

## Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, mediante análisis jerárquico y geotecnologías en la cuenca alta del río Mapocho, Chile

Waldo Pérez-Martínez <sup>(1,2)</sup>, Benjamín Castro-Cancino <sup>(1)</sup>, Josep E. Pardo-Pascual <sup>(2)</sup>, Paulina Vidal-Páez <sup>(1,2)</sup>, Idania Briceño-de-Urbaneja <sup>(1,2)</sup>, Natalia Tapia-Pineda <sup>(3)</sup>, Alejandro Tamayo <sup>(4)</sup>

<sup>(1)</sup> Hémera Centro de Observación de la Tierra, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Santiago 8580745, Chile, waldo.perez@umayor.cl; benjamin.castroc@mayor.cl; paulina.vidal@umayor.cl; idania.briceno@umayor.cl

<sup>(2)</sup> Departamento de Ingeniería Cartográfica, Geodesia y Fotogrametría, Universitat Politècnica de València, Valencia 46022, España, jepardo@cgf.upv.es

<sup>(3)</sup> Magíster en Teledetección, Escuela de Ingeniería Forestal, Facultad de Ciencias, Ingeniería y Tecnología, Universidad Mayor, Santiago 8580745, Chile, natalia.tapia01@mayor.cl

<sup>(4)</sup> Gerencia de Biodiversidad y Cambio Climático, Vicepresidencia de Asuntos Corporativos y Sustentabilidad, Anglo American, Santiago 7550647, Chile, alejandro.tamayo@angloamerican.com

**Resumen:** En la zona central de Chile las remociones en masa hídrica son el peligro geológico-geomorfológico más importante de los ecosistemas de montaña, ocasionando graves daños a la población, infraestructura, economía y medio ambiente. Se evaluó la susceptibilidad de flujos y crecidas de detritos en la parte alta de la cuenca del río Mapocho, mediante información satelital, información cartográfica y meteorológica, e inventario de remociones en masa. Para el cálculo del índice de susceptibilidad (IS), se aplicó una metodología cualitativa y cuantitativa, que considera 14 factores condicionantes agrupados en geología, geomorfología y condición del suelo. El 36.64% de la superficie total presenta un nivel de susceptibilidad alta y muy alta, mientras que 29.59% evidenció susceptibilidad moderada y 33.77% susceptibilidad baja a muy baja.

**Palabras clave:** Flujos de detritos, crecidas de detritos, susceptibilidad de remociones en masa, análisis jerárquico.

### **Susceptibility to the occurrence of debris flows through hierarchical analysis and geotechnologies in the upper Mapocho river basin, Chile**

**Abstract:** In central Chile, landslides are the most important geological-geomorphological hazard in mountain ecosystems, causing serious damage to the population, infrastructure, economy and environment. The susceptibility to debris flows and floods in the upper Mapocho river basin was evaluated using satellite data, cartographic and meteorological information, and a landslide inventory. To calculate the susceptibility index (SI), a qualitative and quantitative methodology was applied, which considers 14 conditioning factors grouped into geology, geomorphology and soil condition. A total of 36.64% of the total area has a high and very high susceptibility level, while 29.59% showed moderate susceptibility and 33.77% showed low to very low susceptibility.

**Keywords:** Debris flows, debris floods, landslides susceptibility, analytic hierarchy process.

## 1. INTRODUCCIÓN

La Estrategia Climática de Largo Plazo 2050 de Chile, establece que el país presenta 7 de los 8 criterios de vulnerabilidad establecidos en el artículo 4° número 8° de la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC, 1992), destacando la presencia de zonas expuestas a la deforestación, zonas propensas a los desastres naturales y zonas de ecosistemas frágiles, incluidos lo de montaña (SEA, 2023).

El efecto que tiene y que seguirá teniendo el cambio climático en la hidrometeorología de los ecosistemas de montaña, se evidencia y mantendrá para las próximas décadas (Garreaud *et al.*, 2019). La precordillera y cordillera andina de Chile central, debido a su posición morfoclimática periglacial, las remociones en masa constituyen los procesos geológicos-geomorfológicos más peligroso y recurrente de la zona, condicionados por factores físico-estructurales y desencadenados por eventos

hidrometeorológicos extraordinarios y sismos de variada magnitud (Hauser, 2000).

Durante las últimas décadas la ciudad de Santiago, ubicada en la Región Metropolitana, ha experimentado un aumento sostenido de la superficie urbana, ocupando el piedemonte andino, áreas con una alta susceptibilidad a la ocurrencia de remociones en masa de acuerdo con los antecedentes históricos y recientes (SERNAGEOMIN, 2017).

El presente trabajo tiene como propósito calcular el índice de susceptibilidad de flujos y crecidas de detrito en la parte alta de cuenca del río Mapocho y determinar los umbrales de precipitación que desencadenan estos eventos, mediante datos satelitales, cartográficos y modelos climáticos de precipitación, inventarios de remociones en masa y análisis jerárquicos.

## 2. MATERIAL Y MÉTODOS

### 2.1. Área de estudio

El área de estudio corresponde al sector alto de la cuenca del río Mapocho, ubicada en el sector noreste de la Región Metropolitana de Chile, entre las coordenadas 33°06'S – 33°29'S y 70°36'O–70°11'O, y cubre un área de 1.017 km<sup>2</sup> (Figura 1).

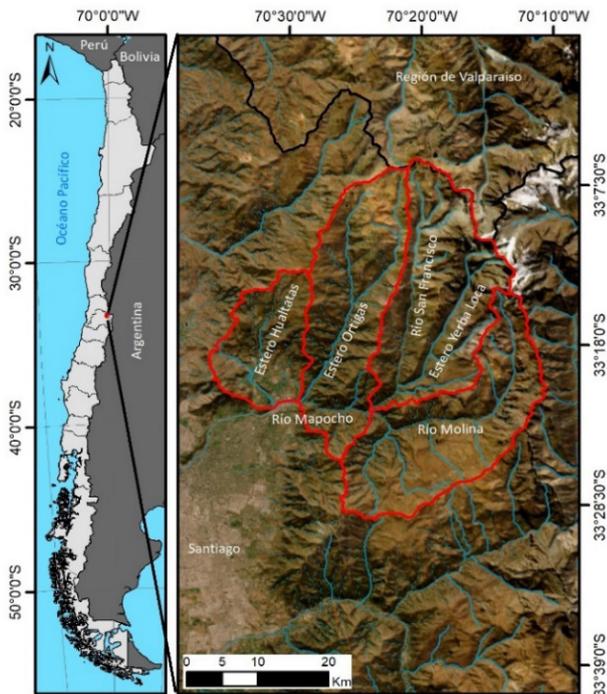


Figura 1. Ubicación de la cuenca alta del río Mapocho.

La zona central de Chile presenta un clima mediterráneo y semiárido, con fluctuaciones de precipitación entre 100 y 1000 mm dependiendo de la latitud y altitud, concentrando el 90% entre los meses de abril a septiembre (Garreaud *et al.*, 2021).

Presenta un relieve montañoso debido a la presencia de la cordillera de los Andes, con elevaciones entre los 795 y 5400 m s.n.m., laderas con pendientes abruptas y valles con perfiles transversales de morfología en “U” sobre los 2400 m s.n.m., característico de un antiguo modelado glaciar.

### 2.2. Fuentes de datos

Las características geológicas, geomorfológicas e hidrográficas, se obtuvieron a partir de la fotointerpretación de imágenes satelitales Pléiades de 50 cm de resolución (2015) y PlanetScope de 3 m de resolución (2023), cartografía digital a escala 1:50 000 (2015) y Modelo Digital de Elevación Alos Palsar de 12.5 m de resolución (2014). La información levantada se validó a partir de campañas de terreno realizadas entre 2017 y 2021.

La persistencia de la cobertura de la nieve se obtuvo de los productos diarios de MODIS, plataformas Terra (MOD10A1) y Aqua (MYD10A1). Se utilizó la banda “NDSI\_Snow\_Cover”, que corresponde al valor del Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) para detectar la

nieve a una escala porcentual de 0-100%. Se fusionaron los productos MODIS de ambas plataformas y se promedió para el periodo 2000-2022 (Saavedra *et al.*, 2018).

A partir del análisis de series temporales de imágenes Landsat 7 y 8 (2000-2022), bandas 3, 4, 5 y 7, se obtuvieron los datos de cambios de la cobertura de bosques, productos que fueron descargados del servidor *Global Land Analysis & Discovery* ([https:// glad.earthengine.app/view/global-forest-change](https://glad.earthengine.app/view/global-forest-change)).

Los usos del suelo del año 2013 se obtuvieron del ajuste geométrico de la cartografía vectorial del catastro vegetacional de la Región Metropolitana, en base a imágenes satelitales SPOT 5 ortorrectificadas del año 2010 y descargados del servidor de la Corporación Nacional Forestal (CONAF, <http://sit.conaf.cl/>). Los datos de precipitación diaria de la Región Metropolitana entre 1980 y 2021, se obtuvieron del reanálisis atmosférico ECMWF ERA5, parámetros topográficos y estimaciones de temperatura de la superficie terrestre del sensor MODIS, generados del modelo climático CR2MET (Boisier, 2023; <http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados>).

### 2.3. Factores condicionantes

Se consideraron 14 factores condicionantes agrupados en las categorías de geomorfología, geología y condición de suelo. Se utilizó una metodología cualitativa de mapas temáticos asociados a los factores condicionantes identificados (Pérez-Martínez *et al.*, 2023).

### 2.4. Índice de Susceptibilidad (IS)

Se aplicó el Proceso de Jerarquía Analítica (AHP), para determinar el Índice de Susceptibilidad (IS). El análisis jerárquico asigna una ponderación de 0 a 100% a cada uno de los factores, según su nivel de importancia. Se utilizó la metodología de Intarawichian y Dasananda (2010), que califica cada factor frente a otro mediante una matriz de comparación por pares, asignando un valor dominante relativo entre 1 y 9 según la escala desarrollada por Saaty y Vargas (2012) (Tabla 1).

Tabla 1. Porcentaje de los pesos asignados a los subgrupos de factores condicionantes, obtenidos a partir del AHP.

Grupo	Subgrupo	Porcentaje
Geomorfología	Topografía	43% 7% 24%
	Geoformas	
	Drenaje	
Geología	Unidades	11% 6%
	Estructuras	
Condición de suelo	Forestación	3% 3% 3%
	Cobertura	
	Persistencia de nieve	

El IS se evaluó mediante la Ecuación 1.

$$IS = \sum_{i=0}^{14} f_i * factor_i \tag{1}$$

Donde  $f_i$  corresponde a cada uno de los factores condicionantes reclasificados en valores entre 0 y 5, donde 0 indica que no incrementa la susceptibilidad y 5 indica

que incide fuertemente en la susceptibilidad; y  $factor_i$  corresponde al porcentaje asignado a cada uno de los factores condicionantes definidos a partir del AHP.

Se determinó el IS para cada microcuenca del área de estudio, delimitadas a partir de procesamientos del MDE Alos Palsar. El cálculo se realizó a partir del promedio del IS de los píxeles dentro de cada microcuenca, fundamentado en el análisis y correlación con el inventario de remociones en masa, el cual establece el lugar del depósito, más no el lugar de origen, por lo que se considera la totalidad de la microcuenca que lo alberga como posible fuente.

El IS final, se reclasificó en 5 categorías con el método *Natural Breaks* (Jenks y Caspall, 1971) (Tabla 2).

**Tabla 2.** Reclasificación del Índice de Susceptibilidad.

Índice de Susceptibilidad	Susceptibilidad
<1.66	Muy baja
1.66 - 1.83	Baja
1.83 - 1.99	Moderada
1.99 - 2.17	Alta
> 2.17	Muy alta

## 2.5. Umbrales de precipitación e inventario de remociones en masa

Los umbrales de precipitación se obtuvieron a partir del cálculo de la precipitación acumulada de 72 horas antes del registro de cada flujo del inventario de remociones en masa elaborado por el SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile; [https://sdngsig.sernageomin.cl/gissdng/rest/services/Catastro\\_RMasa\\_Nac](https://sdngsig.sernageomin.cl/gissdng/rest/services/Catastro_RMasa_Nac)) y la precipitación media anual del modelo climático CR2MET (González *et al.*, 2022). Finalmente se relacionó el IS de cada microcuenca, con los datos del inventario de remociones en masa y umbrales de precipitación.

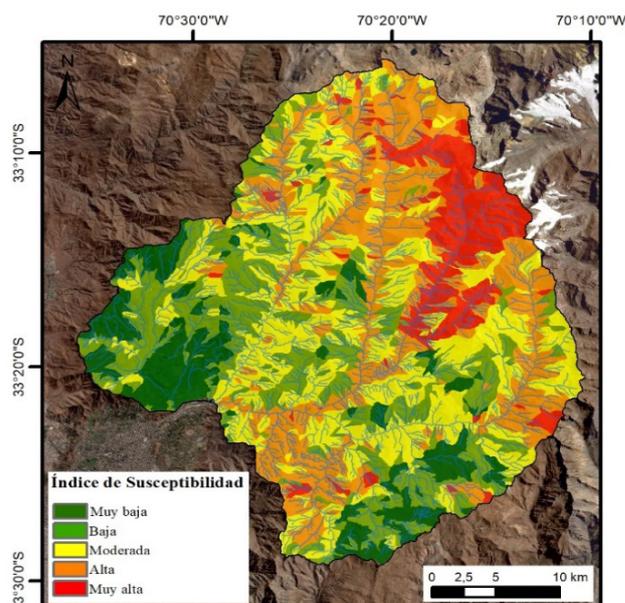
## 3. RESULTADOS

Los resultados de la susceptibilidad de flujos y crecidas de detritos en la parte alta de la cuenca del río Mapocho, se muestran en la Tabla 3 y Figura 2.

**Tabla 3.** Reclasificación del Índice de Susceptibilidad.

Susceptibilidad	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje del área (%)
Muy baja	121.88	11.98
Baja	221.58	21.79
Moderada	300.93	29.59
Alta	266.87	26.24
Muy alta	105.8	10.4

El 63.36% del área de estudio corresponde a superficies con muy baja a moderada susceptibilidad para generar flujos y crecidas de detritos, asociadas a pendientes menores a 30° y unidades geológicas de roca compacta, en sectores elevados en el sector este y oeste del área. El 36.64% presenta alta y muy alta susceptibilidad, distribuido a lo largo de valles principales, quebradas tributarias y sus cabecezas, vinculadas a laderas con pendientes sobre los 30° y escarpes abruptos, propios de circos glaciares.



**Figura 2.** Susceptibilidad de flujos y crecidas de detritos en la cuenca alta del río Mapocho.

Se registraron 56 eventos de flujos de detritos postglaciales (Pleistoceno Superior-Holoceno). El 68% (38) de los registros se localizan en superficies con alta susceptibilidad, mientras que 27% (15) en susceptibilidad moderada y 5% (3) en baja susceptibilidad.

En la Figura 3, se establece que las lluvias generadas en periodos estivales tienen un umbral de 25.94 mm asociado a 3 eventos de precipitación y en microcuencas con alta susceptibilidad (27 depósitos), en otoño es de 12.48 mm asociado con 1 evento y en invierno de 79.45 mm asociado a 1 evento. Además, en las quebradas, fondos de valle y entornos donde se localizan estos depósitos, se reconocen rasgos geomorfológicos que sugieren, en caso de ocurrir eventos de precipitación extrema sobre los umbrales definidos, es posible que vuelvan a reactivarse, generando nuevas remociones que afectarían estos lugares.

## 4. DISCUSIÓN

Los diversos estudios de susceptibilidad de remociones en masa realizados en el área de estudio varían en la cantidad de factores condicionantes y desencadenantes, y escalas de trabajo. Los resultados obtenidos en este trabajo y por otros autores (Lara *et al.*, 2018; Vidal *et al.*, 2020) coinciden que las áreas con alta y muy alta susceptibilidad presentan pendientes mayores a 30°, alta densidad de drenaje, unidades geológicas con bajo grado de consolidación y desprovistas de vegetación, ubicadas en laderas de exposición norte, fondos de valles, quebradas y cabecera de la cuenca.

## 5. CONCLUSIONES

El área de estudio es altamente vulnerable al cambio climático, los estudios realizados a nivel internacional y nacional proyectan un aumento de la frecuencia de los eventos hidrometeorológicos extremos. Se considera muy

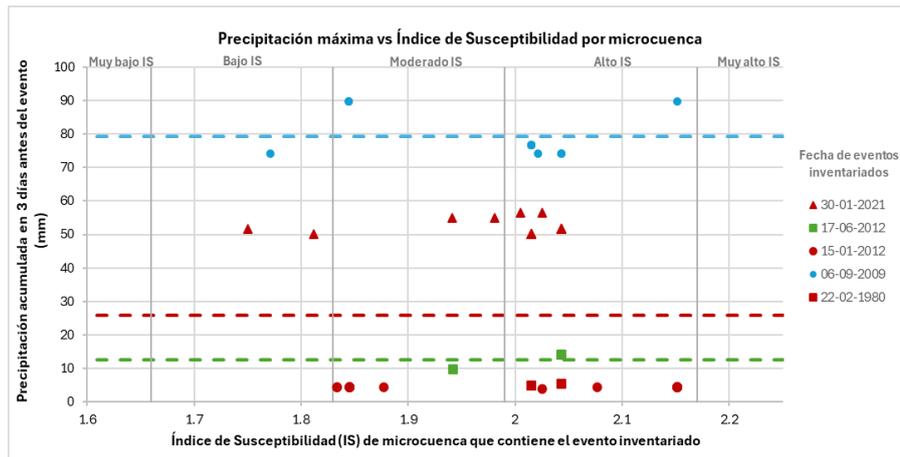


Figura 3. Índice de susceptibilidad asociado al registro de flujos de detritos y precipitaciones acumuladas.

probable que las altas temperaturas, olas de calor, fuertes precipitaciones, inundaciones y remociones en masa, continuarán siendo más frecuente en el futuro cercano (2030-2060). La teledetección y los análisis de susceptibilidad contribuyen a la toma de decisiones para establecer planes de prevención, mitigación, educación, ordenamiento territorial y resiliencia de la población ante este tipo de riesgos naturales.

## 6. AGRADECIMIENTOS

El estudio contó con el apoyo del Centro de Observación de la Tierra “Hémera” de la Universidad Mayor y forma parte de la tesis doctoral en Ingeniería Geomática de la Universitat Politècnica de València, España.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Boisier, J.P. (2023). CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile. (v2.5) [Data set]. Zenodo.
- Garreaud, R.D., Boisier, J.P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H., Veloso-Águila, D. (2019). The central Chile mega drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *Int. J. Climatol.*, 40, 421–439. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>
- Garreaud, R.D., Clem, K., Veloso, J.V. (2021). The South Pacific pressure trend dipole and the Southern Blob. *Journal of Climate*, 34(18), 7661–7676. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-20-0886.1>
- González, G., Jensen, E., Aron, F., Roldán, F., Sáez, E., Díaz, F., Candia, G., Gironás, J., Escauriza, C., Saldías, J., Aranguiz, R., Gilabert, H., De la Barra F., Zúñiga, A. (2022). Guía Metodológica para la Caracterización de la Multiamenaza de la Cuenca del Río Maipo. Proyecto FONDEF 19I10021.
- Hauser, A. (2000). Remociones en masa en Chile (versión actualizada). Servicio Nacional de Geología y Minería, *Boletín*, 59: 90 p.
- Intarawichian, N., Dasananda, S. (2010). Analytical Hierarchy Process for Landslide Susceptibility Mapping in Lower Mae Chaem Watershed, Northern Thailand. *Suranaree J. Sci. Technol.*, 17(3), 277–292.
- Jenks, G.F. and Caspall, F.C. (1971). Error on choroplethic maps: definition, measurement, reduction. *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, 61(2), 217–244. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>
- Lara, S.A., Sepúlveda, C.C., Rebolledo, S. and Ceballos, P. (2018). Landslide susceptibility maps of Santiago city Andean foothills, Chile. *Andean Geol.*, 45(3), 433–442. <https://doi.org/10.5027/andgeoV45n3-3151>
- Pérez-Martínez, W., Castro-Cancino, B., Tapia-Pineda, N., Vidal-Páez, P., Briceño-De-Urbaneja, I., Saavedra, F.A. (2023). Debris Flow and Flood Susceptibility Using Remote Sensing and GIS data: A Case of the Central Andes of Chile (33°13' -33°30'). In *Proceedings of the 5th International Electronic Conference on Remote Sensing*, 7-21 November 2023.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G. (2012). Models, methods, concepts & applications of the analytic hierarchy process. In *International series in management science/operations research*. <https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3597-6>
- Saavedra, F.A., Kampf, S.K., Fassnacht, S.R., and J.S. Sibold, J.S. (2018). Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000–2016. *The Cryosphere*, 12, 1027–1046. <https://doi.org/10.5194/tc-12-1027-2018>
- SEA. (2023). Servicio de Evaluación Ambiental, Guía metodológica para la consideración del cambio climático en el SEIA. Primera edición, Santiago, Chile.
- SERNAGEOMIN. (2017). Principales desastres ocurridos desde 1980 en Chile. *Servicio Nacional de Geología y Minería, Oficina de Comunicaciones: 23 february 2017*, pp. 45, Santiago. <https://doi.org/10.1109/IG-ARSS39084.2020.9324317>
- Vidal-Páez, P., Clavero, J., Droguett, B., Pérez-Martínez, W., Briceño-De-Urbaneja, I., Oliva, P. (2020). Landslide Susceptibility Using Remote Sensing Data & GIS in a High Andean Area of Central Chile. In *IGARSS 2020–2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, September 26–October 2, Waikoloa, Hawái, USA, Virtual Symposium, pp. (6604)–6607.