

Evaluación de peligrosidad por procesos de remoción en masa en los cerros La Unión y Zaror. Comuna de Talcahuano, Región del Biobío (Chile).

Landslide Hazard Assessment on the Hills La Unión and Zaror. District of Talcahuano, Biobío Region (Chile).

Pablo López Filún
Geógrafo, Concepción
plopez.filun@gmail.com

Resumen

En los cerros La Unión y Zaror el nivel de peligrosidad por PRM está condicionado por una litología de roca metamórfica de un avanzado estado de meteorización y de una morfometría con inclinaciones superiores a 20° (Alarcón, 1995), en un suelo altamente saturado por periodos lluviosos con intensidades sobre los 50 mm de agua caída diaria en un tiempo máximo de 72 horas (Mardones et al., 1994). Los resultados indicaron que los deslizamientos rotacionales fueron los procesos de mayor predominio registrándose 21 procesos en estado activo los que presentaron mayor actividad en los meses de invierno. La mayor cantidad de PRM se concentró en pendientes entre los 6° y 27° en una exposición N - NE - NW que propició la aparición de cobertura vegetal de tipo arbustiva, que aumentó los niveles de humedad y meteorización en un suelo de clase textural limo - arcilloso poco cohesionado y de fácil movilización por acción del agua y la gravedad, en donde con un umbral de 12,1 mm de agua precipitada en 12 horas la probabilidad que se detone un PRM es muy alta debido a la alta saturación del suelo. El resultado de la evaluación de peligrosidad de PRM permitió mediante la zonificación de las áreas más inestables proponer las bases hacia una planificación territorial para minimizar la vulnerabilidad y propiciar el uso racional del suelo, entregando a la comunidad local la capacidad de adaptarse ante un peligro natural.

Palabras clave: Meteorización, Pendiente, Precipitaciones, Deslizamiento rotacional.

Abstract

On the hills La Union and Zaror the landslide hazard level is conditioned by a lithology of metamorphic rock in advanced state of weathering and a morphometry with slopes over 20° (Alarcón, 1995), in a highly saturated soil by intensities rainy periods above 50 mm of water daily drop in a maximum of 72 hours (Mardones et al., 1994). The results indicated that rotational landslides were the more predominant processes, which registered 21 active processes which showed higher activity in the winter months. The most number of MWP (Mass Wasting Processes) was concentrated on slopes between 6° and 27° on exposition N - NE - NW, which favored the appearance of shrub vegetation, that increased the levels of humidity and weathering on a soil of texture silt - clay, poorly cohesive and of easy mobilization by action of water and gravity, where with a threshold of 12.1 mm of water precipitated in 12 hours,

the probability of triggering a landslide is very high because of high saturation of the soil. The result of the landslide hazard assessment allowed through the zonification of the most instable areas suggest the basis towards to territorial planning to reduce the vulnerability and encourage the rational land-use, providing to the local community the ability to adapt and face a natural hazard.

Key words: Weathering, Slope, Precipitations, Rotational landslide

Introducción

Los procesos de remoción en masa (PRM) corresponden a procesos gravitacionales de movilización lenta o rápida de un determinado volumen de suelo o roca que en diversas proporciones se desplaza a un nivel de cota inferior a la original (Hauser, 1993). El resultado es un peligro natural de tipo geológico que se genera cuando los factores que regulan el estado morfogenético sobrepasan en cascada los umbrales de estabilidad de los factores que controlan el proceso morfológico, superando valores críticos de ritmo e intensidad (Coque, 1977 en Mardones et al., 2006). El desastre ocurre cuando la peligrosidad se transforma en un proceso que desestabiliza el sistema morfogenético y cuyos efectos se agravan generalmente por falta de prevención y de capacidad de gestión (Mardones et al., 2006). En Chile los PRM han causado daños materiales y pérdidas de vidas humanas, la cuantificación de efectos asociados a estos procesos entre los años 1925 y 1993 indican que se han registrado 653 muertos y aproximadamente 228 desaparecidos (Hauser, 1993). En el área metropolitana de Concepción en un estudio realizado por Alarcón (1995), para el periodo 1960 - 1990 a través de información registrada en el diario El Sur, contabilizó 88 eventos en 30 años, eventos que han sido detonados por lluvias intensas y factores como vertientes deforestadas e intervenidas por la construcción de viviendas o carreteras, pendientes que sobrepasan los 20° y vertientes compuestas por gruesas capas de regolita producto de los procesos de

meteorización. En la comuna de Talcahuano los antecedentes indican que en los cerros de la Península de Tumbes en donde se sitúan los cerros La Unión y Zaror, se han producido numerosos eventos como derrumbes y flujos de barro que han dejado un muerto, 36 viviendas destruidas y 60 viviendas con daños importantes (Mardones et al., 2006). Lo anterior, se suma al acelerado crecimiento urbano que satura los buenos sitios de urbanización y que se desborda hacia áreas con grandes dificultades para su manejo, y que están expuestas a fuertes índices de peligrosidad que aumentan la probabilidad de ocurrencia de PRM (Mardones y Vidal, 2001).

En los cerros La Unión y Zaror el nivel de peligrosidad de PRM está condicionado por factores físico - naturales característicos de ambos cerros, pues ambos presentan una litología de roca metamórfica de un avanzado estado de meteorización y una morfometría con inclinaciones superiores a 20° (Alarcón, 1995). Lo anterior se evidencia en sectores con roca expuesta, en áreas de un alto grado de pendiente que dan como resultado procesos de caídas muy pequeños, que generan zonas de acumulación en sectores urbanizados por viviendas muy precarias al pie de la vertiente. Por otro lado, se evidencia un alto nivel de intervención y ocupación de vertientes por viviendas en un suelo altamente meteorizado y saturado, principalmente por precipitaciones y una débil cobertura vegetal desprovista por acción antrópica. Por otra parte, el factor climático puede ser clasificado como una energía detonante en el área,

ya que se presentan periodos lluviosos con intensidades que superan los 50 mm de agua caída diaria y una acumulación que supera los 100 mm en un tiempo máximo de 72 horas (Mardones et al., 1994). El objetivo de esta investigación es evaluar el nivel de peligrosidad ante procesos de remoción en masa en los cerros La Unión y Zaror, a través de la identificación de los factores físico - naturales que mayor incidencia tienen en la generación de PRM, lo cual permitirá

zonificar las áreas de mayor peligrosidad con el propósito de orientar la planificación territorial en ambos cerros.

Los cerros La Unión y Zaror se ubican en la comuna de Talcahuano, Región del Biobío, Chile y se localizan en las coordenadas $36^{\circ}43'14.68''$ latitud Sur, $73^{\circ}7'42.38''$ longitud Oeste y $36^{\circ}43'6.94''$ latitud Sur, $73^{\circ}7'25.09''$ longitud Oeste (Fig.1).

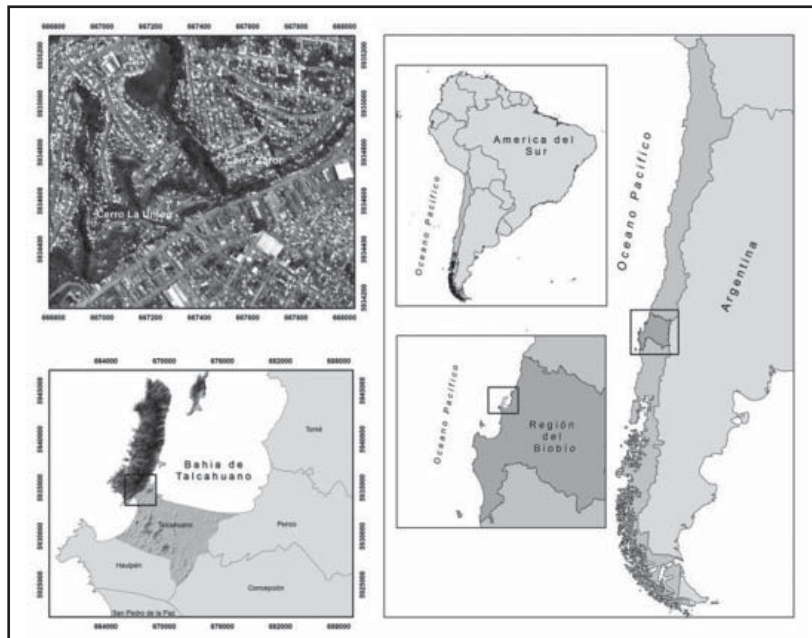


Figura 1: Área de estudio.

Fuente: Elaboración propia

Desde el punto de vista geomorfológico los cerros La Unión y Zaror se conforman en un horst constituido por bloques de terrazas de abrasión marina que han sido solevadas en sus márgenes y modeladas desde su origen por el océano y el viento (Mardones, 1978), su altura máxima supera los 180 m.s.n.m. y se caracterizan por una morfometría con vertientes cóncavo - convexas, con valores entre 11° y 39° en vertientes suaves y entre 31° y más de 40° en acantilados (Mardones et al., 1994). Las características geológicas son fundamentalmente rocas metamórficas de edad paleozoica profundamente

meteorizadas que se observan en el horst de Tumbes (Vayl Oñat, 1961 en Alarcón, 1995). Los sistemas morfogénéticos predominantes en el área son el viento, el mar, la corrosión salina y la humedad del aire, que ocasionan una alteración muy importante en sectores donde aflora la roca metamórfica (Mardones, 1978). Estos procesos estimulan la acción de erosión en manto, zanjas y cárcavas (Devynk, 1970; Romero, 1985 en Peña, 1995). La cobertura vegetal se caracteriza por especies esclerófilas de tipo arbustivo que se distribuyen a través de las vertientes y que se ve limitada por el asentamiento

humano (Rojas et al., 2009 en Jaque, 2010). El clima, por otro lado se caracteriza por un régimen templado mediterráneo con una estación invernal lluviosa, una estación estival seca y cálida, y una fuerte variación interanual de la intensidad pluvial (Romero, 1985 en Mardones et al., 2006).

Los cerros La Unión y Zaror poseen una población aproximada de 3.358 habitantes, de los cuales 1.941 habitantes corresponden al cerro La Unión y 1.417 habitantes al cerro Zaror, lo que equivale a un 2,08% de la población de la comuna de Talcahuano (INE, 2005)¹.

1. Metodología

La metodología de la investigación se dividió en tres etapas (Fig. 2), en la primera se analizó la recurrencia histórica mediante la revisión del registro del Diario El Sur de los meses Mayo, Junio, Julio y Agosto del periodo 1990 - 2012, en donde se buscó el registro de eventos de

PRM en el pasado, aquí se registró el tipo de proceso ocurrido, daños y afecciones, fecha de ocurrencia y energía detonante. En esta misma etapa se realizó un inventario de PRM a partir de los factores característicos para la identificación de movimientos de ladera propuesta por González de Vallejo (2002), a través de la elaboración de una ficha de inventario, en donde se identificó y clasificó los PRM que afectaron a los cerros la Unión y Zaror, para luego reclasificar cada proceso según su estado de actividad, definido por la WP/WLI (1993), agrupando a cada estado en diferentes grados de peligrosidad.

Una segunda etapa (Fig. 2), correspondió al análisis de los factores físico - naturales que inciden en los PRM en los cerros La Unión y Zaror. Los factores considerados para el análisis, fueron aquellos más relevantes para el área de estudio y que representaron aquellas variables que pudieron ser reconocidas en terreno (Cuadro 1).

Cuadro N° 1:
Factores físicos - naturales para la evaluación de peligrosidad de PRM

Factores	Factores considerados	Clasificación
Geología	Litología	Clasificación propia
	Meteorización	IRSM (1981)
Geotecnia	Granulometría	U.S. Dept. Agriculture Handbook Soil Survey Manual (1994)
	Permeabilidad	Clasificación propia
Geomorfología	Morfometría	Pedraza (2006)
	Exposición	Lara (2007)
	Procesos erosivos	Elmes (2006)
	Perfil de la vertiente	Elaboración propia
Vegetación	Cobertura Vegetal	Imagen Landsat ETM+ Path 001 / Row 086

Fuente: Elaboración propia

¹Datos procesados con el software REDATAM + SP (CEPAL, 2011)

²Diario El Sur. Edición, Viernes 05 de Junio de 1992



Aquí se determinaron los niveles de peligrosidad, en donde cada factor se reclasificó de acuerdo a su incidencia en la generación de PRM (Cuadro 2). La asignación se apoya en la importancia

que se determinó a los factores que son relevantes en el área de estudio, para posteriormente calcular el peso relativo para cada uno de ellos.

Cuadro N° 2:
Evaluación de factores físico - naturales a través de técnicas de EMC

Morfometría	Nivel de Peligrosidad	Peso
0° - 5°	Baja	1
5° - 10°	Moderada	2
10° - 20°	Fuerte	3
20° - 30°	Muy Fuerte	4
Litología	Nivel de Peligrosidad	Peso
Depósitos Coluviales	Moderado	2
Rocas Metamórficas	Fuerte	3
Unidades Geomorfológicas	Nivel de Peligrosidad	Peso
Terraza	Moderado	2
Talud	Fuerte	3
Escarpes	Muy fuerte	4
Clasificación Vegetación	Nivel de Peligrosidad	Peso
Vegetación Densa	Baja	1
Vegetación Semidensa	Moderado	2
Vegetación poco densa	Fuerte	3
Suelo Descubierta	Muy fuerte	4
Orientación	Nivel de Peligrosidad	Peso
S	Bajo	1
E - SE - W - SW	Moderada	2
N - NE - NW	Fuerte	3

Fuente: Elaboración propia

En esta etapa se consideró como energía detonante a las precipitaciones como uno de los parámetros más relevantes en el desencadenamiento de PRM en los cerros La Unión y Zaror (Fig. 2). Es así, que para determinar el nivel de peligrosidad, según el nivel de precipitaciones, estas se reclasificaron de acuerdo a los umbrales de precipitación propuesto por Ferrer y Ayala (1996 en González de Vallejo, 2002), con datos de precipitaciones acumuladas para el periodo Mayo, Junio,

Julio y Agosto correspondientes al año 2012, datos obtenidos de las estaciones Bellavista Tomé, Rio Andalién y Estero Nonguén, y que fueron proporcionados por la Dirección General de Aguas (DGA).

La definición de umbrales de precipitación se obtuvo por medio del cálculo del modelo empírico intensidad y duración de lluvia propuesto por Cain (1980 en Medina - Cetina et al., 2011), el cual expone la relación entre la

ocurrencia de PRM y las características de precipitaciones (intensidad y duración de lluvia). El cálculo se basó en la siguiente ecuación:

$$I = 14.82D^{-0.39}$$

En donde:

I = Representa el nivel de precipitaciones

(mm/h)

D = Representa la duración de la precipitación (h)

En donde el resultado de un evento con una duración de precipitaciones D, será más probable de iniciar un proceso de remoción en masa si $I \geq 14,82D^{-0.39}$.

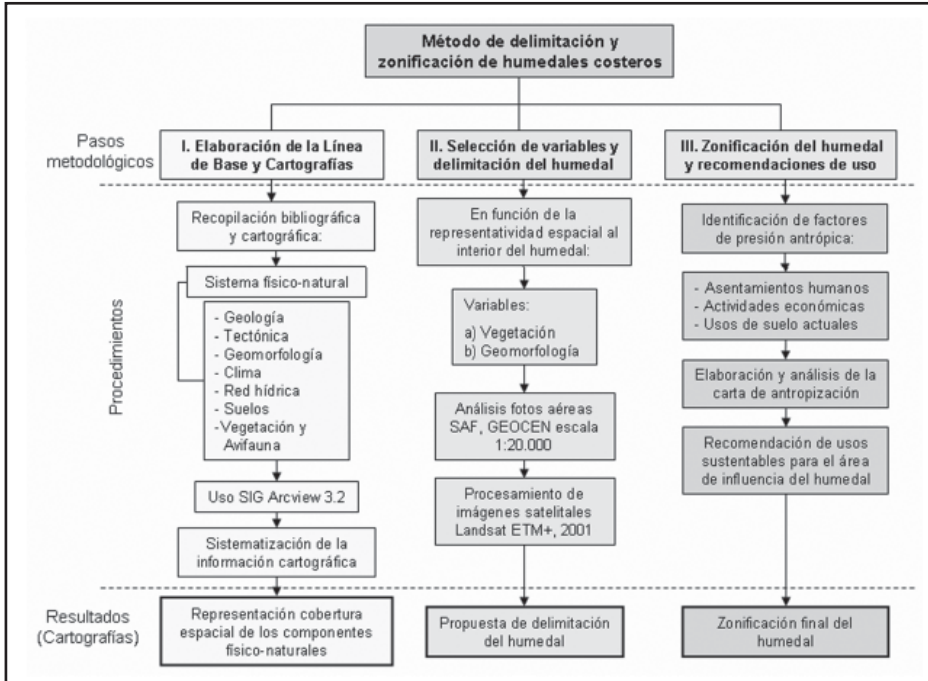


Figura 2: Esquema metodológico

Fuente: Elaboración propia

El análisis de recurrencia histórica permitió la identificación del grado de relación entre el nivel de precipitaciones y los eventos desencadenados en el pasado, este se realizó mediante el análisis de regresión a través del cálculo del coeficiente de correlación de Pearson, que indicó el grado de relación entre las precipitaciones acumuladas y el numero eventos de PRM ocurridos en el periodo 1990 - 2012.

Finalmente en una tercera etapa (Fig. 2), se realizó la evaluación de la peligrosidad de PRM, según la identificación de los factores físico - naturales que inciden en la generación de PRM. El resultado es la ponderación

de cada factor a través de técnicas de EMC, mediante el método de jerarquías analíticas (MJA) (Saaty, 1997 en Barredo et al., 2005) (Cuadro 3), en el cual el peso de cada factor, se encontró determinando la importancia relativa de cada variable a través de una matriz cuadrada, en la cual el número de filas y columnas está definido por el número de criterios a ponderar.

La evaluación de cada factor dio como resultado una ponderación de mayor porcentaje de los factores que tienen mayor incidencia en la generación de PRM y un menor porcentaje de los factores que tienen menor incidencia.

La ponderación de cada factor conllevó a una cuota importante de subjetividad. Es por esta razón, que se calculó la razón de consistencia (*r.c*), índice propuesto por Saaty (1997 en Barredo et al., 2005), que indicó si los juicios de valor asignados a cada factor son consistentes con su real importancia. Así, para los valores de *r.c*. mayores o iguales a 0,10 los juicios de valor asignados deben ser revisados, en cambio para valores inferiores a 0,10 los juicios de valor asignados se consideran satisfactorios. Es así, que el resultado del cálculo de la razón de consistencia fue de 0.09, inferior a 0,10, por lo que los juicios de valor asignados a cada factor

fueron suficientemente consistentes para establecer los pesos de ponderación.

La zonificación de las áreas de peligrosidad de PRM, se realizó mediante el método de suma ponderada, en donde el nivel de adecuación de cada factor se halló sumando el resultado de la multiplicación del peso de cada factor físico - natural por su respectiva ponderación (Saaty, 1997 en Barredo et al., 2005). Donde, es la susceptibilidad al riesgo, es el peso del criterio *j* y es el valor ponderado de la alternativa *i* en criterio *j*.

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

Cuadro N° 3:
Matriz de comparación entre factores del MJA

Factores Condicionantes	Morfometría	Litología	Geomorfología	Vegetación	Exposición	Ponderación
Pendientes	1	1	2	5	6	32%
Litología	1	1	2	5	6	32%
Geomorfología	0,5	0,5	1	5	6	22%
Vegetación	0,2	0,2	0,2	1	6	10%
Exposición	0,2	0,2	0,2	0,2	1	4%
Sumatoria	2,9	2,9	5,4	16,2	25	100%

Fuente: Elaboración propia

El modelo final de peligrosidad de PRM se ejecutó a través del proceso analítico Weighted Overlay, que integró el modelo de suma ponderada con sus respectivos pesos y ponderaciones anteriormente evaluados. Esto fue posible mediante

la herramienta Model Builder en el software ArcGis10, en donde se creó un modelo que combinó todos los factores físico - naturales más relevantes que determinaron la generación de PRM (Fig. 3).

$$PRM = \sum_{i=1}^5 0,32Pen + 0,32Li + 0,22Geo + 0,1Veg + 0,04Exp$$

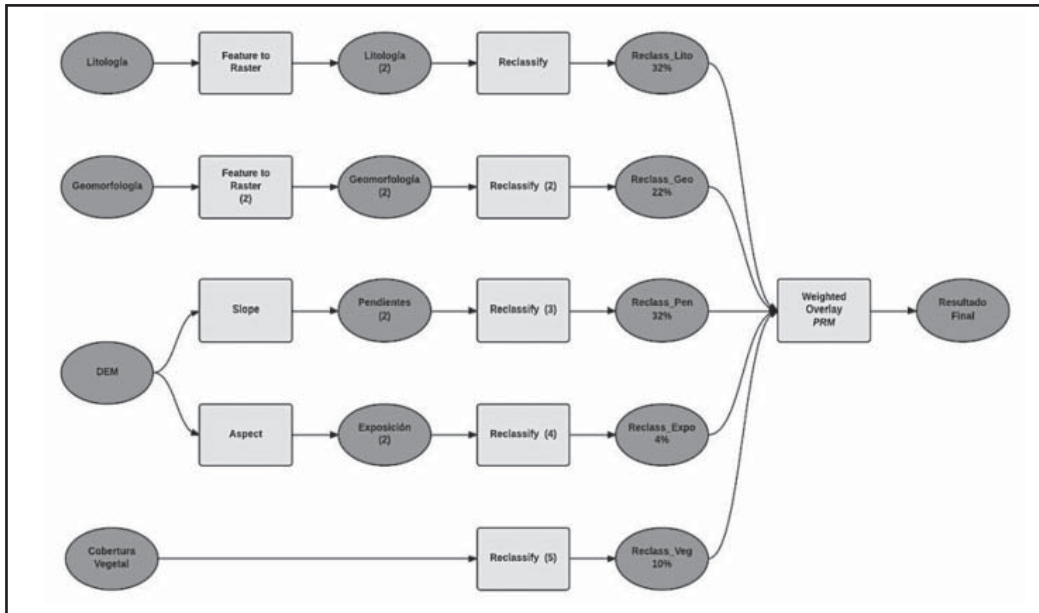


Figura N° 3: Modelo de peligrosidad de PRM

Fuente: elaboración propia

2. Resultados

2.1 Recurrencia Histórica

La información obtenida en los registros del diario El Sur indicaron que entre los años 1990 y 2012 se han registrado 13 eventos de PRM en los cerros La Unión y Zaror (Fig. 4). De los procesos registrados 9 fueron clasificados como deslizamientos rotacionales, de acuerdo al tipo de rotura, superficie cóncavo - convexa y material carente de cohesión que presentó el lugar en el momento en que los eventos ocurrieron, según la información registrada por el diario El Sur, de estos 5 ocurrieron en el cerro La Unión y 4 en el cerro Zaror (Fig. 4). Por

otro lado, se identificaron flujos de barro clasificados por la cantidad de material transportado, energía de avance, superficie convexa de altas pendientes y la identificación de precipitaciones como energía detonante, de ellos 2 se registraron en el cerro La Unión y 2 en el cerro Zaror (Fig. 4). La existencia de una proporción similar de eventos ocurridos entre los cerros La Unión y Zaror, se debió a que ambos cerros se localizan de manera adyacente, lo que implicaría que ambos comparten las mismas características físico - naturales que determinarían la generación de PRM, siendo estos dos los de mayor recurrencia histórica en relación a los cerros circundantes dentro de la comuna de Talcahuano.

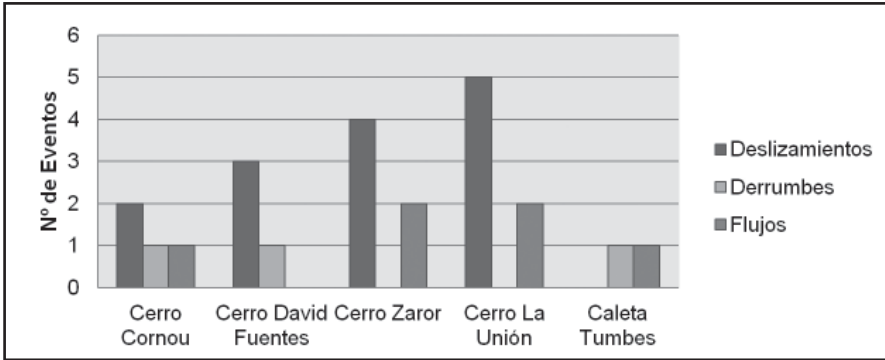


Figura 4: Número de eventos y tipos de procesos, periodo 1990 - 2012.

Fuente: Elaboración propia

La secuencia temporal en el periodo 1990 - 2012 (Fig. 5), indicó que la mayor cantidad de eventos se desencadenó entre los años 1992 y 1995 con un registro de dos eventos por año en cada cerro. El detonante principal de estos eventos fueron las precipitaciones producto de temporales que afectaron a la zona con un nivel de agua caída que se calculó en 10 mm/hora entre las 9 a 18 horas² en el año 1992 y en el año 1993. El tercer año

con mayor cantidad de eventos ocurrió en el año 1995, con dos eventos ocurridos en el cerro Zaror, entre los meses de Junio y Julio donde precipitaron 83,7 mm de agua en un lapso de 36 horas³. Entre los años 1997 y 2012 se desencadenó un evento en cada año. Los eventos registrados han originado daños en la población ocasionando pérdidas en viviendas dejando a diversas familias damnificadas (Cuadro 4).

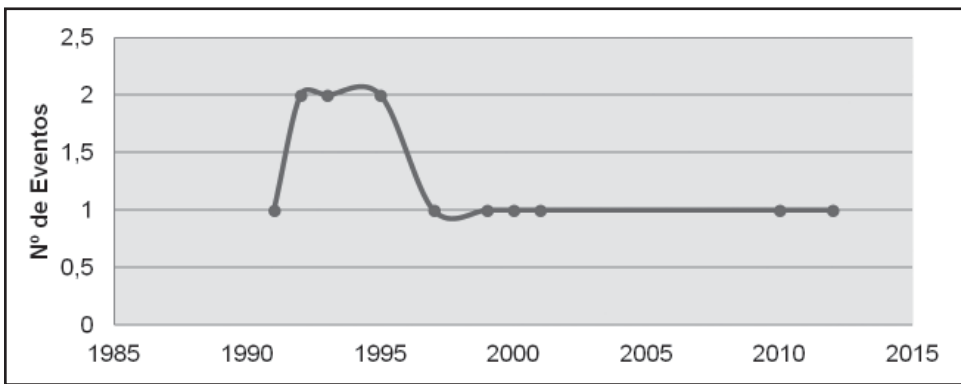


Figura 5: Número total de eventos por año, periodo 1990 - 2012

Fuente: Elaboración propia

²Diario El Sur. Edición, Viernes 05 de Junio de 1992

³Diario El Sur. Edición, Viernes 05 de Julio de 1995

Cuadro N° 4:
Recurrencia histórica de eventos de PRM.

Lugar	Fecha	Tipo de Movimiento	Daños y Afecciones
Cerro La Unión	16-08-12	Deslizamiento	Tres viviendas dañadas
Cerro La Unión	11-06-10	Deslizamiento	Diversas familias afectadas
Cerro Zaror	01-08-01	Deslizamiento	Una vivienda dañada
Cerro Zaror	13-06-00	Deslizamiento	7 viviendas afectadas
Cerro La Unión	07-07-99	Deslizamiento	Una familia afectada
Cerro La Unión	16-06-97	Flujo	Dos viviendas resultaros dañadas
Cerro Zaror	27-07-95	Flujo	6 viviendas dañadas
Cerro Zaror	24-06-95	Deslizamiento	5 viviendas dañadas, falla muro de contención
Cerro La Unión	20-07-93	Deslizamiento	Una vivienda dañada, salvaron ilesos una madre y sus dos hijos
Cerro Zaror	10-07-93	Deslizamiento	Diversas viviendas dañadas
Cerro Zaror	10-06-92	Flujo	Una vivienda dañada y dos personas lesionadas
Cerro La Unión	05-06-92	Flujo	Una vivienda dañada
Cerro La Unión	19-07-91	Deslizamiento	Sin viviendas y personas en el área

Fuente: Diario El Sur ediciones Junio, Julio y Agosto de 1990 - 2012

2.2 Inventario de procesos

Delo efectuado en el trabajo de campo se inventariaron 31 PRM en los cerros La Unión y Zaror (Cuadro 5), de ellos se identificaron y clasificaron según su tipología 7 caídas de roca, 21 deslizamientos rotacionales y 3 flujos de barro. Con respecto a los procesos identificados en ambos cerros, se identificó en el cerro La Unión 20 procesos de los cuales 6 correspondieron a caídas de roca, 13 a deslizamientos rotacionales y un flujo de barro. Por otro lado, en el cerro Zaror se identificó una caída de roca, 8 deslizamientos rotacionales y 2 flujos de barro.

Los procesos con mayor grado de actividad (Cuadro 5), correspondieron a deslizamientos rotacionales de los cuales 17 se mantienen activos, 3 de carácter latente y uno suspendido. En relación a los procesos de caídas de roca y flujos de barro el número total de ellos se mantuvieron en un grado de carácter activo. La cantidad de procesos en estado activo identificados son muy significativos para toda el área, lo cual permitió tener un conocimiento de que tipo de proceso tiene más probabilidades de generarse en un sitio y durante un periodo de tiempo determinado.

Cuadro N°5:
Inventario de procesos y estado de actividad de PRM.

Cerro	Caídas de Roca	Deslizamientos Rotacionales	Flujos de Barro	Total
La Unión	6	13	1	20
Zaror	1	8	2	11
Total	7	21	3	31
Estado	Caídas de Roca	Deslizamientos Rotacionales	Flujos de Barro	Nivel de Peligrosidad
Activo	7	17	3	Muy Fuerte
Suspendido		1		Moderado
Latente		3		Moderado

Fuente: Elaboración propia

La localización espacial de algunos de los procesos inventariados (Cuadro 6), se caracterizó por distribuirse de manera dispersa en diversos sectores de las vertientes de los cerros La Unión y Zaror (Fig. 6). Según la (Fig. 7), se observó que la mayor parte de los procesos se presentaron en sectores con pendientes mayores a 25° distribuyéndose desde las zonas de la cabeza hasta el pie de la vertiente. Se observó además que existe un predominio de deslizamientos

rotacionales, caídas y flujos en sectores que presentaron cambios bruscos de pendiente en zonas muy cercanas al pie de la vertiente. Por otro lado, hacia las zonas de la Terraza Superior de los cerros no se identificaron procesos activos. Entre las características más recurrentes se pudo identificar que para los procesos de deslizamientos, las propiedades mecánicas de los materiales y el factor litológico en el total de los casos facilitó los movimientos del terreno.

Cuadro N° 6: Inventario de PRM, cerros La Unión y Zaror.

Ubicación	Coordenada	Proceso	Estado	Exposición	Altura	Imagen
Cerro La Unión	5934625N 667589E	Caída	Activo	N	32 m	A
Cerro La Unión	5934605N 667531E	Deslizamiento	Activo	N	2 m	B
Cerro La Unión	5934564N 666888E	Deslizamiento	Activo	SE	76 m	C
Cerro La Unión	5934526N 667295E	Deslizamiento	Activo	N	27 m	D
Cerro La Unión	5934320N 666889E	Caída	Activo	SE	59 m	E
Cerro Zaror	5934707N 667681E	Deslizamiento	Activo	W	17 m	F
Cerro Zaror	5934780N 667505E	Deslizamiento	Activo	N	78 m	G
Cerro Zaror	5934583N 667520E	Deslizamiento	Activo	SE	7 m	H
Cerro Zaror	5934852N 667775E	Flujo	Activo	SE	54 m	I

Fuente: Elaboración propia

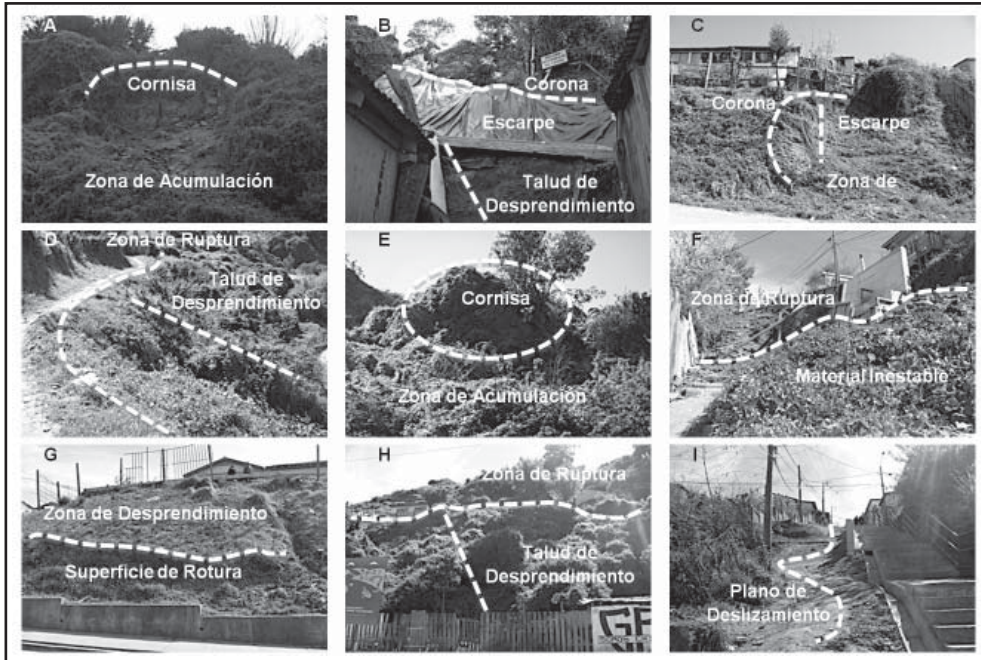


Figura 6: Inventario de PRM, cerros La Unión y Zaror.

Fuente: Fotos del autor

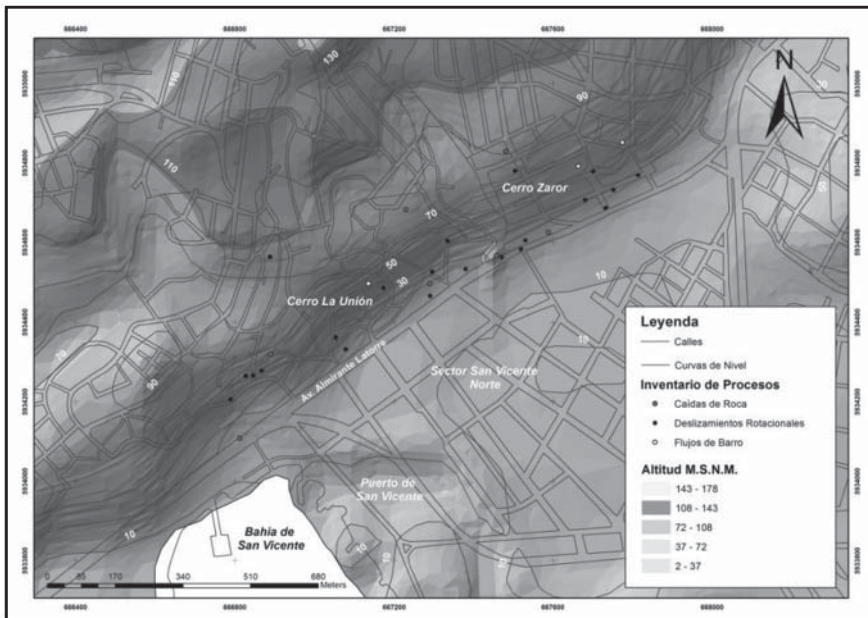


Figura 7: Inventario de PRM, cerros La Unión y Zaror .

Fuente: Elaboración propia

2.3 Análisis Factores Físico - Naturales

La litología constituyó un factor base en el desarrollo de PRM en los cerros La Unión y Zaror, esta incidió en el tipo de material rocoso y de suelo que bajo los avanzados estados de meteorización potenció las condiciones mecánicas para que el material sea movilizado. La unidad conformada por rocas metamórficas presentó un nivel de peligrosidad

muy fuerte al poseer altos niveles de meteorización y estar bajo una capa de suelo compuesto por derrubios y una capa de vegetación de tipo arbustiva de baja consolidación (Fig. 8), que facilitó la rápida infiltración del agua provocando una rápida desestabilización de los materiales. En esta unidad se desarrolló la mayor cantidad de PRM con 30 procesos registrados (Cuadro 7).



Figura 8: Componente litológico, cerros La Unión y Zaror.

Fuente: Fotografías del autor

Las unidades geomorfológicas permitieron reconocer las zonas más susceptibles a PRM (Cuadro N°7). Las unidades de Terraza Superior y Terraza de Deposición presentaron un nivel de peligrosidad moderado, cuyas características morfométricas contribuyeron en la ocurrencia de PRM por sus condiciones de urbanización que influyó en la inestabilidad de estas unidades. La unidad de Talud de Desprendimiento presentó un nivel de peligrosidad fuerte con una morfometría

y morfología muy escarpada en donde la actividad antrópica aportó a la inestabilidad como consecuencia del socavamiento en algunos sectores de la vertiente por viviendas que allí se ubican. La unidad de Talud de Erosión y Remoción presentó un nivel de peligrosidad muy fuerte que se caracterizó por presentar una morfometría con pendientes que superaron los 20°, y que influyó en la movilización de material debido a la configuración convexa que predominó en esta unidad.

Cuadro N° 7: Niveles de peligrosidad de PRM, cerros La Unión y Zaror.

Unidades litológicas	N° de Procesos	Nivel de Peligrosidad	Peso
Depósitos Coluviales	1	Moderado	2
Rocas Metamórficas	30	Fuerte	3
Unidades Geomorfológicas	N° de Procesos	Nivel de Peligrosidad	Peso
Terraza Superior - Terraza de Depositación	11	Moderado	2
Talud de Desprendimiento	12	Fuerte	3
Talud de Erosión y Remoción	8	Muy Fuerte	4

Fuente: Elaboración propia

El resultado del inventario de procesos indicó que en pendientes configuradas en un perfil cóncavo a semirrecto mayores a 6° los PRM comienzan a registrar mayor actividad, evidenciándose en pendientes entre los 6° a 11° (Cuadro 8). Por otro lado, la configuración de un perfil de vertiente semirrecto en pendientes entre los 11° a 17° provocó un estímulo en la generación de PRM en donde se registró la mayor cantidad de procesos en estado

activo (Cuadro 8), esta representó el área de mayor extensión en ambos cerros. La configuración de un perfil convexo en pendientes entre los 17° a 27°, evidenció el registro procesos provocados por la intervención de la vertiente en la construcción de escalinatas, la cual socavó y removió el material estable, ocasionando el debilitamiento de la roca y del suelo que subyace sobre la vertiente (Fig. 9).



Figura 9: Intervención de vertientes, cerros La Unión y Zaror.

Fuente: Fotografías del autor.

El grado de exposición de vertientes indicó que la mayor cantidad de procesos se registró en exposición N - NE - NW con 19 procesos, y en exposición E - SE - W - SW con 12 procesos (Cuadro 8). La orientación influyó en las condiciones de humedad que presentó la vertiente como

consecuencia de la exposición al sol, permitiendo el desarrollo de una cobertura vegetal de tipo arbustiva que influyó en las condiciones de permeabilidad del suelo produciendo una rápida saturación producto de las precipitaciones.

Cuadro N° 8: Niveles de peligrosidad de PRM, cerros La Unión y Zaror

Pendiente	Deslizamientos	Caídas	Flujos	Nivel de Peligrosidad	Peso
6° - 11°	2	3	-	Moderada	2
11° - 17°	13	2	1	Fuerte	3
17° - 27°	6	2	2	Muy Fuerte	4
Exposición	Deslizamientos	Caídas	Flujos	Nivel de Peligrosidad	Peso
E - SE - W - SW	8	3	1	Moderada	2
N - NE - NW	13	4	2	Fuerte	3

Fuente: Elaboración propia

La vegetación de los cerros La Unión y Zaror (Fig. 10), se constituyó de vegetación semidensa que se distribuyó en sectores cóncavo - convexo y en sectores semirectos de un alto grado de pendiente, esta se caracterizó de vegetación de tipo arbustivo esclerófilo y es la de mayor porcentaje en ambos cerros. Por otro lado, las áreas descubiertas de vegetación corresponden a zonas urbanizadas principalmente en

sectores de la terraza superior y pie de la vertiente. En esta ocasión, se comprobó que la cobertura vegetal se distribuyó de manera muy poco consolidada, sobre una capa de suelo poco cohesionado y sobre un macizo rocoso muy meteorizado, esto indicó que esta no cumpliría el rol estabilizador y sería uno de los factores que condicionaría la ocurrencia de PRM en ambos cerros.



Figura 10: Cobertura vegetal, cerros La Unión y Zaror.

Fuente: Fotografías del autor

La composición granulométrica de los cerros La Unión y Zaror proporcionó como resultado la existencia de un predominio de una clase textural de tipo limo - arcilloso (Fig. 11). Esto indicó que la composición granulométrica de ambos cerros presentó una textura muy propensa a la generación de PRM (Fig.

11.), principalmente debido a que la composición del material permitió una mayor concentración de humedad y una mayor saturación que influyó en periodos de mayor precipitación en la inestabilidad del material poco cohesionado, y que presentó una mayor probabilidad de ser movilizado.



Figura 11: Clase textural, cerros La Unión y Zaror.

Fuente: Fotografías del autor

El perfil de suelo realizado en el cerro La Unión en las coordenadas 5934608N y 667524E a una altura de 22 m.s.n.m. (Fig. 12), indicó que el grado de meteorización de la vertiente presentó un nivel de peligrosidad muy fuerte evidenciando la presencia de roca descompuesta y desintegrada configurada en pequeños estratos en donde los fragmentos de roca se distribuyeron a lo largo del horizonte. Por otro lado, se reconoció que los principales agentes de meteorización son el material orgánico producido por la cobertura vegetal, y la humedad que actúa como agente desintegrador generando fracturas en gran parte del horizonte.

El grado de permeabilidad evidenciado en el perfil de suelo (Fig. 12), presentó un nivel de peligrosidad muy fuerte como resultado

de la configuración del material de suelo, el que se evidenció en una capa de grano fino poco compacto cubierta de una densa cubierta vegetal que facilitó la infiltración de agua y humedad hacia el subsuelo. También se identificó una capa de grano grueso en un horizonte mucho más profundo que registró pequeños afloramientos rocosos producto de los procesos de meteorización, y que contribuyó a la formación de grietas que permitió la infiltración de agua desde el horizonte superior.

Lo anterior, indicó que los niveles de permeabilidad del suelo son mucho más evidentes y ocasionan una mayor saturación del suelo, sobre todo en los meses en que existe una mayor acumulación de agua como consecuencia de las precipitaciones que pueden originar movimiento de material potenciando la generación de PRM.

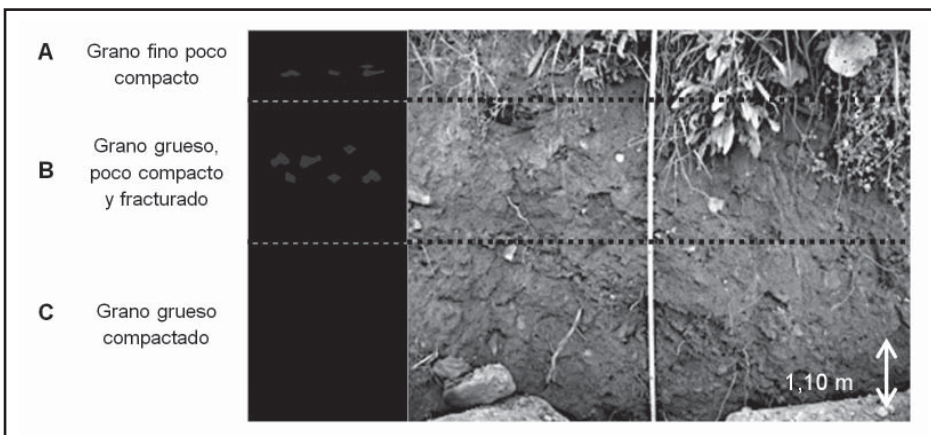


Figura 12: Perfil de suelo, cerro La Unión.

Fuente: Elaboración propia

2.4 Energías Detonantes

El análisis de recurrencia histórica permitió identificar que la mayor cantidad de eventos fueron detonados por precipitaciones ocurridas en los meses de invierno, en periodos de lluvia concentrados

en los meses de Junio y Julio (Cuadro 9). Según los registros del Diario El Sur, los eventos ocurridos tienen como principal característica haber ocurrido en días de intensa pluviosidad con precipitaciones que superaron los 80 mm de agua caída en periodos aproximados de 24 horas.

Cuadro N° 9: Eventos de PRM periodo 1990 - 2012

Año	2012	2010	2009	2006	2001	2000	1999	1997	1996	1995	1994	1993	1992	1991
N° de Eventos	1	2	1	1	1	1	1	2	1	3	2	2	4	1
Pp. Acumulado (mm/24h)	19,4	80	43	51	7,8	15,4	42	62	35	77	67	136	249	24

Fuente: Elaboración propia, con datos diario El Sur y DGA (2012)

El análisis de regresión indicó que el nivel de precipitaciones y el número de eventos de PRM tuvo una alta relación con un coeficiente de correlación casi cercano a 1 ($0,8709 \approx 1$) (Fig. 13), concluyéndose que las precipitaciones como energía detonante tienen una alta incidencia en la generación de PRM. Por otro lado, se observó una relación lineal con un valor R^2

cercano a 1 ($0,7585 \approx 1$), lo que explicaría el buen ajuste de los datos a la línea de tendencia y que explicaría que el 75% de los eventos desencadenados tiene relación con el nivel de precipitaciones, esto entregó una predicción muy fiable de la relación entre el nivel de precipitaciones y la ocurrencia de eventos de PRM.

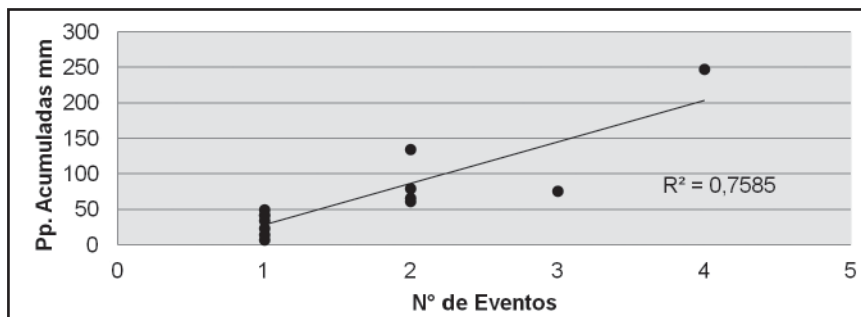


Figura 13: Relación entre número de eventos y precipitaciones periodo 1990 - 2012.

Fuente: Elaboración propia

El cálculo del umbral de precipitación (Cuadro 10), se realizó a partir del evento ocurrido el día jueves 16 de Agosto del 2012, en donde se desencadenó un proceso de deslizamiento rotacional que afectó a dos viviendas y dejó a dos familias afectadas en el cerro La Unión.

El cálculo para 19,4 mm de agua caída en un periodo de 24 horas indico que para , las precipitaciones acumuladas en un periodo de 12 horas con una intensidad de 5,62 mm/h y con 12,1 mm de agua caída, se convirtió en el umbral crítico para la generación de PRM.

Cuadro N° 10: Umbrales de precipitación.

Pp. Acumulado (h)	Duración (h)	Intensidad de Pp. (mm/h)
3,3	6	7,37
12,1	12	5,62
19,4	24	4,29

Fuente: Elaboración propia, con datos DGA (2012)

2.5 Zonificación de peligrosidad de PRM

De acuerdo a la metodología planteada y a la identificación de los factores físico - naturales que incidieron en la generación de PRM, se obtuvo un mapa de peligrosidad que permitió establecer cuáles son las zonas de mayor peligrosidad en la generación de PRM (Fig. 16). El resultado es una zona de peligrosidad moderada y una zona de peligrosidad alta, lo que indicó que los cerros La Unión y Zaror poseen una extensa superficie de áreas inestables.

2.5.1 Zona de peligrosidad moderada

La zona de peligrosidad moderada (Fig. 16), se caracterizó por extenderse en áreas medianamente inestables en donde

los PRM son poco recurrentes debido a las características morfológicas que configuran esta zona. Esta se conformó en las unidades geomorfológicas de Terraza Superior y Terraza de Depositación, unidades que presentaron una morfometría con pendientes que no sobrepasaron los 11°, con terrazas de inclinación suave y con un perfil cóncavo a semirrecto, por lo que su incidencia en la generación de PRM es de carácter moderado.

Esta zona se configuró como una zona propicia para el asentamiento humano (Fig. 14), debido a sus características morfológicas y morfométricas, donde las viviendas ocuparon en mayor porcentaje las zonas más altas y bajas de la vertiente, las cuales poseen una inclinación mucho más suave y que hacen posible la urbanización de esta zona.

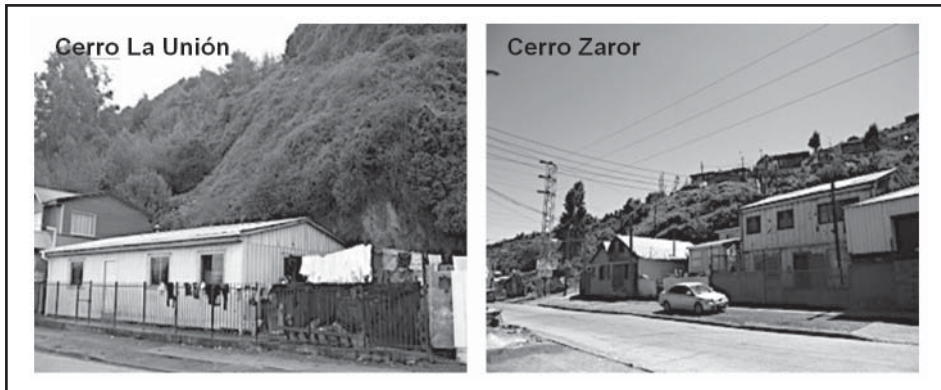


Figura 14: Zona de peligrosidad moderada.

Fuente: Fotografía del autor

2.5.2 Zona de peligrosidad alta

La zona de peligrosidad alta (Fig. 16), se caracterizó por ser un área altamente inestable que concentró la mayor cantidad de procesos de PRM en estado activo inventariados. Esta zona se conformó en las unidades geomorfológicas de Talud de Desprendimiento y Talud de Erosión y Remoción, unidades que se caracterizaron por una morfometría con pendientes que

van desde los 11° hasta los 27° y que correspondieron a vertientes de plano inclinado no muy escarpadas y vertientes acantiladas con formas convexas más o menos abruptas en casi toda su área y que actúan como una zona de movilización de material mucho más acentuada debido al rango de pendientes que predominan en esa zona. Esta zona es de mucha fragilidad por lo que se recomienda que no sea apta para el desarrollo de viviendas (Fig. 15).

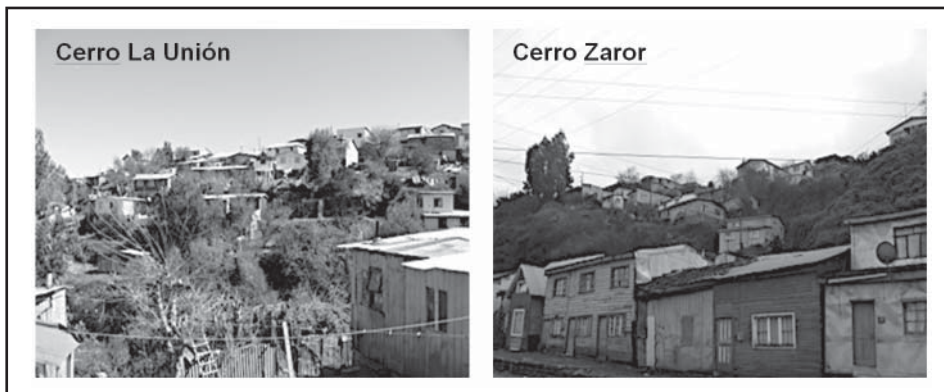


Figura 15: Zona de peligrosidad alta.

Fuente: Fotografías del autor

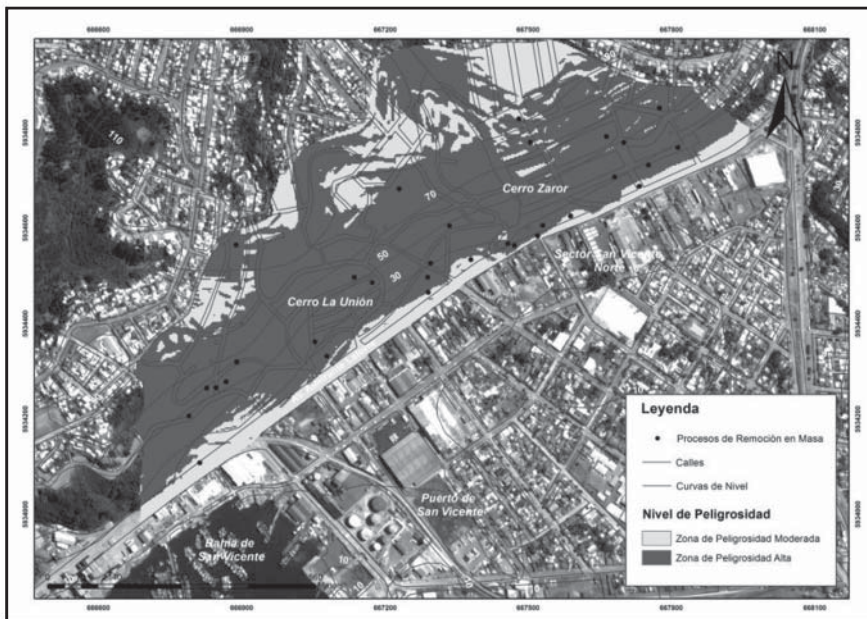


Figura 16: Nivel de PRM, cerros La Unión y Zaror.

Fuente: Elaboración propia

3. Discusión

Los estudios de PRM en el mundo se han enfocado en métodos y herramientas para la identificación, evaluación y mitigación. En Chile nacen como un interés de conocer y profundizar respecto a sus energías detonantes, factores y efectos como una forma de orientar el desarrollo de proyectos civiles de infraestructura, desarrollo urbano, estudios de impacto ambiental y estudios de riesgo. En este sentido, Hauser (1993) ha sido el principal autor en identificar y caracterizar los PRM de común ocurrencia en Chile con información de cada proceso y ambiente geográfico. En el área Metropolitana de Concepción investigaciones realizadas por Mardones et al., (1978; 1994; 2006 y 2010), han contribuido en la zonificación de PRM, así como también en la identificación de los factores físico - naturales que permiten entender la geodinámica que influye en el desarrollo de los PRM en el Gran Concepción y sobre todo en los cerros La Unión y Zaror.

En los cerros La Unión y Zaror la litología resultó ser uno de los factores físico - naturales de mayor relevancia en la generación de PRM. Así se comprobó en los resultados obtenidos, los cuales indicaron que los altos niveles de meteorización identificados sobre la roca metamórfica propició la existencia de suelo residual en ambos cerros, donde la vegetación y la humedad actuaron como agentes de fracturas y diaclasas que incidieron en el grado de compactación y alteración de los materiales, el que se evidenció en un suelo y roca poco cohesionado. Lo anterior se demostró en los PRM inventariados que en su totalidad fueron influenciados por el grado de estructura del material litológico el que propició la generación de deslizamientos rotacionales y caídas de roca. Estudios realizados en el área Metropolitana de Concepción han concluido que este factor es uno de los de mayor incidencia en la generación de PRM, así lo comprobó un estudio realizado por Flores (1993), en la localidad de Cocholgue, quien

estableció que la diversidad litológica y granulométrica, así como la estructura y el grado de compactación de los materiales han sido los factores base en la generación de PRM. Otro estudio realizado por Cuevas (2012), en la misma localidad comprobó que los altos niveles de meteorización son el principal aporte de material disponible para ser movilizado. En este sentido, la elaboración de horizontes de suelo permitió identificar la composición textural de ambos cerros, la que resultó ser de clase limo - arcillosa menor a 1mm de carácter muy fino, esta clase textural permitió una mayor infiltración de agua y humedad hacia el subsuelo por medio de fracturas y grietas producidas por raíces que facilitó la saturación del material compactado que es muy propenso a moverse y que condicionó a la vertiente en la generación de PRM.

La totalidad de los PRM inventariados se concentraron y distribuyeron en un rango de pendientes de 6° a 27°, esto indicó que la morfometría es un factor fundamental en la intensidad de los PRM inventariados. Según Beaty (1956), los PRM en ambientes costeros oscilan en pendientes que van en un máximo de 20° - 25° y hasta un mínimo de 3° - 5°, rango de pendientes que influyen, según Castro et al., (1990) en el comienzo de procesos de erosión lineal como consecuencia del grado de inclinación de la vertiente, la cual permite una mayor acción erosiva del agua, sobre todo en climas mediterráneos de marcada pluviosidad, lo que representa una fase inicial hacia el desarrollo de cárcavas con el paulatino ensanche y profundización del terreno, generando zonas de ruptura y acumulación de material hacia las zonas más bajas por acción del agua y la gravedad. Un estudio realizado por Vennari et al., (2013), en el Sur de Italia comprobó que en pendientes pronunciadas con abundante material

meteorizado las propiedades geotécnicas del terreno son más frágiles, y que con precipitaciones acumuladas en menos de 24 horas podría ser la cantidad necesaria para detonar PRM en basamentos metamórficos. Por otro lado, la cobertura vegetal y la exposición de vertientes son los factores que más se relacionaron, ambos influyeron en la generación de PRM de acuerdo al tipo de vegetación existente como producto de la orientación de la vertiente. Según Beaty (1956), la exposición norte propició la vegetación de tipo arbustiva, esto explicaría la relación exposición - vegetación presente en ambos cerros, en donde según los PRM inventariados la mayoría posee una orientación N - NE - NW, la cual junto a los procesos erosivos, vegetación y humedad favorecieron la meteorización de la roca metamórfica, lo que se manifestó en los PRM evidenciados.

La relación entre el nivel de precipitaciones y la generación de PRM dio cuenta de la alta relación existente entre ambas variables. Así se evidenció en el análisis de recurrencia histórica, en donde se comprobó que el desarrollo de eventos en el periodo 1990 - 2012 se debió a las altas precipitaciones registradas en los meses de invierno, lo que explicó la alta frecuencia de PRM principalmente en el periodo 1992 - 1995. Según Ortlieb (1994), la variabilidad climática manifestada en el litoral central en aquel periodo se debió a la estrecha relación con el fenómeno ENSO que ocasionó un incremento de las precipitaciones que generó la mayor cantidad de PRM para la época, con precipitaciones que alcanzaron un máximo de 90 mm en 24 horas. En este sentido, la correlación entre el nivel de precipitaciones y los eventos históricos resultó ser alta con un valor de 0,8709 muy cercano a uno lo que indicó que las precipitaciones son la principal energía

detonante de PRM en los cerros La Unión y Zaror. Por otro lado, la definición de umbrales de precipitación estableció que para precipitaciones acumuladas de 12,1 mm de una intensidad de 5,62 mm/h en un periodo de 12 horas, la probabilidad que se detone un PRM es muy alta, esto indicó que la intensidad y duración de las precipitaciones son un factor fundamental en la identificación de umbrales críticos que detonan PRM. Un estudio realizado por Tarolli et al., (2011), estableció un modelo para predecir la saturación del suelo basado en la intensidad y duración de las precipitaciones, modelo aplicado en diferentes ambientes principalmente en el norte de Taiwán y los Alpes Italianos, ambientes caracterizados por diferentes climas y duración de precipitaciones, el modelo denominado (QDSLAM) Quasi-Dynamic Shallow Landsliding Model (modelo de deslizamientos superficiales) dio como resultado que los PRM se detonan por lluvias que son cortas con respecto a la longitud de tiempo, en el cual la infiltración alcanza un punto crítico que satura el suelo y rompe el equilibrio en que se encuentra, como producto de la intensa erosión lineal que determina las características locales de fragilidad de cada ambiente, esto indicó la susceptibilidad de PRM en ambientes que se caracterizan por precipitaciones cortas e intensas como las que prevalecen en el clima mediterráneo.

La elaboración del inventario de PRM fue fundamental en la identificación de los procesos dominantes, según Van Den Eeckhaut et al., (2012) la elaboración del inventario provee información sobre ubicación, tipo de proceso, grado de actividad, lo cual es fundamental en el conocimiento del estado actual de cada PRM, que sumado al análisis de susceptibilidad permite tener una aproximación de bajo qué condiciones

de inestabilidad ocurrirá un proceso en el futuro, y que indica según Van Westen et al., (2013), la distribución espacial de las localidades que son favorables para la futura ocurrencia de PRM. En este sentido, Alcántara - Ayala (2002), expone que los modelos de peligrosidad son un papel clave en la prevención de PRM, ya que pueden proporcionar enfoques teóricos y aplicados, en términos de origen y de dinamismo de los procesos físicos, y además, según Fujii et al., (2013) permiten entregar a las comunidades locales la capacidad de adaptarse y organizarse ante un peligro para mantener un nivel funcional, soportar pérdidas o daños para recuperarse de los efectos de un desastre y reorganizarse para la protección futura.

4. Conclusiones

En los cerros La Unión y Zaror los deslizamientos rotacionales fueron los procesos de mayor predominio, registrándose 21 procesos en estado activo, en tramos de pendiente convexos con pendientes sobre los 6° . Por otro lado, las caídas de rocas son el segundo proceso de mayor predominio con 7 procesos en estado activo, concentrados en sectores de roca expuesta en pendientes sobre los 11° . De ellos, la mayor cantidad se concentró en un rango de pendientes entre 6° y 27° , lo que indicó en que la morfometría fue uno de los principales factores que aportó a la inestabilidad de la vertiente. De la totalidad de los PRM inventariados los deslizamientos rotacionales presentaron mayor actividad durante los meses de invierno, en cambio las caídas de roca presentaron un grado de actividad constante durante todo el año.

El grado de exposición N - NE - NW propició la aparición de cobertura vegetal de tipo arbustiva que aumentó los niveles de humedad en el suelo, facilitando los procesos de meteorización, el cual fue

uno de los principales aportes de roca fracturada y suelo residual en la vertiente, que por medio de grietas generadas por las raíces de la cubierta vegetal permitió la infiltración de humedad hacia el subsuelo, saturando el material compactado, lo que derivó en una estructura compacta poco cohesionada y muy susceptible a moverse, en donde la clase textural de tipo limo - arcilloso de carácter muy fino facilitó una menor cohesión y compactación del suelo, permitiendo una mayor permeabilidad del material residual facilitando la movilización por acción del agua o la gravedad.

El análisis de la recurrencia histórica indicó que el cerro La Unión es el cerro con mayores eventos históricos desencadenados con 7 eventos registrados, en comparación al cerro Zaror que registró 6 eventos, lo que indicó la diferencia morfodinámica en ambos cerros. Además, el análisis de recurrencia histórica estableció la alta correlación existente entre los eventos históricos y el nivel de precipitaciones, resultando para ambas variables un coeficiente de correlación de 0,7585 valor muy cercano a 1, cuyo coeficiente de determinación de 0,75 entregó una predicción muy fiable de la relación entre el nivel de precipitaciones y la ocurrencia de PRM. Por otro lado, la determinación de umbrales de precipitación permitió establecer que con precipitaciones máximas en 12 horas de una intensidad de 5,62 mm/h y con un total de 12,1 mm precipitados la probabilidad que se desencadene un PRM es muy alta.

El resultado de la evaluación de peligrosidad por PRM en los cerros La Unión y Zaror, permitió un mayor conocimiento de los PRM de mayor actividad mediante la elaboración de un mapa de inventario, lo que facilitó la identificación de los principales factores físico - naturales que incidieron en la inestabilidad de la vertiente, además de la elaboración de

modelos predictivos a través de factores externos como las precipitaciones, lo que permitió mediante la zonificación de las áreas más inestables proponer las bases hacia una planificación territorial que contemple medidas especiales de urbanización, como una medida de estabilizar aquellos sectores que presentan PRM en estado activo, para minimizar la vulnerabilidad y propiciar el uso racional del suelo, estableciendo zonas seguras y poco expuestas a PRM.

Agradecimientos

El presente artículo se enmarca en la tesis de pregrado para optar al título de Geógrafo "Evaluación de Peligrosidad por Procesos de Remoción en Masa en los Cerros La Unión y Zaror. Comuna de Talcahuano, Región del Biobío, Chile", la cual fue realizada con el apoyo del proyecto FONDECYT N°11100379 (Dra. Carolina Martínez).

Bibliografía.

- ALARCÓN, G. (1995). Evaluación de los riesgos naturales del Área Metropolitana de Concepción, a través de la información del Diario el Sur, 1960 - 1990. Tesis para optar al título de Licenciado en Educación mención Historia y Geografía, Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- ALCÁNTARA - AYALA, I. (2002). Geomorphology, natural hazards, vulnerability and prevention of natural disasters in developing countries [versión electrónica]. *Geomorphology Journal*, N° 47: 107 - 124.
- BARREDO, J., GÓMEZ, M. (2005). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. (2a. Ed). Madrid, España.: Editorial RA - MA.
- BEATY, C. (1956). *Landslide and Slope*

- Exposure [versión electrónica]. The Journal of Geology, N° 64: 70 - 74.
- CASTRO, C., VICUÑA, P. (1990). Caracterización de la Erosión Lineal en Planicies Costeras de Chile Central [versión electrónica]. Revista Geográfica del Norte Grande, N° 17: 37 - 45.
- CUEVAS, M. (2012). Análisis de Susceptibilidad de Remoción en Masa en la Localidad de Cocholgüe, Comuna de Tomé, Región del Biobío - Chile. Tesis para optar al título de Geógrafo. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- ELMES, M. (2006). Análisis y evaluación de riesgo por movimientos en masa, inundación y sismicidad en el piedmont de la comuna de Puente Alto. Memoria de título para optar al título de Geógrafo. Universidad de Chile. Santiago, Chile. Disponible en: <http://www.tesis.uchile.cl/handle/2250/100928>
- FLORES, M. (1993). Zonificación y Jerarquización de Riesgos Geomorfológicos en la Caleta Cocholgüe, Comuna de Tomé, VIII Región. Tesis para obtener el título profesional de Geógrafo y el grado académico de Licenciado en Geografía. Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.
- FUJII, M., PEDCRIS, O. (2013). A localized disaster-resilience index to assess coastal communities based on an analytic hierarchy process (AHP) [versión electrónica]. International Journal of Disaster Risk Reduction, N°3: 62 - 75.
- GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., FERRER, M., ORTUÑO, L., OTEO, C., (2002). Ingeniería Geológica. (1ª. Ed.). Madrid, España.: Editorial Pearson-Prentice Hall.
- HAUSER, A. (1993). Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería - Chile. Santiago de Chile. Boletín N° 59: 89.
- IRSM, (1981). Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods. International Society for Rock Mechanics Pergamon Press, Oxford.
- JAQUE, E. (2010). Diagnóstico de los paisajes mediterráneos costeros. Cuenca del río andalién, Chile [versión electrónica]. Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles, N° 54: 81 - 97.
- LARA, M. (2007). Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebrada San Ramón, Santiago oriente, Región Metropolitana. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias mención Geología, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. Santiago, Chile. Disponible en: http://www.tesis.uchile.cl/tesis/uchile/2007/lara_mc/sources/lara_mc.pdf
- MARDONES, M. (1978). El sitio geomorfológico de las ciudades de Concepción y Talcahuano. Universidad de Concepción, Instituto de Traumatología Histórica y Geografía. Concepción, Chile.
- MARDONES, M., RODRIGUEZ, A., SOTO, J. (1994). Los riesgos naturales en la comuna de Talcahuano. 7° Congreso Geológico Chileno, N° 1: 653 - 656.
- MARDONES, M., VIDAL, C., (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana en la ciudad de Concepción [versión electrónica]. Revista EURE (Santiago), 27(81): 97 - 122.
- MARDONES, M., ECHEVERRIA, F., JARA, C. (2006). Una contribución al estudio de los desastres naturales en Chile centro sur: efectos ambientales de

- las precipitaciones del 26 de junio del 2005 en el área metropolitana de Concepción. *Revista Investigaciones Geográficas*, N° 38: 1 - 25.
- MARDONES, M. (2010). Procesos de remoción en masa asociados al sismo de Mw 8.8 del 27/F 2010 en el litoral de concepción, Chile. *Revista Sociedad Hoy*, N° 19: 11 - 32.
- MEDINA - CETINA, Z., CEPEDA, J. (2011). Clasificación Probabilística de Umbrales de Lluvia para Predecir Deslizamientos de Tierra [versión electrónica]. *Revista Internacional de desastres naturales, accidentes e infraestructura civil*, N° 12: 1 - 8.
- ORTILEB, L. (1994). Las mayores precipitaciones históricas en Chile central y la cronología de eventos ENOS en los siglos XVI-XIX [versión electrónica]. *Revista Chilena de Historia Natural*, N° 67: 463 - 485.
- PEÑA, F. (1995). Geomorfología de la ribera norte del río Biobío en su curso inferior. Limitaciones y potencialidades del área [versión electrónica]. *Revista de Geografía Norte Grande*, N° 22: 27 - 33.
- PEDRAZA, J. (1996). Geomorfología: principios, métodos y aplicaciones. (1ª. Ed.). Madrid, España.: Editorial Rueda.
- TAROLLI, P., BORGA, M., CHANG, K., CHIANG, S. (2011). Modeling shallow landsliding susceptibility by incorporating heavy rainfall statistical properties [versión electrónica]. *Geomorphology Journal*, N° 133: 199 - 211.
- MUNSELL, C. (1994). Munsell soil color charts. *Agriculture Handbook Soil Survey Manual*. NY, USA. [s.n]
- VAN DEN EECKHAUT, M., HERVAS, J. (2012). State of the art of national landslide databases in Europe and their potential for assessing landslide susceptibility, hazard and risk [versión electrónica]. *Geomorphology Journal*, N° 139 - 140: 545 - 558.
- VAN WESTEN, C., TAPAS, M., KERLE, N., JETTEN, V., KUMAR, K. (2013). Landslide hazard and risk assessment using semi-automatically created landslide inventories [versión electrónica]. *Geomorphology Journal*, N° 184: 139 - 150.
- VENNARI, C., GARIANO, S., ANTRONICO, L., BRUNETTI, M., GUZZETTI, F. (2013). Rainfall thresholds for shallow landslides occurrence in Calabria, southern Italy [versión electrónica]. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, N° 1: 5141 - 5179
- WP/WLI, (1993). *Multilingual Landslide Glossary* The Canadian Geotechnical Society Richmond, British Columbia, Canada.: BiTech Publishers.