

# **GEODINÁMICA Y ESTIMACIÓN PROBABILÍSTICA DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE UNA CUENCA DE ALTA MONTAÑA A EXPERIMENTAR PROCESOS DE REMOCIÓN EN MASA EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE.**

**Esteban Delgado A.**

## **I. INTRODUCCIÓN**

A escala global las áreas de montaña constituyen las zonas de más alta actividad morfogénica desde el punto de vista de la geodinámica. Esta condición, con un alto grado de confianza, se ha visto en aumento en las últimas décadas como efecto del cambio climático que experimenta el planeta. Entre otros efectos, este ha provocado el incremento en la inestabilidad del terreno y las avalanchas de roca en tales espacios (INTERGUBERNAMENTAL PANNEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC-, 2007). Chile posee más de un 80% de su superficie continental sobre espacios de montaña y en este sentido es altamente probable que este país se vea afectado por el aumento de la inestabilidad mencionada y dada la amenaza que ello significa para las personas, sus bienes y sus actividades, resulta de vital importancia monitorear el nivel de actividad geodinámica en el territorio. A su vez, dicho monitoreo, implica trabajar de manera continua en la generación de nuevas y mejores metodologías que aumenten la capacidad de análisis y permitan diseñar estrategias y planes de prevención, respuesta y mitigación más adecuados.

En este contexto, el presente trabajo se centró en el análisis geodinámico de una cuenca de alta montaña de la zona central de Chile (la más poblada del país) y tuvo por objetivo: (i) caracterizar geodinámicamente dicha cuenca; (ii) identificar las áreas con mayor grado de susceptibilidad natural, asociada a la dinámica de vertientes en su interior y; (iii) evaluar la utilización de una

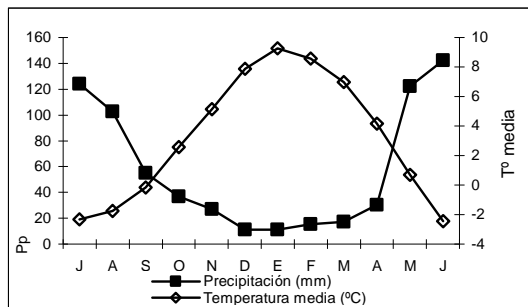
metodología de carácter probabilístico, fundada en el análisis condicional, para realizar la zonificación de susceptibilidad natural del terreno a ser afectado y desarrollar remociones en masa en ambientes periglaciares y glaciares de alta montaña.

El área de estudio correspondió a la cuenca del río Las Leñas, tributaria de la cuenca del río Cachapoal, principal sistema hídrico de la VI Región del país y abarcó el espacio comprendido entre las coordenadas: 378969E-6197751N; 403838E-6193863N; 403811E-6183434N, y; 379753E-6182969N (WGS84, H 19S). Su superficie es de 173.6 km<sup>2</sup> y se desarrolla en su totalidad por sobre los 1300 m.s.n.m., con rangos de altitudes máximas de sus divisorias de aguas por el norte y sur en torno de los 3.700 m.s.n.m., mientras que la divisoria oriental (límite entre Chile y Argentina) se eleva en general por sobre los 4.000 m.s.n.m. Su altitud máxima corresponde al ‘Monte del Atraveso’ con 4.590 m.s.n.m..

Esta cuenca se encuentra inserta en dos ambientes morfoclimáticos distintos: media y alta montaña y ha sido modelada sobre estructuras de origen sedimentarias de tipo continental y marino, fuertemente plegadas y tectonizadas, situación que sumada a la acción de los ciclos de hielo – deshielo, propios de ambientes periglaciares, proporciona abundantes cantidades de materiales coluviales que son depositados al pie de sus vertientes. Estas, a su vez, presentan pendientes pronunciadas (muchas en posición de Hog-back) y fuertemente excavadas por la actividad paraglacial.

El régimen climático de la cuenca corresponde al de un bioclima del tipo mediterráneo pluviestacional – oceánico, con una temperatura media anual inferior a los 3,5° C; una mínima media inferior a los -4° C y una máxima media levemente superior a los 10° C.

La precipitación media anual de la cuenca es del orden de los 695 mm/año, concentradas principalmente en el periodo comprendido entre mayo a septiembre, aunque GARREAUD (2002) registró precipitaciones superiores a los 3.000 mm/año y eventos individuales mayores a 74 mm/24 hrs, monto muy por sobre los 50 mm/24 hrs establecidos por HAUSER (1993) como el umbral para la detonación de procesos de remoción en masa en la zona central de Chile. Estos hechos probablemente se encuentran asociados a alteraciones cíclicas producidas por el fenómeno del Niño en esta latitud.



Por su parte, la más alta oscilación térmica se produce entre los meses de noviembre a marzo, periodo en que la temperatura máxima puede elevarse por sobre los 10° C, mientras que la temperatura mínima media es inferior o levemente superior a 0° C generando condiciones adecuadas para una intensa actividad de los procesos geomorfológicos inducidos por el ciclo hielo – deshielo (crioclastía) y los cambios de temperatura (termoclastía).

Por último, cabe señalar que los antecedentes presentados en este documento corresponden a un resumen ampliado de una investigación de mayor escala realizada por el autor con anterioridad. En tal sentido pueden ser complementados con los antecedentes expuestos en el documento original denominado ‘Geodinámica y valoración del nivel potencial de riesgo natural en alta montaña: Cuenca del río Las Leñas, vertiente occidental de los Andes Centrales’.

## II. METODOLOGÍA

La caracterización geocológica y geodinámica de la cuenca se realizó a partir de una exhaustiva revisión y análisis de antecedentes preexistentes (estudios técnicos, cartografía, artículos científicos, etc.), mientras que la generación de nueva información, se efectuó principalmente a partir de técnicas indirectas diferenciadas para cada variable en estudio.

Se caracterizó la cuenca en términos climáticos, geológicos geomorfológicos hidrográficos y vegetacionales, analizando diversas variables al interior de cada factor (formaciones, tectónica y sismicidad, procesos geomorfológicos y morfometría, uso del suelo, etc.). Luego de la caracterización y análisis de cada factor, se consideraron relevantes para la definición de la susceptibilidad del terreno a desarrollar procesos de remoción en masa, los siguientes factores y variables:

Factor	Variable
Dominio morfoclimático	Cinturones geocológicos
Geología	Formaciones superficiales
Geomorfología	Sistemas de vertientes
Vegetación y uso del suelo	Formaciones vegetacionales y usos del suelo
Pendientes	Rangos de pendientes
Exposición	Orientación de las vertientes

Por su parte, dada la escala del análisis utilizada (1:20.000) y el ambiente morfoclimático en el que se trabajó, los procesos de remoción en masa considerados fueron: Caídas de rocas (*Rockfall*); Deslizamientos rotacionales (*Rotational slide*); Deslizamientos de roca (*Rockslide*); Flujos de roca (*Rockflow*); Flujos de detritos (*Debrisflow*); Gelifluxión; Avalanchas de rocas (*Rock avalanche*), y; Avalanchas o flujos de nieve (*Snow flows*)

La determinación de la susceptibilidad del terreno para experimentar procesos de remoción en masa, fue realizada utilizando la técnica del análisis de probabilidad

condicional agregada, desarrollada por CHUNG y FABBRI (1993) y posteriormente mejorada por CHUNG y FABBRI (1995, 1999, 2002, 2003, 2005); CHUNG y LECLERC (2003); ZÉZERE *et al* (2004); GUZZETTI (2005) y BONACHEA (2006), entre otros. Esta aproximación pertenece al ámbito de los métodos probabilísticos, con un enfoque arraigado en la utilización del Teorema de Bayes (estadística Bayesiana), y se define de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\text{Prob}\{F_p|v_1(p), \dots, v_n(p)\} = \frac{\text{Prob}\{v_1(p)\} \dots \text{Prob}\{v_n(p)\} \text{Prob}\{F_p\} \frac{\text{Prob}\{F_p/v_1(p)\}}{\text{Prob}\{F_p\}} \dots \frac{\text{Prob}\{F_p/v_n(p)\}}{\text{Prob}\{F_p\}}}{\text{Prob}\{v_1(p), \dots, v_n(p)\}}$$

Donde la primera componente de la ecuación está integrada por las probabilidades relacionadas a los datos espaciales utilizados y es igual a 1. La segunda representa la probabilidad previa de encontrar una remoción en el área de estudio y la tercera, da cuenta de como cada una de las *n* evidencias, se relacionan con el modelo de predicción.

Tanto el cálculo, como la generación de la información necesaria para ejecutar esta última ecuación se realizó, tal como expone ZÉZERE *et al* (2004) y BONACHEA (2006), de acuerdo con las siguientes consideraciones:

La probabilidad previa de encontrar una remoción en el área de estudio se define por la relación:

$$\text{Área afectada/ área total}$$

Asimismo, la probabilidad previa de encontrar una clase o unidad definida al

interior de uno de los mapas de factores condicionantes dentro del área de estudio está dada por la relación:

$$\text{Área de la clase/área total}$$

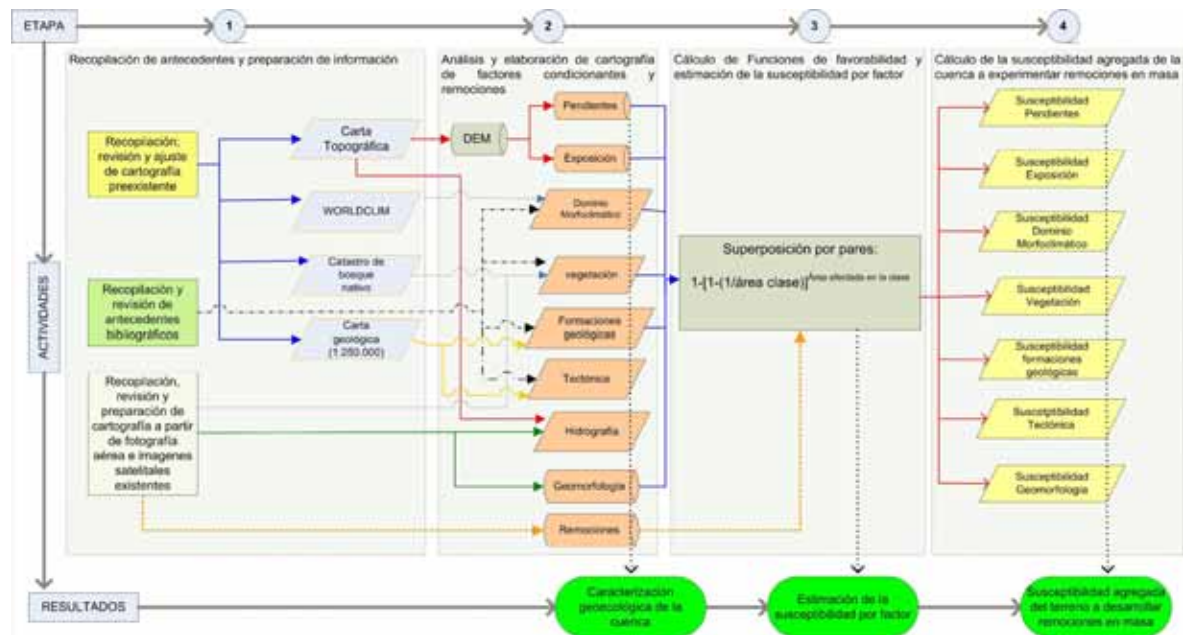
Entonces, la probabilidad condicional de encontrar una remoción en una determinada clase, de un factor establecido queda definida, de acuerdo con CHUNG y FABBRI (1993) por:

$$1 - (1 - \text{1/área de la clase})^{\text{área afectada en la clase}}$$

La aplicación de esta última ecuación a cada uno de los factores de manera independiente, entrega valores que pueden ser considerados como valores de favorabilidad de cada categoría de ellos (CHUNG y FABBRI, 1993; REMONDO *et al.*, 2003 en ZÉZERE, 2004).

Por último, la generación de la cartografía final de susceptibilidad del terreno a desarrollar procesos de remoción en masa es equivalente al producto del proceso de superposición de los resultados obtenidos para cada factor condicionante.

Esquemáticamente, la metodología seguida en el estudio se aprecia en la figura siguiente.



### III. RESULTADOS

#### 1.- Unidades identificadas por variable analizada.

- a. Cinturones geocológicos (Dominio morfoclimático)

Al aplicar, de manera adaptada, los criterios de zonificación vertical geocológica expuestos por KOTARBA y KOTARBA *et al.* (1984, 1987, GARCIA-RUIZ, 1990) fue posible distinguir tres cinturones geocológicos distintos: ‘Montano alto’ en media montaña; ‘Subnival alpino superior’ y ‘Nival’, en ambiente periglacial de alta montaña, los cuales presentan la siguiente distribución:

Cinturón Geocológico	Superficie (km <sup>2</sup> )	%
Montano Alto	8,45	4,87
Subnival Alpino Superior	135,01	77,75
Nival	30,18	17,38

- b. Formaciones superficiales (Geología)

La geología de la cuenca está constituida por depósitos sedimentarios y volcánicos, tanto marinos, como continentales, de edades comprendidas entre el Jurásico Superior y el

Holoceno, que han sido instruidos por cuerpos macizos y filones granodioríticos de edades posteriores, los cuales presentan la siguiente importancia relativa.

Formación superficial	Área (km <sup>2</sup> )	%
Formación Río Damas	21.01	12.1
Formación Leñas - Espinoza	2.28	1.31
Formación Coya – Machalí	40.63	23.4
Formación Farellones	3.03	1.74
Cenozoica		
Intrusivos de Diorita y Granodiorita	6.13	3.53
Sedimentos fluviales y glaciales y Cuaternarios	100.5	57,9

- c. Sistemas de vertientes (Geomorfología)

Las principales unidades identificadas (el sistema de vertientes, las formas de contacto, las formas fluviales polifásicas, las acumulaciones y las formas palustres) y su relevancia espacial se aprecian en la siguiente tabla. Como se señaló con antelación, para este estudio las unidades consideradas relevantes corresponden a los sistemas de vertientes.

Sistemas de vertientes	Área (km <sup>2</sup> )	%
Vertiente conforme con escamas	47,0	27,1
Vertiente conforme simple	10,3	5,9

Vertiente de Hog back	21,2	12,2
Vertiente discordante indefinida	27,1	15,6
Vertiente inversa de cara libre rugosa y talud	37,5	21,6
Conos coluviales	9,8	5,6
Conos de avalancha	5,2	3,0
Conos de deyección caóticos	2,8	1,6
Terrazas aluviales	0,6	0,3
Lechos torrenciales	4,0	2,3
Morrenas	1,3	0,7
Depósitos de remoción en masa	1,1	0,6
Nivel de terraplenamiento palustre	0,6	0,3
Glaciares rocoso	3,7	2,1
Geliflujión en lengua	0,0	0,1
Geliflujión en lupas	0,6	0,3
Geliflujión laminar	0,1	0,0

#### d. Pendientes

La carta de pendientes de la cuenca se elaboró a partir de un sistema de clasificación mixto (propio) adaptado de los trabajos anteriores de ARAYA & BORGEL (1972); YOUNG (1975); FERRANDO (1993) y DE PEDRAZA (1996), el cual se detalla a continuación con los antecedentes específicos de su aplicación en la cuenca.

Rangos de pendientes	Superficie km <sup>2</sup>	%
0 - 5°	6,31	3,6
5° - 10°	6,14	3,5
10° - 25°	45,41	26,17
25° - 45°	96,1	55,36
45° - 90°	19,61	11,3

#### e. Exposición de vertientes

Para efectos de este trabajo, se consideró adecuado dividir los sistemas de vertientes en cuatro categorías de orientación principales y una categoría secundaria que da cuenta de las superficies con valores negativos (-1), correspondiente a los relieves planos, las cuales son expuestas en la siguiente tabla.

Orientación	Rangos	km <sup>2</sup>	%
Plano	-1	2,0	1,1
Norte	315 - 360; 0 - 45	57,1	32,9
Este	45,1 - 135	28,9	16,6
Sur	135,1 - 225	34,5	19,8
Oeste	225,1 - 315	50,9	29,3

## 2.- Procesos de remoción en masa.

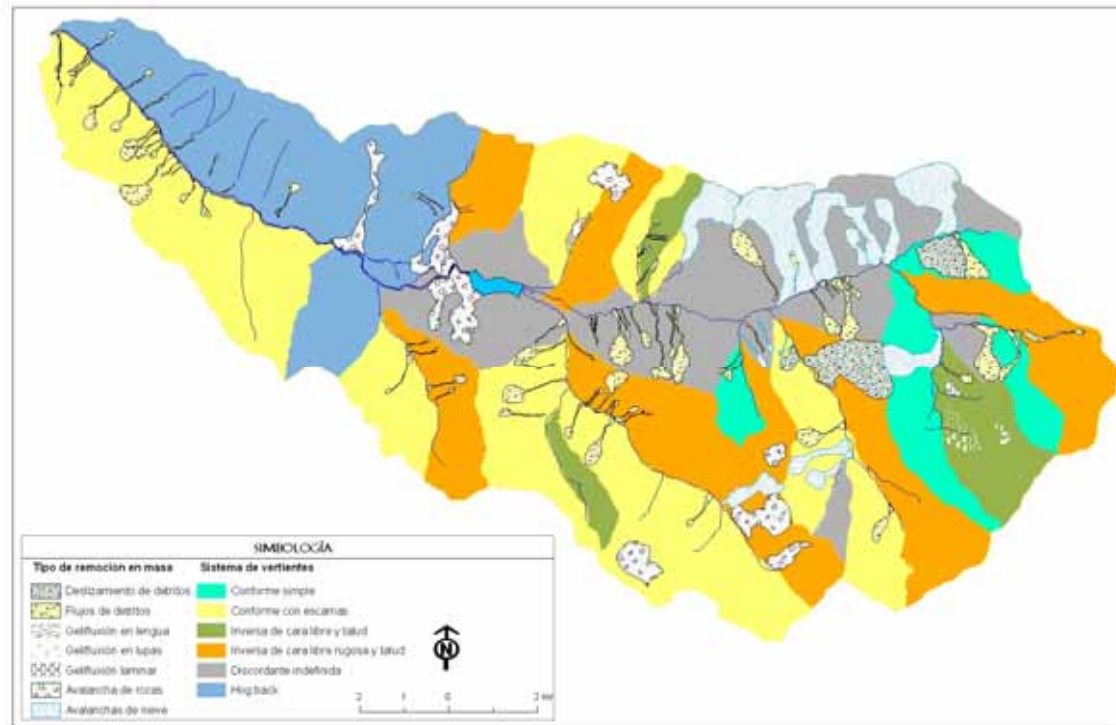
En la cuenca fue posible reconocer caídas de rocas; deslizamientos de detritos; flujos de detritos; avalanchas de roca; avalanchas de nieve, y; geliflujión en sus diversos tipos. En el dimensionamiento de éstos se consideraron, además del área de detonación, los canales o talwegs por donde se evacuan los materiales y el área donde dichos materiales se depositan

Proceso de remoción	Superficie afectada (km <sup>2</sup> )	% de la superficie afectada	% de la superficie de la cuenca (173,63 km <sup>2</sup> )
Caídas de rocas	85,8	80,10	49,42
Avalancha de rocas	4,67	4,36	2,69
Flujos de detritos	5,37	5,02	3,10
Deslizamiento de detritos	2,60	2,43	1,50
Geliflujión en lengua	0,04	0,04	0,02
Geliflujión en lupas	0,11	0,10	0,06
Geliflujión laminar	0,07	0,07	0,04
Avalanchas de nieve	8,51	7,94	4,90
<b>Total</b>	<b>107,18</b>	<b>100</b>	<b>61,73</b>

Existe en la cuenca, una predominancia muy marcada de los procesos de remoción del tipo gravitacional, particularmente, caídas de rocas, las cuales cubren 85,8 km<sup>2</sup> y representan más del 80% de la superficie afectada por remociones en masa en la misma (49,4% de la superficie total de la misma). Luego de este tipo de movimientos, los procesos de remoción de mayor relevancia son: avalanchas de nieve con 8,5 km<sup>2</sup> (7,9% de la superficie afectada y 4,9% de la superficie de la cuenca); flujos de detritos con 5,3 km<sup>2</sup> (5% de la superficie afectada y 3,1% de la superficie de la cuenca); avalanchas de rocas con 4,6 km<sup>2</sup> (4,3% de la superficie afectada y 2,6% de la superficie de la cuenca), y; deslizamientos de detritos con 2,6 km<sup>2</sup> (2,4% de la superficie afectada y 1,5% de la superficie de la cuenca). Los procesos de geliflujión en lupa, geliflujión laminar, y; geliflujión en

lengua ocupan superficies menores al 1% de la superficie de la cuenca tal como se aprecia

en la cartografía siguiente.



### 3.- Susceptibilidad de la cuenca a ser afectada por procesos de remoción en masa

En forma significativa, el proceso de remoción al que la cuenca es más susceptible es la caída de rocas. Esta afecta al 49,4 % de la superficie de la cuenca y se desarrolla de manera primordial, aunque no exclusiva, en vertientes de cara libre y talud (ambos tipos) y en posiciones inversa y discordante.

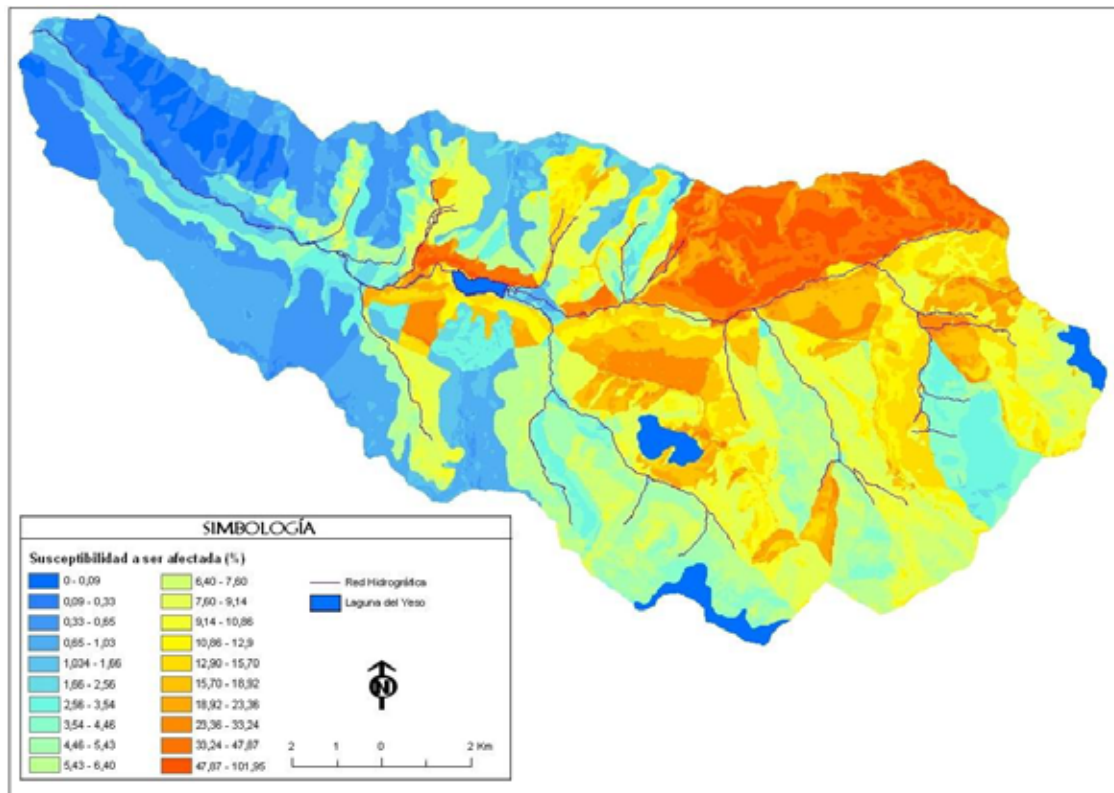
No obstante lo anterior y sin perder de vista esta constatación, por una razón práctica, las caídas de rocas no son consideradas en el análisis integrado. Esto se debe a que la inclusión de la superficie mapeada con caídas de rocas al análisis conjunto generaría una distorsión inevitable en los resultados, dado que, al cubrir la totalidad de la superficie comprometida en el 49,4%

correspondiente a su amplitud espacial, la evidencia provocaría que la probabilidad espacial para todos los factores en el área cubierta por este proceso fuese igual a 1, o lo que es lo mismo 100%.

Habiendo hecho la aclaración anterior, al aplicar las ecuaciones de probabilidad previa y de probabilidad condicional, de acuerdo con el método propuesto por CHUNG y FABBRI (1999), a cada una de las clases de los factores evaluados, se obtuvieron los valores contenidos en la tabla siguiente. Asimismo, la aplicación de las reglas de probabilidad condicional agregada, de acuerdo con las ecuaciones propuestas por los autores antes mencionados, permite estimar espacialmente la probabilidad que la cuenca tiene de ser afectada por los procesos de remoción en análisis, conforme a lo que se muestra en la a continuación de la tabla.

Favorabilidad y probabilidad espacial de factores condicionantes a ser afectados por procesos de remoción en masa.

<b>Factor</b>	<b>Clases</b>	<b>Área clase (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área afectada (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Valor de favorabilidad</b>	<b>Probabilidad espacial de ser afectada por remoción en masa (%)</b>
<b>Dominio Morfoclimático</b> (cinturones geocológicos)	Montano alto	8449375	371875	0,0431	4,3
	Subnival alpino superior	135123125	17736875	0,1230	12,3
	Nival	29992500	3233750	0,1022	10,2
<b>Geología</b> (formaciones)	Río Damas	20999375	4080625	0,1766	<b>17,7</b>
	Leñas espinoza	2276250	331250	0,1354	13,5
	Rocas Intrusivas	6139375	1586875	0,2278	<b>22,8</b>
	Coya Machalí	40642500	940625	0,0229	2,3
	Farellones	3023750	11250	0,0037	0,4
	Dep. Cuaternarios	100545000	14399375	0,1334	13,3
<b>Geomorfología</b> (vertientes)	Conforme con escamas	52758125	3576250	0,0655	6,6
	<i>Hogback</i>	26509375	1133125	0,0418	4,2
	Cara libre rugosa y talud	38242500	4103125	0,1017	10,2
	Discordante indefinida	35611250	10234375	0,2498	<b>25,0</b>
	Cara libre y talud	8716250	363750	0,0409	4,1
	Conforme simple	11793750	1939375	0,1516	<b>15,2</b>
<b>Vegetación</b> (formaciones)	Sin vegetación	141980000	19065625	0,1257	<b>12,6</b>
	Matorral suculentas abierto	10625	0	0,0000	0,0
	Matorral suculentas semidenso	7192500	600625	0,0801	8,0
	Matorral abierto	9293125	213750	0,0227	2,3
	Matorral arborescente muy abierto	120000	11250	0,0895	8,9
	Matorral pradera abierto	2276250	48125	0,0209	2,1
	Matorral semidenso	12086875	1394375	0,1090	10,9
<b>Pendientes</b>	Llana	6313750	602500	0,0910	9,1
	Leve	6136250	1081875	0,1616	<b>16,2</b>
	Moderada	45414375	7018125	0,1432	<b>14,3</b>
	Fuerte	96088750	10676875	0,1052	10,5
	Acantilada	19605625	1958750	0,0951	9,5
<b>Orientación</b>	Plano	2002500	150000	0,0722	7,2
	Norte	57140625	5268750	0,0881	8,8
	Este	28943125	2903125	0,0954	9,5
	Sur	34486250	7848125	0,2035	<b>20,4</b>
	Oeste	50986250	5168125	0,0964	9,6



Como se desprende del análisis de los datos, los valores de favorabilidad más altos, es decir, las mayores probabilidades espaciales de que un área de la cuenca sea afectada por flujos, deslizamientos o avalanchas, se presentan en dominio periglacial de alta montaña (ambos cinturones geoecológicos), sobre materiales de la formación Río Damas y rocas intrusivas, en posiciones discordante indefinida y conforme simple, sobre terrenos sin cobertura vegetal, en pendientes leves a moderadas, ocupando principalmente relieves de exposición sur.

De las probabilidades calculadas, llaman especialmente la atención dos hechos. Por una parte, la alta probabilidad espacial a ser afectada que tienen las rocas intrusivas y, por otra, los altos valores de favorabilidad mostrados por las categorías de pendientes leve y moderada. Sobre esto, se estima que elementos explicativos de ambas situaciones pueden ser los siguientes:

Las rocas intrusivas en la cuenca ocupan una superficie menor en comparación con el

resto de las formaciones, por lo tanto, al coincidir espacialmente cualquiera de los procesos de remoción evaluados, cubriendo una superficie cercana a la de esta unidad, su probabilidad de ser afectada puede llegar a ser muy alta (área afectada/área de la unidad), incluso 1. Por ello el valor de favorabilidad también sería alto, dada la evidencia existente.

Como se señaló con anterioridad, la susceptibilidad a ser afectada se refiere a la posibilidad espacial de que un área intervenga en el ciclo de desarrollo de una remoción, ya sea siendo parte del área de detonación, de transporte o de depositación de los materiales removidos.

En este sentido, se estima que los valores de favorabilidad más altos en pendientes leves a moderadas, se debe a que es en ese tipo de pendientes donde se produce la depositación de los materiales removidos de las zonas altas y, dado que el volumen de los materiales sueltos ocupan una superficie mayor en pendientes leves o moderadas, que los materiales compactados en el lugar de



arranque de la remoción, la superficie afectada por el mismo proceso es mayor en las pendientes de depositación que en las zonas de arranque, por lo tanto la evidencia de la remoción genera un valor de favorabilidad mayor en dichas zonas.

Como es natural, las áreas de detonación de los procesos de remoción mapeados se encuentran sobre pendientes más pronunciadas que sus áreas de transporte y depositación. Esto provoca que desde la toma de la fotografía aérea hasta la digitalización de los procesos exista una distorsión de la superficie mapeada (subdimensionamiento), derivado del efecto del relieve, toda vez que en todo el proceso se está mirando e interpretando procesos en una superficie plana (papel, pantalla), en un ángulo inadecuado (diagonal o tangencial), para definir con exactitud su superficie. Este efecto es menor en la medida que las superficies son más planas y la toma de la fotografía se realiza de manera más cercana a un ángulo perpendicular entre la superficie y el lente de la misma.

La expresión gráfica y espacial de las probabilidades ratifica las observaciones de campo, en cuanto a que existe una marcada diferencia entre la zona media baja de la cuenca y su zona media alta, siendo esta última, la que es afectada con mayor recurrencia por procesos de remoción en masa y la que, al mismo tiempo, tiene menor capacidad para evacuar los materiales detríticos desplazados por estos procesos (lechos de erosión con balance de disección negativo).

En términos generales, el eje hidráulico principal de la cuenca, en sus vertientes

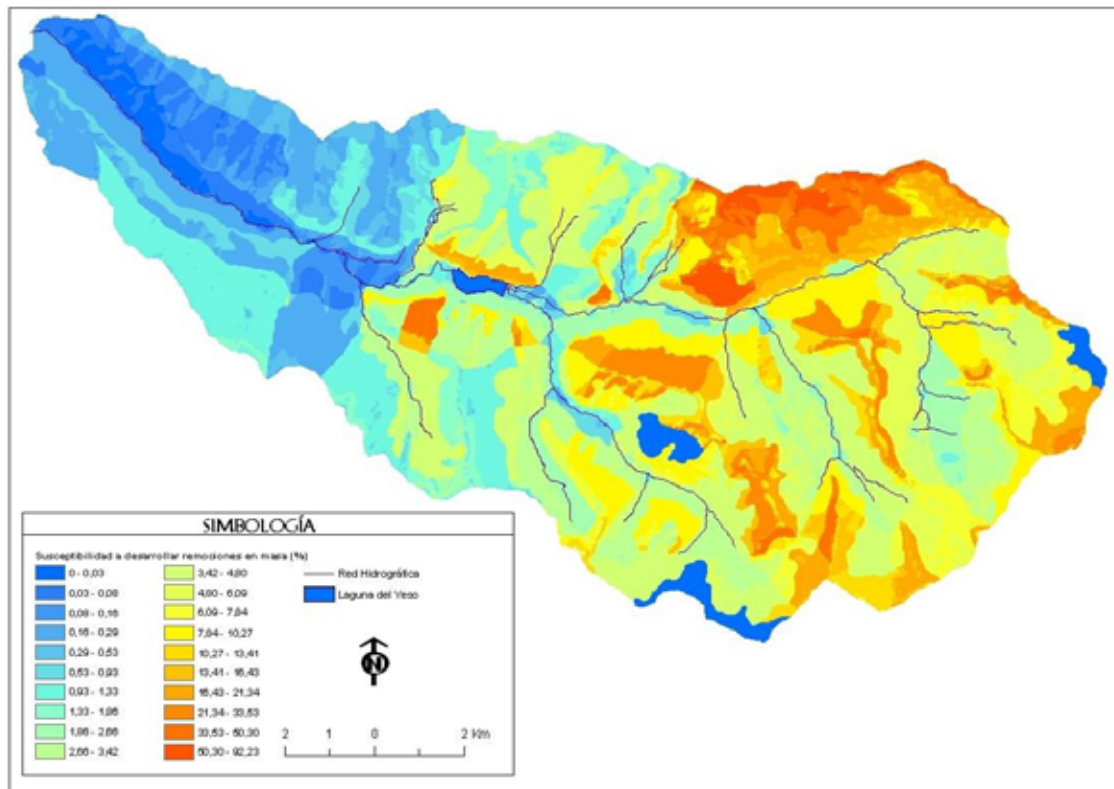
norte y sur, es el área que presenta las mayores posibilidades de ser afectado por una remoción del tipo analizado. En términos particulares, dentro de la zona media alta de cuenca y en este mismo eje, el área con mayores probabilidades de ser afectada por un proceso de remoción, específicamente por avalanchas de nieve, es la zona comprendida a partir, aproximadamente, de la confluencia del río Las Leñas con el curso de la quebrada Cerro Blanco. Esta zona, corresponde a una vertiente de exposición sur, en posición discordante indefinida, con pendientes superiores a 25°, excavada sobre materiales pertenecientes a la formación Río Damas

#### **4.- Susceptibilidad de la cuenca a desarrollar procesos de remoción en masa**

A efectos de comprobar la tesis planteada en la sección anterior, respecto de las diferencias observadas entre la susceptibilidad esperada de algunas unidades y la probabilidad espacial calculada, y como forma de tener claridad respecto no sólo de que una unidad espacial de la cuenca sea afectada por una remoción, sino que desarrolle (sea su zona de arranque) un proceso morfogenético de estas características, se realizó otro análisis de susceptibilidad espacial (del mismo tipo), pero esta vez considerando como evidencia, sólo el área de origen de las diversas remociones mapeadas, es decir, excluyendo la zona de transporte y el área de depositación. Los resultados de este análisis se expresan en términos numéricos en la tabla siguiente, y en términos gráficos en la figura posterior.

Favorabilidad y probabilidad espacial de factores condicionantes a desarrollar procesos de remoción en masa.

Factor	Clases	Área clase (m <sup>2</sup> )	Área afectada (m <sup>2</sup> )	Valor de favorabilidad	Probabilidad espacial a desarrollar remociones en masa (%)
<b>Dominio Morfoclimático</b> (cinturones geocológicos)	Montano alto	8449375	163125	0,0191	1,9
	Subnival alpino superior	135123125	9766875	0,0697	7,0
	Nival	29992500	3223125	<b>0,1019</b>	10,2
<b>Geología</b> (formaciones)	Río Damas	20999375	3761875	<b>0,1640</b>	16,4
	Leñas espinoza	2276250	278750	<b>0,1153</b>	11,5
	Rocas Intrusivas	6139375	1497500	<b>0,2164</b>	21,6
	Coya Machalí	40642500	926875	0,0225	2,3
	Farellones	3023750	11250	0,0037	0,4
	Dep. Cuaternarios	100545000	6684375	0,0643	6,4
<b>Geomorfología</b> (vertientes)	Conforme con escamas	52758125	2720000	0,0502	5,0
	<i>Hogback</i>	26509375	396250	0,0148	1,5
	Cara libre rugosa y talud	38242500	2856875	0,0720	7,2
	Discordante indefinida	35611250	5926875	<b>0,1533</b>	15,3
	Cara libre y talud	8716250	321875	0,0363	3,6
	Conforme simple	11793750	938750	0,0765	7,7
<b>Vegetación</b> (formaciones)	Sin vegetación	141980000	12504375	0,0843	8,4
	Matorral suculentas abierto	10625	0	0,0000	0,0
	Matorral suculentas semidenso	7192500	166875	0,0229	2,3
	Matorral abierto	9293125	191250	0,0204	2,0
	Matorral arborescente muy abierto	120000	2500	0,0206	2,1
	Matorral pradera abierto	2276250	11875	0,0052	0,5
	Matorral semidenso	12086875	283750	0,0232	2,3
	<b>Pendientes</b>	Llana	6313750	228125	0,0355
Leve		6136250	468125	0,0735	7,3
Moderada		45414375	3115625	0,0663	6,6
Fuerte		96088750	7600625	0,0761	7,6
Acantilada		19605625	1736250	0,0848	8,5
<b>Orientación</b>	Plano	2002500	63125	0,0310	3,1
	Norte	57140625	3741250	0,0634	6,3
	Este	28943125	2190625	0,0729	7,3
	Sur	34486250	4112500	<b>0,1124</b>	11,2
	Oeste	50986250	3041250	0,0579	5,8



Al focalizar el análisis hacia las áreas de origen de los procesos de remoción en estudio, los resultados evidencian, en primer lugar, una disminución en términos globales de la susceptibilidad espacial, ello, como efecto de la disminución del área considerada como evidencia. En tal sentido, disminuyen también, los valores de favorabilidad de las unidades correspondientes a los factores condicionantes involucrados.

En segundo lugar, la representación espacial de la susceptibilidad a desarrollar procesos de remoción en masa, es capaz de mostrar claramente las zonas con mayor favorabilidad espacial de originar tales procesos, las cuales, si bien coinciden, en términos generales con las áreas de mayor susceptibilidad a ser afectadas, delata

claramente las áreas con mayor factibilidad al origen de los procesos estudiados.

Una tercera situación relevante, dice relación con que, el análisis de los valores de favorabilidad obtenidos, versus, el mismo análisis realizado para estimar la probabilidad de ser afectada por uno de estos procesos realizado en el punto anterior, muestra valores relativamente más cercanos a los resultados que se obtendrían mediante la estimación de la susceptibilidad aplicando juicios o criterios de experto, extraídos desde los antecedentes bibliográficos sobre la materia. Esta situación puede ser claramente observada a partir de la tendencia al ajuste de los valores, versus los juicios expertos mostrados en la tabla siguiente.

Comparación entre susceptibilidad esperada (por juicio experto) y susceptibilidad espacial calculada.

Factor	Clases	Susceptibilidad esperada por juicio experto (análisis bibliográfico)	Susceptibilidad calculada mediante análisis probabilístico (%)
<b>Dominio Morfoclimático</b> (cinturones geocológicos)	Montano alto	Moderada	1,9
	Subnival alpino superior	Alta	7,0
	Nival	Muy alta	10,2
<b>Geología</b> (formaciones)	Río Damas	Alta	16,4
	Leñas espinosa	Alta	11,5
	Rocas Intrusivas	Baja	21,6
	Coya Machalí	Media	2,3
	Farellones	Media	0,4
	Dep. Cuaternarios	Muy alta	6,4
<b>Geomorfología</b> (vertientes)	Conforme con escamas	Alta	5,0
	<i>Hogback</i>	Muy Alta	1,5
	Cara libre rugosa y talud	Muy alta	7,2
	Discordante indefinida	Alta	15,3
	Cara libre y talud	Alta	3,6
	Conforme simple	Moderada	7,7
<b>Vegetación</b> (formaciones)	Sin vegetación	Muy alta	8,4
	Matorral suculentas abierto	Alta	0,0
	Matorral suculentas semidenso	Alta	2,3
	Matorral abierto	Alta	2,0
	Matorral arborescente muy abierto		2,1
	Matorral pradera abierto	Alta	0,5
	Matorral semidenso	Moderada	2,3
	<b>Pendientes</b>	Llana	Muy baja
Leve		Baja	7,3
Moderada		Moderada	6,6
Fuerte		Alta	7,6
Acantilada		Muy Alta	8,5
<b>Orientación</b>	Plano	Muy Baja	3,1
	Norte	Muy Alta	6,3
	Este	Alta	7,3
	Sur	Leve	11,2
	Oeste	Moderada	5,8

No obstante la tendencia al ajuste que es posible observar en la tabla anterior, se puede observar asimismo que existen una serie de juicios y parámetros que muestran una amplia diferencia entre la valoración esperada y calculada de la susceptibilidad para una misma variable.

Además de los valores de susceptibilidad esperados y calculados para las rocas intrusivas, los cuales permiten apoyar, sin probar, la tesis planteada en el punto

anterior, llaman la atención la distancia entre juicios y valores de susceptibilidad de las siguientes variables: depósitos cuaternarios, en el factor geología; vertiente en posición de Hogback, en el factor geomorfología, y; orientación sur, en el factor orientación o exposición del relieve.

Respecto de los bajos valores de favorabilidad calculados para los depósitos cuaternarios versus el nivel de susceptibilidad esperado, se estima que ello puede deberse básicamente al efecto de la

escala de análisis, pues en general los depósitos se encuentran al pie de las vertientes y son afectados por procesos de erosión en canales o flujos de detritos difíciles de detectar y mapear a escala media. En este sentido el método utilizado podría contener una subvaloración de la susceptibilidad de los mismos, cuestión que debería ser comprobada en trabajos posteriores de mayor escala.

En el caso de la diferencia registrada para vertientes en posición de hogback se puede señalar que si bien este tipo de vertientes ocupan una superficie importante en la cuenca, sobre materiales fuertemente plegados y fracturados, la evidencia muestra que su actividad actual es menor en comparación con las vertientes en posición inversa o discordante y que, aunque ellas han originado potentes depósitos en su zona basal, estos se encuentran actualmente colonizados por la vegetación. Adicionalmente se observa que los drenes que evacuan los materiales producidos en la actualidad en las zonas altas de estos sistemas muestran balances de disección positivo. En tal sentido, se considera que el valor de favorabilidad calculado es adecuado para reflejar la dinámica actual de dichos sistemas.

Por último, se estima que una posible explicación para la diferencia del valor de susceptibilidad esperada y calculada de las vertientes de exposición sur, puede estar dada por el dominio morfoclimático y la pendiente en la que se encuentra la zona de mayor registro de avalanchas de nieve de la cuenca, zona comprendida entre la quebrada cerro blanco y la cabecera de la cuenca, en exposición sur y que da origen a la alta valoración de la favorabilidad de esta área. Se presume que en este caso, dada la pendiente de la vertiente, la nieve acumulada durante eventos de precipitación pierde cohesión con facilidad, generando recurrentes avalanchas en la zona.

## V. CONCLUSIONES

La cuenca del río Las Leñas presenta una activa geodinámica externa, en toda su superficie. Estos procesos son de diversa índole y escala, registrándose desde grandes deslizamientos de detritos y rocas (quebrada Borgollones, por ejemplo), hasta solifluxiones laminares (estero Balmaceda). Esta dinámica, presenta marcadas diferencias entre la zona media baja y media alta de la cuenca, entendiéndose como sector medio de ella, la ubicación que ocupa la Laguna del Yeso.

El nivel de actividad geodinámica de la cuenca es coincidente con los ambientes morfoclimáticos en los cuales se encuentra la mayoría de su superficie; con las condiciones de sismicidad general de la vertiente occidental del continente (en promedio sobre 135 sismos de diversa intensidad cada día) y con los montos de precipitación acumulada e intensidad que la precipitación puede alcanzar en el área, particularmente en años con influencia del fenómeno de El Niño (sobre 3.000 mm para el periodo abril – agosto de 2002, y frecuentemente con precipitaciones de intensidad superior a 70 mm/día, según GARREAUD (2002)).

La geodinámica es considerablemente más alta en el ambiente morfoclimático de alta montaña (pisos geocológicos subnival alpino superior y nival). Esto coincide, en alta proporción, con la exposición de los estratos en posiciones discordantes e inversas, libre de cubiertas vegetales o detríticas.

En orden de importancia, se puede señalar que los procesos de remoción más importantes en la cuenca son los de tipo gravitacional (caídas de rocas), seguidos de avalanchas de nieve, flujos de detritos y avalanchas de rocas. Las caídas de rocas (*rockfall*), las cuales cubren una superficie superior al 49% de la misma, presentan gran actividad, particularmente, sobre vertientes

del tipo caras libre y talud, cara libre rugosa y talud, inversas y discordantes indefinidas. La mayor dinámica de estos procesos se registra por sobre los 1.800 m.s.n.m, generando potentes depósitos inconsolidados de materiales, de diverso calibre, en la zona de contacto entre sistemas de vertientes y fondo de valle. Recurrentemente, estos depósitos se encuentran disectados por procesos posteriores de remociones del tipo flujos de detritos.

La disección por flujos de detritos o el desplazamiento de los materiales de los depósitos gravitacionales por deslizamiento de los mismos, desarrollados con posterioridad a la conformación del depósito, hacen suponer que existe una correlación positiva entre las dimensiones de estos, los procesos que los originaron y su antigüedad, por lo menos en una secuencia temporal regresiva hasta comienzos del último finiglaciario. Es decir, a mayor dimensión de los depósitos (superficie cubierta y volumen), más significativos los procesos de remoción que les dieron origen y más antigua su formación.

Lo anterior puede deberse, como se ha demostrado para otras regiones del planeta, a la mayor disponibilidad de materiales existentes al terminar el último periodo glaciario. Esta conclusión se deriva, del hecho de que tanto a nivel mundial, como en la cuenca, los grandes depósitos de remoción en masa reconocidos, parecen ser inconsistentes con las tasas de remoción actuales, tal como ya observara BALLANTYNE (2002) para el NW de Escocia.

No obstante estos antecedentes, una situación de excepción en la cuenca puede ser encontrada en la vertiente norte de su eje principal, aguas arriba de la confluencia entre el curso principal y la quebrada Cerro Blanco, derivada de la acción de las avalanchas de nieve. En esta zona es posible reconocer una activa acción de este tipo de procesos, la que redundará en potentes

depósito en la zona basal de la vertiente respectiva.

Por otra parte, se puede señalar que en la zona media baja de la cuenca el proceso de remoción en masa dominante, particularmente en la vertiente sur del eje hidráulico principal, corresponde a los flujos de detritos. Estos flujos se desarrollan en vertientes en posiciones de hogback y conformes con escamas, disectando los materiales de sus bases, sin generar depósitos mayores a los ya existentes y relativamente consolidados por efecto de la vegetación, dado que el talweg principal posee energía suficiente para evacuar los materiales desplazados en esta zona.

Los resultados obtenidos ratifican los antecedentes teóricos y empíricos existentes a la fecha, en cuanto a una mayor geodinámica en ambientes de alta montaña que en media montaña, además de ser coincidentes con los resultados obtenidos por CASTRO et al., (2003), quienes, utilizando una metodología basada en Análisis Jerárquico para evaluar unidades de la carta geomorfológica elaborada para tales efectos (de acuerdo con la propuesta metodológica de ARAYA-VERGARA (1985), por CHAVEZ (2005) para media montaña y DELGADO (inédito) para alta montaña), definen niveles de riesgo moderado a alto, para la sección de alta montaña y de moderado a bajo, para la sección de media montaña, del río Cachapoal.

Por último, respecto del método utilizado, se puede señalar que él ha probado ser útil para evaluar la probabilidad espacial de una superficie, tanto para ser afectada por una remoción, como para desarrollar un proceso de esta índole, sobre la base de la evidencia existente. Cabe también concluir que, para su correcta y más simple aplicación, resulta vital, previo a la aplicación del método, realizar una clara distinción de la escala espacio temporal de los procesos a estudiar y su tipología. Esto, pues, la integración de

antiguas y extensas remociones, originadas en contextos climáticos distintos al actual, puede generar una sobrestimación del nivel de susceptibilidad actual de las vertientes, para desarrollar procesos de remoción en masa. En síntesis, mientras más específico el análisis, mejor comportamiento del método en la estimación.

## VI. BIBLIOGRAFÍA

- ARAYA Vergara, José. Análisis de la carta geomorfológica de la cuenca del Mapocho. Informaciones Geográficas Universidad de Chile (32): 31-44, 1985.
- ARAYA Vergara, José. Primeras experiencias con una clasificación dinámica de vertientes de montaña. En: I TALLER INTERNACIONAL de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable de los Andes del Sur (Santiago y norte de Chile, 1991). I Taller Internacional de Geoecología de Montaña y Desarrollo Sustentable de los Andes del Sur. Viña del Mar, Chile, Universidad de Chile, 1996. 482 p.
- AYALA CARCEDO, Francisco J. y Olcina, J. Riesgos Naturales. Madrid, España. Editorial Ariel S.A., 2002. 1304p.
- BALLANTYNE Colin K. Paraglacial geomorphology. Quaternary Science Reviews 21: 1935-2017, 2002.
- BONACHEA Pico, Jaime. Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. Tesis Doctoral. Santander, España. Universidad de Cantabria, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias de la Tierra y física de la materia condensada, 2006. 356h.
- CASTRO A., Consuelo, BRIGNARDELLO L. A., CERECEDA T. Pilar. Determinación de áreas de riesgo morfodinámico en San Juan Bautista, Isla de Robinson Crusoe, Comuna de Juan Fernández, V Región. Rev. Geográfica de Chile Terra Australis (40): 43-61. 1995.
- CASTRO C., Carmen, SOTO B. María, CHAVEZ Carolina. Aporte moderno de masa y su implicancia en la definición de niveles de riesgo natural. Tiempo y Espacio, 13: 185 – 199, 2003.
- CHUNG, Chang-Jo F. y FABBRI, Andrea G. The representation geoscience information for data integration. Natural Resources Research. 2(2): 122-139, 1993.
- CHUNG, Chang-Jo F. y FABBRI, Andrea G. Probabilistic prediction models for landslide hazard mapping. Photogrametric engineering & remote sensing. 65(12): 1389-1399, 1999.
- CHUNG Ch. J. y FABBRI A. Modeling the conditional probability of the occurrences of future landslides in a study area characterized by spatial data. En: Symposium on Geospatial theory, Processing and applications, Ottawa: 9 - 12 de Julio de 2002 [en línea] <<http://www.isprs.org/commission4/proceedings02/pdfpapers/440.pdf>> [consultado 05 de julio de 2007].
- CHUNG, Ch. J. y LECLERC Y. Use of quantitative techniques for zoning landslide hazard. En: Eartquake hazard mapping for landuse and emergengy planning, Summary of conference presentation, editado por LEVSON, V.M. y JONES, S. Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources, British Columbia, Canada, 2003. 91-102p.
- CHUNG Ch. J. y LECLERC Y. Use of quantitative techniques for zoning landslide hazard [en línea] <<http://www.empr.gov.bc.ca/DL/GSBPubs/Paper/P2003-2/P2003-2-11.pdf>> [consultado 16 de julio de 2007].
- DELGADO, E. Identificación de áreas con riesgo natural asociadas a la dinámica de los procesos de remoción en masa y su interferencia sobre la alternativa de trazado del corredor de comercio Las Leñas, VI Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Universidad de Chile. Santiago, Chile. Inédito.
- DELGADO, E. Geodinamica y valoración del nivel potencial de riesgo natural en alta montaña: Cuenca del río Las Leñas, vertiente occidental de los Andes Centrales. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 2007
- DE PEDRAZA, Gilsanz J. Geomorfología, Principios, Métodos y Aplicaciones. Madrid, Ediciones Rueda, S. L. 1996. 414p.
- FERRANDO, Francisco J. La cuenca andina del río Mapocho: Determinación de su estado de equilibrio morfodinámico. Informe final proyecto FONDECYT 1000-91. Santiago, Chile. Inédito.
- FERRANDO, F.J. La cuenca andina del río Mapocho, evaluación de su riesgo erosivo: Desarrollo Metodológico. En: Determinación de 1er Simposio internacional sobre sensores remotos y sistemas de información geográfica (SIG) para estudios de riesgos naturales: I.G.A. Codazzi (Bogota, Colombia). 1992, pp 609-627.
- FERRANDO, Francisco J. Métodos hidromorfométricos para determinar la erosividad en cuencas hidrográficas. Ingeniería Hidráulica en México (Vol. IX, 3): 5-14, septiembre – diciembre 1994.
- GARCIA, Ruíz J.M., La Montaña: una perspectiva geoecológica. En: Geoecología de las áreas de montaña. Logroño, España. Geoforma Ediciones, 1990. pp15-31.
- GARREAUD, Rene. Determinación del efecto topográfico en el régimen de precipitación. Resultados preliminares para el informe final del proyecto DI TNAC 11-02/01, Determinación de niveles de riesgo natural en el corredor de comercio Las Leñas, en la VI Región. 2002, Universidad de Chile. Inédito.
- GUZZETTI Fausto. Review and selection of optimal geological models related to spatial information available [en línea] [www.smr.arpa.emr.it/riskaware/?page=download](http://www.smr.arpa.emr.it/riskaware/?page=download) [consulta: 15 de agosto de 2007].
- HAUSER Y. ARTURO., 1993. Remociones en masa en Chile. Boletín N° 45, Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC) 2007. Climate Change 2007: Climate change impacts, Adaptation and vulnerability. Summary for Policimakers [en línea] <<http://www.ipcc.ch>> [consulta: 16 mayo 2007].



KOTARBA Adam. High – energy geomorphic events in the Polish Tatra Mountains. Geografiska Annaler Kraków, Poland 74 A (2-3): 123 – 131. 1992.

KOTARBA Adam. Elevational differentiation of slope geomorphic processes in the Polish Tatra Mountains. Studia Geomorphologica Carpatho – Balcanica (Vol. XVIII): 117 – 133. 1984.

SERVICE DE DOCUMENTATION ET DE CARTOGRAPHIE GÉOGRAPHIQUES. Cartographie Géomorphologique, travaux de la R.C.P. 77. Mémoires et Documents (Volume 12). Francia. Éditions du Centre National de la Recherche Scientifique. 1971.

YOUNG, Anthony. Slopes. USA. Longman Group Limited, 1977.

ZÊZERE J. L., REIS E., GARCIA R., OLIVEIRA S., RODRIGUEZ M. L., VIEIRA G. y FERREIRA A. B.. Integration of spatial and temporal data for the definition of different landslides hazard scenarios in the area north of Lisbon (Portugal). *Natural Hazard and Earth System Sciences* 4: 133-146, 2004.

ZILBERBERG, Alejandro D. Probabilidad y estadística. Buenos Aires, Nueva Librería, 2005. 624p.