Assisted mass removal in water as morphometric parameters.

Fabiola Barrenechea Riveros
Universidad Bernardo O'Higgins, fabarren@gmail.com

Abel Fuentes Garrido
Escuela Ingeniería en Geomensura y Cartografía,
Universidad Bernardo O'Higgins, afuentes@ubo.cl

Abstract: Chile, for its natural geomorphological structure, constantly has recorded several natural events that have been causing a huge number of losses, both human and material, most of them concentrated in its Central Zone. The most common natural events in the Central Zone are floods and mudslides, given by the topographic and climatic features present in that area, with an a large mountainous area and rainfall periods when the soil is devoid of vegetation , thereby dragging materials that are deposited in the lower valleys. That is why this study seeks to determine areas with landslide threat as a tool to support decision-making authorities who are facing emergency situations. The methodology was adapted from the Ministry of Public Work method in the "Study of Environmental Facets", consisting in the intersection of hydrographic parameters using a Geographic Information System, through the use of tools such as the Model Builder. According to the results, the Metropolitan Region of Santiago has a large percentage of its surface with the threat of mass movement processes, indicating that the instruments of land should consider this type of study when planning to use the territory**.**

Keywords: hazard, hydrologic morphometry, landslide.

1. Problema

Los procesos de remoción en masa asistida por el agua, conocidos comúnmente como aluviones, son procesos de movilización o transferencia de material lenta o rápida pendiente abajo por efectos de la gravedad como cuerpo coherente, de determinado volumen de suelo, roca o ambas, en diversas proporciones. Se producen por factores condicionantes tanto físicos como humanos, las que son gatilladas por factores desencadenantes, siendo la más importante las precipitaciones [1]. Los procesos de alteración de laderas y los flujos de escombros, poseen un común como son las precipitaciones, en donde su intensidad y magnitud puede activar los procesos morfogenéticos desde los más simples a los más catastróficos. Rice reconoce una estrecha relación entre movimientos de laderas y precipitaciones [2], siendo éstas generalmente aceptadas como la principal causa de los deslizamientos y su frecuencia, magnitud e influencia estarán determinada por las condiciones climáticas del área que se analice, por ejemplo: la distribución de las precipitaciones y los cambios de temperaturas a lo largo del país varían, generando diferentes escenarios para el desencadenamiento de estos fenómenos, siendo su desarrollo mucho más abrupta en algunas zonas que en otras.

Chile, por sus características geomorfológicas, ha registrado constantemente diversos eventos naturales que han sido causantes de un alto número de pérdidas, tanto humanas como materiales, concentrándose la mayoría de ellos en la Zona Central. La Región Metropolitana posee una gran zona montañosa con pendientes que superan el 100% de inclinación, por lo que los procesos de remoción en masa asistida por el agua suelen ser comunes. Los aluviones de 1980, ocurridos el 22 y 24 de febrero en los sectores del Arrayá y la Dehesa, dejo hubo 4 personas desaparecidas y 300 personas aisladas en la Mina la Disputada. El evento del 29 de noviembre 1987 ocurrido en el sector del Alfalfal, en la comuna de San José de Maipo, causó la muerte de 29 personas, junto con la destrucción de la Central Los Maitenes. Sin embargo, uno de los aluviones más significativos en afectación fue el aluvión de la Quebrada de Macul, ocurrido el 3 de mayo de 1993 a las 10:33, el que dejó 26 personas fallecidas, 8 desaparecidas y 4.000 personas

damnificadas. Se desencadenó en una quebrada precordillerana ubicada en las comunas de Peñalolén y La Florida. La conjugación de un sistema cálido, intensas precipitaciones y material disponible en el interior de la quebrada, generaron las condiciones propicias para el desarrollo del fenómeno. La zona de Farellones y el sector del Cajón del Maipo han sido escenario de varios aluviones. En la primera, tres de ellos ocurrieron el 6 de septiembre de 2009 a las 14.30 horas, provocando cortes la Ruta G-21 en los kilómetros 6, 11 y 13, siendo el kilómetro 6, la zona más afectada. El fenómeno dejó un total de 67 personas damnificadas, 2 fallecidos y 20 heridos, 3 de ellos de gravedad. Unas 50 casas quedaron afectadas, 6 debieron ser demolidas, otras 18 con consecuencias graves. En total 12 vehículos fueron arrastrados por el conjunto de agua, barro y rocas.[1]

Si bien existen varios estudios que micro zonifican la amenaza de remoción en masa asistida por el agua, son pocos los que analizan el potencial que presenta la unidad hidrográfica de una subsubcuenca para el desencadenamiento de este tipo de procesos. Por la conformación morfométrica e hidrográfica de las subsubcuencas, existe una alta probabilidad de desencadenamiento de procesos de remoción en masa, en gran parte de la Región Metropolitana. El peligro potencial de este tipo de eventos, con el siguiente riesgo de pérdida de vidas humanas, así como la perdida de materiales; hacen necesaria la existencia de un levantamiento de información del sector como un instrumento eficaz para evitar o al menos mitigar los efectos nocivos de un aluvión. Su importancia radica en que en general, los sectores de peligros tienden a ser ocupados por personas de escasos recursos que se ubican en estos lugares debidos, principalmente, a que son terrenos de uso público. Por otra parte, el aumento de la población genera una presión sobre el terreno que busca satisfacer las demandas de lugares aptos para vivir, situación que se puede dar en un futuro no muy lejano. De esta manera, esta presión puede provocar que, ante la necesidad de terrenos, se ocupen sitios que presenten algún tipo de peligro. Dada esta combinación de variables, la necesidad de contar con un sistema de alertamiento temprano que permita a las autoridades y organismo competentes, tomar acciones previas, se hace urgente.

2. Objetivo

El presente trabajo busca determinar las subsubcuencas que presentan amenaza de remoción en masa asistida por el agua en la Región Metropolitana de Santiago.

3. Estado del Arte

Los Sistemas de Información Geografica (SIG), cuyos antecedentes datan de varias décadas atrás se han posicionado como una tecnología básica, imprescindible y poderosa, para capturar, almacenar, manipular, analizar, modelar y presentar datos espaciales referenciados [3]. Por tanto, se trata, de una categoría dentro de los sistemas de información que se especializa en manejar datos espaciales, con las particularidades y requerimientos que ello conlleva. Lo importante de los SIG reside en la capacidad para almacenar grandes masas de información geo-referenciada y su posterior análisis de ellas, lo que lo hace idóneo para abordar problemas de planificación y gestión para la toma de decisiones.

Para la realización de los mapas de zonificación de remociones en masa, existen variadas técnicas y métodos de acuerdo al objetivo de cada investigación y la preparación, conocimiento y enfoques que se quiera dar.

La realización del mapa de zonificación, debería proporcionar información tanto de la probabilidad espacial como temporal de la ocurrencia del fenómeno, el tipo de remoción, su magnitud, la velocidad, la distancia de viaje y el límite de avance retrogresivo de los movimientos en masa [4]. Sin embargo éste idealmente se logra en parte por la gran dificultad que entraña establecer cuantitativamente la probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa en grandes áreas y por el costo y el tiempo que se requeriría para obtener la información.

La zonificación “es una herramienta muy útil para la toma de decisiones y consiste en la división del terreno en aéreas homogéneas y la calificación de cada una de estas, de acuerdo al grado real o potencial de amenaza de riesgo o peligro” [5] y prevenir los posibles desastres.

Los avances de Sistemas de Información Geográfica (SIG), por medio de modelos espaciales y simulaciones, han desarrollado técnicas cuantitativas en muchas aéreas de las ciencias de la tierra. Sin embargo, pocas disciplinas han utilizado este insumo para el estudio de riesgos de remoción en masa. Chung propone el uso del SIG para el análisis de peligro de remoción en masa [6], por medio de una Evaluación Multi Criterio que abarca procesos sistemáticos: que comprende la correlación del peligro y la valoración de probabilidad empírica de ocurrencia. El primero obedece a un modelo matemático que genera un “mapa de predicción de ocurrencia” según la probabilidad de futuras remociones en masa,

de acuerdo a las características geomorfológicas y topográficas del área de estudio. La segunda etapa, estima empíricamente la probabilidad del acontecimiento en cada clase de predicción, generado en el primer paso, aplicando una técnica de validación, con el fin de evaluar la exactitud y de las estadísticas a la probabilidad de futuras remociones. Según el autor, este tipo de estudio ha sido ejemplificado por varios expertos en Lisboa, Portugal [6].

4. Método

Área de estudio

Según Börgel [7], la Región Metropolitana de Santiago se emplaza en la zona centro del país, donde se identifican claramente tres unidades geomorfológicas dispuestas de oriente a poniente de la siguiente manera: Cordillera de los Andes, Depresión Intermedia y Cordillera de la Costa.

La Cordillera de Los Andes es representada por un macizo que supera los 5.000 m.s.n.m., donde se pueden nombrar el Volcán Tupungato (6.570 msnm), Volcán Marmolejo (6.108 msnm), Nevados del Plomo (6.050 msnm), Nevado de Los Piuquenes (6.017 msnm) y el Volcán San José (5.856 msnm).

La Depresión Intermedia, también conocida, como Cuenca de Santiago es donde se depositan materiales aluviales y coluviales provenientes de los procesos de acumulación de materiales desde el sistema de drenaje y los cordones montañosos de la Cordillera de los Andes y de los procesos volcánicos.

La Cordillera de la Costa es el límite entre la Región Metropolitana y la Región de Valparaíso donde su fisonomía se presenta como un cordón compacto que delimita, por el poniente a la cuenca de Santiago. En esta zona, el macizo alcanza continuidad y alturas que sobrepasan los 2.000 m.s.n.m., donde destacan el cordón de los cerros del Roble con 2.222 m.s.n.m. y La Campana con 1.828 m.s.n.m.

Un característica importante en la morfología de esta región es el desnivel entre la altitud más baja y la más alta, la que se produce sólo en 130 km aprox, lo que da un cambio de pendientes que van desde 0º hasta 80º. Las fuertes pendientes hacen potencialmente riesgosa de flujos de escombros al 50% de la región.

La principal hoya hidrográfica de esta región es la del río Maipo y sus tributarios. Posee una cuenca que drena unos 15.380 km² y su caudal promedio es de 92,3 m^3 por segundo. Una característica particular de esta red de drenaje es la gran cantidad de material que arrastran sus quebradas, con rodados que pasan los 70 cm de longitud [7].

El clima es templado cálido, del tipo continental. Se caracteriza por un irregular régimen de precipitaciones, que se concentran en los meses de otoño e invierno, con un promedio anual de 384 mm. También presenta un verano seco, con temperaturas que en ocasiones sobrepasan los 30º C [8].

Recopilación de datos

Para el desarrollo del trabajo se utilizó información digital MDE Aster, en formato Raster con resolución de 30 mt., en formato GeoTiff o Tiff Georreferenciado, en coordenadas geográficas Lat/Long, con Datum WGS 84 obtenido desde la pag web http://reverb.echo.nasa.gov y las coberturas shape de “subsubcuencas” y “curvas de nivel” levantadas a una escala de 1:250.000 facilitadas por el Ministerio de Medio Ambiente.

Tratamiento de datos

La determinación de remoción en masa asistida por el agua, se realizó por medio del análisis de variables morfométricas e hidrográficas de las subsubcuencas existentes en el área de estudio a través de SIG, todas mostradas en la Figura 1.

Además de las áreas de cada cuenca, se consideró el Índice de Compacidad (IC) definido según la fórmula de Gravelius, que establece una comparación entre la forma de la cuenca y un círculo. De de esta manera los valores se relacionan con la hidrodinámica, el tiempo de concentración y el tipo de respuesta de la cuenca frente a determinadas precipitaciones, de modo que a un menor valor, el tiempo de concentración será menor y la cuenca tendrá una respuesta más torrencial y brusca. El cálculo de este índice se hace importante por cuanto se relaciona directamente con la capacidad de arrastre de carga sólida que tenga una cuenca.

También se consideró la Pendiente Media (PM) que se define como una variable importante por considerase como el motor de todos los procesos exógenos de movilización de masas por acción de la fuerza de gravedad, con o sin

presencia de agua. Se calculo por medio de la fórmula de Morcionita.

Se incluyó el Régimen Predominante (RP), información que se obtuvo desde el Ministerio de Medio Ambiente.

También se consideró la Jerarquía de drenes (JD); variable que se asocia a los valores de escurrimiento y su torrencialidad.

Finalmente los Caudales Máximos (CM) por medio del método racional; Coeficiente de escurrimiento el cual se calculó relacionando el tipo de relieve, la permeabilidad del suelo y la capacidad de almacenaje de agua de las subsubcuencas.

Para la cuantificación de las variables se realizó una adaptación al método empleado por el M.O.P. en el "Estudio de Facetas Ambientales", en el cual se incluyeron variables a las cuales se les designó un valor absoluto de acuerdo a la importancia de cada variable en el desarrollo del proceso en cuestión.

Tabla N°1: Valores Absolutos (VA) y Relativos (VR)

Variable	Rango	VR	VA
IC	>1.51	3	1.5
	1.26-1.50	2	
	1 – 1.25	1	
PM	>20°	3	2
	8-20°	2	
	<8°	1	
RP	nivopluvial-nival	3	0.5
	pluvionival	2	
	pluvial	1	
JD	4 - 5	3	1
	6 - 7	2	
	8	1	
CM	1.31-1.8	3	1-5
	0.8-1.3	2	
	0.3-0.8	1	

Fuente: Elaboración de los Autores

Las variables y valores presentados anteriormente, fueron enlazados por medio de la siguiente fórmula:

$$ARM^2 = \sum (VR * VA)$$

El resultado fue evaluado en una tabla que cuenta con 4 rangos, en función del tipo de amenaza, presentados a continuación:

Tabla N°2: Valoración del potencial de peligro

Valor	Clasificación
7.5 – 9.5	Bajo
10 – 11.5	Medio
12 – 13.5	Alto
14 – 15.5	Muy alto

Fuente: Elaboración de los Autores

5. Resultados

Dada la morfología propia de la región, dominada por una gran zona cordillerana atravesada por valles transversales y abundantes escurrimientos superficiales, su hidrografía se encuentra compuesta por 41 subsubcuencas de diversos tamaños, donde destacan unidades de menor tamaño con menos de 15 km2, hasta unidades de gran tamaño con más de 800 km2. Lo que implica la mayor capacidad de ésta para captar las precipitaciones, las que escurrirán hasta los sectores más deprimidos. Dependiendo de la forma que presente una unidad, será la respuesta que ésta tendrá. Índice de Compacidad, establece una relación entre la forma y la respuesta frente a las precipitaciones. En esta ocasión los valores obtenidos van entre 1,1 y 1,9, siendo la subsubcuenca del Zanjón de la Aguada Bajo la que presenta el menor valor y la subsubcuenca del Estero Puangue entre Estero Zapata y Estero sin nombre el que presenta uno de los mayores valores. Si se considera que más del 50% de las unidades en estudio presentan valores sobre 1,6, se tiene entonces, que el mismo porcentaje se da una alta torrencialidad. Esta variable también se ve directamente relacionada con la Jerarquía de Drenaje. Como se explicó anteriormente, la importancia de esta variable radica en el mayor o menor grado de torrencialidad que presentan una subsubcuenca. Al existir una gran cantidad de drenes de orden 1 o 2, los procesos de escurrimientos serán más torrenciales, por lo que la potencialidad para arrastrar material es mayor. Tanto la

zona de la Cordillera de la Costa como la Cordillera de Los Andes, presentan una gran cantidad de drenes de primer orden, lo que se relaciona directamente con el tipo de material geológico y la pendiente. Los valores obtenidos en la pendiente van directamente asociados con la geomorfología que presenta la Región y se configuran como un factor importante en la capacidad de arrastre de material por el agua. En el área se presentan fuertes pendientes que van desde 2% hasta 32%, ubicándose los mayores valores en la zona alta de la Cordillera de Los Andes y los menores valores en la Depresión Intermedia. Según Castro y Cereceda [9] desde 15% de pendiente se comienzan a producir movimientos de reptación y resbalamientos de tierras activos. De las 41 subsubcuencas, un 70% tienen pendientes sobre el 15%, por lo que la mayor parte de la superficie de la región presenta valores que podrían desencadenar este tipo de procesos. Se tiene entonces que la suma de las variables anteriores es importante para el desarrollo de este tipo de procesos. Sin embargo, otro factor es la cantidad de agua que una subsubcuenca pueda recepcionar. Depende fundamentalmente de dos variables: la cantidad de agua en estado líquido que pueden recibir las unidades de estudio y el caudal máximo. Así, una subsubcueca que tiene régimen pluvial o pluvio – nival, presenta una mayor probabilidad de generar procesos de remoción en masa que una de régimen nival. 36 de las 41 unidades presentan este tipo de régimen. Ahora, la cantidad de agua que puede concentrar una subsubcuenca depende en gran medida del tamaño de ésta. Resulta así, que los mayores caudales los concentran las subsubcuencas de mayor área y viceversa.

Determinación de Unidades con Amenaza de Remoción en Masa Asistida por el agua

Se realizó una jerarquización que contempla cuatro categorías: riesgo muy alto, alto, medio y bajo. En el mapa N°1 se presenta la jerarquización realizada de acuerdo a las 41 subsubcuencas que ésta tiene. Se observa así, que prácticamente toda la zona que corresponde a la Precordillera y Cordillera de los Andes presenta un peligro muy alto y alto. Destaca una unidad en la Cordillera de la Costa, específicamente, en la zona de Altos de Cantilla, comuna de Alhué, donde se ubica un macizo de mayor altitud y pendientes. Lo anterior se condice con los registros históricos que dan cuenta de la ocurrencia de procesos de remoción en masa en esta zona. Por su parte, la zona de la depresión intermedia arrojo resultados de peligrosidad bajo, consecuentemente con las características morfológicas que esta presenta, principalmente, menor pendiente y valores de índice de compacidad cercanos a 1, lo que se refleja en una menor torrencialidad.

En este caso, resulta importante mencionar el resultado de la subsubcuenca del Estero Puangue, donde se observa una ruptura del macizo de la Cordillera de la Costa, en relación a sus características morfológicas.

Ahora bien, los resultados obtenidos se deben a las características hidrográficas que estas subsubcuencas presentan. La mayoría de las unidades de estudio presenta pendientes sobre los 20°, valor que representa el inicio de los movimientos en masa. Además, las abundantes precipitaciones registradas en el área (superior a los 400 mm, en promedio, al año), sumado a los altos valores registrados en el índice de compacidad da como resultado subsubcuencas con una gran capacidad de arrastre de materiales frente a fuertes precipitaciones.

El hecho que este sistema hidrográfico presente altos riesgos de flujos de escombros asistidos por el agua, pone en peligro a las poblaciones que se encuentren a la salida de éste. En la Región Metropolitana, una importante cantidad de población se ubica en los sectores de los conos de deyección. El análisis del resultado obtenido lleva a pensar que las estrategias de desarrollo y expansión de las ciudades, se realicen con miras hacia el sector poniente, área que presenta un menor peligro de flujos de escombros asistidos por el agua, dado las características propias de este sector, de lo contrario se estaría poniendo en riesgo a la población.

Resulta de vital importancia que las autoridades desarrollen medidas que regulen la planificación en los sectores rurales y que impida el emplazamiento de asentamientos humanos en los lugares que representen algún grado de riesgo físico. Para disminuir el riesgo que presenta la población se puede erradicar los habitantes del lugar o bien construir obras de encauzamiento de los flujos, sin embargo, esta medida sería efectiva para aquellos eventos de mediana o baja intensidad, ya que los de mayor intensidad suelen arrastrar todo lo que encuentren a su paso. La alternativa más segura sería la erradicación de la población y el impedimento de la instalación de nuevas poblaciones. Si bien, se disminuye el riesgo sacando a la población de estos lugares no hay que olvidar que ellos representan, por siempre, una zona de peligro.

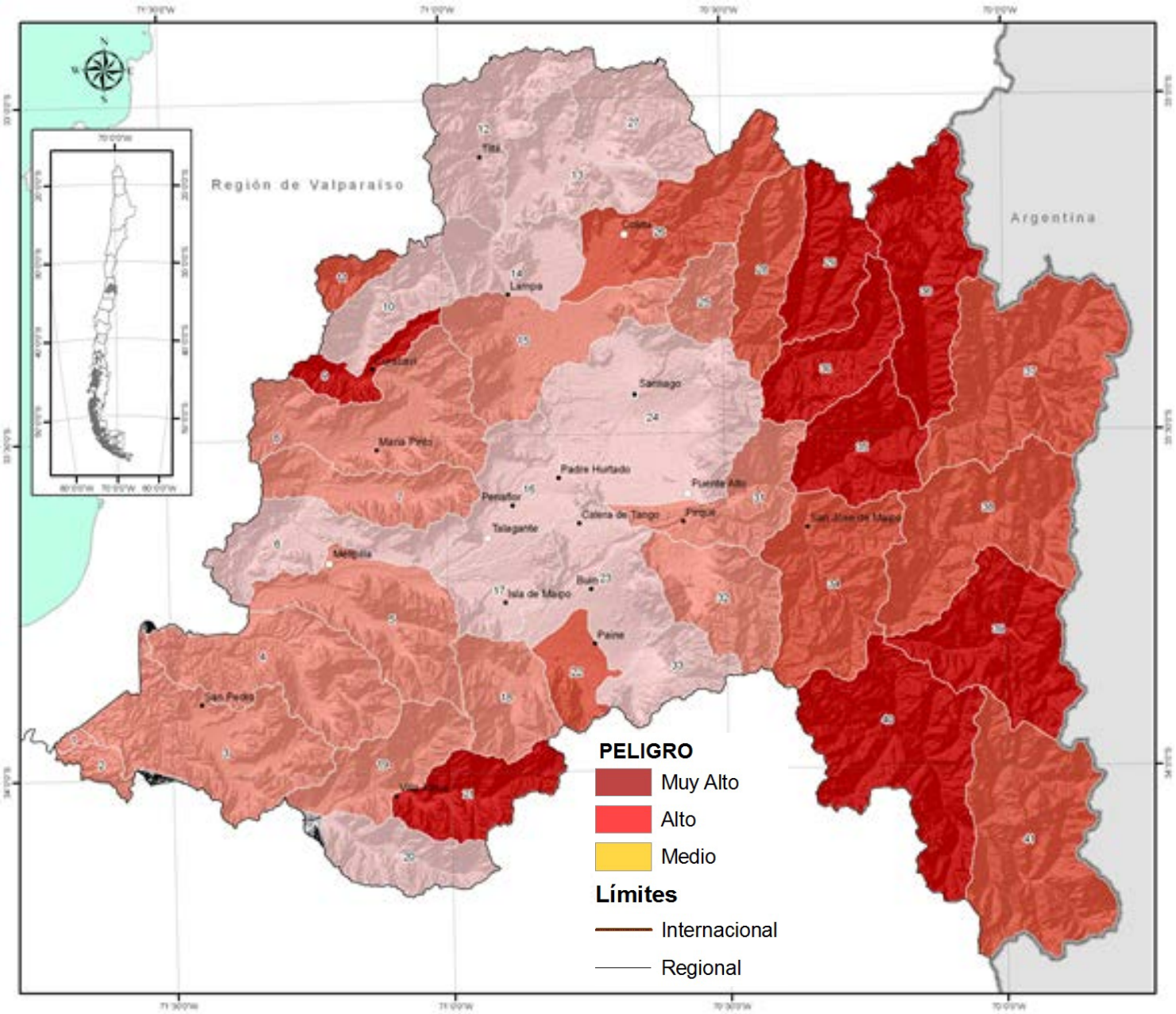

Figura 1: Mapa Amenaza de Remoción en Masa Asistida por el Agua.
Fuente: Elaboración de los Autores

6. Conclusiones Generales

En el área de estudio existen condiciones morfológicas y antecedentes históricos que señalan la probabilidad y potencialidad de ocurrencias de procesos de remoción asistidos por el agua. Lamentablemente, los registros que se encuentra disponible de eventos desastroso/catastróficos no señalan las precipitaciones en las cuales se desarrollaron, por lo que no se pudo establecer un parámetro pluviométrico específico.

Ahora, la ocurrencia de flujos de escombros asistidos por el agua se debe a las características particulares que presentan las subsubcuencas del área de estudio:

1. Una alta pendiente media que supera los 25°, lo que facilita el arrastre de materiales hacia las zonas bajas en donde se ubica la población.

2. Valores de índice de compacidad que se traducen en un gran potencial de arrastre de material al interior de

las subsubcuencas, con valores que superan los 1,4, dando cuenta de la forma alargada que tienes las unidades estudiadas.

3. Precipitaciones esporádicas de gran magnitud, con intensidades que superan los 30 mm, entre otras.
Como resultado se determinó que casi un 50% del área de estudio presenta una alta probabilidad de ocurrencia de flujos de escombros asistidos por el agua. Las subsubcuencas que presentan un riesgo muy alto se ubican hacia el interior de la cordillera en la zona limítrofe con argentina, mientras que las de riesgo alto o medio se ubican en la zona precordillerana, Cordillera de la Costa e inmediata al emplazamiento de la población. Es por esto que resulta importante que la población se localice en los sectores que no sean los desagües de las quebradas pertenecientes a este sistema hidrográfico, ya que representan un alto riesgo de remoción en masa asistida por el agua por el hecho de que las subsubcuencas descargan el material arrastrado en estos lugares.

De acuerdo al posibilismo geográfico, la relación entre el ser humano y el medio ambiente está condicionada por las técnicas que éste último utilice en su ocupación. Por esto, la utilización de zonas con amenaza de remociones en masa asistidas por el agua como suelos urbanos, es absoluta responsabilidad de cada una de las personas que habitan estos lugares. Si bien el estudio no considera una evaluación de riesgos asociados a las personas, si se configura como un elemento a considerar a la hora de planificar terrenos con usos de suelos urbanos, ya que brinda una parte importante de los antecedentes necesarios para que esta gestión se realice bajo un concepto de seguridad.

Referencias

[1] Arturo Hauser (2000). Flujo de detritos en segmento del Camino Internacional a Argentina, sector Juncal, Paso Los Libertadores: Causas, efectos, medidas de control, SERNAGEOMIN. Santiago, Chile.

[2] R. J. Rice, Fundamentos de Geomorfología, 1983, Paraninfo, Madrid, España.
[3] T. W. Foresman, The History of Geographic Information Systems: Perspectives from the Pionners, 1998, Prentice Hall.
[4] Van Westen, et al. Introducción a los deslizamientos; Mapeo de los deslizamientos empleando fotografías aéreas (Documento en línea) Disponible://www.itn.nl/…140%20amenaza%20%por%20deslizamientos/pdf.

[5] Jaime Suarez, Deslizamiento y estabilidad de taludes en zonas tropicales. 1998, Buacaramango, Colombia, Editorial Ingeniería de Suelos Ltda.

[6] Luiggi Brignardello, Proposición Metodológica Para la evaluación y zonificación integrada de riesgos naturales mediante la aplicación de Sistemas de Información Geográfica. Revista Norte Grande N° 24; 91-102. Instituto de Geografía, PUC, 1997, Revista Scielo.

[7] Reinaldo Börgel, Colección Geografia de Chile, Geomorfología, Tomo II, Instituto Geografico Militar, 1983.

[8] Dirección Meteorológica de Chile. www.meteochile.cl

[9] Consuelo Castro y Pilar Cereceda (1988) Estudio Facetas Ambientales, Ministerio de Obras Públicas.

Notas

1 Información obtenida desde base de Registros de ONEMI, comprendida entre los años 1980 – 2014)

Journal of Technological Possibilism

Paper Info

Fecha de recepción: Diciembre 2014

Fecha de aceptación: Diciembre 2014

Cantidad de revisores: 3.

Cantidad de revisiones consolidadas: 1.

Total de observaciones: 8

Índice de Novedad: 0,57.

Índice de Utilidad: 0,95.