo de una metodología en detalle para la estimación de umbrales críticos por precipitación de remociones en masa. Su aplicación a un caso de estudio dio como resultado una primera aproximación vinculante entre la lluvia acumulada durante un periodo de tiempo (días) y el desencadenamiento de remociones en masa en la comuna de San José de Maipo.

Para el caso de los registros de lluvia solo se tuvo acceso a valores diarios, lo que limitó la aplicación de otro tipo de metodología. Caso similar ocurre con los eventos de remoción en masa, donde variados registros cuentan con información poco precisa (ubicación de origen, fecha, entre otros), acotando el conjunto de datos útiles. Para el caso particular de Chile, se recomienda que las entidades públicas a cargo del monitoreo de estas amenazas direccíen esfuerzos en mejorar los procesos de recopilación y almacenamiento de antecedentes meteorológicos y eventos de remoción en masa. Lo anterior, con el objetivo de que estudios posteriores puedan correlacionar con un menor grado de incertidumbre el factor climático con este tipo de amenazas.

En cuanto a los resultados, se pudo establecer una importante concentración de eventos en los valles del río Maipo y sus principales afluentes, postulando como principal factor contribuyente la pérdida de estabilidad de laderas a causa de la intensa actividad antrópica en la zona. Como medida de prevención, se propone que previo a cualquier obra de construcción que necesite de la modificación de laderas se realicen estudios que acrediten el estado del macizo rocoso a intervenir, esto con el objetivo de establecer si es viable su ejecución. Por otra parte, en el caso de laderas que ya han sido intervenidas y evidencien desplazamientos de terreno, se recomienda monitorear vía teledetección o instrumentación in situ, y a la vez establecer medidas de mitigación como refuerzos de talud y/o piscinas decantadoras.

Será fundamental que dentro de la instrumentación de captura de datos se considere la opción de aumentar el número de estaciones pluviométricas automáticas en la zona de estudio, dado que actualmente solo cuenta con una de este tipo (San José Guayacán) para un área aproximada de 500.000 ha. Esta densificación en un futuro permitiría tanto simplificar la captura y almacenamiento de datos como un monitoreo más eficaz en cuanto a tiempo de respuesta ante este tipo de eventos. En esta misma línea, se recomienda prestar especial atención a lluvias que ocurren durante las estaciones secas del año o inmediatamente posterior a ellas, dado que es el periodo donde se concentra la mayor cantidad de remociones en masa (20).

Las características de los depósitos que sobrepasan las laderas de los valles de San José de Maipo las transforman en zonas altamente susceptibles a eventos de remoción en masa. En esta investigación, se dedujo que basta con la caída de 10 mm de precipitación durante 24 hrs para el desarrollo de uno o más eventos de remoción en masa con una probabilidad de ocurrencia de más del 50%. Por lo tanto, se plantea fundamental realizar un seguimiento a los pronósticos meteorológicos de forma anticipada con el objetivo de prever condiciones que puedan resultar en el desencadenamiento de este tipo de amenazas.

Dada la poca estabilidad temporal que actualmente rige a los patrones de lluvia, se recomienda evaluar y actualizar periódicamente los valores de intensidad y duración de los eventos que terminan por desencadenar remociones en masa en un área determinada.

Por último, se espera que esta investigación impulse nuevos trabajos que a través de la ciencia brinden herramientas para el establecimiento de estrategias de acción en post de un mejor manejo de eventos de remociones en masa.

REFERENCIAS

- Albornoz, F. (2018). *Evaluación de la susceptibilidad de remociones en masa en las laderas del Fiordo Comau, Región de Los Lagos, Chile*. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Santiago, Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/152665?show=full>

- Alfaro, A. (2022). *Metodología para la evaluación de susceptibilidad de remociones en masa basada en redes neuronales convolucionales, con aplicación en la Comuna de San José De Maipo, Región Metropolitana, Chile*. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/187031>
- Brand, E., Premchitt, J. & Phillipson, H. (1984). *Relationship between Rainfall and Landslides in Hong Kong*. En actas del 4th International Symposium on Landslides, Toronto, 16-21 September 1984, 377-384. https://www.researchgate.net/publication/308105129_Relationship_between_rainfall_and_landslides_in_Hong_Kong
- Bravo, C., Caamaño, D. & King, R. (2018). Umbral de precipitación de procesos de remoción en masa, en la Provincia de Concepción. Universidad Católica de la Santísima Concepción. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3031231>
- Campbell, R. (1975). Soil slips, debris flows, and rainstorms in the Santa Monica Mountains and vicinity, southern California. *Geological Survey Professional Paper N° 851*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/pp851>
- Charrier, R. (1981). *Mesozoic and Cenozoic stratigraphy of the Central Argentinian-Chilean Andes (32°-35°S) and chronology of their tectonic evolution*. Zbl. Geol. Paläontol., Stuttgart, Part I, N° 1/3, 344-355.
- Centro de Cambio Global UC. (2012). *Enfoque metodológico para evaluar la adaptación al cambio climático en la infraestructura pública del Ministerio de Obras Públicas*. Santiago, Chile; Leipzig, Alemania. <https://cambioglobal.uchile.cl/proyecto/enfoque-metodologico-para-evaluar-la-adaptacion-al-cambio-climatico-en-la-infraestructura-publica-del-mop/>
- Centro de Cambio Global UC. (2013). *Propuesta Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile. <https://cambioglobal.uchile.cl/proyecto/plan-nacional-de-adaptacion-al-cambio-climatico/>
- Díaz, G. (2018). *Evaluación de la susceptibilidad de remoción en masa en la localidad de El Ingenio, comuna de San José de Maipo, Chile*. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geografía, Santiago, Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170450>
- Dirección General de Aguas. (2004). *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad, Cuenca del Río Maipo*. Ministerio de Obras Públicas, Santiago, Chile. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/e025b9e8-3baf-4f2f-aoae-02d05c50daa4>
- Duhart, P., Sepúlveda, V., Garrido, N., Mella, M., Quiroz, D., Fernandez, J., Roa, H. & Hermosilla, G. (2019). The Santa Lucía landslide disaster, Chaitén-Chile: origin and effects. En *7th International Conference on Debris-Flow Hazards Mitigation*, Golden, Colorado, Estados Unidos. <https://www.researchgate.net/publication/334654646>
- Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J. & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21(12), 6307-6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- Garreaud, R., Boisier, J., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. & Veloso-Aguila, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, 1-19. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- González, P. (2010). *Geología y Geomorfología del Complejo de Remoción en Masa La Engorda, Chile Central*. Memoria de Título (Inédito), Universidad de Chile, Departamento de Geología, Santiago, Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103776>
- González, M., Gómez-González, S., Lara, A., Garreaud, R. & Díaz-Hormazábal, I. (2018). The 2010–2015 Megadrought and its influence on the fire regime in central and south-central Chile. *Ecosphere*, 9(8). <https://doi.org/10.1002/ecs2.2300>
- González-Muzzio, C. & Rozas, C. (2020). La Gestión de Riesgos en los Destinos Turísticos de Montaña en Chile: El caso del Embalse El Yeso. *Revista de Estudios Latinoamericanos sobre Reducción del Riesgo de Desastres REDER*, 4(1), 1-20. <https://doi.org/10.55467/feder.v4i1.38>
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. & Stark, C. (2007). Rainfall thresholds for the initiation of landslides in Central and Southern Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 98, 239-267. <https://doi.org/10.1007/s00703-007-0262-7>

Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M. & Stark, C. (2008). The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows: An update. *Landslides*, 5(1), 3-17. <https://doi.org/10.1007/s10346-007-0112-1>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2012). Resumen para responsables de políticas en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático. Editado por C. Field, V. Barros, T. Stocker, D. Qin y D. Dokken (pp. 1-19). *Informe especial de los Grupos de trabajo I y II del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, Nueva York, Estados Unidos. https://archive.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf

López Filun, P. (2015). Análisis de umbrales de precipitación de procesos de remoción en masa, en laderas urbanizadas de la costa de Chile centro-sur. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 93-112. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50212>

Masotti, I., Aparicio-Rizzo, P., Yevenes, M., Garreaud, R., Belmar, L. & Farías, L. (2018). The Influence of River Discharge on Nutrient Export and Phytoplankton Biomass Off the Central Chile Coast (33°–37°S): Seasonal Cycle and Interannual Variability. *Frontiers in Marine Science* (5). <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00423>

Mergili, M., Marchant, C. & Moreiras, S. (2015). Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 113-131. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211>

Naranjo, J., Arenas, M. & Ramírez, P. (2006). *Remociones en masa causadas por las precipitaciones de los días 9 al 11 de julio de 2006, en algunos sectores de la Provincia de Concepción (Informe Técnico)*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile. https://portalgeo.sernageomin.cl/Informes_PDF/RBIO-056.pdf

Oficina de Cambio Climático (OCC). (2014). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático*. Ministerio del Medio Ambiente, Santiago, Chile. https://mma.gob.cl/wp-content/uploads/2015/03/Acuerdo-CMS_21-14-Plan-Nacional-Adaptacion-Cambio-Climatico.pdf

Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI). (2017). *Plan específico de emergencia por variable de riesgo – Remoción en masa vo.o*. Ministerio del Interior y Seguridad Pública, Santiago, Chile. https://www.ssffaa.cl/media/PNEVR_REMOCION%20EN%20MASA.pdf

Onodera, T., Yoshinaka, R. & Kazama, H. (1974). Slope failures caused by heavy rainfall in Japan. *Journal of the Japan Society of Engineering Geology* 15(4), 191-200. <https://doi.org/10.5110/jjseg.15.191>

Orellana, H., García, J., Ramírez, C. & Zanetta, N. (2017). El aluvión del 9 agosto 2015 en Alto Patache, región de Tarapacá, Desierto de Atacama 1. *Revista de geografía Norte Grande* (68), 65-89. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022017000300005>

Pizarro, R., Ramírez, C. & Flores, J. (2003). Análisis comparativo de cinco métodos para la estimación de precipitaciones areales anuales en períodos extremos. *Bosque* 24(3), 31-38. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002003000300003>

Pradenas, M. (2014). *Umbral empírico de deslizamiento por precipitación, para la provincia de Concepción*. Memoria de Título (Inédito), Universidad del Bío-Bío, Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Concepción, Chile. <http://repobib.ubiobio.cl/jspui/handle/123456789/810?mode=full>

Ramos, A., Trujillo-Vela, M. & Prada, L. (2015). Análisis descriptivos de procesos de remoción en masa en Bogotá. *Obras y Proyectos* (18), 63-75. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132015000200006>

Reichenbach, P., Cardinali, M., De Vita, P. & Guzzetti, F. (1998). Hydrological thresholds for landslides and floods in the Tiber River basin (central Italy). *Environmental Geology* 35, 146-159. <https://doi.org/10.1007/s002540050301>

Segoni, S., Piciullo, L. & Gariano, S. (2018). A review of the recent literature on rainfall thresholds for landslide occurrence. *Landslides* 15, 1483-1501. <https://doi.org/10.1007/s10346-018-0966-4>

Sepúlveda, S. & Padilla, S. (2008). Rain-induced debris and mudflow triggering factors assessment in the Santiago cordilleran foothills, Central Chile. *Natural Hazards* 47, 201-215. <https://doi.org/10.1007/s11069-007-9210-6>

Sepúlveda, S., Rebolledo, S. & Vargas, G. (2016a). Recent catastrophic debris flows in Chile: Geological hazard, climatic relationships and human response. *Quaternary International* 158, 83-95. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2006.05.031>

Sepúlveda, S., Rebolledo, S., Lara, M. & Padilla, S. (2016b). Landslide hazards in Santiago, Chile: An overview. IAEG2006. Engineering geology for tomorrow's cities. En *10th IAEG International Congress*, Nottingham, Reino Unido, 6-10 de septiembre de 2006. https://media.geolsoc.org.uk/iaeg2006/PAPERS/IAEG_105.PDF

Thiele, R. (1980). *Hoja Santiago. Región Metropolitana*. Instituto de Investigaciones Geológicas, Boletín, 39, 1-51. <https://tiendadigital.sernageomin.cl/es/geologia-basica/1376-1980-geologia-de-la-hoja-santiago-region-metropolitana-escala-1-250000.html>