



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA AMENAZA DE FLUJOS DE
DETRITOS UTILIZANDO UN ANÁLISIS JERÁRQUICO DE PROCESOS
Y EL SOFTWARE RAMMS, CON APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL
ESTERO SAN ALFONSO, REGIÓN METROPOLITANA**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE GEÓLOGO
ANTONIO ANDRÉS MUÑOZ MUÑOZ**

PROFESOR GUÍA:
ALEJANDRO ALTAIR ALFARO SOTO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN
MARISOL DEL PILAR LARA CASTILLO
SOFÍA REBOLLEDO LEMUS

SANTIAGO DE CHILE

2018

**RESUMEN DE MEMORIA PARA OPTAR AL
TÍTULO DE:** Geólogo
POR: Antonio Andrés Muñoz Muñoz
FECHA: 02/04/2018
PROFESOR GUIA: Alejandro Altair Alfaro Soto

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA AMENAZA DE FLUJOS DE DETRITOS
UTILIZANDO UN ANÁLISIS JERÁRQUICO DE PROCESOS Y EL SOFTWARE
RAMMS, CON APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL ESTERO SAN ALFONSO,
REGIÓN METROPOLITANA**

En los últimos años, diversas zonas del mundo han sufrido grandes pérdidas al ser alcanzadas por inundaciones y *aluviones* (flujos de detritos), por lo que desarrollar estudios relacionados a estos fenómenos se ha transformado en una necesidad. Para abordar esta problemática, en este estudio se desarrolla una metodología determinística para evaluar la amenaza de flujos de detritos, la cual contempla dos etapas con sus respectivas aplicaciones en la cuenca del estero San Alfonso, afluente del río Maipo de la Región Metropolitana.

La primera consiste en una metodología orientada a evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos mediante la ponderación de factores condicionantes con el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la implementación de un análisis jerárquico de procesos (AHP). Los resultados muestran que el AHP permitió realizar un análisis comparativo entre propiedades que no tienen una escala de medición entre sí, bajo tres principios fundamentales: la construcción de jerarquías, el establecimiento de prioridades y la consistencia lógica. Además, esta metodología es aplicable a nivel de cuencas en cualquier ambiente geológico y escala de trabajo.

La segunda etapa consiste en una metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos. Como criterios para zonificar en grados de amenaza se incorporan morfologías (abanico y vías aluviales) y áreas de alcance de flujos (conocidos y posibles), en base a la clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005), agregando como hipótesis que, a mayor volumen de flujo, menor probabilidad de ocurrencia y, por tanto, menor grado de amenaza. Los posibles flujos se simulan con el programa *RAMMS-debris flow v.1.6* y sus áreas de generación se definen en base a una evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos. Los parámetros de resistencia de las simulaciones se obtienen a partir del retroanálisis de un evento conocido, cuyos datos de entrada se calculan mediante la metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos mediante trabajo en terreno y de gabinete (MPF), propuesta en este estudio.

De los resultados finales, se desprende que la cuenca del estero San Alfonso presenta zonas de alta, media y baja susceptibilidad de flujos de detritos, siendo la subcuenca NE aquella con mayor inestabilidad. Además, muestra grados de amenaza de este tipo de remoción en masa: muy alto, alto, medio y bajo; siendo los eventos de Clase III, como el ocurrido el 21 de enero de 2013, los de mayor amenaza. Los mapas elaborados para esta cuenca son válidos a una escala 1:20.000.

En memoria de Ana María Villar Villar

A mis padres, Antonella y Arsenio

A mi familia

Agradecimientos

En primer lugar, quiero dar gracias a Dios por todas las bendiciones que me ha otorgado.

Agradezco al profesor Alejandro Alfaro por su amistad, por ser un excelente guía y haber apoyado este proyecto desde sus inicios. Así también, le doy las gracias a la profesora Sofía Rebolledo por todo su apoyo y orientación.

Como no agradecer a la profesora Marisol Lara, por todo su apoyo, orientación y sabiduría, no solo en este trabajo, sino a lo largo de toda mi formación profesional y como persona.

Agradezco a cada una de las personas que integran la Unidad de Peligros Geológicos y Ordenamiento Territorial del SERNAGEOMIN, quienes me brindaron sabiduría, cariño y creyeron en este proyecto.

Agradezco a Hugo Neira, Gilma Pantoja y Sandra Huerta por sus consejos de vida y apoyo en cartografía. De la misma manera le doy gracias a Paula Olea y a toda la Unidad de Unidad de Servicios de Información Geológica por su apoyo en el análisis de imágenes satelitales.

Agradezco a la Red Nacional de Vigilancia Volcánica (RNVV) por su amabilidad al haber dispuesto con el espacio de trabajo necesario para el desarrollo de este proyecto.

Agradezco a Luna Pérez y a toda la generación de Geólogos 2014 U. de Chile, por su incondicional apoyo a lo largo de nuestra formación como profesional. Cada grito, cada discusión y cada frustración queridos amigos, fueron aprendizajes que valieron la pena... gracias por aquellos buenos y malos momentos.

Agradezco a Sergio Sepúlveda, Jaime Campos, Juliette Marín y a todos los integrantes y colaboradores del Programa de Reducción de Riesgos y Desastres de la Universidad de Chile (CITRID), por la confianza, formación y apoyo que me entregaron a lo largo de mis estudios.

Agradezco a todas las personas que han participado y nos ayudaron a levantar el grupo organizado de Geociencias para las Políticas Públicas (GPP) y así poder entregar nuestro granito de arena a la sociedad.

Agradezco a Blanquita, Don Carlos, Verónica, William, Rosita, tía Lili y a todos los funcionarios del Departamento de Geología de la Universidad de Chile, por todo el esfuerzo que ponen cada día para hacer más grata nuestra comunidad universitaria.

Finalmente, quiero dar las gracias a toda mi familia por todo el cariño, amor, confianza que me han entregado y por los innumerables momentos de felicidad que hemos pasado juntos.

Tabla de Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Formulación del problema propuesto	1
1.2	Objetivos.....	3
1.2.1	Objetivo general	3
1.2.2	Objetivos específicos.....	3
1.3	Metodología.....	3
2	Marco teórico.....	4
2.1	Remociones en masa.....	4
2.1.1	Definición.....	4
2.1.2	Tipos de remociones en masa.....	4
2.2	Flujos de detritos.....	8
2.2.1	Composición granulométrica y morfología de flujos de detritos	8
2.2.2	Reología de flujos de detritos	9
2.2.3	Propiedades de la mecánica de movimiento de flujos de detritos	10
2.2.4	Cómo distinguir entre tipos de flujos a partir de evidencias de campo en pequeñas cuencas hidrográficas	11
2.3	Software RAMMS-debris flow.....	15
3	Metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos mediante análisis jerárquico de procesos (AHP).....	18
3.1	Introducción	18
3.2	Descripción del área de estudio	19
3.3	Determinación de factores condicionantes	20
3.4	Elaboración de mapas temáticos.....	20
3.5	Reclasificación de mapas temáticos mediante AHP.....	21
3.6	Elaboración de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos	22
3.7	Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos	24
3.8	Resumen esquemático de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos	25
4	Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos.....	26
4.1	Introducción	26
4.2	Revisión y corrección del Modelo de Elevación Digital (DEM).....	26

4.3	Metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos (MPF)	27
4.3.1	Introducción.....	27
4.3.2	Trayectoria de un flujo de detritos.....	28
4.3.3	Puntos de control	29
4.3.4	Volumen de un flujo de detritos	30
4.3.5	Densidad de un flujo de detritos.....	31
4.3.6	Hidrograma y área de liberación	31
4.3.7	Resumen esquemático de MPF.....	33
4.4	Calibración de parámetros de resistencia.....	33
4.5	Elaboración de un mapa de amenaza de flujos de detritos	35
4.6	Resumen esquemático de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos...	38
5	Susceptibilidad de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso.....	40
5.1	Descripción del área de estudio	40
5.1.1	Ubicación y vías de acceso.....	40
5.1.2	Antecedentes de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso.....	41
5.1.3	Marco Geológico	47
5.1.4	Marco Geomorfológico	56
5.1.5	Clima	60
5.1.6	Hidrometeorología.....	61
5.2	Determinación de factores condicionantes	62
5.3	Elaboración de mapas temáticos.....	63
5.4	Reclasificación de mapas temáticos mediante AHP.....	68
5.5	Elaboración de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos	75
5.6	Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos	78
6	Amenaza de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso	79
6.1	Introducción.....	79
6.2	DEM corregido a partir de GPS diferencial.....	79
6.3	Estimación de parámetros físicos del flujo de detritos	80
6.3.1	Trayectoria del flujo de detritos.....	80
6.3.2	Puntos de control, volumen, densidad e hidrograma del flujo de detritos	80
6.4	Calibración de parámetros de resistencia.....	82

6.5	Elaboración del mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso	84
7	Discusiones.....	87
7.1	Análisis de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos	87
7.2	Análisis de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos	88
7.2.1	Análisis de metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos (MPF).....	89
7.2.2	Uso de RAMMS-debris flow en la elaboración de un mapa de amenaza de flujos de detritos.....	90
7.3	Evaluación de la susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso	92
7.4	Evaluación de la amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso	94
8	Conclusiones.....	96
9	Recomendaciones	97
9.1	Estudios metodológicos futuros.....	97
9.2	Estudios futuros de flujos de detritos en la cuenca del rio Maipo	97
9.3	Sistema de monitoreo de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso	97
10	Glosario	99
11	Bibliografía.....	100

Índice de Figuras

Figura 2.1. Tipos de movimientos de remociones en masa, según Cruden & Varnes (1996). a) Caída, b) Volcamiento, c) Deslizamiento, d) Propagación lateral, e) Flujo.....	8
Figura 2.2. Corte esquemático típico de un flujo de detritos. Frente con bloques de un pulso del flujo de detritos (diagrama de Pierson, 1986). Tomado de Proyecto Multinacional Andino (2007).	9
Figura 2.3. Evidencias de campo del paso de a) flujos de detritos e b) inundaciones. Modificada de Pierson (2005).	14
Figura 3.1 Esquema de ejemplo de aplicación de AHP para la elaboración de mapa continuo de susceptibilidad. Elaboración propia.....	23
Figura 3.2. Campos de validación de un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos a partir de un catastro de activación. Elaboración propia.	24
Figura 3.3. Flujograma de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos. Elaboración propia.....	25
Figura 4.1. Resumen de corrección de DEM a partir de mediciones en terreno con GPS diferencial. Elaboración propia.....	27

Figura 4.2. Flujograma para estimar parámetros de flujo a partir de fórmulas empíricas. Modificado de Rickenmann (1999).....	28
Figura 4.3. Mapeo de la trayectoria de un flujo de detritos. Modificada de Nhuchhen (2017). ...	29
Figura 4.4. Ejemplo de punto de control para la aplicación de la Ecuación de Selby (1993), a) vista en planta y b) vista en sección transversal del canal. Elaboración propia.....	29
Figura 4.5. Ejemplo de Hidrograma de Tres Puntos. Tomado de WLS (2013).	32
Figura 4.6. Flujograma de metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos con trabajo en terreno y gabinete (MPF). Elaboración propia.	33
Figura 4.7. Datos necesarios para calibrar un evento conocido con el software RAMMS-debris flow. Elaboración propia.	34
Figura 4.8. Ejemplo generalizado de zonificación de grados de amenaza. Grados de amenaza: Muy alto (rojo), Alto (naranja), Medio (amarillo) y Bajo (verde). Elaboración propia.	37
Figura 4.9. Flujograma de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos. Elaboración propia.....	39
Figura 5.1. Ubicación del área de estudio con sus estaciones meteorológicas más cercanas. Elaboración propia.....	40
Figura 5.2. Catastro de activaciones recientes de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.....	42
Figura 5.3. a) Secciones media e inferior del estero San Alfonso, se indican los puntos de muestras. b) Marcas de olas y depósitos de flujo en el punto de la muestra SA (1). Tomada de Sepúlveda <i>et al.</i> (2014).	44
Figura 5.4. Trayectoria de flujo y depósito del evento del 21 de enero de 2013. Recuadro rojo corresponde a la imagen de la derecha. Elaboración propia.....	44
Figura 5.5. a) Altura de las marcas de olas en los pilares del puente de la vía del tren. b) Depósito final en la zona de descarga al río Maipo. c) Embancamiento local del río Maipo por la descarga del aluvión. Tomada de Marín <i>et al.</i> (2017).	46
Figura 5.6. Trayectoria de flujo y depósito del evento del 25 de febrero de 2017. Recuadro rojo corresponde a la imagen de la derecha. Elaboración propia.....	47
Figura 5.7. Segmentación morfoestructural del Orógeno Andino entre los 32°S y los 35°S. El recuadro blanco encierra el área estudiada. Tomado de Quiroga (2013).	48
Figura 5.8. Mapa Geológico Regional adaptado por Fock (2005) de la Hoja de Santiago 1:250.000 (Thiele, 1980). Tomado de Fock (2005). El recuadro negro encierra el área de estudio. Los recuadros rojos indican la geología regional involucrada en este estudio.....	49
Figura 5.9. Mapa Geológico (y geotécnico) del área de estudio a escala 1:20.000. Elaboración propia.	55
Figura 5.10. Mapa Geomorfológico Regional de la Región Metropolitana. El recuadro negro encierra el área de estudio. Tomado de Börgel (1983).....	56
Figura 5.11. Mapa Geomorfológico del área de estudio a escala 1:20.000. Elaboración propia. .	59
Figura 5.12. Mapa con climas presentes en la Región Metropolitana. Tomado de Padilla (2006). El recuadro negro corresponde a la zona de estudio.	60
Figura 5.13. (a) Representación esquemática de las condiciones meteorológicas durante días lluviosos TWW y (b) días lluviosos TSW. Modificada de Viale & Garreaud (2014).	62

Figura 5.14. Mapa temático de Pendiente. Elaboración propia.....	64
Figura 5.15. Mapa temático de Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.	66
Figura 5.16. Mapa temático de Antecedentes por subcuenca. Las etiquetas corresponden al nombre de cada subcuenca. Elaboración propia.	67
Figura 5.17. Mapa temático de Curvatura. Elaboración propia.	68
Figura 5.18. Mapas temático y reclasificado del factor Geomorfología. Elaboración propia.....	70
Figura 5.19. Mapas temático y reclasificado del factor Geología. Elaboración propia.	71
Figura 5.20. Mapas temático y reclasificado del factor Pendiente. Elaboración propia.	72
Figura 5.21. Mapas temático y reclasificado del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.	73
Figura 5.22. Mapas temático y reclasificado del factor Antecedentes. Elaboración propia.....	74
Figura 5.23. Mapas temático y reclasificado de Curvatura. Elaboración propia.....	75
Figura 5.24. Distribución de ponderación de los factores condicionantes para la susceptibilidad de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.....	75
Figura 5.25. Mapas continuo y reclasificado de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.	76
Figura 5.26. Mapa final de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Escala 1:20.000. Elaboración propia.	77
Figura 5.27. Izquierda: distribución del catastro al superponerlo sobre el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Derecha: valores dentro de los campos que validan el mapa anterior. Cada “x” representa porcentaje de puntos en cada zona de susceptibilidad. Elaboración propia.....	78
Figura 6.1. a) Comparación entre drenajes generados por DEM original (10 m) y DEM corregido (5 m) y, b) Puntos de elevación tomados con GPS diferencial. Elaboración propia.....	79
Figura 6.2. Puntos de control del evento del 25 de febrero de 2017 y localización de hidrograma. Elaboración propia.....	81
Figura 6.3. Hidrograma para una C_v de a) 48% y b) 57%. Elaboración propia.	82
Figura 6.4. Localización de áreas de liberación en bloque y alcance del flujo simulado para zonificar el grado de amenaza medio de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.....	85
Figura 6.5. Mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Escala 1:20.000. Elaboración propia.....	86
Figura 9.1. Propuesta de armonización de metodología expuesta con estudios de vulnerabilidad y de capacidades, para la reducción de riesgos de desastres siconaturales. Elaboración propia....	97
Figura 9.2. Localización de herramientas para un sistema de monitoreo de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.	98

Índice de Tablas

Tabla 2.1. Resumen del nuevo Sistema de Clasificación de Varnes según Hungr et al. (2014).....	4
Tabla 2.2. Escala de velocidades de remociones en masa según Cruden & Varnes (1996). La respuesta humana se basa en Hungr (1981).....	5

Tabla 2.3. Clasificación de un flujo canalizado con arrastre de detritos según concentración volumétrica. Modificada de Costa (1988).	8
Tabla 2.4. Aspectos físicos asociados al movimiento de flujos de detritos. Modificado de Sepúlveda (1998).	10
Tabla 2.5. Formas y márgenes de depositación como evidencias para distinguir entre inundaciones, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos. Modificado de Pierson (2005).	12
Tabla 2.6. Estratificación y texturas de sedimentos como evidencias para distinguir entre inundaciones, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos. Modificado de Pierson (2005).	13
Tabla 2.7. Datos de entrada necesarios para simular en RAMMS. Elaboración propia.	16
Tabla 2.8. Rangos recomendados para μ , ξ y C. Tomada de WSL (2013).	17
Tabla 3.1. Escala de Saaty (2008) para la toma de decisiones. Modificado de Saaty (2008).	19
Tabla 3.2. Ejemplo de factores condicionantes para un análisis de susceptibilidad de remociones en masa. Modificado de Lara (2007).	20
Tabla 3.3. Relación referencial entre escala de trabajo y resolución espacial en metros. Modificado de Sepúlveda & Patiño (2016).	21
Tabla 3.4. Ejemplo de matriz de comparación a pares con su error de consistencia asociado e IS _n dentro de cada factor condicionante. Elaboración propia.	22
Tabla 4.1. Fórmulas empíricas que relacionan la descarga máxima (Qp) y el volumen total de flujo de detritos (Vt). Modificado de Jakob (2005).	30
Tabla 4.2. Parámetros utilizados para la calibración de un evento conocido en RAMMS-debris flow. Modificado de Hussin et al. (2012).	34
Tabla 4.3. Grados de amenaza y clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005). Modificada de Jakob (2005).	36
Tabla 4.4. Ejemplo generalizado de criterios de zonificación de grados de amenaza. Elaboración propia.	37
Tabla 5.1. Eventos declarados en la desembocadura del estero San Alfonso. Modificado de Muñoz (2016).	41
Tabla 5.2. Precipitaciones registradas entre el 19 y el 22 de enero 2013. Modificada de Sepúlveda et al. (2014).	43
Tabla 5.3. Precipitaciones ocurridas entre el 24 y el 26 de febrero 2017. Modificada de Marín et al. (2017).	45
Tabla 5.4. Descripción de las morfologías descritas en el área de estudio, con sus respectivos procesos morfogenéticos. Elaboración propia.	57
Tabla 5.5. Factores condicionantes en la generación de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.	63
Tabla 5.6. Clasificación y justificación del factor Pendiente. Elaboración propia.	63
Tabla 5.7. Clasificación y justificación del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.	65
Tabla 5.8. Clasificación y justificación del factor de Antecedentes. Elaboración propia.	66
Tabla 5.9. Clasificación y justificación del factor Curvatura. Elaboración propia.	67
Tabla 5.10. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Geomorfología. Elaboración propia.	69

Tabla 5.11. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Geología. Elaboración propia.....	70
Tabla 5.12. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Pendiente de morfologías aluviales. Elaboración propia.....	71
Tabla 5.13. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Pendiente de morfología predominantemente no aluviales. Elaboración propia.	72
Tabla 5.14. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.	73
Tabla 5.15. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Antecedentes por subcuenca. Elaboración propia.	74
Tabla 5.16. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Curvatura. Elaboración propia.....	74
Tabla 5.17. Comparación a pares, error de consistencia y ponderación de cada factor condicionante. Elaboración propia.....	76
Tabla 6.1. Aplicación de relaciones empíricas para la estimación de volumen y concentración volumétrica del flujo. Elaboración propia.	81
Tabla 6.2. Estimación de densidad del flujo. Elaboración propia.	82
Tabla 6.3. Datos necesarios para la calibración de los parámetros de resistencia del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017. Elaboración propia.....	82
Tabla 6.4. Control de parámetros utilizados para la calibración del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017 evento, para $C_v=48\%$, $\mu=0,08$, $\xi=600 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C=0 \text{ Pa}$. Elaboración propia.	83
Tabla 6.5. Criterios de zonificación de grados de amenaza para la elaboración de mapa de amenaza de flujos de detritos para la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.....	84

Anexos

Anexo I	– Clasificación de flujos
Anexo II	– Resumen de modelos hidráulicos para flujos de detritos
Anexo III	– Resumen de estudios orientados a evaluar la susceptibilidad de remociones en masa
Anexo IV	– Trabajo en terreno
Anexo V	– Sobrevuelo SERNAGEOMIN
Anexo VI	– Justificación de comparación a pares mediante AHP
Anexo VII	– Análisis de sensibilidad de simulaciones en RAMMS-debris flow

1 Introducción

1.1 Formulación del problema propuesto

Las actividades humanas y el desarrollo socioeconómico en los Andes Centrales están fuertemente influenciados por el régimen de precipitación, los fenómenos climáticos y los peligros o amenazas naturales. En los últimos años, diversas zonas del mundo han sufrido grandes pérdidas al ser alcanzadas por inundaciones y flujos de detritos (*aluviones*), por lo que desarrollar estudios relacionados a estas amenazas se ha transformado en una necesidad.

Dentro de estos estudios, es necesario contar con una metodología que permita evaluar la amenaza de flujos de detritos que: i) identifique y considere los agentes que favorecen su generación, ii) reconozca las particularidades geológicas-geotécnicas y geomorfológicas de cada área de estudio, iii) incorpore métodos para estimar parámetros físicos de eventos característicos de cada área de estudio, iv) incorpore nuevas tecnologías que permitan determinar posibles flujos y; que finalmente todo lo anterior sea plasmado de forma lógica, ordenada y consistente.

Para alcanzar lo anterior, en este trabajo se propone una metodología orientada a evaluar la amenaza de flujos de detritos que incluye: i) la evaluación de susceptibilidad de estos eventos, a partir de la ponderación de sus factores condicionantes, utilizando un análisis jerárquico de procesos (AHP), ii) el desarrollo de una metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos con trabajo en terreno y gabinete (MPF) y, iii) la modelación del alcance de eventuales flujos de detritos mediante el *software RAMMS-debris flow v. 1.6*. Cada una de estas etapas se aplica en la cuenca del estero San Alfonso, área de estudio seleccionada para probar y ajustar esta metodología.

La cuenca del estero San Alfonso, está inmersa en la comuna San José de Maipo de la Región Metropolitana y corresponde a un afluente de la cuenca del río Maipo. Su descarga ocurre en el kilómetro 48 de la ruta G-25, específicamente donde se ubica su puente homónimo. Esta ruta conecta la ciudad de Santiago con poblados que se inmiscuyen hacia la Cordillera de Los Andes y poseen un fuerte atractivo turístico, tales como, El Ingenio, San Gabriel, Las Melosas, El Romeral, Baños Morales, entre otros. Además, conecta a cientos de personas con su fuente laboral ligada principalmente a la minería, turismo y ganadería, por tanto, existe una importante población flotante que utiliza el puente San Alfonso como vía única de tránsito.

A lo largo de su historia, en la cuenca del estero San Alfonso han ocurrido importantes eventos de remoción en masa, siendo los de mayor relevancia en el último tiempo, flujos de detritos desencadenados por precipitaciones intensas.

Los flujos de detritos más recientes que provocaron un gran impacto en la población, corresponden a los ocurridos el 21 de enero de 2013 y el 25 de febrero de 2017. Ambos ocurrieron en época estival y fueron desencadenados por tormentas de verano, asociadas a precipitaciones intensas, muy localizadas, de corta duración y con una isoterma 0° C superior a los 4.000 m s.n.m.

(Marín *et al.*, 2017; SERNAGEOMIN, 2013b). Esto configura un escenario favorable para la generación de remociones en masa por el aumento de la superficie de captación de aguas lluvias.

Los eventos que se desarrollaron el 21 de enero de 2013 en la cuenca del río Maipo, causaron interrupciones en la ruta G-25, siendo el más dañino el ocurrido en la cuenca del estero San Alfonso, cuyo volumen depositado superó los 5.000 m³ (Sepúlveda *et al.*, 2014), aislando a miles de personas en el sector. Además de la afectación directa a la infraestructura y conectividad vial, los flujos de detritos aportaron una alta concentración de sedimentos finos en el río Maipo, la principal fuente (cerca del 70%) de agua potable de la ciudad capital de Santiago (Moreiras & Sepúlveda, 2013; Sepúlveda *et al.*, 2014), afectando el normal funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua potable de Aguas Andinas (Fundación Aquae, 2014a). Esta situación provocó el corte del suministro de agua potable (Sepúlveda *et al.*, 2014) que afectó a más de 4 millones de habitantes durante 24 horas (Fundación Aquae, 2014b), generando a su vez un fuerte impacto socioeconómico.

Los eventos ocurridos el 25 de febrero de 2017, tuvieron un mayor efecto a los acontecidos el 2013, ya que esta vez, provocaron la destrucción total del puente del estero San Alfonso y dejaron 33 comunas sin suministro de agua potable, equivalente a más de 1.700.000 clientes sin este servicio (Marín *et al.*, 2017).

Además, pese a que no se han registrado muertes por causa de remociones en masa ocurridas en la cuenca del estero San Alfonso, este se percibe como un riesgo latente. Lo que realza la importancia en la previsión de accidentes y aislamiento en la ruta G-25 producto de los flujos que se puedan generar en la cuenca.

Finalmente, se pretende contribuir en la generación y profundización de conocimiento relacionado a la amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso, mediante la aplicación de las metodologías desarrolladas en este estudio.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Desarrollar una metodología que permita evaluar la amenaza de flujos de detritos utilizando un análisis jerárquico de procesos (AHP) y el *software RAMMS-debris flow*, con aplicación en la cuenca del estero San Alfonso, Región Metropolitana.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Desarrollar una metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos utilizando AHP.
2. Desarrollar una metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos con trabajo en terreno y gabinete (MPF).
3. Evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso.
4. Modelar el alcance y evaluar la amenaza de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso.

1.3 Metodología

La primera etapa de este trabajo consiste en la **elaboración de una metodología que permite evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos** en base a la ponderación de factores condicionantes y el análisis jerárquico de procesos (AHP). Este último, se basa en comparaciones a pares utilizando la Escala de Saaty (2008). Además, se incluye un tópico de descripción de área de estudio para determinar los factores condicionantes de este tipo de remoción en masa.

La segunda etapa corresponde a la **elaboración de una metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos**. Dentro de ella, se elabora una metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos con trabajo en terreno y gabinete (MPF). Además, se incluyen criterios de zonificación de grados de amenaza que incorporan morfologías, eventos pasados y flujos simulados con el programa *RAMMS-debris flow*, cuyas áreas de generación se definen en base a una evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos.

La tercera etapa consiste en la **aplicación de la metodología elaborada en la primera etapa, en la cuenca del estero San Alfonso**. La descripción del área de estudio incluye la revisión de antecedentes y el levantamiento de información geológica y geomorfológica, mediante trabajo en terreno y fotointerpretación de imágenes aéreas y satelitales. Se utilizan Sistemas de Información Geográfica (SIG) para producir las cartografías asociadas.

Finalmente, se **aplica la metodología elaborada en la segunda etapa, en la cuenca del estero San Alfonso**. Se retroanaliza el evento del 25 de febrero de 2017, para determinar los parámetros de resistencia de flujos simulados con el programa *RAMMS-debris flow*. Se utilizan SIG para producir las cartografías asociadas.

2 Marco teórico

2.1 Remociones en masa

2.1.1 Definición

Los fenómenos de remoción en masa son procesos de transporte de un volumen de material definidos como aquellos movimientos ladera abajo de una masa de roca, de detritos, de regolito o de tierras que son fundamentalmente afectados por la gravedad (Cruden, 1991; Proyecto Multinacional Andino, 2007).

2.1.2 Tipos de remociones en masa

En este trabajo se utiliza la clasificación propuesta por Hungr *et al.* (2014), la cual corresponde a una actualización del Sistema de Clasificación de Varnes (1978). Además, toda esta información se apoya con el texto en castellano correspondiente al Proyecto Multinacional Andino (2007). El Sistema de Clasificación modificado de Varnes, propuesta por Hungr *et al.* (2014), se basa en el tipo de movimiento y el tipo de material movilizado, suelo o roca. Esta información se resume en la Tabla 2.1.

Tabla 2.1. Resumen del nuevo Sistema de Clasificación de Varnes según Hungr *et al.* (2014).

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Caída	1. Caída de roca/hielo	2. Caída de <i>boulder</i> /detritos/limo
Volcamiento	3. Volcamiento en bloque de roca 4. Volcamiento flexural de roca	5. Volcamiento de grava/arena/limo
Deslizamiento	6. Deslizamiento rotacional de roca 7. Deslizamiento planar de roca 8. Deslizamiento de roca en cuña 9. Deslizamiento compuesto de roca 10. Deslizamiento irregular de roca	11. Deslizamiento rotacional de arcilla/limo 12. Deslizamiento planar de arcilla/limo 13. Deslizamiento de grava/arena/detritos 14. Deslizamiento compuesto de arcilla/limo
Propagación lateral	15. Propagación lateral de ladera de roca	16. Licuefacción de arena/limo 17. Propagación lateral de arcilla sensitiva

Continuación de Tabla 2.1.

Tipo de movimiento	Roca	Suelo
Flujo	18. Avalancha de roca/hielo	19. Flujo seco de arena/limo/detritos 20. Deslizamiento por flujo de arena/limo/detritos 21. Deslizamiento por flujo de arcilla sensitiva 22. Flujo de detritos 23. Flujo de lodo 24. Crecida de detritos 25. Avalancha de detritos 26. Flujo de tierra 27. Flujo de turba
Deformación de ladera	28. Deformación de ladera de montaña 29. Deformación de ladera de roca	30. Deformación de ladera de suelo 31. Reptación 32. Soliflucción

Por otro lado, en la Tabla 2.2 se muestra la escala de velocidades propuesta por Cruden & Varnes (1996), útil para describir el rango de velocidades de cada tipo de remoción en masa, ya que este parámetro se relaciona con la intensidad y la amenaza que éstos pueden significar (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Tabla 2.2. Escala de velocidades de remociones en masa según Cruden & Varnes (1996). La respuesta humana se basa en Hungr (1981).

Clases de velocidad	Descripción	Velocidad (mm/s)	Velocidad típica	Respuesta humana
7	Extremadamente rápida	5×10^3	5 m/s	Nula
6	Muy rápida	5×10^1	3 m/min	Nula
5	Rápida	5×10^{-1}	1,8 m/h	Evacuación
4	Moderada	5×10^{-3}	13 m/mes	Evacuación
3	Lenta	5×10^{-5}	1,6 m/año	Mantenimiento
2	Muy lenta	5×10^{-7}	16 mm/año	Mantenimiento
1	Extremadamente lenta	-	-	Nula

Una **caída** (ver Figura 2.1a) es un tipo de remoción en masa en el cual uno o varios bloques de suelo o roca se desprenden de una ladera, sin que a lo largo de esta superficie ocurra desplazamiento cortante apreciable. Una vez desprendido, el material cae en caída libre, botando o rodando (Varnes, 1978). Dependiendo del material desprendido se habla de una caída de roca o una caída de suelo. El movimiento es muy rápido a extremadamente rápido (Cruden & Varnes, 1996). El estudio de casos históricos ha mostrado que las velocidades alcanzadas por las caídas de rocas pueden exceder los 100 m/s (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Un **volcamiento** (ver Figura 2.1b) corresponde a un tipo de remoción en masa en el cual hay una rotación generalmente hacia adelante y hacia el exterior de la ladera de uno o varios bloques de roca o suelo, alrededor de un punto o pivote de giro en su parte inferior. Este movimiento ocurre por acción de la gravedad, por empujes de las unidades adyacentes o por la presión de fluidos en grietas (Varnes, 1978; Proyecto Multinacional Andino, 2007). Otra característica importante para que este tipo de movimiento ocurra es que las discontinuidades deben tener un manteo opuesto a la pendiente de la ladera. Para el material roca se distingue entre volcamiento en bloque y flexural. El primero involucra roca más competente y corresponde a un proceso frágil que involucra altas velocidades en sus etapas finales, mientras que el segundo involucra roca más débil y fisible y, corresponde a un proceso de torsión de capas de rocas que están estrechamente espaciadas. Para el material suelo se tiene un volcamiento en bloque de capas sub-verticales de suelo cohesivo.

Un **deslizamiento** (ver Figura 2.1c) corresponde a un tipo de remoción en masa caracterizado por el movimiento descendente (ladera abajo) de una masa de suelo o roca, que se desplaza sobre una superficie de cizalle. Para el material roca, los deslizamientos se pueden sub-clasificar según la forma de la superficie de cizalle en: rotacional, traslacional (planar o en cuña), irregular o compuesta. Un deslizamiento rotacional se caracteriza por tener una superficie de cizalle curva, mientras que para uno traslacional ésta es planar. En ocasiones dos o más planos de cizalle planos pueden cortarse y formar una cuña, en este caso se el movimiento corresponde a un deslizamiento en cuña, en caso de tener uno o más planos individuales (sin intersectarse) se llama deslizamiento planar. Por otra parte, Hungr *et al.* (2014) añade a la clasificación de Varnes (1978), un sub-tipo de movimiento llamado deslizamiento irregular (colapso de roca) el cual consiste en el deslizamiento de una masa de roca sobre una superficie de cizalle irregular. Finalmente, aquellos deslizamientos que se desarrollan a lo largo de planos de plegamiento, o por la intersección de varias discontinuidades planares o por la combinación de superficies de ruptura y de planos de debilidad de la roca, se denominan deslizamientos compuestos (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

Para el material suelo se sub-clasifican en: rotacional, traslacional (planar en bloque o planar superficial) o compuesto. En general, los deslizamientos tanto rotacionales como compuestos se dan en suelos homogéneos y cohesivos. Según Hungr *et al.* (2014), los deslizamientos planares en bloque corresponden a deslizamiento de suelo cohesivo sobre una superficie de cizalle planar inclinada, formado por una lámina débil, mientras que los superficiales se dan por el movimiento de una masa de material granular sobre una superficie de cizalle planar paralela al suelo poco profundo (usualmente en depósitos coluviales).

Una **propagación, expansión o extensión lateral** (ver Figura 2.1d) es un tipo de remoción en masa cuyo desplazamiento ocurre predominantemente por deformación interna (expansión) del material. La mayoría de los deslizamientos y los flujos involucran algún grado de expansión. Las propagaciones laterales pueden considerarse como la etapa final en una serie de movimientos donde la deformación interna predomina decididamente sobre otros mecanismos de desplazamiento como los que imperan en el deslizamiento o el flujo (Proyecto Multinacional Andino, 2007). En general presentan una subsidencia de la masa fracturada y está condicionada por laderas de baja a moderada pendiente. Esta puede ocurrir en rocas o en suelo. Para el material suelo se distinguen dos sub-procesos: **licuefacción** y **propagación lateral de arcillas sensitivas**. Según Hungr *et al.* (2014), el primero corresponde a una extensión lateral extremadamente rápida de una serie de bloques, flotando sobre una capa de suelo granular (suelto) saturado, licuado por la sacudida de un sismo o de forma espontánea; mientras que el segundo es una extensión lateral extremadamente rápida de bloques de arcilla, flotando sobre una capa de arcilla sensitiva remoldeada.

Un **flujo** (ver Figura 2.1e) es un tipo de remoción en masa que durante su desplazamiento exhibe un comportamiento mecánico semejante al de un fluido; puede ser rápido o lento, saturado o seco. En muchos casos se originan a partir de otro tipo de movimiento, ya sea un deslizamiento o una caída (Varnes, 1978; Proyecto Multinacional Andino, 2007). La clasificación de flujos se muestra en el Anexo I.

Una **deformación de ladera** es un tipo de remoción en masa que presentan rasgos de deformación, pero no se distingue la superficie de cizalle. Además, en general éstas son lentas a extremadamente lentas y no alcanzan grandes desplazamientos en comparación a los demás tipos de remociones en masa. Hungr *et al.* (2014), la subdivide para el material roca en deformación de ladera de roca y de montaña. Diferenciándose entre sí por la escala, la primera desarrolla en laderas de un orden de decenas a centenas de metros de alto y de roca débil, mientras que la segunda alcanza un relieve vertical de 1 o más kilómetros. El material suelo se sub-clasifica en tres: deformación de ladera de suelo, reptación y soliflucción. La primera posee características similares a sus homónimos en roca, pero se da en suelos usualmente cohesivos. Hungr *et al.* (2014) define la reptación como un movimiento extremadamente lento de capas de suelo superficial sobre una ladera (típicamente menor a 1 metro de profundidad) como resultado de cambios de volúmenes cíclicos controlado por el clima (humedecimiento y secado, helada fuerte). Mientras que la soliflucción la define como una reptación de suelo superficial muy lenta, pero intensa, que involucra la capa en el permafrost alpino o polar. La soliflucción es causada por cambios de volumen de carácter estacional en capas superficiales del orden de 1 a 2 metros de profundidad, combinados con el movimiento lento del material ladera abajo (Proyecto Multinacional Andino, 2007).

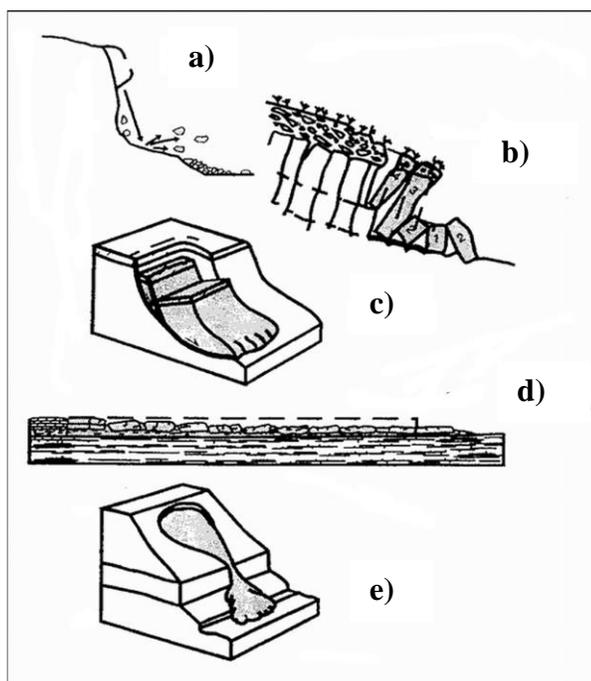


Figura 2.1. Tipos de movimientos de remociones en masa, según Cruden & Varnes (1996).
a) Caída, b) Volcamiento, c) Deslizamiento, d) Propagación lateral, e) Flujo.

2.2 Flujos de detritos

2.2.1 Composición granulométrica y morfología de flujos de detritos

Las remociones en masa compuestas por material suelo, se diferencian entre tierra o lodo (más del 80% de las partículas son menores a 2 mm) y detritos (entre el 20% y 80% de las partículas superan los 2 mm) (Varnes, 1978; Farías *et al.*, 2016). Además, según el comportamiento mecánico de las corrientes de detritos, se ha observado que, en la mayoría de los estudios, la concentración volumétrica (C_v), definida como el porcentaje de volumen de sólidos con respecto al volumen de la mezcla, es el factor más importante que considerar (Solís, 1995). En la Tabla 2.3, se muestra la clasificación de un flujo canalizado con arrastre de detritos según concentración volumétrica, cuyos valores son de carácter referencial y resultan de la aproximación a la décima de valores obtenidos por Costa (1988).

Tabla 2.3. Clasificación de un flujo canalizado con arrastre de detritos según concentración volumétrica. Modificada de Costa (1988).

Tipo de flujo	Concentración volumétrica
Crecida de agua o inundación	< 20%
Crecida de detritos o flujo hiperconcentrado	20%-50%
Flujo de detritos	50%-80%

Durante su desarrollo, un flujo de detritos exhibe una morfología típica. Presenta una **cabeza** en el frente, donde se transportan y acumulan los clastos de mayor tamaño (bolones y bloques). Esta sección representa la mayor altura del flujo. Tras la cabeza, el flujo muestra un **cuerpo** donde se desarrolla el flujo de detritos propiamente tal, transportando partículas gruesas incluso en suspensión. Detrás del cuerpo el flujo exhibe una **cola**, que se caracteriza por ser la parte más tardía del paso del flujo y corresponde a un flujo más diluido (flujo hiperconcentrado). Entre la cola y el cuerpo hay una zona de transición entre un flujo de detritos y un flujo hiperconcentrado, donde se inicia la turbulencia. En ocasiones, antes del paso del frente del flujo, pueden existir pulsos precursores de C_v variable, pero de alturas menores. En la Figura 2.2, se muestra la morfología descrita anteriormente.

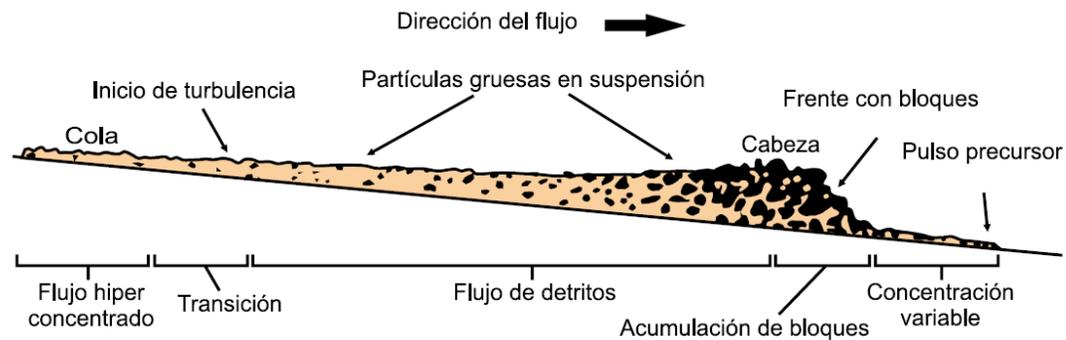


Figura 2.2. Corte esquemático típico de un flujo de detritos. Frente con bloques de un pulso del flujo de detritos (diagrama de Pierson, 1986). Tomado de Proyecto Multinacional Andino (2007).

De acuerdo con Solís (1995), esta morfología típica responde a un comportamiento de la mecánica de movimiento del flujo, la cual se puede explicar por dos efectos que ocurren en él: 1) la fuerza boyante, asociada a la diferencia de densidad entre el sólido sumergido y la matriz, con lo cual los bloques se mantienen en suspensión; 2) la fuerza dispersiva, la cual es proporcional al diámetro del sedimento, de manera que las partículas de mayor tamaño son arrastradas a la parte superior del flujo.

2.2.2 Reología de flujos de detritos

Los flujos de detritos se comportan mecánicamente como un fluido no-newtoniano, ya que a medida que aumenta la cantidad de sólidos transportados y la densidad de la mezcla sobrepasa la densidad del agua, la resistencia a la deformación crece, de tal forma que la relación entre tensión de corte y tasa de deformación es no-lineal (o, si lo es, no pasa por el origen). En cambio, en un fluido newtoniano esta relación es lineal.

Por tanto, los flujos de detritos tienden a comportarse como fluidos viscoplásticos (Costa, 1984), que se caracterizan por presentar una tensión de corte mínima, denominada tensión de fluencia (*yield stress*). Por encima de esta tensión el fluido comienza a moverse. En caso de no superarse esta tensión de fluencia, el fluido se comporta como un cuerpo rígido o cuasi-rígido, con velocidad de deformación nula (Moreno, 2014).

Esta transformación reológica se produce por la acción del fluido intersticial y las colisiones entre las partículas que condicionan las leyes constitutivas de la mezcla (Solís, 1995). Si la concentración de finos (tamaño limo o arcilla) supera el 10%, el fluido intersticial lubrica los granos y controla la dinámica de la mezcla, por lo que para un bajo tamaño de partículas la viscosidad domina en la mecánica de ésta. Se reconocen dos modelos que permiten simular la resistencia de un flujo de detritos para estas concentraciones: Modelo de Bingham y Modelo de Herschel-Bulkley.

En cambio, si los finos son menos del 10%, el control está dominado por el contacto entre los granos, siendo las fuerzas inerciales quienes adquieren mayor relevancia. El Modelo de Bagnold permite simular la resistencia, dado que asume colisión entre granos. A diferencia de los modelos presentados para concentraciones de finos >10%, este modelo no considera tensión de fluencia. En el Anexo II, se muestra un resumen de los modelos hidráulicos de flujos de detritos descritos.

2.2.3 Propiedades de la mecánica de movimiento de flujos de detritos

Junto con los modelos hidráulicos, existen otros aspectos físicos importantes que se relacionan con el comportamiento mecánico de un flujo de detritos, tales como, la velocidad, la viscosidad y densidad, la erosión y la energía de impacto. Estos temas se resumen en la Tabla 2.4.

Tabla 2.4. Aspectos físicos asociados al movimiento de flujos de detritos. Modificado de Sepúlveda (1998).

Tópico	Descripción y ecuaciones
Velocidad	<p>El rango típico de velocidades de los flujos de detritos es entre 1 y 12 m/s, pero se han registrado eventos de hasta 18 m/s. La velocidad de un flujo de detritos puede estimarse en zonas de curva del canal. En estos sectores, la superficie del flujo alcanza una altura superior en el lado externo de la curva que en el interno. Esto queda reflejado en los depósitos laterales o marcas de olas. La velocidad en estos casos se puede estimar como:</p> $v = (r \times g \times \cos \beta \times \tan \delta)^{1/2} \text{ (Selby, 1993)}$ <p><i>r</i>: radio de curvatura <i>g</i>: gravedad <i>β</i>: pendiente del canal <i>δ</i>: inclinación entre las cimas de los levées externo e interno</p> <p>Asumiendo que las pérdidas por fricción son despreciables en superficies orientadas perpendicularmente a la trayectoria del flujo, se puede calcular su velocidad como:</p> $v = (2 \times g \times \Delta h)^{1/2} \text{ (Modificada de Pierson, 1982)}$ <p><i>g</i>: gravedad <i>Δh</i>: diferencia de altura de flujo</p>

Continuación de Tabla 2.4.

Tópico	Descripción y ecuaciones
Viscosidad y densidad	<p>Para C_v entre 20 y 50%, la densidad del flujo varía entre 1,33 y 1,80 g/cm³, mientras la viscosidad puede alcanzar hasta 200 Poise. El régimen de escurrimiento en este rango es de transición turbulento - laminar. Cuando las concentraciones superan el 50%, la densidad puede variar entre 1.80 y 2,30 g/cm³ y la viscosidad puede superar largamente los 200 Poise. Se puede estimar la densidad y viscosidad de un flujo de detritos a partir de la C_v de la forma:</p> $\eta_d = \eta_w * (1 + 2.5 C_v) \text{ (Einstein, 1909)}$ $\rho_d = \rho_w * (1 - C_v) + \rho_s * C_v \text{ (Solís, 1995)}$ <p>η_d: viscosidad de la mezcla η_w: viscosidad del agua C_v: concentración volumétrica ρ_d: densidad de la mezcla ρ_w: densidad del agua ρ_s: densidad de sedimentos</p>
Erosión del canal	<p>La capacidad erosiva del flujo en el canal es proporcional al esfuerzo de corte que es ejercido por el flujo sobre la base:</p> $\tau = \rho_F * g * R * \sin \beta$ <p>τ: esfuerzo de corte g: gravedad ρ_F: densidad del fluido R: radio hidráulico β: pendiente del canal</p>
Energía de impacto	<p>El flujo lleva una energía cinética dada por la relación:</p> $E = \frac{1}{2} * m * v^2$ <p>m: masa de la mezcla v: velocidad de la mezcla en el impacto</p>

2.2.4 Cómo distinguir entre tipos de flujos a partir de evidencias de campo en pequeñas cuencas hidrográficas

En este apartado, se resumen los aspectos más importantes expuestos en Pierson (2005). En el cual, se exponen evidencias para distinguir entre flujos de detritos, flujos hiperconcentrados e inundaciones, a partir de pruebas de campo en pequeñas cuencas hidrográficas (<20 km²). Este reconocimiento se basa en observaciones de terreno como formas y márgenes de depositación (ver Tabla 2.5), impacto en la vegetación, estratificación y texturas de sedimentos (ver Tabla 2.6), principalmente.

Cabe destacar que para los tipos de flujo expuestos en la Tabla 2.3, se advierten las siguientes consideraciones importantes: (1) estos tipos de flujos representan un continuo y sus límites no son nítidos y, (2) cualquier evento puede mostrar diferentes tipos de flujos, en diferentes puntos a lo largo de su trayectoria y en diferentes momentos durante su desarrollo (Pierson, 2005).

Tabla 2.5. Formas y márgenes de depositación como evidencias para distinguir entre inundaciones, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos. Modificado de Pierson (2005).

Inundaciones	Flujos hiperconcentrados	Flujos de detritos
Comunmente presentan dunas u ondulitas en la superficie	Sin dunas o ondulitas en la superficie	
Superficies cortadas por canales y depresiones de socavación	Superficies cortadas por canales y depresiones de socavación. Usualmente están incrustadas con <i>boulders</i> de forma más aleatoria que las inundaciones	Relieve positivo (morfología convexa de la superficie donde ocurre la detención del flujo). Superficies comúnmente incrustadas con <i>boulders</i>
Usualmente los <i>levées</i> no se forman, aunque los restos pueden acumularse en los márgenes de flujo		Márgenes lobulados. Acumulaciones de clastos gruesos en los márgenes. La distribución en la superficie de clastos gruesos es bastante aleatoria. Presenta <i>levees</i> pero no siempre se forman
Sin recubrimientos de lodo en <i>boulders</i> , troncos o bancos	Comúnmente con revestimientos de lodo/arena en <i>boulders</i> , troncos y/o bancos	
Los clastos de grava pueden estar imbricados		Sin imbricación de grava
Comúnmente, no se observan agrupaciones de sedimentos	Los sedimentos consolidados se agrupan en "rincones y grietas". Por ejemplo, entre las raíces de los árboles, en las cavidades de árboles, edificios, riberas, etc.	
Sin represamiento de sedimentos	Depósitos pueden estar represados localmente por pequeñas obstrucciones de troncos o cúmulos de rocas	Depósitos frecuentemente represados localmente por pequeñas obstrucciones de troncos o cúmulos de rocas

Tabla 2.6. Estratificación y texturas de sedimentos como evidencias para distinguir entre inundaciones, flujos hiperconcentrados y flujos de detritos. Modificado de Pierson (2005).

Inundaciones	Flujos hiperconcentrados	Flujos de detritos
La mayoría de los granos son redondeados a subredondeados. Cuya fuente son lechos de canales	La mayoría de los granos son subredondeados a subangulares. Cuya fuente son lechos de canales y laderas	Arena y granos finos de grava típicamente angulares a subangulares. Cuya fuente principal son laderas
Generalmente presenta estratificación: laminaciones y estratos distintos. Comúnmente con estratificación cruzada	Muestran leves estratificaciones horizontales a masivas, con grandes clastos de grava individuales y lentes, que a veces aparecen como diamícticos, masivos y poco consolidados	No presenta estratificación. Extremadamente mala selección, es decir, masivos y diamícticos
Se observan cambios abruptos en el tamaño de grano en secciones verticales. De moderada a buena selección dentro de cada estrato. Los clastos más gruesos pueden presentar imbricación	La selección es generalmente de pobre a muy pobre. No presenta generalmente cambios texturales abruptos	Gradación normal y/o inversa son comunes en secciones verticales. Clastos orientados al azar, excepto en los márgenes de flujo
Vacíos comunes entre clastos más grandes (textura con quedades)	Comunmente no presenta vacíos entre clastos más grandes (textura con quedades)	Matriz llenando todos los vacíos, excepto en los márgenes, o donde ésta no se eliminó (no se observa)
Competencia de depósitos suelta y friable cuando está seca (es fácil excavar)	Competencia de depósitos ligeramente más consolidado que en inundaciones	Competencia firme o semi-dura. Los afloramientos son difíciles de excavar, se rompen en pequeños trozos cuando son golpeados o pateados
Superficies comúnmente tienen barras longitudinales (usualmente blindadas con clastos gruesos), dunas y/u ondulitas. Cambios abruptos en el tamaño de grano entre barras y <i>thalweg</i> de canales son típicos	Las superficies de depósito suelen ser convexas hacia arriba	Múltiples unidades de flujo comúnmente indistinguibles estratigráficamente. La distribución de los granos gruesos es bastante aleatoria en los centros de las superficies de depósito, pero está más concentrada en los márgenes de éstos. Las superficies de depósito suelen ser convexas hacia arriba

Además, en las Figura 2.3, se muestran formas de depositación (distribución espacial granulométrica) y daño en la vegetación producto del paso de flujos de detritos e inundaciones.

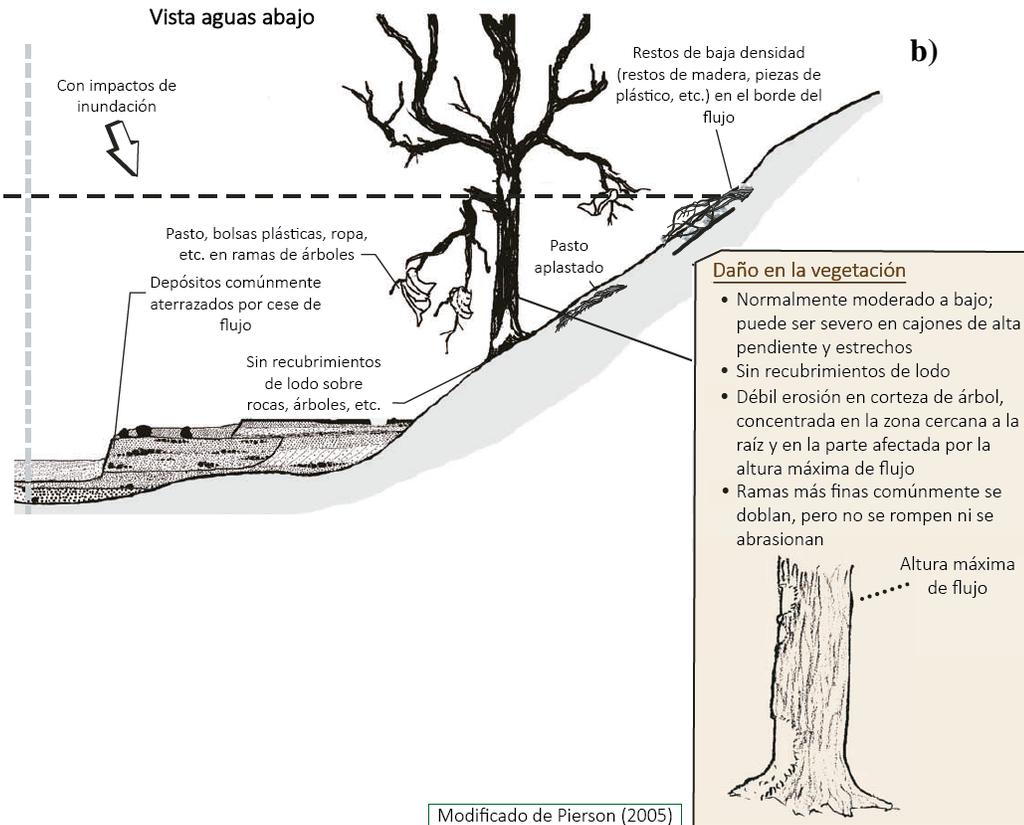
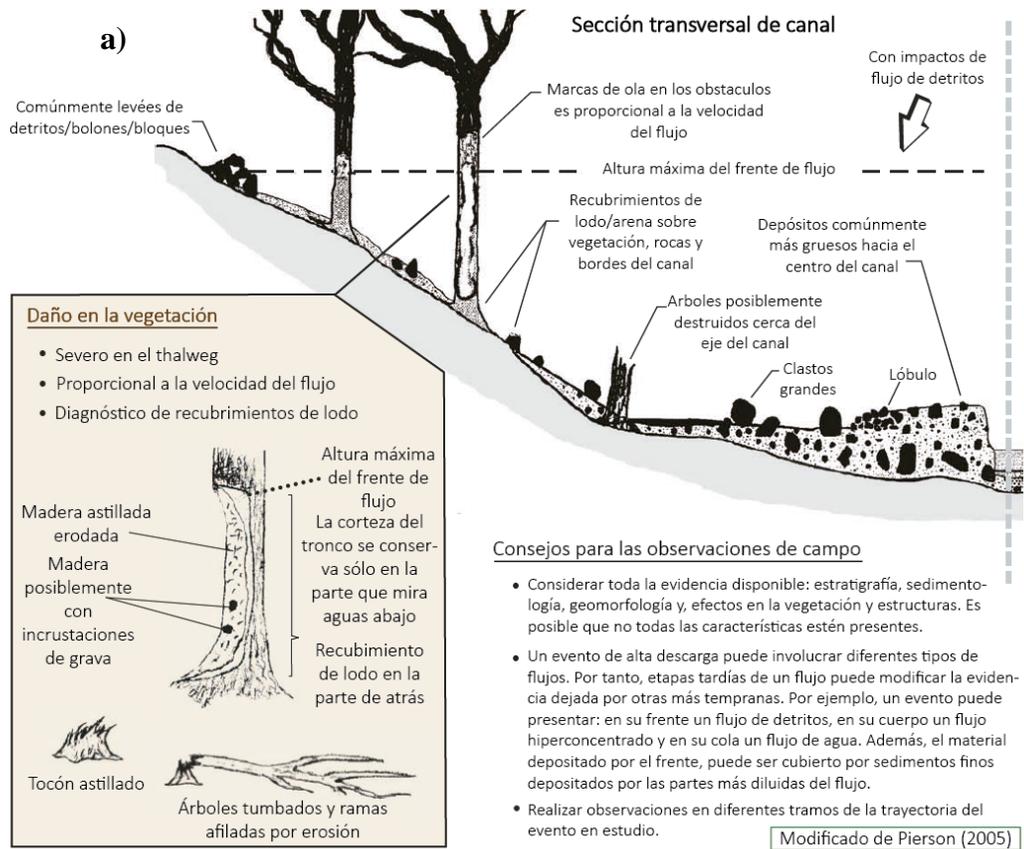


Figura 2.3. Evidencias de campo del paso de a) flujos de detritos e b) inundaciones. Modificada de Pierson (2005).

Finalmente, para mayor información se recomienda revisar Pierson (2005): *Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds*.

2.3 Software RAMMS-debris flow

En este trabajo se utiliza el programa *RAMMS-debris flow*, el cual ha ido diseñado por el Instituto Federal Suizo de estudios de avalancha de nieve y corresponde a un *software* de modelamiento numérico, que inicialmente fue diseñado para modelar avalanchas de nieve, pero se le realizaron algunas modificaciones, con el fin de adaptarse a otras remociones en masa, como la versión para flujos de detritos (*debris flow*). Para mayor detalle del funcionamiento e implementación del programa se recomienda revisar el manual del programa.

Las ecuaciones que utiliza este programa son extraídas y modificadas del Tutorial del programa *RAMMS-debris flow v1.5* para flujos de detritos. La ecuación principal, se extrae de la ley de Voellmy, que divide la resistencia a la fricción en dos partes: un coeficiente μ , que representa la fricción seca de Coulomb ($\mu = \tan(\phi)$; ϕ es el ángulo de fricción interna), es decir, la fase sólida de resistencia; y el coeficiente ξ , que es un parámetro de fricción viscoso-turbulento. El coeficiente μ domina cuando el flujo está cercano a detenerse, y ξ cuando el flujo se mueve rápidamente (WLS, 2013).

La resistencia friccional (S) está dada por:

$$S = \rho \times g \times \mu \times H \times \cos \beta + \rho \times g \times U^2 / \xi,$$

donde ρ es la densidad del flujo, g la gravedad, H la altura del flujo, β el ángulo de la pendiente y U la velocidad del flujo.

En este trabajo se utiliza la versión *RAMMS-debris flow v1.6*, en la cual se incluye el parámetro *yield stress* (tensión de fluencia) o cohesión (C) para reducir la difusión exagerada de los flujos al expandirse en áreas de inundación (WLS, 2017). Por ello, se modificó la ecuación de la ley de Voellmy a:

$$S = \mu \times N + (1 - \mu) \times C - (1 - \mu) \times C \times e^{-N/C} + \rho \times g \times U^2 / \xi,$$

donde $N = \rho \times g \times \mu \times H \times \cos \beta$.

Para realizar simulaciones con este programa, es necesario determinar algunos datos de ingreso, tales como: un DEM, el área de liberación o hidrogramas, volumen y densidad de la mezcla y los parámetros de resistencia del flujo (μ , ξ y C). La descripción de cada uno de ellos se muestra en la Tabla 2.7.

Tabla 2.7. Datos de entrada necesarios para simular en RAMMS. Elaboración propia.

Datos de entrada	Descripción
Modelo de elevación digital (DEM)	Contiene la información topográfica necesaria para realizar las simulaciones. Debe ser cargado en su formato ESRI ASCII grid o como ASCII X, Y, Z.
Área de liberación de flujo o Hidrograma	La implementación de uno u otro, se define dependiendo del tipo de flujo que se esté estudiando y si es canalizado o no. Los flujos canalizados tienden a seguir los límites de corrientes preexistentes, y los no canalizados se generan de laderas y no siguen los cauces preestablecidos. Para los primeros, es mejor utilizar hidrogramas, mientras que para los segundos, es mejor emplear áreas de liberación.
Volumen de flujo V_t [m ³]	Se puede obtener directamente a partir de datos empíricos y sirve para adecuar los parámetros de resistencia.
Densidad de flujo ρ [kg/m ³]	Se puede obtener a partir de mediciones directas o mediante la aplicación de ecuaciones (ver Tabla 2.4).
Trayectoria o alcance de flujo	Este dato sólo es necesario cuando se requiera retroanalizar un evento pasado, para determinar los parámetros de resistencia del mismo (μ , ξ y C). Se puede obtener a partir de antecedentes, trabajo en terreno y/o análisis de imágenes satelitales históricas. Debe ser cargado en formato <i>.shp</i> .
Parámetro de fricción μ [adimensional]	Para su calibración, se puede comenzar aproximándolo a la tangente del ángulo de reposo de los depósitos dejados por el flujo o a la pendiente del canal. Otra opción es utilizar los valores de flujos ocurridos en otras zonas, que se encuentren dentro del mismo contexto geológico, geomorfológico, climático e hidrometeorológico.
Parámetro de fricción ξ [m ² /s]	Para su calibración, se puede estimar a partir del retroanálisis de un evento ocurrido en el área de estudio. Su valor se puede ajustar con datos de volúmenes, alturas y velocidades del flujo. Otra opción es utilizar los valores de flujos ocurridos en otras zonas, que se encuentren dentro del mismo contexto geológico, geomorfológico, climático e hidrometeorológico. A mayor cantidad de finos en un flujo, mayor turbulencia y, por tanto, su valor asociado crece.
<i>Yield stress</i> C [Pa]	Para su calibración, se puede obtener utilizando tablas que relacionen la concentración de finos de un flujo con su tensión de fluencia. También, con los demás datos de entrada se pueden hacer simulaciones para ajustar este parámetro, considerando que, a mayor cantidad de finos, mayor valor de C . Otra opción es utilizar los valores de flujos ocurridos en otras zonas, que se encuentren dentro del mismo contexto geológico, geomorfológico, climático e hidrometeorológico. Si se utiliza este parámetro (i. e. $C > 0$ Pa), los parámetros μ y ξ deben ser calibrados nuevamente.

En la Tabla 2.8, se muestran los rangos recomendados para μ , ξ y C; como parámetros de entrada para la simulación con este software, basado en WSL (2013).

Tabla 2.8. Rangos recomendados para μ , ξ y C. Tomada de WSL (2013).

Parámetros	Rangos		
μ	0,05-0,4		
ξ [m ² /s]	Flujos granulares	100–200	
	Flujos de barro	200–1000	
C [Pa]	Flujos de detritos	0–2000	
	Avalanchas	Húmeda	0–100
		Secas	100–300

Según WSL (2013) una vez finalizada la simulación, los datos de salida principales que se obtienen son:

1. Volumen de depositado (m³) en algún momento del flujo
2. El área superficial del flujo (m²) en algún momento
3. Altura del depósito (m), velocidad (m/s), presión de impacto (kPa) y tasa de arrastre (kg/m²), incluyendo sus valores máximos alcanzados
4. Perfiles longitudinales y secciones transversales del flujo
5. Animaciones del flujo completo en formato GIF

3 Metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos mediante análisis jerárquico de procesos (AHP)

3.1 Introducción

Existen diversos estudios que tienen como objetivo evaluar la susceptibilidad de remociones en masa. Algunos autores implementan metodologías cualitativas que se basan principalmente en patrones geomorfológicos y geológicos de cada área de estudio. En zonas que poseen un amplio registro de ocurrencia de remociones en masa, usualmente se utilizan metodologías cuantitativas que consisten principalmente en un análisis estadístico. Sin embargo, en la mayoría de los estudios publicados en los últimos años se emplean técnicas mixtas. En ellas destaca la superposición de mapas mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG), la evaluación de unidades geológicas o unidades geomorfológicas con un ranking o un índice de susceptibilidad. En el Anexo III, se muestra un resumen con estudios orientados a evaluar la susceptibilidad de remociones en masa.

Para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos, en este trabajo se propone una metodología mixta cuantitativa/cualitativa diseñada a partir de la ponderación de factores condicionantes. La cual incluye la elaboración de una serie de mapas temáticos que corresponden a la representación cartográfica de cada factor. Los cuales se deben reclasificar a partir del cálculo de un índice de susceptibilidad normalizado (IS_n) para cada uno de sus atributos, que se obtiene mediante la aplicación de un análisis jerárquico de procesos (AHP), basado en la Escala de Saaty (2008) (ver Tabla 3.1). Luego, la ponderación de cada factor condicionante se determina mediante AHP y utilizando álgebra de mapas se superponen los mapas reclasificados, para producir un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos. Finalmente, se debe validar el mapa de susceptibilidad.

Esta metodología es aplicable a nivel de cuencas, en cualquier escala de trabajo y ambiente geológico. Además, permite la incorporación de cualquier variable o factor utilizado en otras metodologías (Anexo III), teniendo en cuenta que deben ser clasificados y representados cartográficamente, de modo que cubra toda el área de estudio. Esto último es necesario ya que, para evitar errores de cálculo durante el álgebra de mapas, los mapas reclasificados no deben tener errores topológicos al ser rasterizados.

Las etapas en que se divide este capítulo consisten en:

1. Descripción del área de estudio
2. Determinación de factores condicionantes
3. Elaboración de los mapas temáticos
4. Reclasificación de mapas temáticos mediante AHP
5. Elaboración de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos
6. Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos

Tabla 3.1. Escala de Saaty (2008) para la toma de decisiones. Modificado de Saaty (2008).

Intensidad de importancia sobre una escala absoluta	Definición	Explicación
1	De igual importancia	Dos actividades contribuyen de igual forma al objetivo
2	Leve importancia	-
3	Moderada importancia	La experiencia y el juicio favorecen levemente a una actividad sobre la otra
4	Moderada a fuerte importancia	-
5	Importancia esencial o fuerte	La experiencia y el juicio favorecen fuertemente una actividad sobre la otra
6	Fuerte a muy fuerte importancia	-
7	Muy fuerte importancia	Una actividad es mucho más favorecida que la otra; su predominancia se demostró en la práctica
8	Muy fuerte a extrema importancia	-
9	Extrema importancia	La evidencia que favorece una actividad sobre la otra es absoluta y totalmente clara
1,1-1,9	Entre 1 y 2, cuando la comparación de importancia es muy estrecha.	Una mejor manera de asignar estos pequeños decimales es comparar dos actividades con un tercero en común, usando la escala de valores del 1 al 9. De esta manera es posible obtener valores como 9/8 o 7/4, entre otros
Recíprocos	$a_{ij}=1/a_{ji}$	Si la actividad i tiene un número asignado cuando se comparó con la actividad j, luego j tiene el valor recíproco cuando se compara con i
Racionales	Razón derivada de la escala	Si la consistencia fuera forzada para obtener n valores numéricos que abarque la matriz

3.2 Descripción del área de estudio

La descripción del área de estudio es importante para la correcta aplicación de la metodología propuesta y debe estar enfocada en flujos de detritos, dado que es fundamental para determinar los factores condicionantes que la dominan.

Los temas que incluye esta etapa son:

1. Ubicación y vías de acceso
2. Antecedentes de flujos de detritos en la cuenca
3. Marco Geológico
4. Marco Geomorfológico
5. Clima y Vegetación (opcional)
6. Hidrometeorología

En caso de trabajar a una escala local, en los marcos geológico y geomorfológico, se debe incluir la geología y geomorfología local, respectivamente.

3.3 Determinación de factores condicionantes

En este trabajo, para elaborar el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos es necesario determinar los factores condicionantes de la cuenca en estudio. En la Tabla 3.2, se muestra un ejemplo de factores condicionantes que se podrían tener en cuenta en un análisis de susceptibilidad de remociones en masa, en base a la revisión de estudios (Anexo III).

Tabla 3.2. Ejemplo de factores condicionantes para un análisis de susceptibilidad de remociones en masa. Modificado de Lara (2007).

Factor	Condición de influencia o categorías
Geomorfología	Morfologías y sus procesos morfogenéticos asociados
Pendiente	Pendiente de laderas y pendiente de canales de drenaje
Geología	Características geológicas del área de estudio
Geotecnia	Características geotécnicas del material
Antecedentes	Aluviones declarados en las cuencas
Vegetación	Densidad de vegetación
Nieve	Acumulación de nieve
Orientación	Exposición al Sol
Antrópico	Desestabilización artificial de laderas y obstrucción de canal de drenaje
Morfometría	Hipsometría, pendiente, densidad de drenaje, entre otros
Elevación	Procesos desestabilizadores asociados con la altitud
Curvatura	Superficie cóncava, plana o convexa

Para efectos prácticos, se recomienda implementar entre 3 y 6 factores condicionantes, considerando como mínimo la pendiente, la geología y la geomorfología.

3.4 Elaboración de mapas temáticos

Una vez que se establecen todos los factores condicionantes a utilizar, se procede a elaborar los mapas temáticos asociado a cada uno de ellos. Como, por ejemplo, el mapa geológico, el mapa geomorfológico y el mapa de pendientes del área de estudio.

Los atributos de cada mapa temático dependen de su propia clasificación. Por ejemplo, la geología se puede clasificar en unidades geológicas y la geomorfología en morfologías o unidades geomorfológicas; mientras que la clasificación de los demás factores depende del autor y debe ser validada para cada zona de estudio. Por esta razón, cada justificación debe ser apoyada por datos expuestos por algún autor previamente, con datos levantados en terreno y/o fotointerpretación de imágenes.

En particular, para la generación de un mapa de pendientes a partir de un DEM, se debe considerar una relación entre la resolución espacial y la escala de trabajo. El estudio de Sepúlveda & Patiño (2016), muestra la relación existente entre la escala de trabajo y las dimensiones del pixel basado en el área mínima de una Unidad de Cálculo de Terreno (UTC), para realizar operaciones en SIG a escala adecuada. Esta relación es de la forma: tamaño pixel= $X/1000$, donde X, representa la escala de trabajo. Mientras que para mapeo geológico de exploración se considera: tamaño pixel= $X/4000$ a $X/3000$ (comunicación verbal en curso GL6006-1 Teledetección: Fundamentos y Aplicaciones en Geología, semestre Otoño 2017, FCFM, Universidad de Chile).

Finalmente, tras consultar con expertos en cartografía del Departamento de Geología Aplicada del SERNAGEOMIN, se confecciona la Tabla 3.3 que relaciona de manera referencial la resolución espacial y la escala de trabajo.

Tabla 3.3. Relación referencial entre escala de trabajo y resolución espacial en metros.
Modificado de Sepúlveda & Patiño (2016).

Nivel de escala	Escala de trabajo	Resolución espacial [m]
-	1:X	$X/2.000$
Nacional	1:500.000 a 1:1.000.000	>100
Regional	1:100.000 a 1:500.000	50 a 100
Media	1:25.000 a 1:100.000	12,5 a 50
Local	1:10.000 a 1:25.000	5 a 12,5
Detalle	1:5.000 a 1:10.000	<5

3.5 Reclasificación de mapas temáticos mediante AHP

Es necesario reclasificar cada mapa temático para determinar cuánto influye cada atributo en la susceptibilidad. Esto se logra al calcular un índice de susceptibilidad normalizado (IS_n) para cada uno de sus atributos mediante la aplicación de AHP (ver Tabla 3.1).

Para entender cómo realizar la comparación a pares, se puede utilizar como ejemplo la Tabla 3.4. En ella se muestra que el evaluador le asigna al atributo A una importancia esencial o fuerte sobre el atributo B, lo que se traduce en base a la Tabla 3.1, en un valor igual a 5. De esta forma se prosigue a llenar la tabla realizando las comparaciones pertinentes. Luego, se debe calcular un IS_n asociado a cada atributo y así, estandarizar sus pesos o significancias cuando sean multiplicados

por la ponderación de cada factor condicionante. El valor de IS_n se calcula dividiendo el peso de cada atributo en el de mayor importancia o valor.

Tabla 3.4. Ejemplo de matriz de comparación a pares con su error de consistencia asociado e IS_n dentro de cada factor condicionante. Elaboración propia.

Comparación a pares			
Atributo	A	B	C
A	1	5	3
B	1/5	1	1
C	1/3	1	1
Error de consistencia	3%		
Peso	65%	16%	19%
IS _n	100%	24%	28%

Es importante que antes de realizar cada comparación a pares se tenga un buen conocimiento de la influencia que posee cada atributo de cada mapa temático, en la generación de flujos de detritos en el área de estudio, para obtener resultados consistentes. En caso de contar con un error de consistencia superior a 5%, este proceso debe realizar nuevamente.

Tras la comparación a pares, cada atributo de cada factor condicionante tendrá asignado un IS_n, con el cual se reclasifica cada mapa temático, obteniendo mapas reclasificados.

3.6 Elaboración de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos

Una vez que se elaboran los mapas reclasificados, es necesario determinar la ponderación de cada factor condicionante para obtener mediante la superposición de mapas un valor de índice de susceptibilidad total (IS) en cada pixel. En esta etapa, las comparaciones a pares se realizan de la misma forma como se comparan los atributos, teniendo en cuenta que esta vez no se calcula un IS_n y, en lugar de atributos, se comparan mapas (factores).

Para realizar comparaciones a pares de manera justificada, se deben considerar “constantes” los factores condicionantes que no se están comparando y conocer bien la distribución de los IS_n asociado a cada uno de éstos, por lo que tener un buen entendimiento de cada mapa temático y los procesos asociados a cada atributo es fundamental.

Para efectos prácticos, si la ponderación de un factor condicionante es <5%, se recomienda no considerarlo en la aplicación de la metodología propuesta.

Tras determinar las ponderaciones de cada factor condicionante, es posible obtener el mapa que representa la susceptibilidad de flujos de detritos, a partir de la superposición ponderada de cada mapa reclasificado. Para esto, utilizando un SIG (por ejemplo, *ArcGIS v. 10.1*) se debe transformar cada mapa reclasificado a formato *raster* y luego, mediante herramientas que permitan

el álgebra de mapas (por ejemplo, *Raster Calculator* de la extensión *Spatial Analyst*, en *ArcGIS v. 10.1*), se debe aplicar la ecuación $IS = \sum_i a_i \times f_i$, donde i es el factor condicionante, a_i la ponderación asociada al factor i y, f_i el mapa reclasificado del factor i .

La herramienta de álgebra de mapas entrega un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos continuo (sin reclasificar), cuyos valores mostrados corresponden al IS calculado para cada pixel. En la Figura 3.1, se muestra un resumen de lo anteriormente planteado.

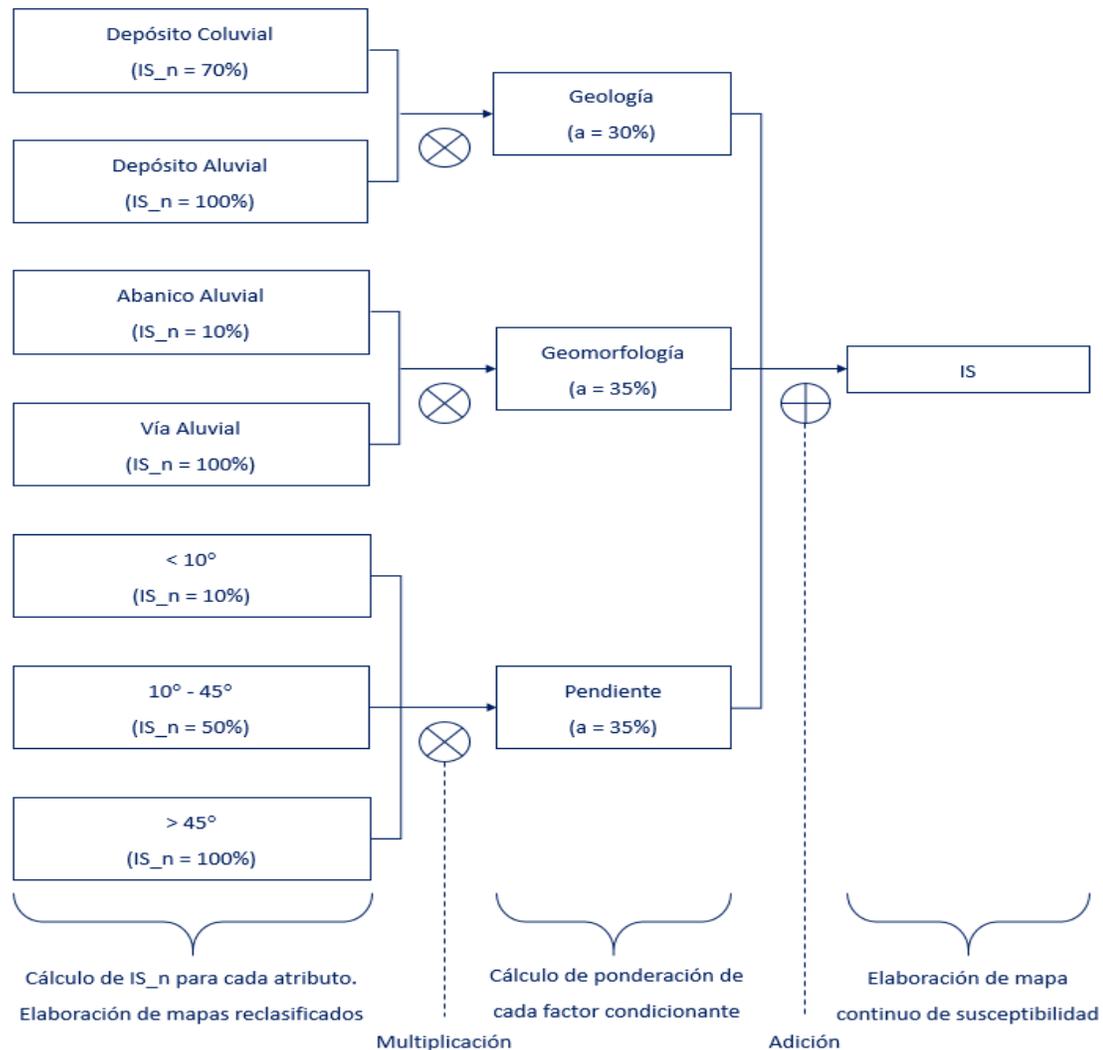


Figura 3.1 Esquema de ejemplo de aplicación de AHP para la elaboración de mapa continuo de susceptibilidad. Elaboración propia.

Luego, se propone reclasificar el mapa de susceptibilidad en máximo tres categorías: baja, media y alta; utilizando un método de clasificación de datos o en rangos que se ajusten mejor a los resultados esperados. Los cuales estarán condicionados por la experiencia del geólogo, el conocimiento del área estudiada y de las observaciones en terreno, imágenes aéreas y satelitales. Finalmente, este mapa reclasificado se vectoriza y se afinan sus polígonos, para filtrar, aproximar o eliminar los más pequeños.

3.7 Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos

Una forma de realizar la validación del mapa de susceptibilidad de flujos de detritos es a través de un catastro de puntos o zonas activadas durante eventos históricos. Para ello, se debe cruzar este catastro con el mapa final de susceptibilidad y analizar la distribución de éste en los distintos rangos de susceptibilidad: alta, media y baja.

En caso de tener un catastro de puntos, la distribución se analiza por densidad numérica, mientras que para uno de polígonos por densidad de área. En cualquiera de los dos tipos, para validar un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos se debe cumplir la siguiente distribución: $2 \times S_{\text{alta}} \geq 3 \times S_{\text{media}} \geq 12 \times S_{\text{baja}}$, donde S_{alta} , S_{media} y S_{baja} , representan al número de activaciones en zonas de alta, media y baja susceptibilidad, respectivamente. De esta forma, se obtienen los campos en los cuales un mapa es validado (ver Figura 3.2).

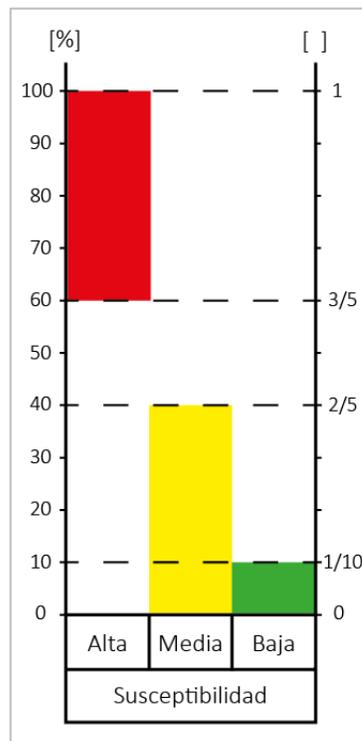


Figura 3.2. Campos de validación de un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos a partir de un catastro de activación. Elaboración propia.

De la Figura 3.2, se desprende que la distribución de densidad del catastro para zonas de baja, media y alta susceptibilidad de flujos de detritos, varían en los rangos 0-10%, 0-40% y 60-100%, respectivamente. Por ejemplo, en caso de tener un catastro con puntos de activación, donde el 65, 30 y 5% de los puntos, queden dentro de zonas de alta, media y baja susceptibilidad respectivamente, el mapa final es válido.

Cabe destacar que esta validación se basa en Guinau *et al.* (2007), en el cual se muestra gráficamente el porcentaje acumulado de corte, que equivale al catastro, versus el índice de susceptibilidad de corte del terreno (TFSI), que es equivalente al mapa de susceptibilidad.

En caso de no contar con un catastro, una forma de validar cualitativamente el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos es mediante la revisión de pares, es decir, profesionales con experiencia en la materia y el área de estudio. Teniendo en consideración que las zonas con $IS_n=100\%$ de cada factor condicionante correspondan a zonas de alta o media susceptibilidad.

Finalmente, se sugiere realizar estudios de amenaza de flujos de detritos en aquellas cuencas que presenten zonas de alta y/o media susceptibilidad de este tipo de remoción en masa. Mientras que, si una cuenca muestra solamente susceptibilidad baja, se recomienda sólo zonificar un grado de amenaza bajo, delimitado por su abanico y vías aluviales.

3.8 Resumen esquemático de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos

En la Figura 3.3, se muestra el flujograma que resume la metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos. Notar que la flecha negra indica el inicio del proceso.

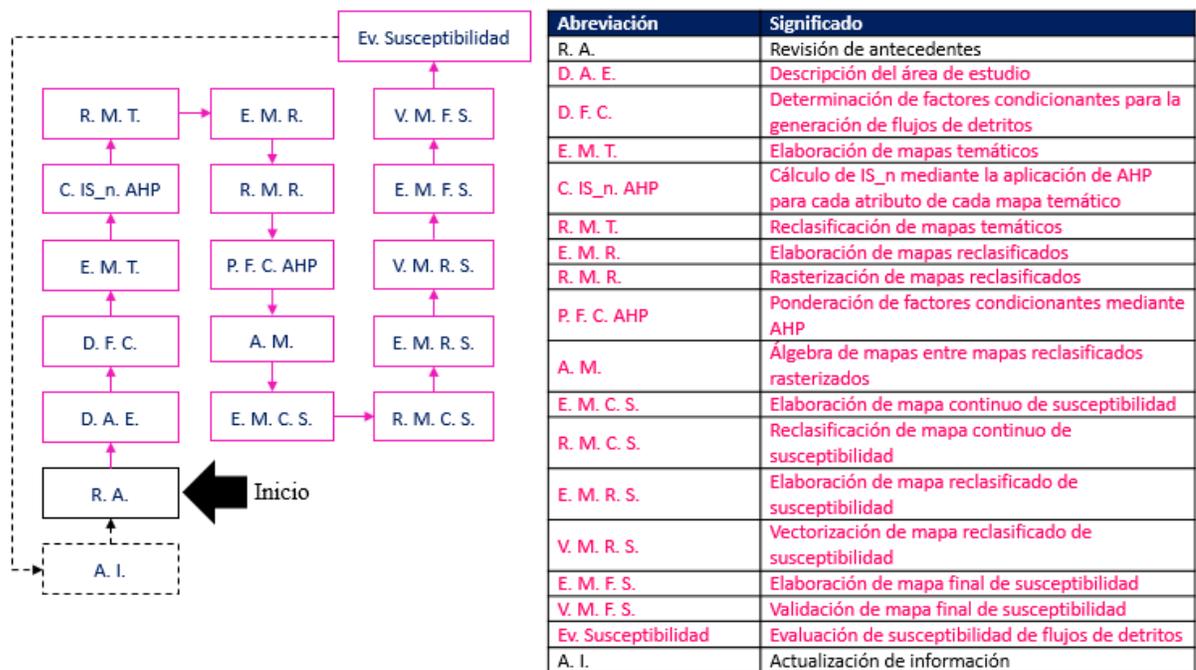


Figura 3.3. Flujograma de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos. Elaboración propia.

4 Metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos

4.1 Introducción

En este capítulo se plantea una metodología determinística para evaluar la amenaza de flujos de detritos, en la cual se establecen diferentes escenarios para elaborar un mapa que se zonifica en grados de amenaza.

Para zonificar en grados de amenaza se consideran morfologías (abanico y vías aluviales) y áreas de alcance de flujos (conocidos y posibles), en base a la clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005), agregando como hipótesis que, a mayor volumen de flujo, menor probabilidad de ocurrencia y, por tanto, menor grado de amenaza. Los posibles flujos se simulan con el programa *RAMMS-debris flow v.1.6* y sus áreas de generación se definen en base a una evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos. Los parámetros de resistencia de las simulaciones se obtienen a partir del retroanálisis de un evento conocido, cuyos datos de entrada se calculan mediante la metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos mediante trabajo en terreno y de gabinete (MPF), propuesta en este estudio.

En esta metodología, para las simulaciones de posibles flujos es fundamental realizar una evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos, dado que da cuenta de las zonas de donde estos se liberarán (generarán).

Los parámetros de resistencia de las simulaciones se pueden obtener de dos maneras: i) aplicando la metodología desarrollada en este estudio que permite estimar parámetros físicos de un flujo de detritos con trabajo en terreno y gabinete (MPF) y realizando el retroanálisis de un evento conocido; o ii) utilizando los valores de flujos ocurridos en otras zonas, que se encuentren dentro del mismo contexto geológico, geomorfológico, climático e hidrometeorológico.

Las etapas en que se divide este capítulo consisten en:

1. Revisión y corrección del Modelo de Elevación Digital (DEM)
2. Metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos (MPF)
3. Calibración de parámetros de resistencia
4. Elaboración de mapa de amenaza de flujos de detritos

4.2 Revisión y corrección del Modelo de Elevación Digital (DEM)

El *software RAMMS* es sensible a la calidad del DEM a utilizar para las simulaciones, es decir, a su resolución espacial y a su representatividad del área en estudio. Por esta razón, antes de realizar cualquier simulación, se debe verificar que el DEM tenga una calidad aceptable.

La resolución espacial del DEM depende de la escala de trabajo. Para tener una referencia de la relación entre ambos, se sugiere considerar la Tabla 3.3 y se recomienda que el tamaño de la celda sea ≤ 10 m.

Para verificar que el DEM sea representativo del área de estudio, en primer lugar, se debe comparar con la imagen satelital o área que se utiliza como base de mapeo. En segundo lugar, en caso de no calzar bien con el mapa base, éste debe ser georreferenciado hasta que calcen ambas capas. En tercer lugar, se deben corregir los errores por sumideros del DEM mediante herramientas de relleno y generar la red de drenaje. Luego, si la hidrografía generada no se ajusta con el curso del mapa base, se debe hacer una corrección.

Para la corrección del DEM, se sugiere tomar datos topográficos en el área de estudio, mediante LiDAR, GPS (Global Position System) diferencial, GNSS (Global Navigation Satellite System) diferencial, entre otros. Para reducir el tiempo utilizado en esta actividad, se recomienda definir un área de interés que abarque la zona desde donde se localizará el hidrograma o área de liberación para el retroanálisis hasta la zona de descarga de la cuenca en estudio. Especialmente para los cauces, se sugiere tomar puntos para hacer perfiles con, al menos, tres puntos; y así, lograr mayor detalle de su geometría. Finalmente, a partir de estos puntos se puede generar un DEM de mejor calidad.

En la Figura 4.1, se muestra un resumen para corregir un DEM mediante la toma de puntos de elevación con un GNSS o GPS diferencial. Para efectos de simplificación de lenguaje, en este trabajo la expresión GPS diferencial, se refiere tanto a GPS como a GNSS.

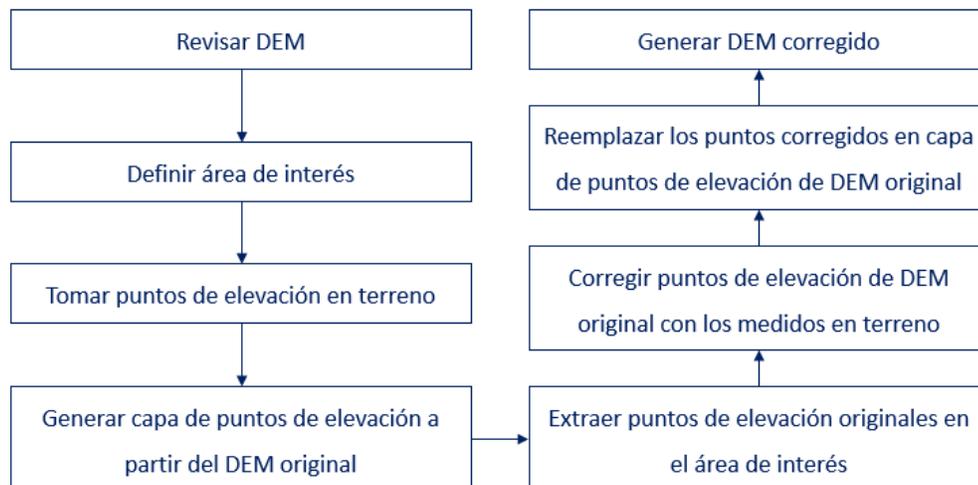


Figura 4.1. Resumen de corrección de DEM a partir de mediciones en terreno con GPS diferencial. Elaboración propia.

4.3 Metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos (MPF)

4.3.1 Introducción

Los datos de entrada que utiliza el programa *RAMMS-debris flow* (ver Tabla 2.9) se podrían obtener directamente de antecedentes y bibliografía. Sin embargo, es posible que no se disponga de esta información. Por esta razón, en este subcapítulo se elabora una metodología para estimar

parámetros físicos de un flujo de detritos (MPF), que se basa en observaciones y mediciones en terreno, análisis de imágenes (satelitales y fotografías aéreas) y aplicación de ecuaciones empíricas que permite su estimación. Por lo anterior, esta etapa se puede omitir en la aplicación de la metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos, propuesta en este trabajo.

Además, se requiere que las observaciones se realicen para un evento específico, el cual se utiliza para calibrar los parámetros de resistencia (μ , ξ y C) (ver Tabla 2.8).

Rickenmann (1999) sugiere que a partir de relaciones empíricas entre volumen y descarga máxima de un flujo de detritos, se puede estimar la descarga máxima, seguida por la velocidad media, el área transversal y la trayectoria total de flujo (ver Figura 4.2).

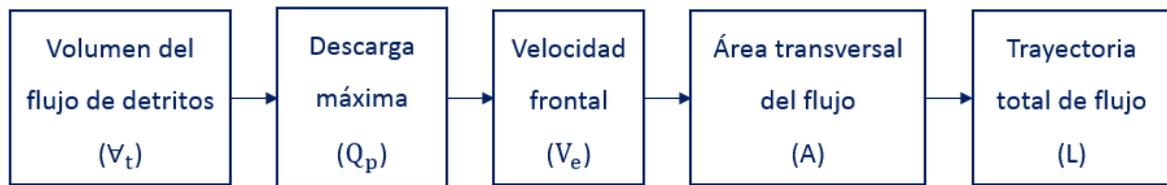


Figura 4.2. Flujograma para estimar parámetros de flujo a partir de fórmulas empíricas. Modificado de Rickenmann (1999).

Para retroanalizar un evento conocido, en este trabajo se propone invertir el flujograma de la Figura 4.2. Para ello, es necesario contar con la siguiente información de dicho evento:

- ✓ DEM corregido
- ✓ Trayectoria de un flujo de detritos
- ✓ Puntos de control
- ✓ Volumen de un flujo de detritos
- ✓ Densidad de un flujo de detritos
- ✓ Hidrograma y área de liberación de flujo de detritos

Cabe destacar que MPF debe ser apoyada por evidencias que permitan distinguir entre tipos de flujos (ver Tabla 2.3), como se muestra en el capítulo 2, específicamente en el apartado 2.2.4 *Cómo distinguir entre tipos de flujos a partir de evidencias de campo en pequeñas cuencas hidrográficas.*

4.3.2 Trayectoria de un flujo de detritos

La trayectoria del flujo de detritos que se desea calibrar es el parámetro que define el área de alcance del evento. Se obtiene a través de observaciones de campo, imágenes (aéreas o satelitales), realizando un seguimiento del paso del flujo corriente arriba, desde el abanico hasta su área de generación, como se muestra en la Figura 4.3.



Figura 4.3. Mapeo de la trayectoria de un flujo de detritos. Modificada de Nhuchhen (2017).

4.3.3 Puntos de control

Una vez identificada la trayectoria del flujo de detritos que se desea reproducir, se deben identificar puntos de control para su calibración. Estos deben realizarse en secciones donde se puedan medir datos de altura de flujo y otras en las cuales se pueda aplicar la Ecuación modificada de Pierson (1982) o la Ecuación de Selby (1993), para obtener la velocidad de un flujo de detritos. Ambas ecuaciones se muestran en la Tabla 2.4.

La Ecuación de Pierson (1982) asume que las pérdidas por fricción son despreciables y es aplicable en superficies orientadas perpendicularmente a la trayectoria del flujo. Además, toma en cuenta el ascenso máximo de un flujo de detritos por superelevación. En cambio, en este trabajo se considera como la velocidad que alcanza una partícula que viaja sobre su superficie.

La Ecuación de Selby (1993) es aplicable en curvas donde la superficie de un flujo alcanza una altura superior en el lado externo de la curva que, en el interno, es decir, que presenten depósitos laterales (*levées*) o marcas de olas de flujo (ver Figura 4.4).

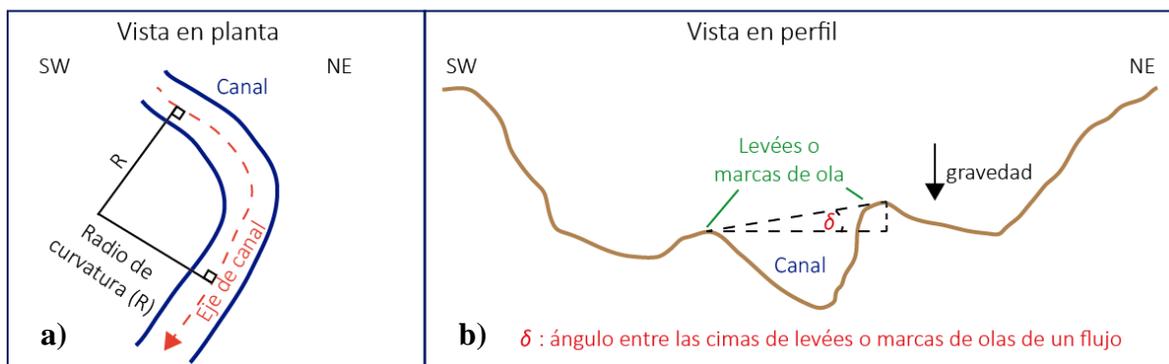


Figura 4.4. Ejemplo de punto de control para la aplicación de la Ecuación de Selby (1993), a) vista en planta y b) vista en sección transversal del canal. Elaboración propia.

El radio de curvatura se recomienda medirlo en fotografías aéreas o imágenes satelitales. Además, las medidas se deben tomar preferiblemente en partes donde el canal sea rocoso para evitar errores debidos a la erosión y acumulación en el canal, después de la ocurrencia del flujo de detritos (Bovis & Jakob, 1999).

Finalmente, las alturas y velocidades medidas en estos puntos de control, serán los datos que permitan validar el modelo calibrado.

4.3.4 Volumen de un flujo de detritos

Una vez calculada la velocidad en cada punto de control (V_c), es necesario medir para cada uno de ellos el área transversal de su trayectoria de flujo ($A_{m\acute{a}x}$), con el objetivo de calcular la descarga o caudal máximo (Q_p), de la forma $Q_p = A_{m\acute{a}x} \times V_c$.

Algunos autores como Mizuyama *et al.* (1992), Jitousono *et al.* (1996), Bovis & Jakob (1999) y Rickenmann (1999), han desarrollado ecuaciones empíricas que relacionan Q_p con el volumen de un flujo de detritos (V_t), es decir, el volumen de la mezcla de sólidos y agua. En la Tabla 4.1, se muestran las relaciones empíricas propuestas por los autores anteriores, considerando el tipo de flujo de detritos para cual aplican. De esta tabla se desprende que las relaciones son de la forma $Q_p \propto V_t^D$, con D =constante.

Tabla 4.1. Fórmulas empíricas que relacionan la descarga máxima (Q_p) y el volumen total de flujo detritos (V_t). Modificado de Jakob (2005).

Fórmula	Tipo de flujo	Lugar	R ²	N	Autor
$Q_p = 0,135 \times V_t^{0,78}$	Flujo de detritos granular	Japón y China	0,78	~50	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
$Q_p = 0,019 \times V_t^{0,79}$	Flujo de detritos lodoso	Japón y China	0,74	~100	Mizuyama <i>et al.</i> (1992)
$Q_p = 0,00558 \times V_t^{0,831}$	Flujo de detritos volcánico	Volcán Merapi Indonesia	0,95	~200	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
$Q_p = 0,00135 \times V_t^{0,87}$	Flujo de detritos volcánico	Volcán Sakurajima Japón	0,81	~100	Jitousono <i>et al.</i> (1996)
$Q_p = 0,04 \times V_t^{0,90}$	Flujo de detritos granular	British Columbia Canadá	0,72	~33	Bovis & Jakob (1999)

Continuación de Tabla 4.1.

Fórmula	Tipo de flujo	Lugar	R ²	N	Autor
$Q_p = 0,003 \times V_t^{1,01}$	Flujo de detritos volcánico	British Columbia Canadá	N/A	N/A	Bovis & Jakob (1999)
$Q_p = 0,1 \times V_t^{0,83}$	Flujo de detritos granular	Suiza, Canadá, Japón, China, EE. UU., otros	N/A	145	Rickenmann (1999)

Si los Q_p calculados en cada punto de control fueran relativamente similares, se puede encontrar el volumen del flujo. En cambio, si existen importantes variaciones de Q_p , se recomienda realizar las simulaciones considerando cada uno de ellos y/o decidir en base a criterios físicos y/o geológicos. Dentro de estos criterios se sugiere descartar simulaciones cuyos volúmenes no son realistas (e.g. $V_t < V_s$); o que pese a usar parámetros de resistencia muy favorables para el avance del flujo (e.g. $\mu=0,01$), éste no alcance su abanico; o en caso de obtener C_v que no sean coherentes con observaciones en terreno, entre otros.

Para determinar qué relación empírica utilizar, se debe considerar primero la granulometría y origen/fuente de flujo (e.g. volcánico). Si tras lo anterior, no hay evidencias suficientes para elegir una ecuación sobre otra, se recomienda simular con dos o más de ellas y determinar el peor y mejor escenario.

4.3.5 Densidad de un flujo de detritos

Con el volumen total (V_t) calculado anteriormente y midiendo el volumen del material depositado ($V_s = A_d \times H_d$; con mediciones en terreno, imágenes aéreas y/o satelitales), se puede estimar la C_v de la forma $C_v = V_s / V_t$.

Por otro lado, mediante el análisis granulométrico y de litologías del material depositado, se puede calcular la densidad de sólidos en el flujo (ρ_s). Una vez conocidos ρ_s , C_v y considerando la densidad del agua, $\rho_w = 1.000 \text{ kg/m}^3$, la densidad de la mezcla (ρ_t) se obtiene mediante la Ecuación de Solís (1995) (ver Tabla 2.4).

4.3.6 Hidrograma y área de liberación

Para calibrar el evento conocido se requiere determinar la forma en la cual se libera el flujo, es decir, desde dónde y de qué forma se inicia la simulación. Para ello, se puede optar por dos opciones: hidrograma o área de liberación (ver Tabla 2.7).

Si no se dispone de la información suficiente para construir un hidrograma, en este trabajo se propone utilizar un Hidrograma de Tres Puntos (ver Figura 4.5). Para ello, se define el volumen

total (V_t) correspondiente a la máxima descarga (Q_p), el tiempo de descarga máxima (t_p), el tiempo total de descarga a (t) y la velocidad (V_c). A excepción del tiempo, todos estos datos pueden obtenerse de las etapas anteriores de esta metodología. El tiempo t_p puede ser estimado como pocos segundos después del inicio de la descarga, mientras que el tiempo t , matemáticamente se puede estimar como $t = 2 \times V_t/Q_p$. Para ingresar la localización del hidrograma se debe trazar un polígono transversal de donde se estimó la descarga, el tiempo y la velocidad.

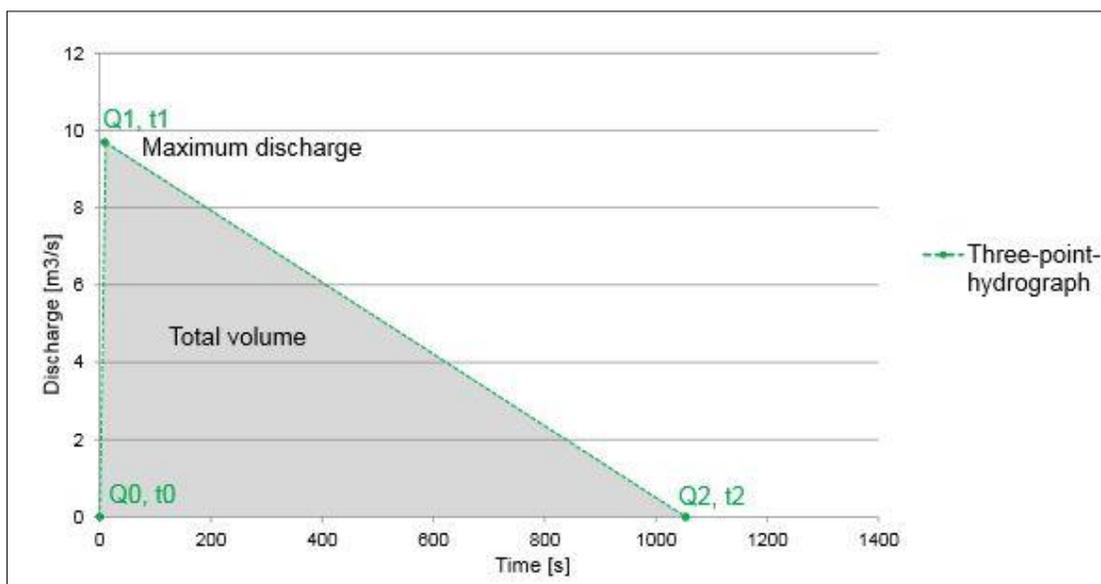


Figura 4.5. Ejemplo de Hidrograma de Tres Puntos. Tomado de WLS (2013).

Por otra parte, el área de liberación (A_g) para la calibración de un evento, corresponde al área de generación del evento que se desea calibrar y ésta, se puede obtener a través de observaciones de campo, imágenes aéreas y/o satelitales. Se debe observar el material depositado y compararlo con su posible fuente y, hacer un seguimiento aguas arriba. A esta área se le debe asignar una altura de liberación (d_0) que reproduzca un volumen equivalente a V_t , tal que cumpla: $V_t = A_g \times d_0$.

Simulaciones con grandes volúmenes de liberación usualmente tienen alturas máximas mayores en comparación con aquellas que usan hidrogramas. Esto se explica porque en una simulación con liberación en bloque, su altura inicial se ajusta según el volumen de flujo especificado por el usuario. Este bloque se comienza a mover tan pronto como la simulación comienza, por lo que, pueden ocurrir alturas iniciales extremadamente altas y poco realistas (WLS, 2013). Para evitar este tipo de inconvenientes, se sugiere ajustar la extensión del área de liberación de tal forma de tener d_0 más realistas que reflejen resultados más razonables.

4.3.7 Resumen esquemático de MPF

En la Figura 4.6, se muestra el flujograma que resume la metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos con trabajo en terreno y gabinete (MPF). En esta figura se incluye una tabla con el significado de cada abreviación utilizada en el flujograma. Además, para la implementación de esta metodología se debe seguir el orden de la tabla. Finalmente, se destaca que las líneas segmentadas indican insumos o acciones que podrían ser necesarias. Por ejemplo, se puede usar área de liberación para complementar la información de un hidrograma

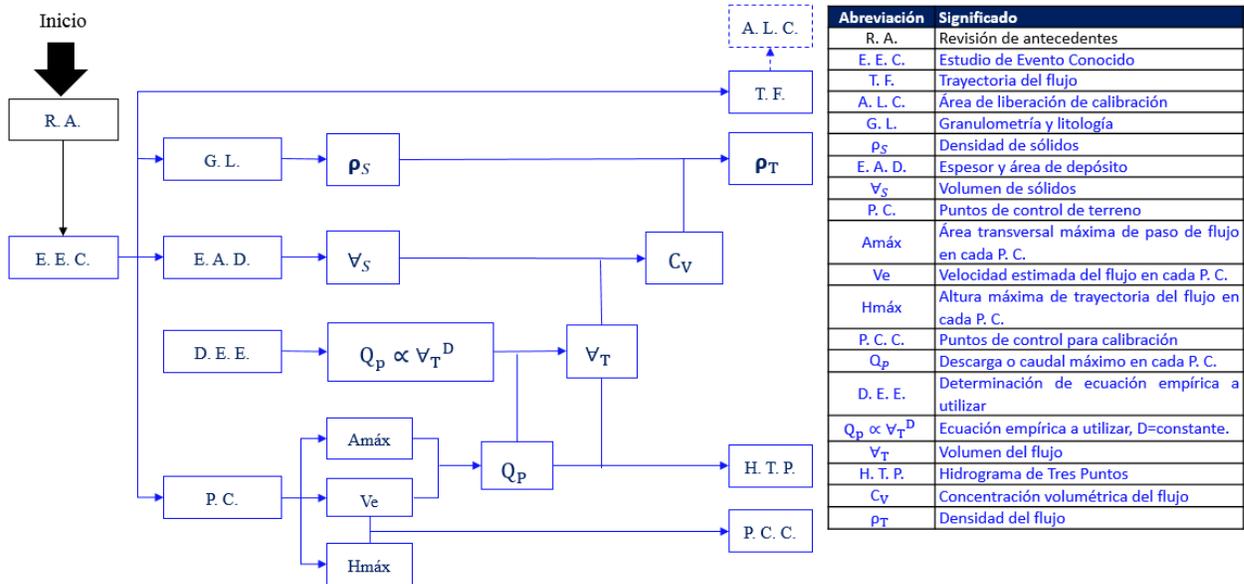


Figura 4.6. Flujograma de metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos con trabajo en terreno y gabinete (MPF). Elaboración propia.

4.4 Calibración de parámetros de resistencia

Como se ha mencionado anteriormente, los parámetros de resistencia que se utilizan como datos de entrada en el programa *RAMMS-debris flow v.1.6*, corresponden al coeficiente de fricción μ , el coeficiente de turbulencia ξ y la tensión de fluencia (*yield stress*) C . Estos se pueden considerar contantes para toda el área de simulación (dominio) o utilizar distintos valores para diferentes dominios, según estime conveniente el autor. Para determinar estos parámetros se debe simular al menos un evento conocido, del cual se conozcan sus datos de entrada para su calibración (ver Figura 4.7). Estos se pueden obtener a partir de la aplicación de la metodología expuesta en el subcapítulo anterior y/o de la revisión de antecedentes.

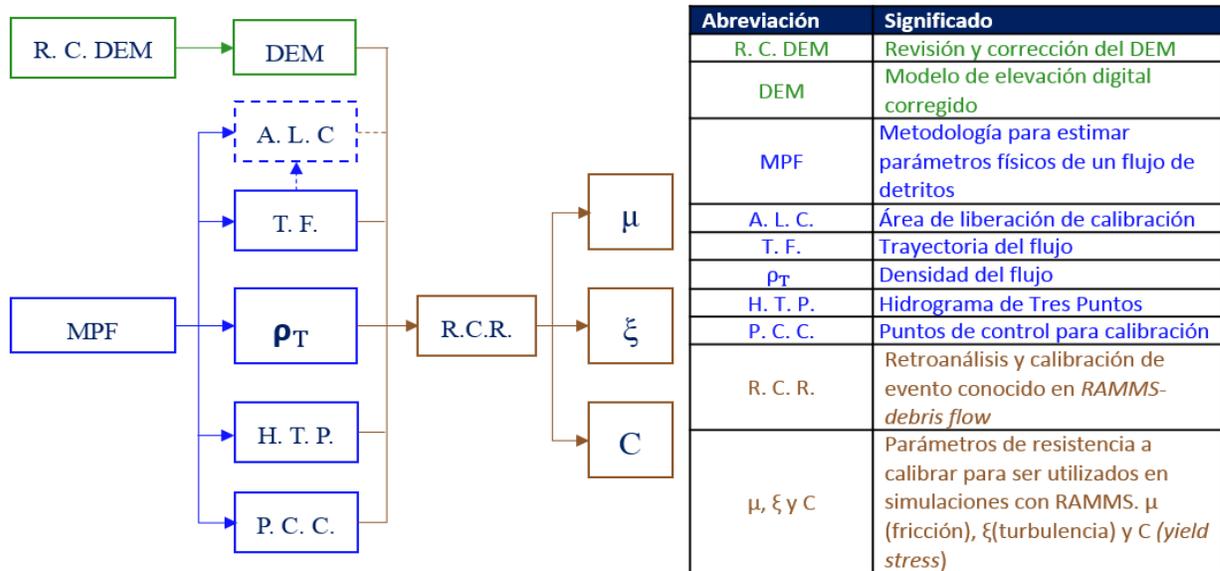


Figura 4.7. Datos necesarios para calibrar un evento conocido con el *software RAMMS-debris flow*. Elaboración propia.

Tras el análisis de sensibilidad, se debe constatar que los resultados se ajusten con los datos de cada evento conocido. La combinación de μ , ξ y C, que más se asemeje a dicho evento, corresponderá a los parámetros a utilizar en las simulaciones de los eventuales escenarios.

Sobre la base de los estudios de Hussin *et al.* (2012) y WLS (2013); se elabora una tabla con los parámetros necesarios para calibrar un evento conocido (ver Tabla 4.2).

Tabla 4.2. Parámetros utilizados para la calibración de un evento conocido en *RAMMS-debris flow*. Modificado de Hussin *et al.* (2012).

Parámetros de ajuste	Evento conocido (EC)	Modelo calibrado (MC)	Error
Velocidad de flujo en punto de control i	m/s	m/s	%
Altura de flujo en punto de control i	m	m	%
Área de alcance de flujo en el abanico	m ²	m ²	%
Alcance de trayectoria de flujo	m	m	%
Altura máxima de depósito en abanico de flujo	m	m	%

Se recomienda que el área de alcance en el abanico y el alcance de trayectoria de flujo del modelo calibrado sean visualmente semejantes al evento conocido. A su vez, la velocidad y las alturas de flujo se deben conocer para –al menos– dos puntos de control, considerando que mientras más puntos se tengan, mejor será la calibración. El error (\mathcal{E}) asociado a estos parámetros está dado por: $\mathcal{E}_{\%} = \frac{MC-EC}{EC} \times 100\%$, donde EC y MC corresponden al valor del evento conocido y modelo calibrado, respectivamente.

En este trabajo se propone que para validar la calibración el error promedio entre los parámetros sea $\leq 10\%$.

Por otra parte, como se señala en la Tabla 2.7, para comenzar con el análisis de sensibilidad de calibración se puede considerar $\mu = \tan(\beta)$, donde β es el ángulo de reposo de los depósitos del evento o la pendiente del canal. Dado que el valor de ξ se asocia a la turbulencia del flujo, se recomienda realizar simulaciones con $\xi > 200 \text{ m}^2/\text{s}$ para flujos turbulentos y $\xi < 200 \text{ m}^2/\text{s}$ para flujos laminares. Por su parte, la tensión de fluencia C , está sujeta a la concentración de finos en la matriz del flujo, es decir, mientras mayor sea la concentración de éstos, mayor será la tensión de fluencia y viceversa. Para efectos prácticos, se sugiere que para flujos con concentraciones de finos $< 10\%$, se considere $C = 0 \text{ Pa}$, porque en estos casos la dinámica de la mezcla está controlada por el contacto entre granos (fuerzas inerciales) y no por el fluido intersticial. Lo que implica que la tensión de fluencia (*yield stress*) tienda a cero.

Cabe destacar que en aquellas cuencas en que no existan las condiciones mínimas para poder realizar el retroanálisis de un evento conocido, pero que de todas maneras se necesite realizar una evaluación de amenaza de flujos de detritos, se pueden utilizar los parámetros de resistencia estimados en otras cuencas. El requisito que tienen que cumplir es que ambas estén dentro del mismo contexto geológico, geomorfológico, climático e hidrometeorológico. Un ejemplo donde no se cumple lo anterior, sería utilizar los parámetros estimados en un ambiente semiárido y aplicarlos en uno mediterráneo. Siempre que se usen los datos de otros lugares, se debe justificar bien su pertinencia en la aplicación.

4.5 Elaboración de un mapa de amenaza de flujos de detritos

En este estudio, se propone que la zonificación de amenaza de flujos de detritos se represente por grados, cuyos criterios están determinados por las morfologías (abanico y vías aluviales) y áreas de alcance de flujos (conocidos y posibles), en base a la clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005), agregando como hipótesis que, a mayor volumen de flujo, menor probabilidad de ocurrencia y, por tanto, menor grado de amenaza (ver Tabla 4.3), sin tomar en cuenta las características del factor detonante. Los posibles flujos se simulan con el programa *RAMMS-debris flow v.1.6* y sus áreas de generación se definen en base a una evaluación de susceptibilidad de flujos de detritos. Los parámetros de resistencia de las simulaciones se obtienen a partir del retroanálisis de un evento conocido, cuyos datos de entrada se calculan mediante la metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos mediante trabajo en terreno y de gabinete (MPF), propuesta en este estudio.

Tabla 4.3. Grados de amenaza y clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005).
Modificada de Jakob (2005).

Grado de amenaza	Clase	\forall_t [m ³]	Potenciales consecuencias
Mayor  Menor	I	$<10^2$	Daño muy localizado, podría matar trabajadores forestales en pequeñas quebradas y dañar construcciones pequeñas.
	II	10^2-10^3	Podría enterrar autos, destruir pequeñas construcciones de madera, romper árboles, bloquear alcantarillas y descarrilar trenes.
	III	10^3-10^4	Podría destruir edificios más grandes, dañar pilares de puentes de concreto, bloquear o dañar carreteras y tuberías.
	IV	10^4-10^5	Podría destruir partes de pueblos, destruir secciones de infraestructura, puentes y bloquear esteros.
	V	10^5-10^6	Podría destruir partes de las ciudades, destruir bosques de 2 km ² de área, bloquear esteros y pequeños ríos.
	VI	10^6-10^7	Podría destruir ciudades, obliterar valles o abanicos de hasta varias decenas de km ² de tamaño y represar ríos.
	VII	10^7-10^8	Podría destruir partes de ciudades, obliterar valles o abanicos de hasta varias decenas de km ² de tamaño y represar grandes ríos.
	VIII	10^8-10^9	Podría destruir ciudades, inundar grandes valles de hasta 100 km ² de tamaño y represar grandes ríos.
	IX	10^9-10^{10}	Destrucción extensa y completa sobre cientos de km ² .
	X	$>10^{10}$	

En base a esta clasificación, el volumen asociado a un grado de amenaza j (\forall_j), se puede escribir de la forma: $\forall_j = k_j \times 10^{C_j}$, donde $1 \leq k_j < 10$ y C_j corresponde a la Clase del evento que lo define. Esta relación, ayuda a definir los criterios de zonificación, principalmente para cuencas en que no tienen eventos históricos o que se desconoce su alcance.

Para definir las zonas de amenaza se utilizan los límites de: i) el abanico y las vías aluviales de la cuenca en estudio, ii) el área de alcance de eventos anteriores ocurridos en ella y iii) los resultados de simulaciones de flujos que se podrían generar, según la susceptibilidad y la disponibilidad de material removible en la cuenca.

Cabe destacar que, si una cuenca solamente posee zonas de baja susceptibilidad, se sugiere sólo zonificar un grado de amenaza bajo, delimitado por el abanico respectivo y vías aluviales.

En la Tabla 4.5, se muestra un ejemplo generalizado de criterios de zonificación de grados de amenaza, cuya representación gráfica se muestra en la Figura 4.8.

Tabla 4.4. Ejemplo generalizado de criterios de zonificación de grados de amenaza. Elaboración propia.

Grado de amenaza	Criterio de zonificación	Volumen de flujo [m ³]	Clase
Muy alto (MA)	Vías aluviales al interior de la cuenca en estudio, más el área de alcance de sus eventos históricos recurrentes (EHR). En caso de no disponer de EHR, zonificar con el área de un flujo simulado con <i>RAMMS-debris flow</i> , perteneciente a la Clase C _{MA} .	$k_{MA} \times 10^{C_{MA}}$	C _{MA}
Alto (A)	Área de alcance de los eventos históricos de recurrencia media (EHRM) de la cuenca en estudio. En caso de no disponer de EHRM, zonificar con el área de un flujo simulado con <i>RAMMS-debris flow</i> , perteneciente a la Clase C _A .	$k_A \times 10^{C_A}$	C _A
Medio (M)	Área de alcance de los eventos históricos poco recurrentes (EHPR) de la cuenca en estudio. En caso de no disponer de EHPR, zonificar con el área de un flujo simulado con <i>RAMMS-debris flow</i> , perteneciente a la Clase C _M .	$k_M \times 10^{C_M}$	C _M
Bajo (B)	Área del abanico de la cuenca en estudio.	–	–

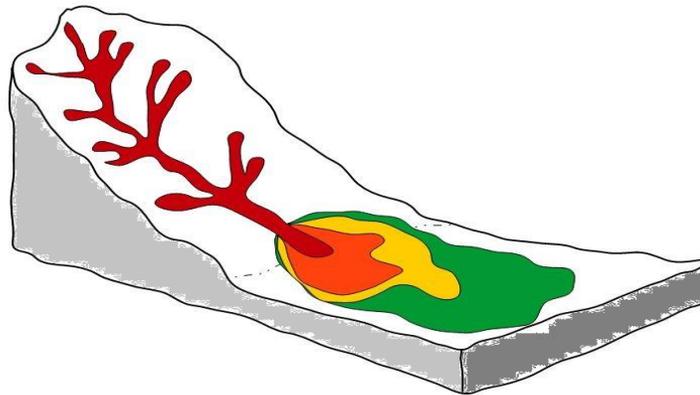


Figura 4.8. Ejemplo generalizado de zonificación de grados de amenaza. Grados de amenaza: Muy alto (rojo), Alto (naranja), Medio (amarillo) y Bajo (verde). Elaboración propia.

Si una cuenca registra dentro de una misma Clase eventos históricos recurrentes (EHR), es decir, aquellos con periodicidad <10 años (Lara, 2007), se recomienda considerarlos dentro del mayor grado de amenaza, junto con las vías aluviales. El siguiente grado de amenaza, lo conformarán aquellos flujos con recurrencia de 10–25 años, catalogados como de frecuencia media (EHRM). El grado que sigue al anterior, estaría representado por flujos con periodicidad >25 años, considerados poco recurrentes (EHPR). Finalmente, el menor grado de amenaza estará dado por el

área del abanico de la cuenca. Cabe destacar que los grupos de recurrencia están determinados por eventos pertenecientes a una misma Clase.

Para la zonificación de grados de amenaza en cuencas que se desconozca la recurrencia de sus eventos históricos, se deben realizar simulaciones computacionales de posibles flujos de detritos. Para ello, asumiendo las mismas características físicas (distribución granulométrica, concentración volumétrica y densidad de flujo) y parámetros de resistencia (μ , ξ y C) de un evento conocido en la cuenca, se simula el flujo de detritos esperado de mayor envergadura (evento máximo). En caso de no disponer de un evento conocido, se sugiere tomar en cuenta uno desarrollado en otra cuenca que se encuentre dentro del mismo contexto geológico, geomorfológico, climático e hidrometeorológico.

El evento máximo simulado se debe liberar desde zonas de alta o media susceptibilidad, donde exista el suficiente material removible para formarlo, generalmente cerca de las cabeceras de una cuenca. Como referencia para calcular lo anterior, Sepúlveda & Patiño (2016) utilizan valores de aporte entre 15 y 27%. Sin embargo, se recomienda calcular el volumen de flujo considerando a lo más el 10% del espesor promedio del material disponible y multiplicarlo por su área.

Por otra parte, para cuencas que no presenten eventos históricos, el área del abanico de la cuenca delimitará la zona de menor grado de amenaza, seguido por el área de alcance del evento máximo. Los siguientes grados deberán ser determinados por el evaluador especialista, teniendo en cuenta la información de eventos conocidos y que, a mayor grado, menor volumen (ver Tabla 4.4). Se sugiere que cada vez que se aumente un grado de amenaza, se disminuya -al menos- una Clase (ver Tabla 4.3).

Finalmente, tras la aplicación de todo lo anteriormente expuesto, se confecciona el mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca en estudio, utilizando SIG.

4.6 Resumen esquemático de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos

En la Figura 4.9 se presenta el flujograma que resume la metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos, propuesta en este estudio. Cabe destacar, que se debe seguir el orden de los números (N°) presentes en las tablas para la lectura y aplicación de esta metodología. En caso de utilizar los parámetros de resistencia de un flujo ocurrido en una cuenca diferente a la estudiada, se deben saltar los pasos del N°21 al N°40.

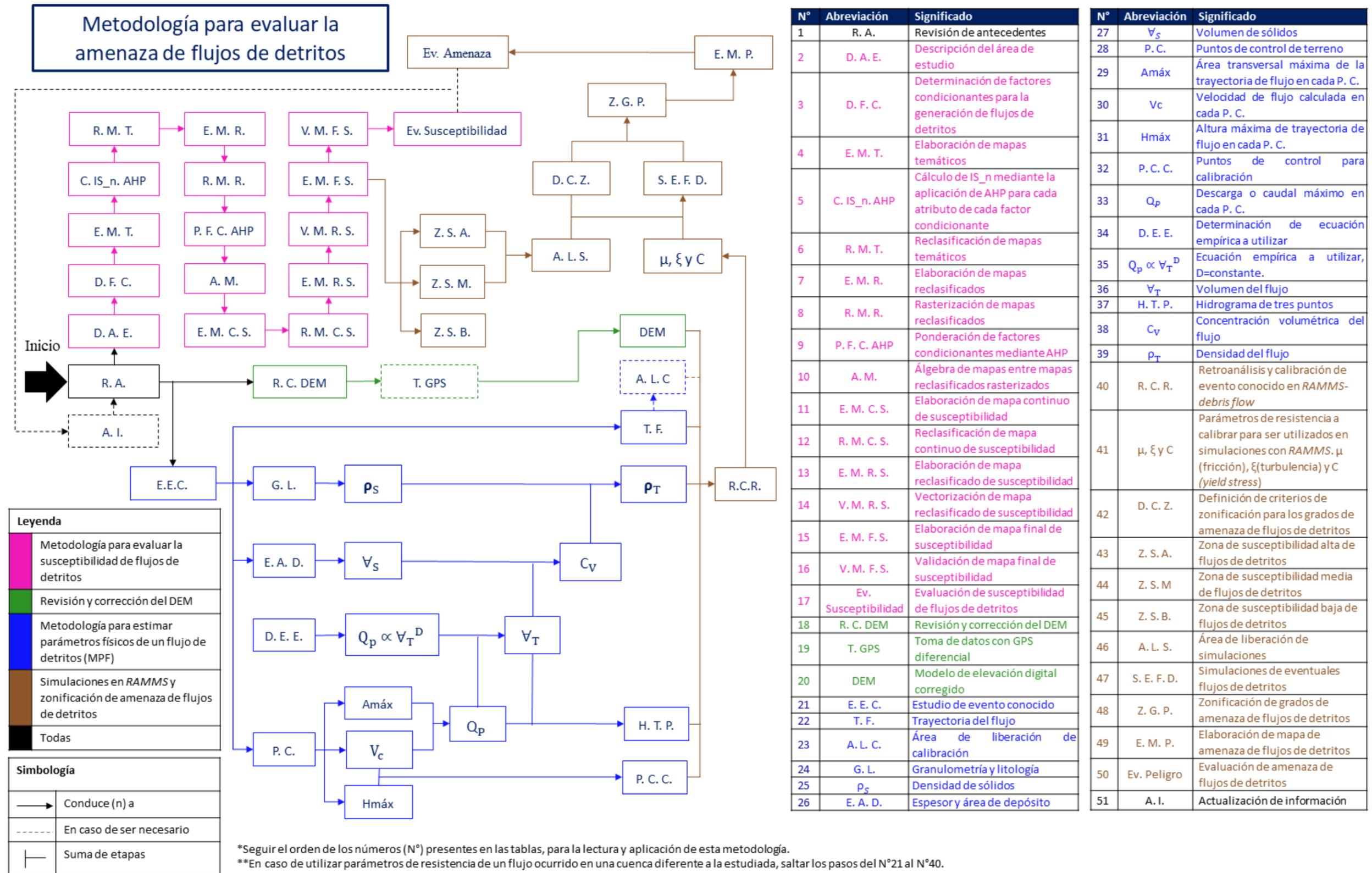


Figura 4.9. Flujograma de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos. Elaboración propia.

5 Susceptibilidad de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso

5.1 Descripción del área de estudio

5.1.1 Ubicación y vías de acceso

El área de estudio está inmersa en la Región Metropolitana de Santiago, Provincia Cordillera, Comuna San José de Maipo, en la cuenca del río Maipo. Específicamente corresponde a la cuenca del estero San Alfonso y su abanico. Esta cuenca tributa al río Maipo mediante su curso principal de drenaje, el estero San Alfonso. La cuenca en estudio tiene una dimensión de 21 km² aproximadamente, su altitud varía entre 1.100 a 3.500 m s.n.m. aproximadamente y su descarga ocurre en el kilómetro 48 de la ruta G-25, específicamente donde se ubica su puente homónimo. En la Figura 5.1, se muestra la ubicación de la cuenca y sus estaciones meteorológicas más cercanas: Río Maipo en San Alfonso, San Gabriel y Embalse el Yeso.

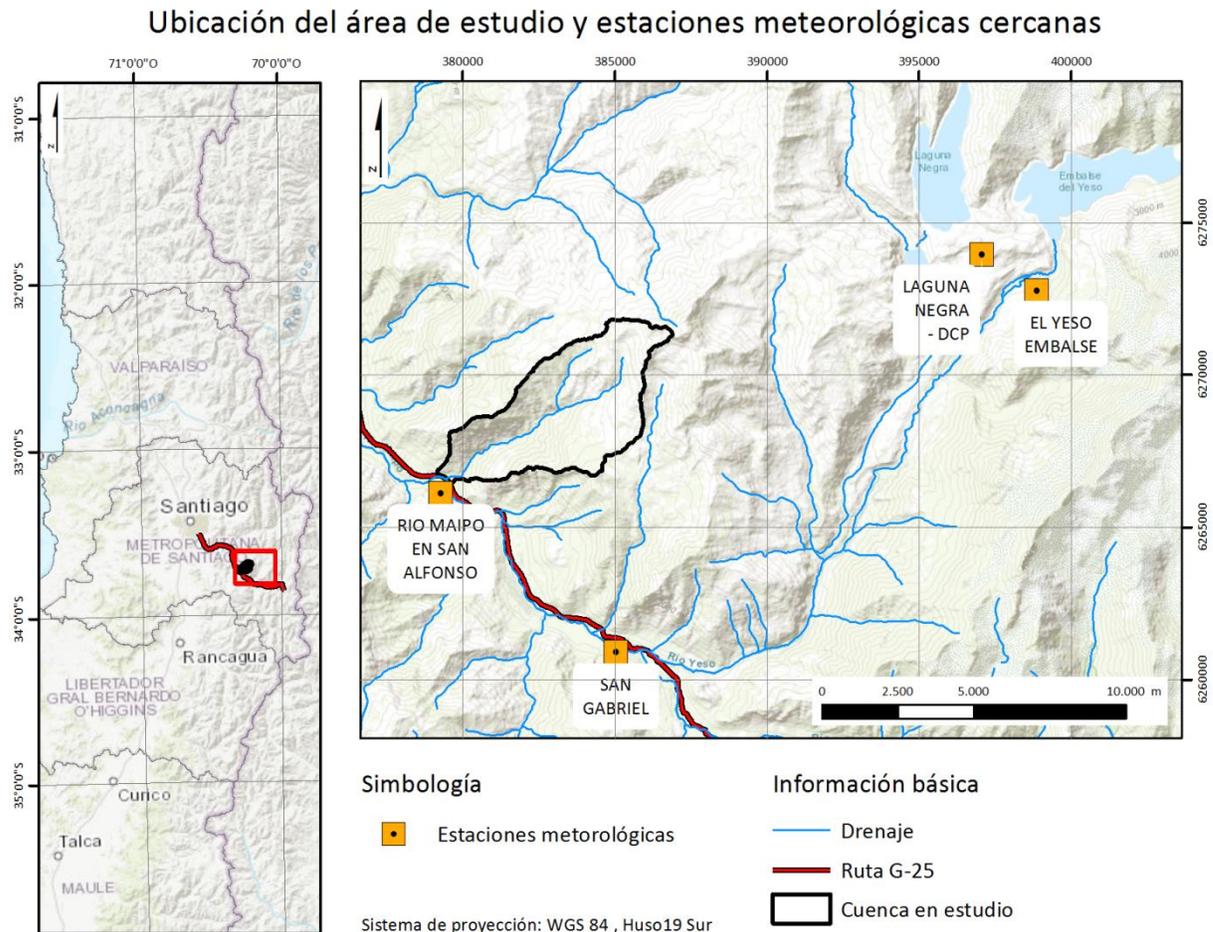


Figura 5.1. Ubicación del área de estudio con sus estaciones meteorológicas más cercanas. Elaboración propia.

5.1.2 Antecedentes de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso

5.1.2.1 Eventos históricos

Existen algunos estudios, testimonios verbales (Hauser, 1996; Muñoz, 2016) e información de prensa que dan a conocer importantes eventos históricos que han ocurrido en el área de estudio, siendo todos asociados a precipitaciones como factor detonante. En la Tabla 5.1, se muestra un resumen con los eventos declarados en la desembocadura de la cuenca. En este resumen, se pueden diferenciar dos tipos de tormentas que han generado activación de flujos en la cuenca: tormentas de invierno y tormentas de verano. Los datos de esta tabla refuerzan la hipótesis de que las precipitaciones que detonan la ocurrencia de flujos de detritos, registradas por las estaciones meteorológicas durante tormentas de verano, son de menor intensidad (diaria) de precipitaciones en comparación a las que ocurren en invierno. Esto se puede explicar por el alcance y/o distribución espacial que tienen las tormentas de verano. Estas al ser muy localizadas es posible que no fueran medidas correctamente por las estaciones meteorológicas (Muñoz, 2016).

En la Tabla 5.1, los datos para los eventos de febrero 1978 y 03 de mayo de 1993 fueron completados a partir de la base de datos disponible del sitio web del Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2, 2016) que fueron descargados en enero de 2016. Para el evento de mayo 1933 no se dispone de esta información. Además, la intensidad de precipitaciones presentada en la tabla, corresponde a la estación meteorológica cercana que presentó mayor intensidad en 24 horas (ver Figura 5.1).

Tabla 5.1. Eventos declarados en la desembocadura del estero San Alfonso. Modificado de Muñoz (2016).

Fecha	Intensidad de precipitaciones [mm/24 horas]	Estación meteorológica	Fuente
Mayo 1933	-	-	Hauser <i>et al.</i> (1996)
Febrero 1978	0,0	San Gabriel y Embalse El Yeso	Hauser <i>et al.</i> (1996)
03 de mayo 1993	58,7	Embalse El Yeso	Hauser <i>et al.</i> (1996)
11 de junio 1997	49,5	San Gabriel	Muñoz (2016)
14 de octubre 1997	11,0	San Gabriel	Muñoz (2016)
21 de enero 2013	11,0	Embalse El Yeso	Muñoz (2016)
25 de febrero 2017	20,5	Embalse El Yeso	Marín <i>et al.</i> (2017)
20 de abril 2017	36,0	Embalse El Yeso	DGA (2017)

De todos los eventos históricos aquí registrados, de los que se tiene más información y que han generado un importante impacto en la población, principalmente debido al corte del suministro de agua potable de Santiago y corte en la ruta G-25, corresponden a los eventos del 21 de enero de

2013 y 25 de febrero de 2017. Por lo anterior, se estudiarán con mayor detalle en los apartados siguientes.

Además, en la Figura 5.2, se muestra un catastro de activaciones recientes de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso, que fueron identificadas a partir de observaciones en terreno, imágenes satelitales y aéreas, mediante el sobrevuelo de SERNAGEOMIN, realizado el 02 de marzo de 2017 (Anexo V).

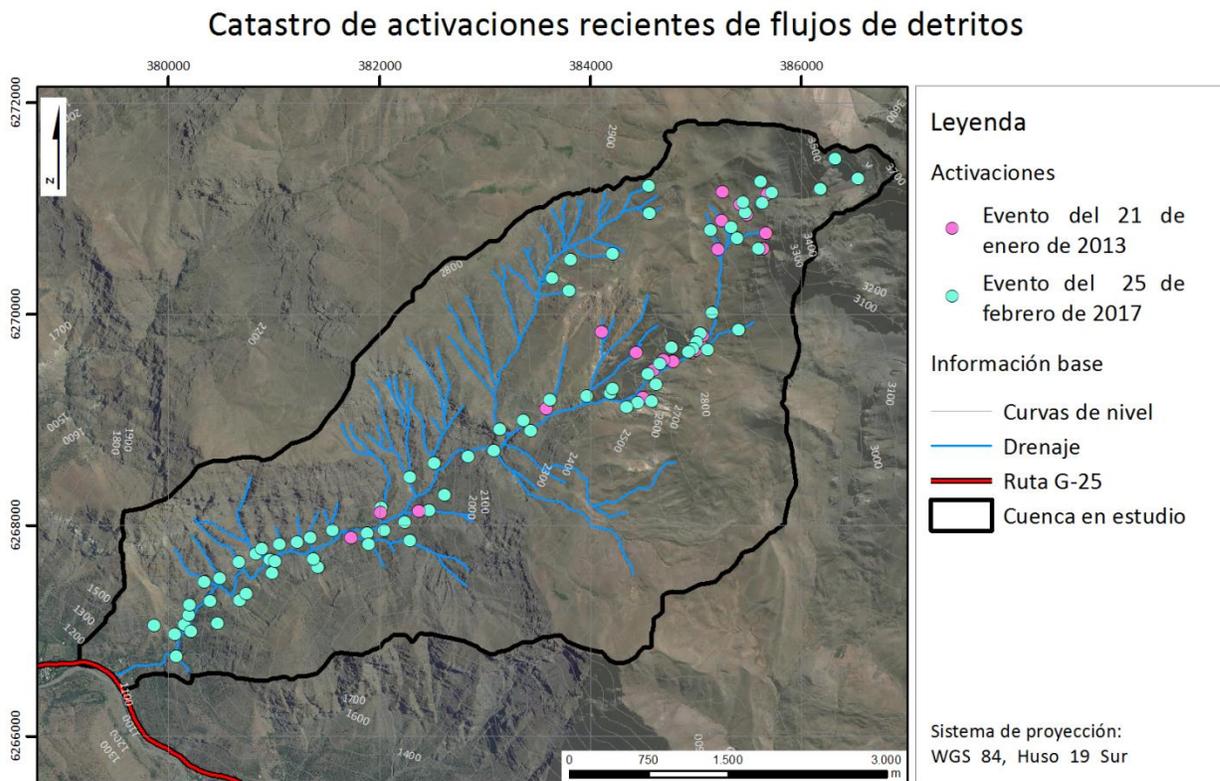


Figura 5.2. Catastro de activaciones recientes de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.

5.1.2.2 Evento del 21 de enero de 2013

Los trabajos de Sepúlveda *et al.* (2014) y SERNAGEOMIN (2013a) indican que el evento hidrometeorológico del 21 de enero de 2013 produjo importantes flujos de detritos en las cuencas del río Maipo, del río Cachapoal y del río Mendoza, respectivamente. El evento más perjudicial de la cuenca del río Maipo ocurrió en el estero San Alfonso.

El detonante de estos eventos fueron precipitaciones intensas, muy localizadas y de corta duración, atribuidas a celdas convectivas, comunes en época estival (Garreaud & Rutllant, 1997), favorecidas por una isoterma 0°C por sobre los 4.460 m s.n.m. (SERNAGEOMIN, 2013b), lo que significó un aumento en la superficie de captación de aguas lluvias en toda la zona.

El río Maipo constituye la principal fuente de agua potable de la ciudad de Santiago (Moreiras & Sepúlveda, 2013). Con la llegada de los flujos generados a su cauce principal, aumentó su concentración de sedimentos finos, lo que afectó el normal funcionamiento de las plantas de tratamiento de agua potable de Aguas Andinas, debido a un aumento en los valores de turbidez. Esto provocó el corte del suministro de agua potable que afectó a más de 1 millón de clientes (4 millones de habitantes) durante 24 horas (Fundación Aquae, 2014b).

En la Tabla 5.2, se muestra el registro de precipitaciones a partir de la base de datos disponible en CR2 (2016), para los días entre el 19 y 22 de enero, evidenciando un buen registro para la estación Embalse El Yeso. En esta estación se registró una precipitación máxima de 11,0 mm/24 horas (precipitación máxima registrada para la cuenca del río Maipo; Sepúlveda *et al.*, 2014) y una precipitación acumulada para el evento de 11,0 mm. No se dispone de información de intensidad en mm/h. Para las estaciones Río Maipo en San Alfonso y San Gabriel no se registraron precipitaciones.

Tabla 5.2. Precipitaciones registradas entre el 19 y el 22 de enero 2013. Modificada de Sepúlveda *et al.* (2014).

Estación	Precipitación acumulada para el evento (mm)	Precipitación Diaria (mm/24 horas)			
		19-Ene	20-Ene	21-Ene	22-Ene
Embalse El Yeso	11,0	0,0	0,0	11,0	0,0

La Dirección Meteorológica de Chile (DMC, 2017) señala que la condición sinóptica el 21 de enero 2013, consistió a un núcleo frío en altura, favorecida por la circulación ciclónica en superficie, acompañada de suficiente agua precipitable para la ocurrencia de precipitaciones en los sectores cordilleranos.

Según Sepúlveda *et al.* (2014), el flujo de detritos generado este día en el estero San Alfonso habría recorrido unos 9.300 m de longitud hasta llegar al río Maipo, generándose a una altitud aproximada de 3.200 m s. n. m., variando la pendiente de línea de *thalweg* entre 8 y 31°, presentando un volumen de depósito por sobre 5.000 m³ aproximadamente; mientras que SERNAGEOMIN (2013b) lo estima entre 4.000 y 8.000 m³. El primero describe que este depósito es bien gradado, compuesto de clastos volcánicos subangulares, principalmente entre 5 y 20 cm, pero con bloques de hasta 1 m de diámetro aproximadamente, inmersos en una matriz areno-limosa, con 10-20% de finos, de plasticidad media. El espesor de los depósitos varía entre menos de 1 m en la zona distal hasta 2 m en la sección media (ver Figura 5.3a); con un espesor promedio de depósito entre 0,5 a 1 m (Moreiras & Sepúlveda, 2013). Las marcas de olas en el puente San Alfonso indican que el flujo alcanzó alturas de hasta 3 m, con marcas hasta 5 m aguas arriba (ver Figura 5.3b) (Sepúlveda *et al.*, 2014).

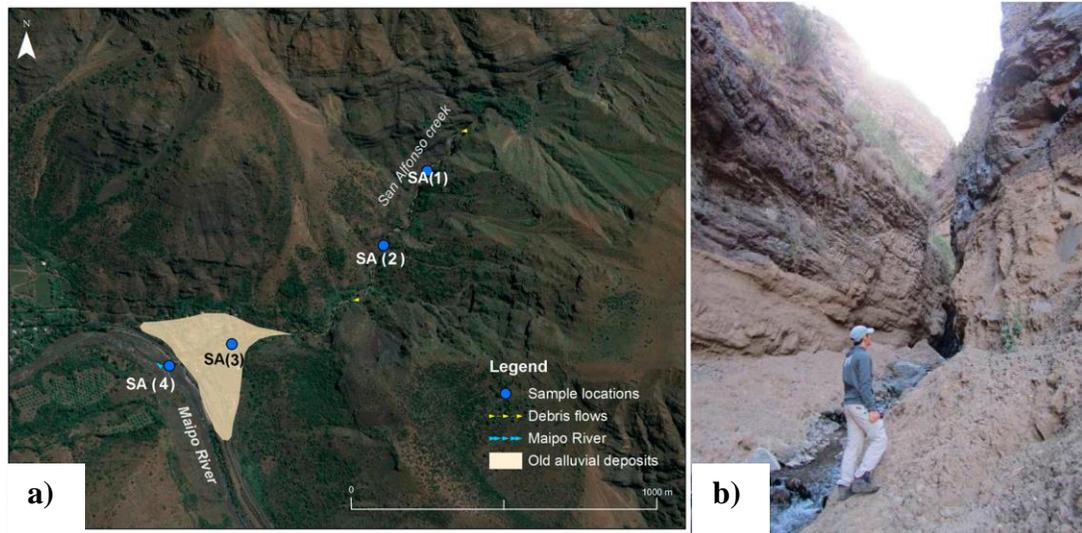


Figura 5.3. a) Secciones media e inferior del estero San Alfonso, se indican los puntos de muestras. b) Marcas de olas y depósitos de flujo en el punto de la muestra SA (1). Tomada de Sepúlveda *et al.* (2014).

En la Figura 5.4, se muestra la trayectoria del flujo de detritos del 21 de enero de 2013, dentro del cual se identifican los procesos que la dominan: erosión, transporte y depositación. Además, se muestra un acercamiento de su área de depósito.

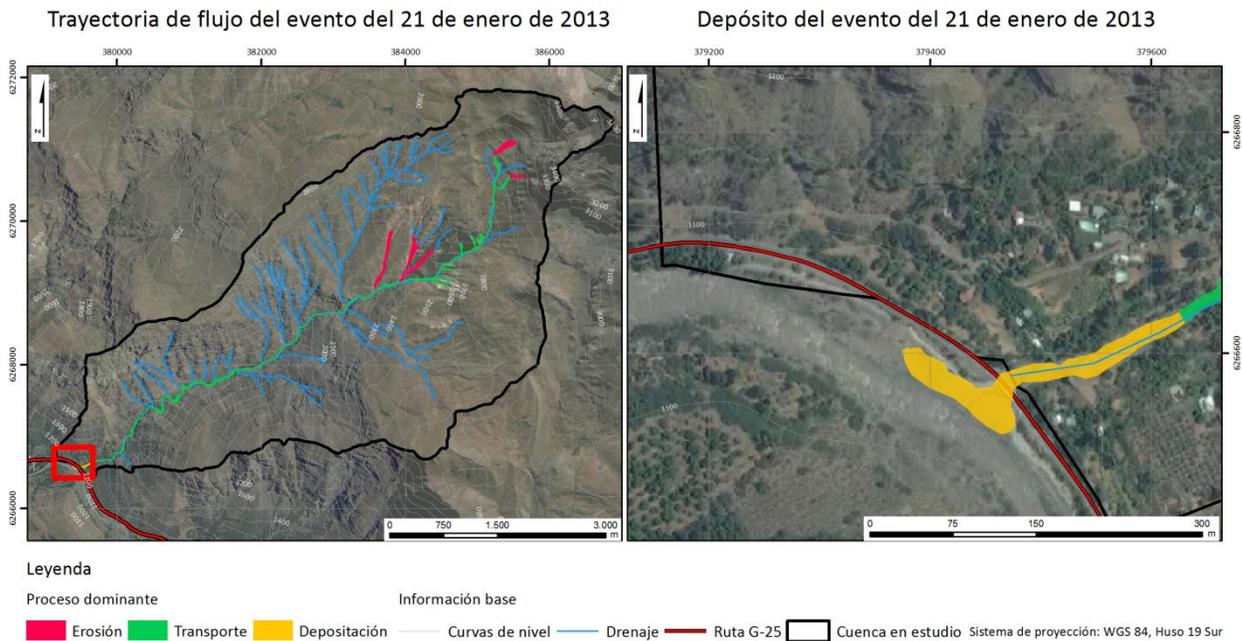


Figura 5.4. Trayectoria de flujo y depósito del evento del 21 de enero de 2013. Recuadro rojo corresponde a la imagen de la derecha. Elaboración propia.

5.1.2.3 Evento del 25 de febrero de 2017

El trabajo de Marín *et al.* (2017) detalla sobre los efectos geológicos del evento hidrometeorológico del 25 y 26 de febrero de 2017, el cual produjo importantes flujos de detritos y/o barro en la cuenca del río Maipo, siendo el evento más perjudicial en la quebrada San José con 8 personas fallecidas y 1 desaparecido; y el de mayor volumen el ocurrido en el estero San Alfonso el 25 de febrero de 2017.

La DMC (2017) señala que este evento hidrometeorológico corresponde a un núcleo frío en altura, con un alto aporte de agua precipitable desde las costas del Perú, asociado a El Niño Costero, con difluencia en su parte delantera, lo que favoreció el desarrollo de convección que afectó a la zona central del país. Debido a este fenómeno se generaron precipitaciones intensas que desencadenaron la ocurrencia de flujos de detritos en las subcuencas de la cuenca del río Maipo, favorecidos por una isoterma 0°C sobre los 4.540 m s.n.m.

El flujo de detritos generado en la cuenca del estero San Alfonso, produjo cortes en la ruta G-25, aislando poblados que se inmiscuyen hacia la Cordillera de Los Andes, tales como, El Ingenio, San Gabriel, Las Melosas, El Romeral, Baños Morales, entre otros. Además, según Marín *et al.* (2017), la llegada de estos flujos al cauce del río Maipo, al igual que el evento del 21 de enero de 2013, provocó el corte del suministro de agua potable que afectó a más de 1.700.000 clientes.

En la Tabla 5.3, se muestran datos de precipitaciones para los días entre el 24 y 26 de febrero, los cuales evidencian un buen registro en las estaciones Embalse El Yeso y Laguna Negra. La intensidad máxima de precipitación fue de 5,7 mm/h registrada en la estación Embalse El Yeso para el 25 de febrero a las 22:57 horas, mientras que en la estación Laguna Negra fue de 4,1 mm/h a las 19:57 horas; con una precipitación acumulada del evento hidrometeorológico de 22,8 y 25,0 mm respectivamente. Según testigos el flujo de detritos habría destruido el puente del estero San Alfonso, alrededor de las 20:00 horas, lo cual coincide con el último registro de la estación Río Maipo San Alfonso, que sufrió un cese en su funcionamiento producto de esta remoción en masa.

Tabla 5.3. Precipitaciones ocurridas entre el 24 y el 26 de febrero 2017. Modificada de Marín *et al.* (2017).

Estación	Precipitación acumulada para el evento (mm)	Intensidad máxima para el evento (mm/h)	Precipitación Diaria (mm/24 horas)		
			24-Feb	25-Feb	26-Feb
Embalse El Yeso	22,8	5,7	0,0	20,5	2,3
Laguna Negra	25,0	4,1	0,0	21,3	3,7

Según Marín *et al.* (2017), el flujo de detritos generado en la cuenca presentó un depósito gradado, compuesto de clastos de tamaño arena y grava con bloques de hasta 1,5 m de diámetro,

predominantemente de color gris, de formas subangulares a subredondeadas, inmersos en una matriz areno-limosa. Además, en el puente de la ruta y en el canal del estero San Alfonso se observaron marcas de olas (*run-up*) que alcanzaron hasta 7 m, mientras que en el puente de la vía del tren hasta 11 m (ver Figura 5.5a). En este sector el depósito alcanzó hasta 3 m de espesor que rellenó el espacio que había entre el puente San Alfonso y el cauce del estero San Alfonso (ver Figura 5.5b). El paso de este flujo destruyó el puente homónimo, lo que generó el corte de tránsito en dicho sector de la ruta. Adicionalmente, según la minuta técnica levantada por la Dirección de Obras Hidráulicas (DOH, 2017) el material detrítico depositado por este evento, generó un alto grado de embancamiento temporal en el cauce del río Maipo (ver Figura 5.5c).

Además, a partir de mediciones de campo realizadas en los últimos 800 m del estero San Alfonso antes de desembocar en el río Maipo (Anexo IV. Terreno N°2), se tiene que para este evento la altura del flujo varía de 3 a 16 m con una media de ~7 m, una pendiente de canal de 5 a 9° con algunos cortes abruptos en ~90° y el material depositado se estima en 46.000 m³ aproximadamente.

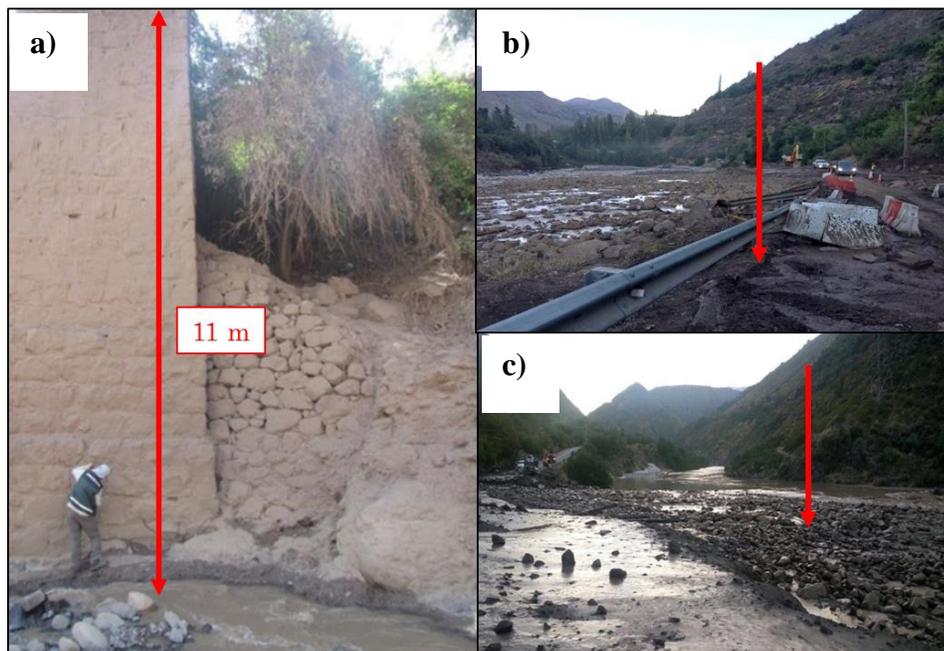


Figura 5.5. a) Altura de las marcas de olas en los pilares del puente de la vía del tren. b) Depósito final en la zona de descarga al río Maipo. c) Embancamiento local del río Maipo por la descarga del aluvión. Tomada de Marín *et al.* (2017).

En la Figura 5.6, se muestra la trayectoria del flujo de detritos del 25 de febrero de 2017, dentro del cual se identifican los procesos que la dominan: erosión, transporte y depositación. Además, se muestra un acercamiento de su área de depósito.

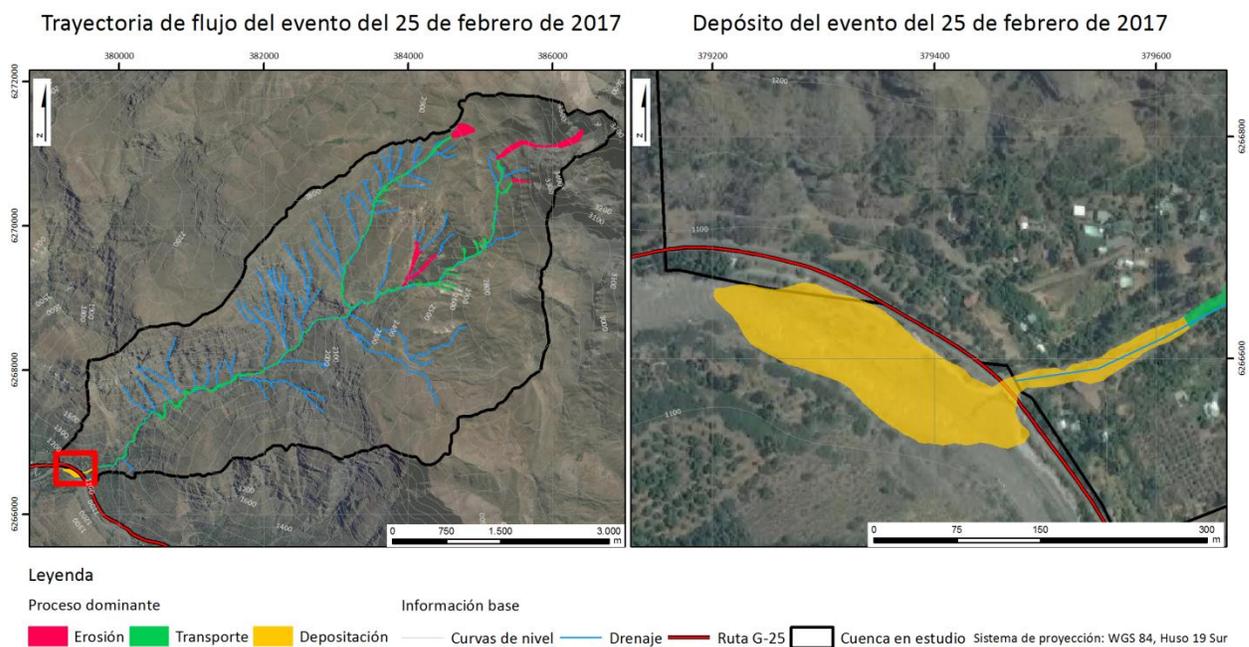


Figura 5.6. Trayectoria de flujo y depósito del evento del 25 de febrero de 2017. Recuadro rojo corresponde a la imagen de la derecha. Elaboración propia.

5.1.3 Marco Geológico

5.1.3.1 Unidades Morfoestructónicas Regionales

Chile central se ubica en un ambiente tectónico de convergencia, con una subducción reconocida desde al menos el Jurásico y con variaciones en la tasa de convergencia durante el Eoceno – Mioceno que van desde 5 a 15 cm/año. Actualmente se estima que la tasa de convergencia es 6,8 cm/año (Rauld, 2011). Esta convergencia a condicionado distintos procesos geológicos como el magmatismo, ubicación del arco con respecto a la fosa, desarrollo de cuencas, orogenia y tectonismo (Fock, 2005; Farías *et al.*, 2016).

Entre los 33°S y los 35°S, la zona central de Chile posee cinco unidades morfoestructurales que se disponen con orientación N-S. De Oeste a Este éstas son: Cordillera de la Costa, Depresión Central, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Precordillera (ver Figura 5.7) (Quiroga, 2013). En particular, la zona de estudio se ubica en la Cordillera Principal. La cual alcanza altitudes superiores a las demás unidades morfoestructurales, de hasta aproximadamente casi 6.600 m s.n.m. En ella se reconocen dos segmentos: uno occidental compuesto por rocas cenozoicas que abarca toda la zona de estudio, y uno oriental que evidencia rocas mesozoicas deformadas, correspondiente en este segmento a la Faja Plegada y Corrida (FPC) del Aconcagua (Quiroga, 2013) (ver Figura 5.7). Por tanto, el área de estudio está inmersa en un contexto de altitudes elevadas y de pendientes pronunciadas, es decir, en un ambiente montañoso.

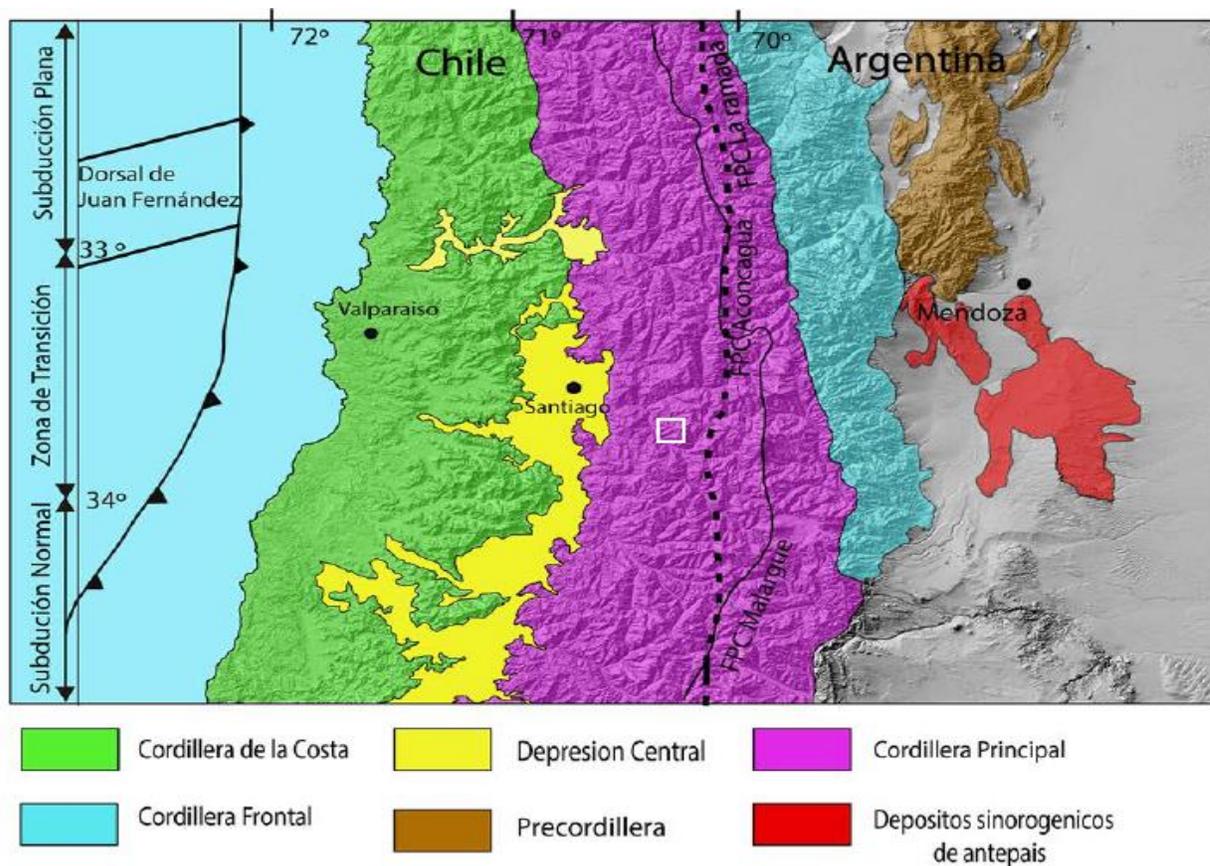


Figura 5.7. Segmentación morfoestructural del Orógeno Andino entre los 32°S y los 35°S. El recuadro blanco encierra el área estudiada. Tomado de Quiroga (2013).

5.1.3.2 Geología Regional

La geología regional del área de estudio está dada principalmente por el estudio de Thiele (1980) correspondiente a la Hoja Geológica de Santiago a escala 1:250.000, que posteriormente fue digitalizada y modificada por Fock (2005). En la Figura 5.8, se muestra el mapa geológico de Fock (2005) incluyendo el área estudiada (recuadro negro) y resaltando la geología regional involucrada en este estudio (recuadros rojos).

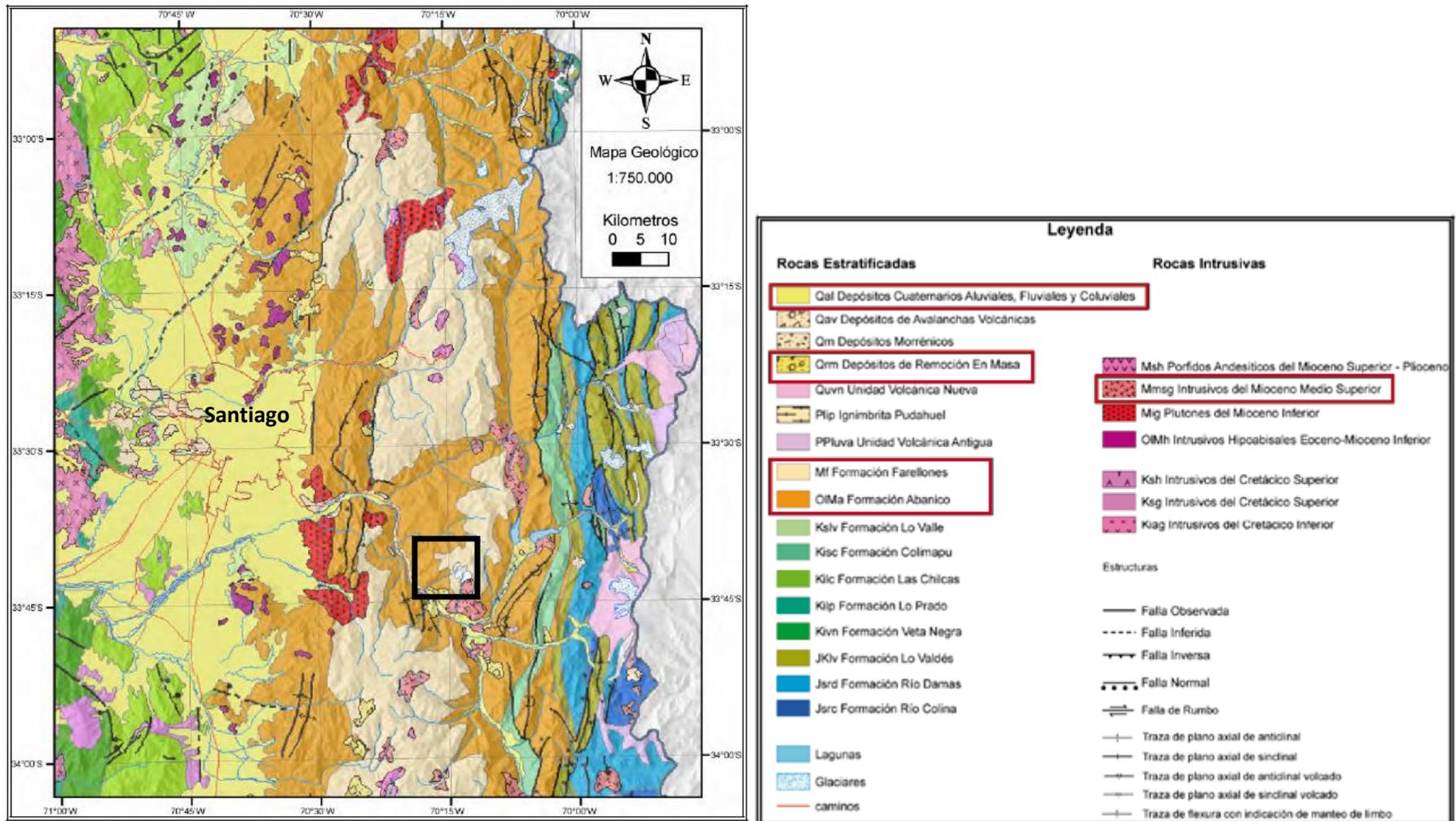


Figura 5.8. Mapa Geológico Regional adaptado por Fock (2005) de la Hoja de Santiago 1:250.000 (Thiele, 1980). Tomado de Fock (2005). El recuadro negro encierra el área de estudio. Los recuadros rojos indican la geología regional involucrada en este estudio.

A continuación, se describe la geología presente en el área de estudio, de carácter regional:

1. Rocas Estratificadas

Formación Abanico (Aguirre, 1960)

Unidad litoestratigráfica constituida por lavas básicas a intermedias, rocas piroclásticas ácidas, e intercalaciones sedimentarias continentales (fluviales, aluviales y lacustres). Esta formación se encuentra plegada y es afectada por un pervasivo metamorfismo de muy bajo grado. El espesor del conjunto se estima en ~3.000 m, aun cuando se acepta que éste aparece aumentado por las numerosas intrusiones de filones-manto y lacolitos andesíticos (Thiele, 1980). De acuerdo a diversas dataciones radiométricas y estudios de fauna fósil se le asigna una edad Eoceno Superior – Mioceno (Fock, 2005).

Formación Farellones (Klohn, 1960)

Sucesión compuesta de lavas, tobas e ignimbritas con intercalaciones de brechas, mientras que la alternancia de rocas volcanoclásticas más finas, en tramos de 4 a 5 metros, producen una marcada estratificación en la serie (Thiele, 1980). A la Formación Farellones se le asigna una edad Miocena, de acuerdo a las dataciones radiométricas disponibles. Esta Formación sobreyace a la Formación Abanico entre los 32°S hasta los 35°S (Fock, 2005).

2. Rocas Intrusivas

Intrusivos del Mioceno Medio-Superior

Intrusivos cuyo rango de edad varía entre los 13 y 8 Ma (Sellés & Gana, 2001), y que se ubican más al este de la franja de Intrusivos del Mioceno Inferior. Las litologías principales de esta unidad son granodiorita, monzogranito y monzonita cuarcífera (Thiele, 1980).

3. Estructuras

No se observan estructuras (de carácter regional, mayores) en el área de estudio, sin embargo, hay algunas que se ubican cerca; éstas tienen un rumbo general aproximado norte-sur, pero presentan fuertes variaciones en el estilo de deformación y vergencia. Corresponden principalmente a pliegues asimétricos con ejes de rumbo N-NE y a fallas inversas de orientación N-NE y con vergencia tanto al este como al oeste (González, 1963; Thiele, 1980). En la parte más oriental se puede observar una secuencia de fallas, anticlinales y sinclinales de rumbo N-NW, apretados y volcados con vergencia de preferencia al este, que constituyen la Faja Plegada y Corrida del Aconcagua, que afecta principalmente a las rocas Mesozoicas (Thiele, 1980; Giambiagi *et al.*, 2003).

4. Depósitos no consolidados

Depósitos Coluviales

Corresponden a depósitos ampliamente distribuidos en la zona cordillerana, sin embargo, existen sectores en que su extensión y potencia es mayor, un ejemplo de ellos es la ladera norte del valle del Río Maipo en el sector de San Alfonso. Se presentan como depósitos con estratificación interna poco definida y en muchas ocasiones solo insinuada, predominando los depósitos de tipo masivo. Estos depósitos con formas laminares se disponen en las laderas y desarrollan pendientes fuertes de unos 20° a 25°, o bien se ubican al pie de laderas constituyendo gruesos apilamientos de formas cónicas y con varias decenas de metros de espesor en algunos casos. Su génesis se asocia a meteorización mecánica y química, vinculados al efecto de heladas y variaciones bruscas de la temperatura en las rocas expuestas. Los materiales producidos forman un manto in situ como coberturas de suelos o escombros de falda o eventualmente caen en fragmentos individualmente desde los puntos altos del relieve al pie de los faldeos de la zona, por efecto de la gravedad, pero ayudados en menor o mayor grado por aguas que provienen de precipitaciones o fusión de nieves. La edad de formación de estos depósitos es fundamentalmente Holocena (Moreno *et al.*, 1991; Herrera, 2016).

Depósitos Aluviales y Fluviales

Corresponden a bloques, gravas, arenas, limos y arcillas. Son el principal material de relleno de la Depresión Central y de todos los valles interiores del área de estudio. Sobresalen entre estos últimos aquéllos que forman los importantes niveles de terrazas en el valle del Río Maipo. En términos generales, se puede sostener que sobre una cota promedio de 1.500 m.s.n.m., los depósitos fluviales gradan a glaciofluviales (Thiele, 1980).

Depósitos de Remoción en Masa

Estos depósitos presentan gran distribución espacial. Los materiales de los depósitos más jóvenes están completamente sueltos y se presentan estabilizados, sin embargo, ciertos niveles de inestabilidad que podrían generar movimientos de volúmenes importantes (Thiele, 1980; Herrera, 2016).

5.1.3.3 Geología Local

A continuación, se describe la Geología Local levantada en este estudio a escala 1:20.000 (ver Figura 5.9), que fue adaptado del mapa geológico de Moreno *et al.* (1991) de escala 1:50.000.

1. Rocas estratificadas

Unidad Abanico fracturada (Tiaf)

En esta unidad la roca se presenta fracturada y meteorizada. Las rocas más incompetentes corresponden a lavas de grano fino (andesitas) e intercalaciones sedimentarias (lutitas y areniscas finas). Generalmente se encuentra en toda el área de estudio, principalmente en las zonas más próximas a estructuras tipo fallas y pliegues.

Unidad Abanico competente (Tiac)

En esta unidad la roca presenta un leve fracturamiento y meteorización. Las rocas de grano más grueso (lavas de grano grueso, brechas, tobas) son más competentes, presentándose fracturadas, pero formando bloques mayores entre los sets de estructuras. En general, se encuentra alejado de estructuras mayores, como fallas y pliegues.

Unidad Abanico con cobertura de suelo (Tias)

Esta unidad presenta un desarrollo de suelo superficial residual que genera una topografía suave y su espesor varía de métrico a decamétrico, principalmente en las zonas localmente más elevadas, corresponde a suelo arenoso a gravoso denso, con un porcentaje de material fino limoso variado. Suele estar cubierto por escasa vegetación.

2. Intrusivos

Intrusivo Porfírico (Pp)

Corresponde a un intrusivo mayor en la zona de estudio que se encuentra en el borde oriental de la cuenca y afecta a la Formación Abanico. Corresponde a un pórfido andesítico de masa fundamental de color negro con fenocristales de plagioclasa. Este intrusivo podría estar asociado con la alteración hidrotermal que se observa en la zona. Se presenta poco fracturado.

Filón Manto (Tf)

Corresponde a un intrusivo menor en la zona de estudio que se encuentra en el borde suroccidental de la cuenca y afecta a la Formación Abanico. Se dispone con orientación NE-SW, con un manteo menor a 30°.

3. Alteraciones

Alteración Hidrotermal (Ah)

Corresponde a zonas de roca y regolito altamente alterada, concentrada cerca de la cabecera de la cuenca, reconocida por tonalidades marrón-amarillentas y anaranjadas. Rica en arcillas de indeterminado tipo y composición. Posiblemente corresponde a una alteración argílica moderada-avanzada.

4. Depósitos no consolidados

Depósitos Aluviales (Qal)

Se reconocen dos tipos de depósitos: activos e inactivos. Los primeros corresponden a depósitos bien gradados, clastos subangulares a subredondeados, de granulometría variable, desde arenas gruesas a gravas, con eventual presencia de bloques, sueltos a firmes en una matriz areno-limosa, cuyas litologías provienen principalmente de la Formación Abanico y de la Alteración Hidrotermal. Su origen se asocia a flujos esporádicos de baja energía con volúmenes variables, ocasionados principalmente en las cabeceras de las subcuencas de mayor altitud. Morfológicamente se presentan en vías y abanicos aluviales (Punto D1_07, Anexo IV).

Los segundos corresponden a depósitos densos, mal gradados, clastos subredondeados a redondeados, de granulometría variable, desde arenas gruesas a bolones, cuyas litologías provienen principalmente de la Formación Abanico. Su origen se asocia a flujos estacionarios o perennes de alta energía, pero su proveniencia no es bien conocida. Morfológicamente se presentan en terrazas. Queda abierta a la hipótesis de que podrían haber sido depositados por un antiguo régimen del estero San Alfonso o más bien a corresponden a depósitos fluviales (Punto D1_11, Anexo IV). En el Punto D1_02 del Anexo IV, se muestra el contacto entre ambos tipos de depósitos.

Depósitos Coluviales (Qc)

Corresponden a acumulaciones de sedimentos gruesos de tamaños variables, que generalmente se muestran en forma de conos de deyección al pie de la Unidad Abanico fracturada o como mantos sobre ésta. Se encuentran en las zonas de alta pendiente que gradualmente decrecen. Sus depósitos tienen un espesor decimétrico a métrico, son pobremente gradados y el tamaño promedio de sus clastos son centimétricos a decimétricos, con tamaños hasta 8 m. Dentro de éstos, domina una compacidad baja, con escasa a nula cobertura vegetal y una litología perteneciente a la Formación Abanico. Los clastos son de variada angulosidad y esfericidad, mientras que su pendiente de reposo varía entre 20 y 40°. Estos depósitos se encuentran por toda el área de estudio, principalmente en laderas cercanas al cauce principal del estero San Alfonso y en las zonas de mayor altitud local (Punto D1_01, Anexo IV).

Depósitos de Deslizamientos (Qd)

Corresponden a acumulaciones de sedimentos de mayor envergadura (volumen) en comparación a Qc. Se presentan a los pies de zonas de alta pendiente, se distinguen principalmente por su morfología lobulada y por el escarpe localizado en sus laderas adyacentes. Sus características litológicas y granulométricas son ampliamente variadas. Corresponden a depósitos densos y los de mayor volumen se encuentran en las subcuencas de mayor altitud (Punto D1_11, Anexo IV).

Depósitos Glaciales (Qg)

Corresponden a depósitos firmes con clastos angulosos inmersos en una matriz arenolimsa, con presencia de bloques; de textura masiva, mal seleccionada y caótica. Estos depósitos se reconocen principalmente en morrenas y dentro de circos glaciales. Su origen se asocia al avance y retroceso de glaciares, los cuales actualmente no se observan en la cuenca en estudio.

5. Estructuras

Pliegues

En la mitad de la línea divisora de aguas de la parte NW de la cuenca, se distingue el eje de un pliegue anticlinal, de orientación NW-SE que deforma la Formación Abanico.

Fallas

Corresponden a discontinuidades que cortan la Formación Abanico, pero no a sus depósitos adyacentes. Se distinguen dos orientaciones principales: NW-SE y NE-SW. Todos ellos cortan la Unidad Abanico fracturada. Además, la falla de orientación NE-SW se alinea con uno de los cauces principales de la cuenca.

Mapa temático de Geología

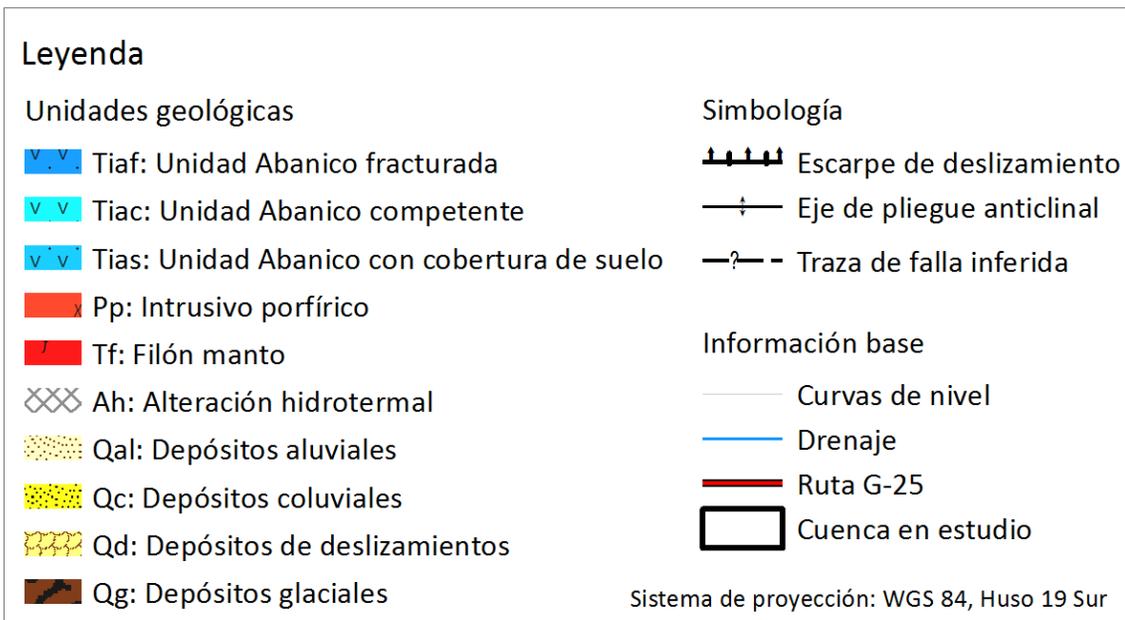
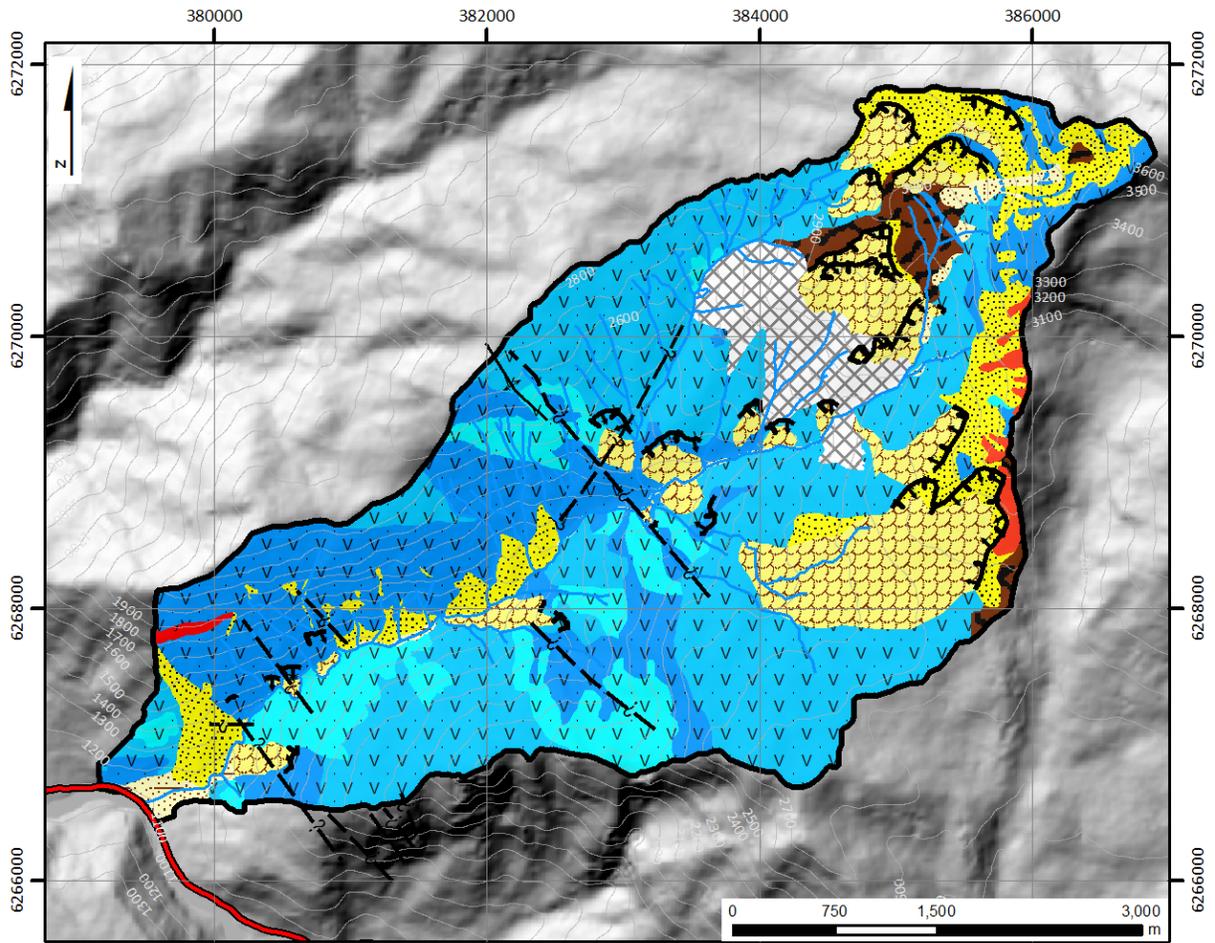


Figura 5.9. Mapa Geológico (y geotécnico) del área de estudio a escala 1:20.000. Elaboración propia.

5.1.4 Marco Geomorfológico

5.1.4.1 Geomorfología Regional

Börgel (1983) presenta un mapa geomorfológico regional para la Región Metropolitana, identificando de Oeste a Este las siguientes unidades: planicie marina y/o fluvio marina, cuencas graníticas marginales, cordillera de la costa, cuenca de Santiago y llanos de sedimentación fluvial y/o aluvial (más al norte) y, cordillera andina de retención crionival (ver Figura 5.10).

El área de estudio se ubica en la cordillera andina de retención crionival. Esta unidad aporta la mayor cantidad de material que rellena la cuenca de Santiago, el cual es transportado principalmente por los ríos Maipo y Mapocho. Exhibe un relieve joven, con una topografía escarpada, cuyas cotas decrecen hacia el Oeste. Presenta fuertes pendientes, modeladas por procesos tectónicos, fluviales y glaciales. Adicionalmente, destaca la presencia de quebradas tributarias cortas, de alta pendiente, en general rectas y estrechas, afluentes de los cauces principales (Fundación Aquae, 2014a).

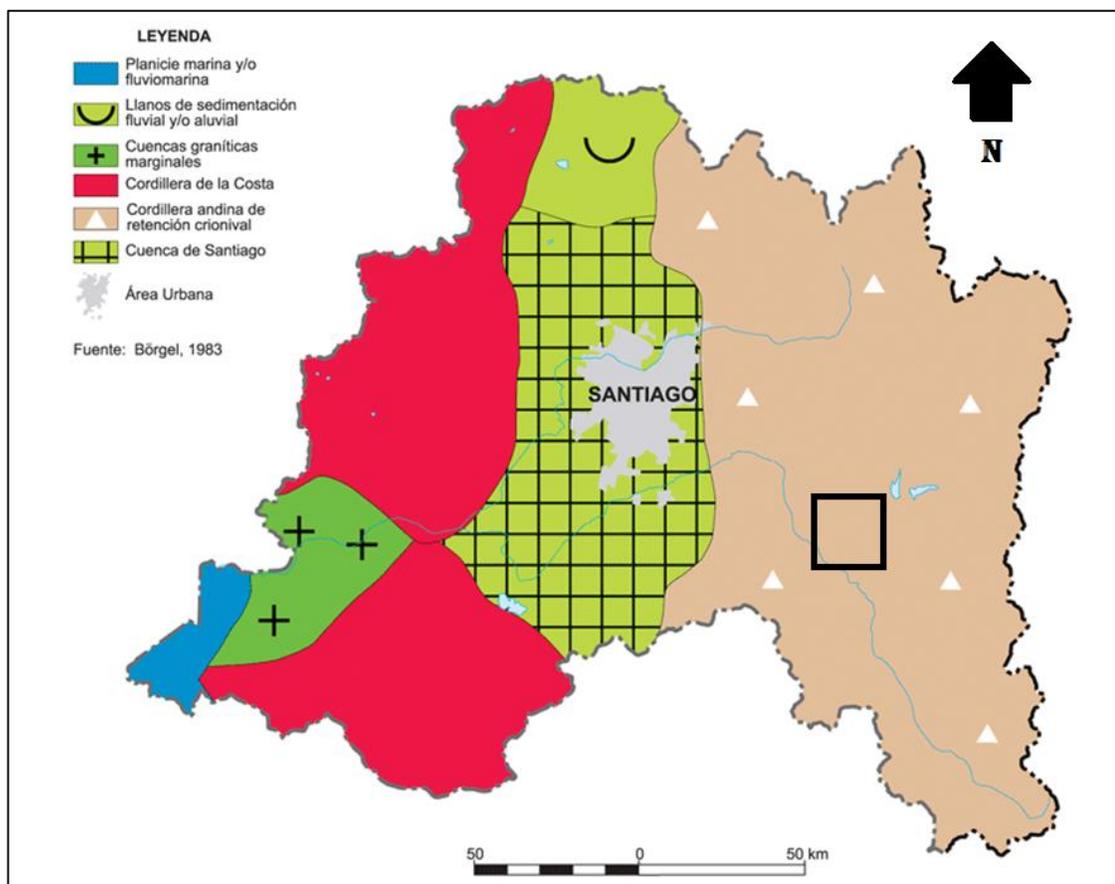


Figura 5.10. Mapa Geomorfológico Regional de la Región Metropolitana. El recuadro negro encierra el área de estudio. Tomado de Börgel (1983).

5.1.4.2 Geomorfología Local

La geomorfología local expuesta en este estudio fue levantada por el autor, a partir de trabajo en terreno, fotointerpretación de imágenes y con apoyo de *Google Earth*. La Tabla 5.4, muestra la descripción de la forma y de los procesos morfogenéticos para cada morfología descrita. En la Figura 5.11, se muestra la Geomorfología Local levantada en este trabajo a escala 1:20.000.

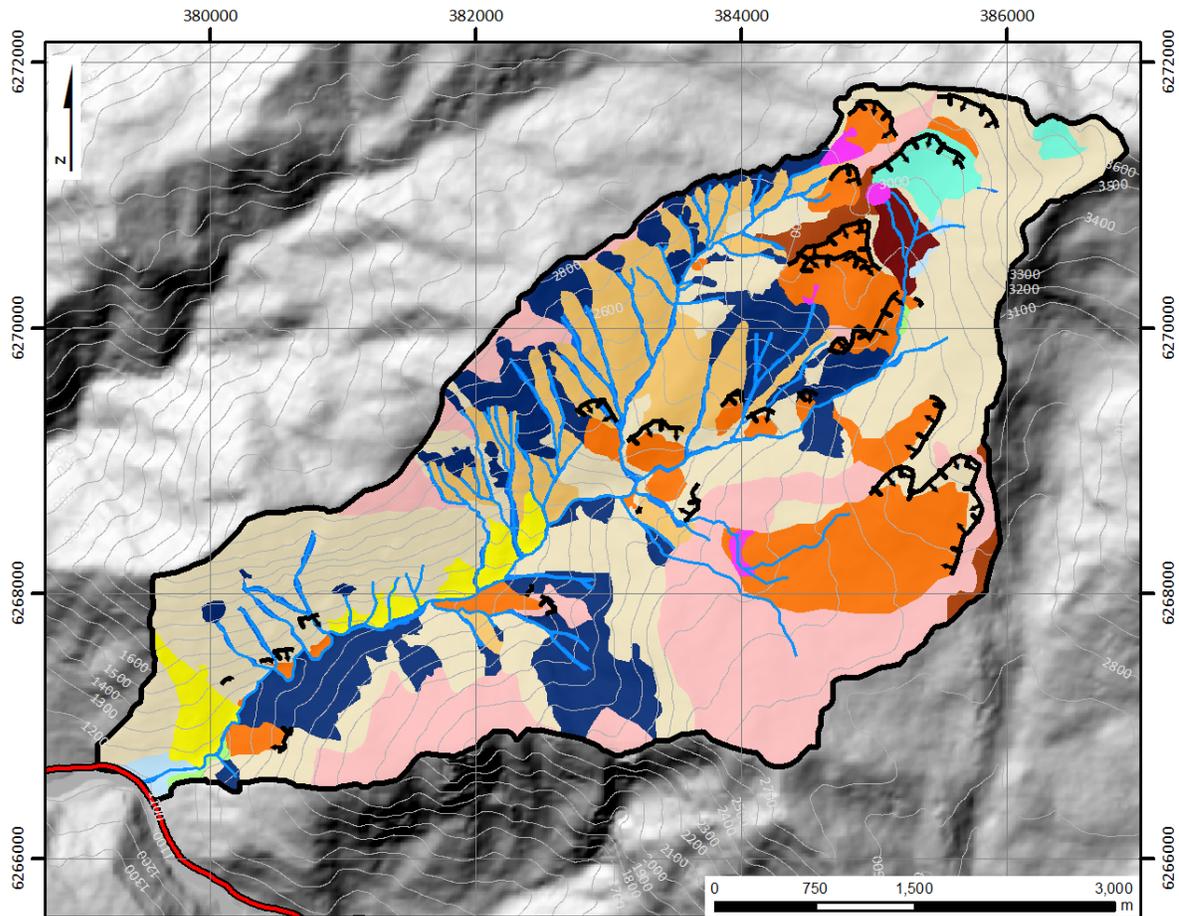
Tabla 5.4. Descripción de las morfologías descritas en el área de estudio, con sus respectivos procesos morfogenéticos. Elaboración propia.

N°	Origen	Morfología	Descripción de forma	Procesos morfogenéticos
1	Aluvial	Interfluvio o loma	Corresponde a una superficie convexa alargada que separa dos cursos de agua.	Se forma a partir de la fragmentación, meteorización, deslizamiento superficial y caída de material, condicionados por dos o más cursos de agua.
2	Aluvial	Zona de arranque	Corresponde a una superficie cóncava, levemente confinada, de apariencia rasgada y generalmente con forma de micro cuenca.	Se forma a partir de la erosión de roca y/o suelo y el transporte de dicho material, producto de cursos de agua incipiente o deslizamientos superficiales saturados en agua. Afectada por la gravedad.
3	Aluvial	Vía aluvial	Corresponde a una superficie cóncava alargada, bien confinada, formando un canal.	Se forma a partir de la combinación principalmente de erosión y transporte descendente de material fragmentado, mediante cursos de aguas, con un menor grado de depositación de éstos. Afectada por la gravedad.
4	Aluvial	Abanico aluvial	Corresponde a una superficie convexa a plana, no confinada, con forma de abanico. Se encuentra en las zonas de descompresión de cursos de agua.	Se forma por el desconfinamiento de cursos de agua, asociado a la desembocadura de éstos en cursos o cuerpos de agua de mayor envergadura.
5	Aluvial	Terraza aluvial (agradacional)	Corresponde a una superficie de plataforma (plana), en los costados de uno o más cursos de agua y topográficamente a mayor elevación que estos.	Formación de terrazas agradacionales por la disminución en la capacidad de transporte de sedimentos de un curso de agua (aluvial o fluvial) o cambio de nivel de base.
6	Aluvial	Pantano	Corresponde a una depresión de poca profundidad rellena de agua estancada.	Se forma por el estancamiento de agua, generalmente asociada a un desborde (inundación) de un cuerpo o curso de agua.

Continuación de Tabla 5.4.

N°	Origen	Morfología	Descripción de forma	Procesos morfogenéticos
7	Gravitacional	Cono de deyección	Presenta una forma de cono, en las faldas de laderas de alta pendiente. En general, poseen pendientes mayores que un abanico aluvial (hasta 40°).	Se forma a partir de la acumulación de fragmentos por caída libre, rodamiento o saltación. Afectado por la gravedad.
8	Gravitacional	Deslizamiento	Presenta una superficie lobulada (tipo <i>hummocky</i>) y se reconoce una cicatriz en su fuente.	Se forma a partir del colapso descendente de una ladera de cerro, sobre una superficie de cizalle definida. Afectado por la gravedad.
9	Glacial	Morrena de fondo	Corresponde a una superficie lobulada (tipo <i>hummocky</i>), que se dispone por debajo de un glaciar, separándolo de su roca caja; en la actualidad o en tiempos pasados.	Se forma por la depositación de una gran cantidad de material mientras un glaciar se funde (retrocede).
10	Glacial	Morrena lateral	Corresponde a una superficie convexa alargada, que separa un glaciar de las laderas de su roca caja; en la actualidad o en tiempos pasados.	Se forma por la dinámica de un glaciar, el cual transporta y acumula el material arrancado, en sus costados y paralelo a las laderas del valle.
11	Glacial	Circo glacial	Corresponde a una depresión con forma de anfiteatro de paredes abruptas; ubicada en las partes más altas de una montaña.	Se forma por erosión (excavación) glacial, en las partes más altas de una montaña.
12	Indiferenciado	Ladera de caída	Corresponde a una superficie plana de alta pendiente, que forman los lados de un cerro.	Se forma a partir del movimiento de fragmentos y del perfilamiento de laderas. Procesos que pueden resultar de la combinación de múltiples procesos denudativos (incluyendo las remociones en masa).
13	Indiferenciado	Cima	Corresponde a una superficie plana de baja pendiente, que forman las partes más altas de un cerro.	Se forma a partir de la fragmentación y meteorización in situ de material.

Mapa temático de Geomorfología



Leyenda

Morfología

Abanico aluvial	Morrena de fondo
Cima	Morrena lateral
Circo glacial	Pantano
Cono de deyección	Terraza aluvial
Deslizamiento	Vía aluvial
Interfluvio	Zona de arranque
Ladera de caída	

Simbología

Escarpe de deslizamiento

Información base

Curvas de nivel

Drenaje

Ruta G-25

Cuenca en estudio

Sistema de proyección: WGS 84, Huso 19 Sur

Figura 5.11. Mapa Geomorfológico del área de estudio a escala 1:20.000. Elaboración propia.

De las morfologías aluviales, es importante destacar que la zona de arranque es un término introducido en este trabajo, que hace referencia a una morfología asociada al origen de un flujo de detritos, equivalente a la cicatriz o escarpe de un deslizamiento.

5.1.5 Clima

Este apartado es un extracto del estudio de Padilla (2006), que corresponde a un análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago.

El clima de la región central de Chile puede ser clasificado como mediterráneo, caracterizado por una estación cálida y seca en el verano y una estación fría y lluviosa durante el invierno (Miller, 1976; Fuenzalida, 1982). Dentro de esta clasificación general, y particularmente para la Región Metropolitana, se distinguen dos subtipos climáticos que se definen a partir de la duración de sus estaciones secas (Padilla, 2006). Estos dos subtipos se describen en los párrafos siguientes y sus distribuciones se muestran en la Figura 5.12:

1. **Clima templado cálido con estación seca prolongada:** corresponde al subtipo climático más importante de la Región Metropolitana. Presenta un periodo seco de 7 a 8 meses con precipitaciones bajo los 40 mm. Las precipitaciones se concentran entre mayo y agosto, y por **sobre los 1500 m s.n.m.** estas precipitaciones son de nieve. Las amplitudes térmicas son altas, con una diferencia de 13°C entre el mes más cálido (enero) y el mes más frío (julio) y la diferencia media entre las máximas y mínimas diarias es de 14 a 16°C.
2. **Clima templado cálido con estación seca de 4 a 5 meses:** corresponde al tipo de clima que domina la zona cordillerana, particularmente por **sobre los 2000 m s.n.m.** El periodo lluvioso es más extenso, de 7 a 8 meses, donde predominan las temperaturas bajo los 0°C por lo que las precipitaciones son de tipo nieve.

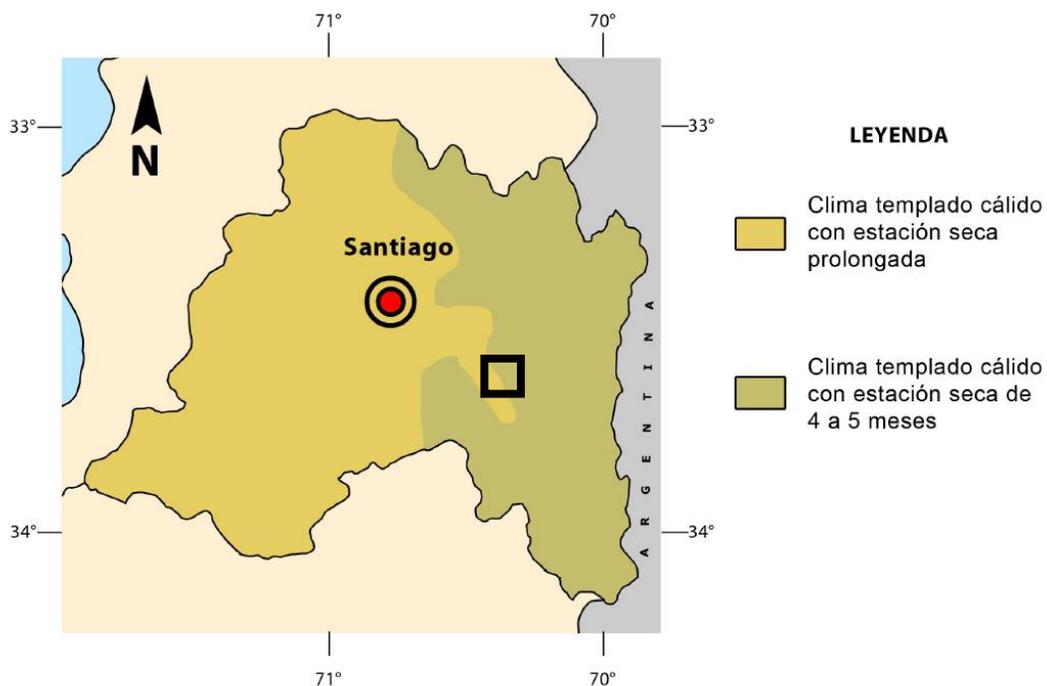


Figura 5.12. Mapa con climas presentes en la Región Metropolitana. Tomado de Padilla (2006). El recuadro negro corresponde a la zona de estudio.

5.1.6 Hidrometeorología

A continuación, se resume la hidrometeorología desde el punto de vista de tormentas de verano, dado que, según el registro histórico de flujos de detritos ocurridos en la cuenca, los eventos que han generado un mayor impacto ocurrieron en dicho escenario.

Viale & Garreaud (2014), basado en una climatología sinóptica y un diagnóstico físico, revelan dos sistemas de precipitación en época estival: un sistema de Vientos Débiles de Vaguada (*trough weak winds*; TWW) y un sistema de Vientos Oestes Fuertes de Vaguada (*trough strong westerlies*; TSW).

El primero es el tipo más frecuente (cerca del 80% de los casos) y generalmente ocurre en asociación con una vaguada de onda corta que se aproxima y presenta vientos del Este o vientos del Oeste muy débiles en la cima de los Andes subtropicales (32-36°S), favoreciendo el desarrollo de **tormentas convectivas de verano** (ver Figura 5.13a).

El segundo ocurre por el paso de perturbaciones extratropicales moviéndose hacia el Este, produciendo precipitaciones más estables y de naturaleza estratiforme, similares a las tormentas de invierno, es decir, **lluvias estratiformes de verano** (ver Figura 5.13b).

Ambos tipos estarían favorecidos por la elevada altura de la línea de nieve que se alcanza en épocas estivales, ya que esta permite que la precipitación líquida pueda llegar hasta los 4.000 m s.n.m. en las montañas, bastante más arriba de los 2.300 m s.n.m. que posee la línea de nieve típica en invierno (Garreaud, 2013); lo que se traduce en un aumento de la superficie de captación de agua líquida.

Según Viale & Garreaud (2014), las precipitaciones que habría generado los flujos de detritos el 21 de enero 2013, están asociadas a tormentas convectivas de verano, es decir, a un sistema TWW (ver Figura 5.13). Para los eventos del 25 de febrero 2017, se desconoce de estudios al respecto, pero dado su similitud en cuanto a condición sinóptica, se infiere que también correspondería a un sistema TWW.

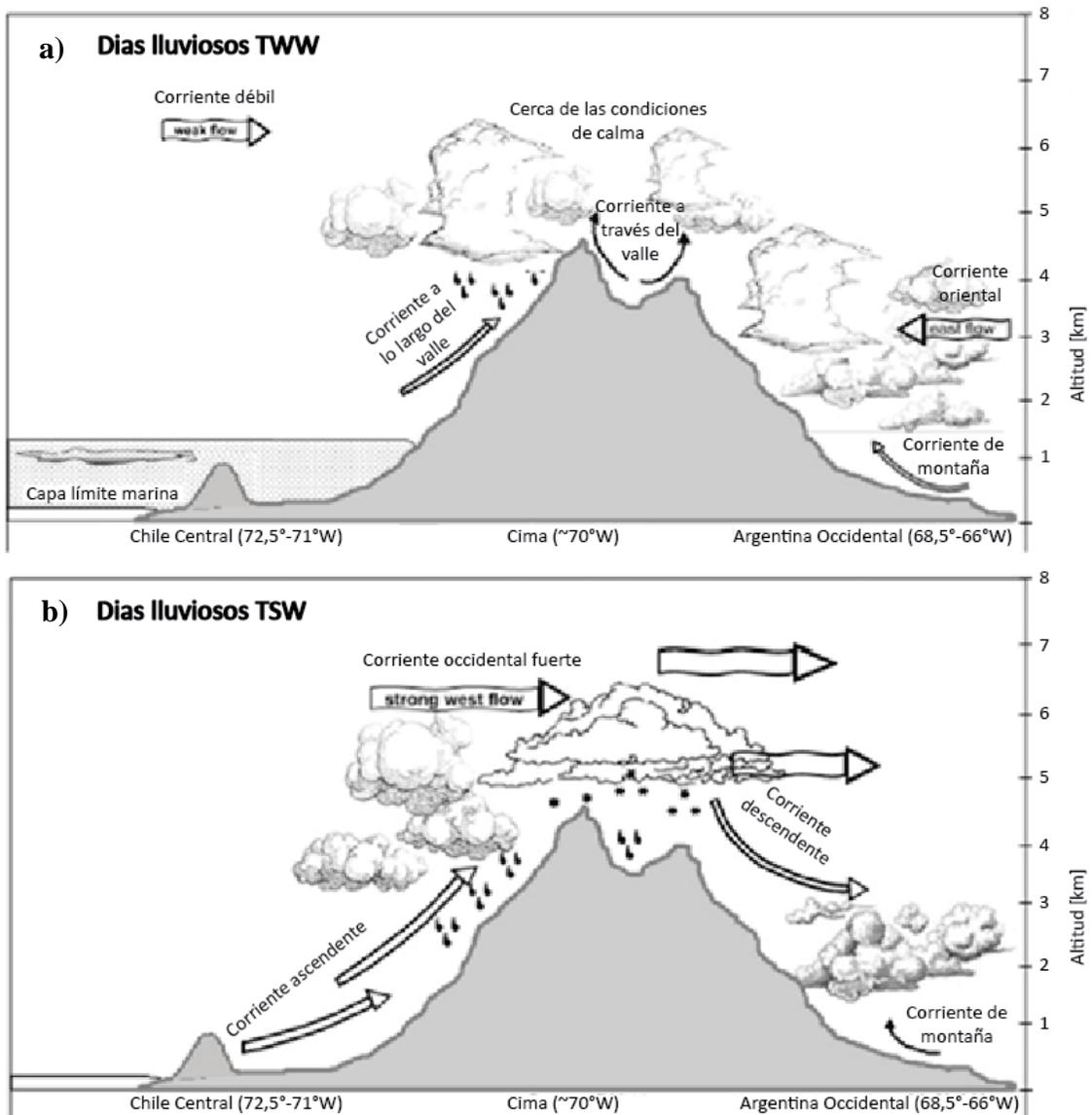


Figura 5.13. (a) Representación esquemática de las condiciones meteorológicas durante días lluviosos TWW y (b) días lluviosos TSW. Modificada de Viale & Garreaud (2014).

5.2 Determinación de factores condicionantes

Los factores condicionantes seleccionados obedecen a las características propias del área en estudio; la cual se encuentra inmersa en un ambiente montañoso que relaciona distintos procesos: aluvial, periglacial, crionival y paleoglacial. Además, junto a estructuras tipo falla, facilitan el desarrollo de altas pendientes, grandes volúmenes de depósitos, una roca madre de baja resistencia, escasa a nula vegetación y un relieve predominantemente cóncavo-plano, entre otros. Lo que configura un escenario de inestabilidad en la cuenca frente a eventos de remociones en masa, especialmente flujos de detritos.

En base a la descripción del área de estudio, se reconocen seis factores que condicionan la generación de flujos de detritos, los cuales se muestran en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Factores condicionantes en la generación de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.

Factor	Condición de influencia
Geomorfología	Morfologías y sus procesos morfogenéticos
Geología (y Geotecnia)	Depósitos y calidad de roca
Pendiente	Energía y superación de tensión de corte de flujos
Elevación y Crioclastia	Procesos de hielo y deshielo asociado a elevación
Antecedentes	Revisión por inspección de subcuencas activadas
Curvatura	Canalización y superación de tensión de corte de flujos

5.3 Elaboración de mapas temáticos

Los mapas temáticos correspondientes a la Geología (y Geotecnia) y Geomorfología, se detallan en el subcapítulo anterior, *Descripción del área de estudio*, específicamente en los apartados de 5.1.3.3 *Geología Local* y 5.1.4.2 *Geomorfología Local*, respectivamente. A continuación, se describen los demás factores condicionantes identificados en la cuenca del estero San Alfonso.

La Pendiente en su rol como factor condicionante, es dividida por algunos autores en pendientes de laderas y pendientes de canales, sin embargo, en este estudio, se decide realizar una subdivisión en base a morfologías aluviales y no aluviales (ver Tabla 5.6), aprovechando los procesos identificados en la Geomorfología. Además, en la Figura 5.14 se muestra el mapa temático de este factor.

Tabla 5.6. Clasificación y justificación del factor Pendiente. Elaboración propia.

Factor	Rango	Justificación
Pendiente	>45°	Los rangos se dividen entre morfologías aluviales y morfologías no aluviales. Esto porque se espera que las primeras fueran más sensibles a los cambios de pendientes, en cuanto a la generación de flujos se trata. Los rangos utilizados son modificados de Lara (2007) y se reajustan (calibrados) a medida que se realiza este trabajo. La misma autora, establece un límite de 10° de pendiente, para remociones en masa no canalizadas; mientras que para flujos canalizados se incluyen pendientes incluso menores a 5°.
	35-45°	
	25-35°	
	15-25°	
	10-15°	
	5-10°	
	<5°	
	>40°	
	30-40°	
	20-30°	
10-20°		
<10°		

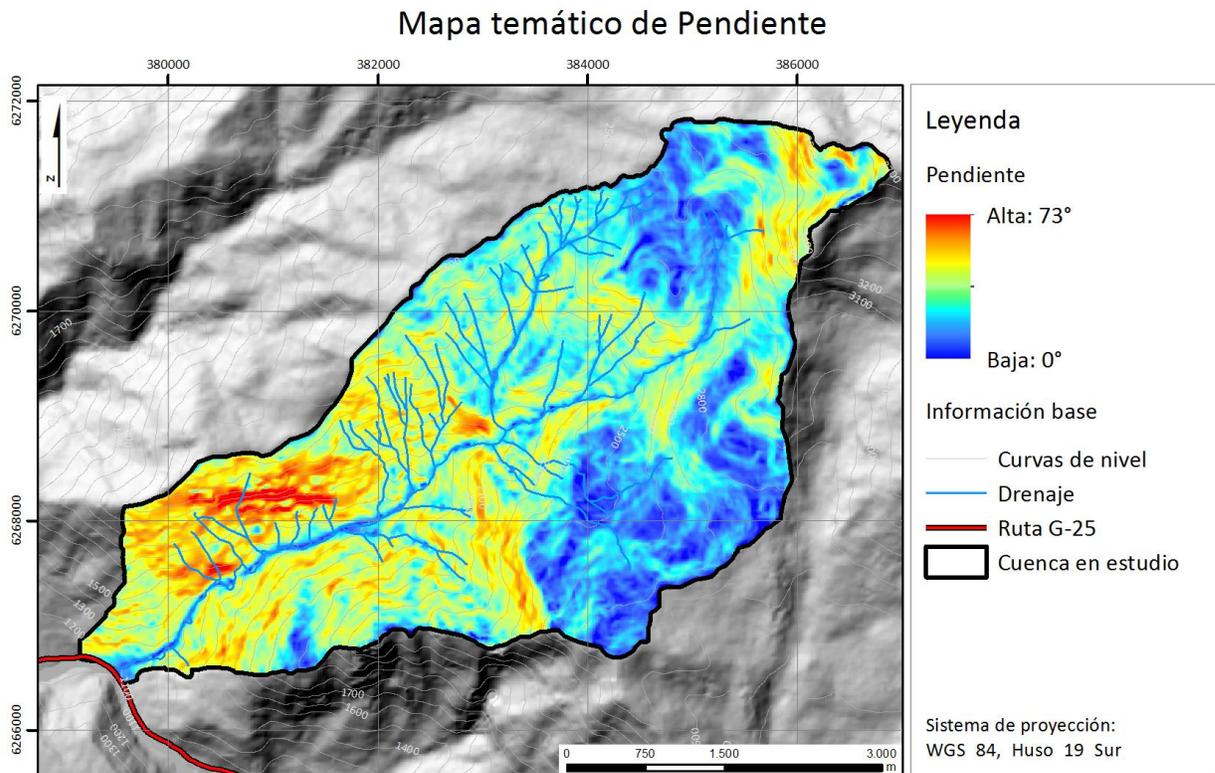


Figura 5.14. Mapa temático de Pendiente. Elaboración propia.

En cuanto a la Elevación y Crioclastia, mediante el análisis de imágenes satelitales y aéreas, se reconocen patrones en la calidad geotécnica de las rocas y depósitos de la zona de estudio sujetas a la elevación, esto es, a mayor elevación peor calidad. Esto último se ajusta bien con cotas de isoterma 0°C y líneas de nieve para distintas épocas del año en la zona en estudio. Por tanto, se decide utilizar estas cotas como criterios para clasificar las diferentes zonas. Gracias a esto, se identifica como agente desestabilizador a la crioclastia, entendida como un proceso que involucra hielo y deshielo.

Además, se infiere que el área expuesta en época estival es más favorable que la expuesta en invierno, a ser afectada por crioclastia y, por tanto, condicionar la generación de flujos de detritos. Su clasificación y justificación se muestra en la Tabla 5.7, mientras que en el Figura 5.15, se muestra el mapa temático asociado.

Tabla 5.7. Clasificación y justificación del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.

Factor	Rango		Justificación
	Exposición	Altitud	
Elevación y Crioclastia	Baja	≤ 1500 m s.n.m.	Elevación por debajo del valor mínimo de isoterma cero definidos por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno. De esto se interpreta que la zona ha estado muy poco expuesta a procesos de hielo y deshielo, eventualmente en época invernal.
	Media baja	1500-2300 m s.n.m.	Elevación entre valor mínimo de isoterma cero definidos por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno y la línea de nieve típica en invierno (Garreaud, 2013). De esto se interpreta que esta zona ha estado expuesta a procesos de hielo y deshielo durante el invierno, pero en general, en esta época no ha estado cubierta de nieve.
	Media alta	2300-2900 m s.n.m.	Elevación entre la línea de nieve típica en invierno (Garreaud, 2013) y por debajo del valor máximo de isoterma 0°C definidos por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno. De esto se interpreta que esta zona ha estado expuesta a procesos de hielo y deshielo durante el invierno y, además, ha sido afectada por procesos nivales en esta época.
	Alta	2900-4500 m s.n.m.	Elevación entre el valor máximo de isoterma cero definidos por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno y por debajo del valor promedio de isoterma 0°C de los eventos estudiados durante tormentas de verano. De esto se interpreta que esta zona ha estado fuertemente expuesta a procesos de hielo y deshielo durante el invierno y ha sido afectada por procesos nivales en época invernal.
	Muy Alta	≥ 4500 m s.n.m.	Elevación sobre el valor promedio de isoterma cero de los eventos estudiados durante tormentas de verano, por tanto, es una zona que siempre ha estado expuesta a procesos de hielo y deshielo y también, ha sido posiblemente fuertemente afectada por procesos nivales. En la cuenca estudiada, no existen zonas en este rango.

Mapa temático de Elevación y Crioclastia

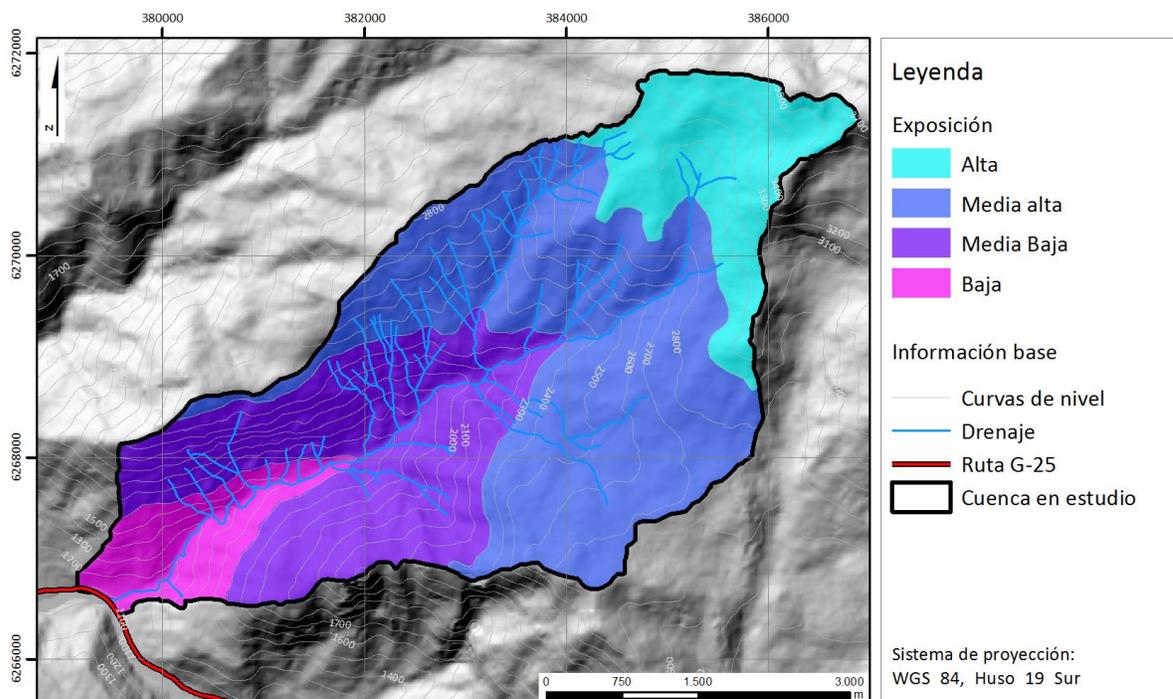


Figura 5.15. Mapa temático de Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.

Para el factor Antecedentes, a partir del análisis de imágenes aéreas y satelitales, trabajos previos y en terreno (Anexo IV), se realiza una clasificación en base a la activación de cada subcuenca (ver Tabla 5.8).

Tabla 5.8. Clasificación y justificación del factor de Antecedentes. Elaboración propia.

Factor	Activación de subcuenca	Justificación
Antecedentes	Importante	Presenta importante activación de flujos durante los eventos de 2013 y 2017, respectivamente.
	Regular	Presenta importante activación en al menos uno de los dos eventos estudiados. También, si en ambos eventos tuvieron una activación regular.
	Poco importante	Presenta activación poco importante en general, considerando los dos eventos estudiados.

Cabe destacar que, una activación importante de un evento se entiende como aquella que da forma a la masa principal de un flujo. Por ejemplo, para el evento del 25 de febrero de 2017, el flujo se generó en las dos subcuencas de mayor altitud (ver Figura 5.6), por tanto, se les atribuye una activación importante a ambas subcuencas.

Por otra parte, una activación regular se refiere a la activación de quebradas laterales menores que alimentan el flujo principal de un evento. Mientras que el término poco importante

de un evento se asocia con zonas de generación de menor envergadura en comparación con una regular. En la Figura 5.16, se muestra el mapa temático asociado a este factor.

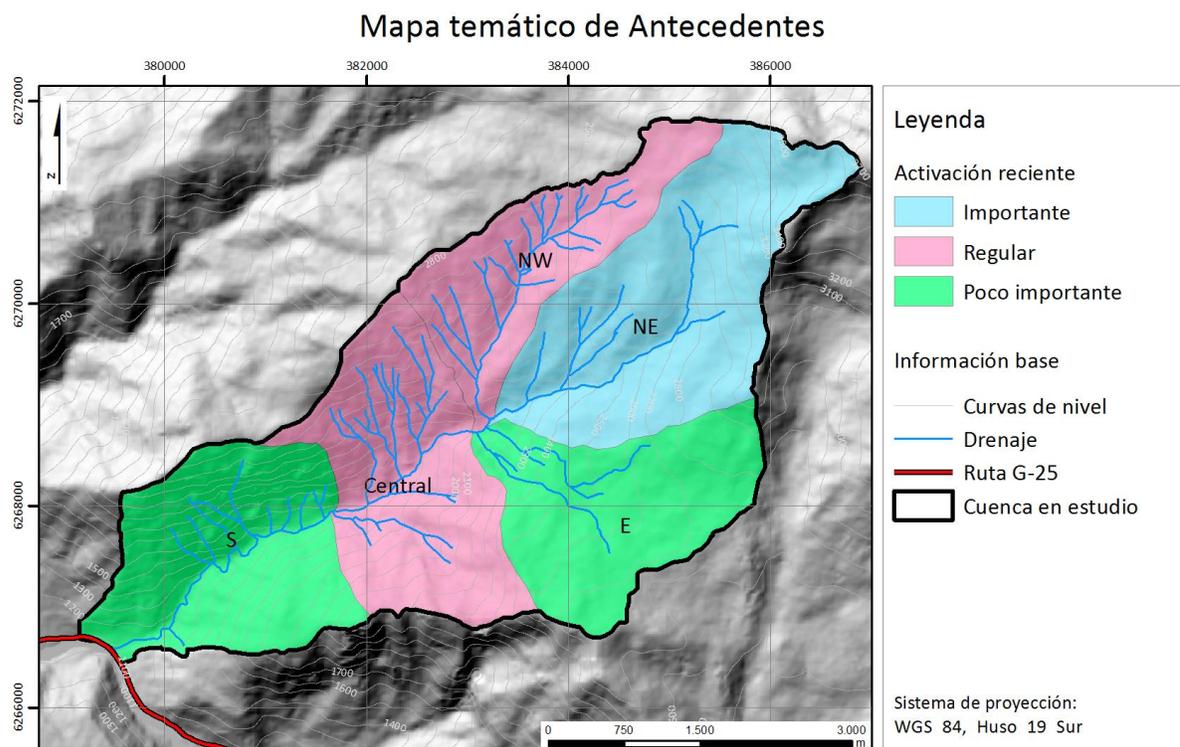


Figura 5.16. Mapa temático de Antecedentes por subcuenca. Las etiquetas corresponden al nombre de cada subcuenca. Elaboración propia.

Por otra parte, la Curvatura da cuenta de las zonas que tienden a acumular material removible. En este trabajo se utiliza la curvatura de superficie, mientras que la curvatura de perfil, se descarta dado que no aporta más información sobre la acumulación de material. La Tabla 5.9 muestra su clasificación y justificación, mientras que el mapa temático se muestra en la Figura 5.17.

Tabla 5.9. Clasificación y justificación del factor Curvatura. Elaboración propia.

Factor	Superficie	Rango	Justificación
Curvatura	Cóncava	$<-0,1$	Para este factor, se utiliza la herramienta curvatura de <i>ArcGIS</i> , la cual, calcula el valor de la segunda derivada de la superficie de entrada, celda por celda. Para cada una de estas, una transformación polinómica de cuarto orden se ajusta a una superficie compuesta por una ventana de 3x3 (<i>ArcGIS</i> , 2017). Se justifica su implementación en este estudio, dado que corresponde a un factor que influye y permite reconocer la convergencia y divergencia del flujo, es decir, su canalización.
	Plana	$-0,1$ a $0,1$	
	Convexa	$>0,1$	

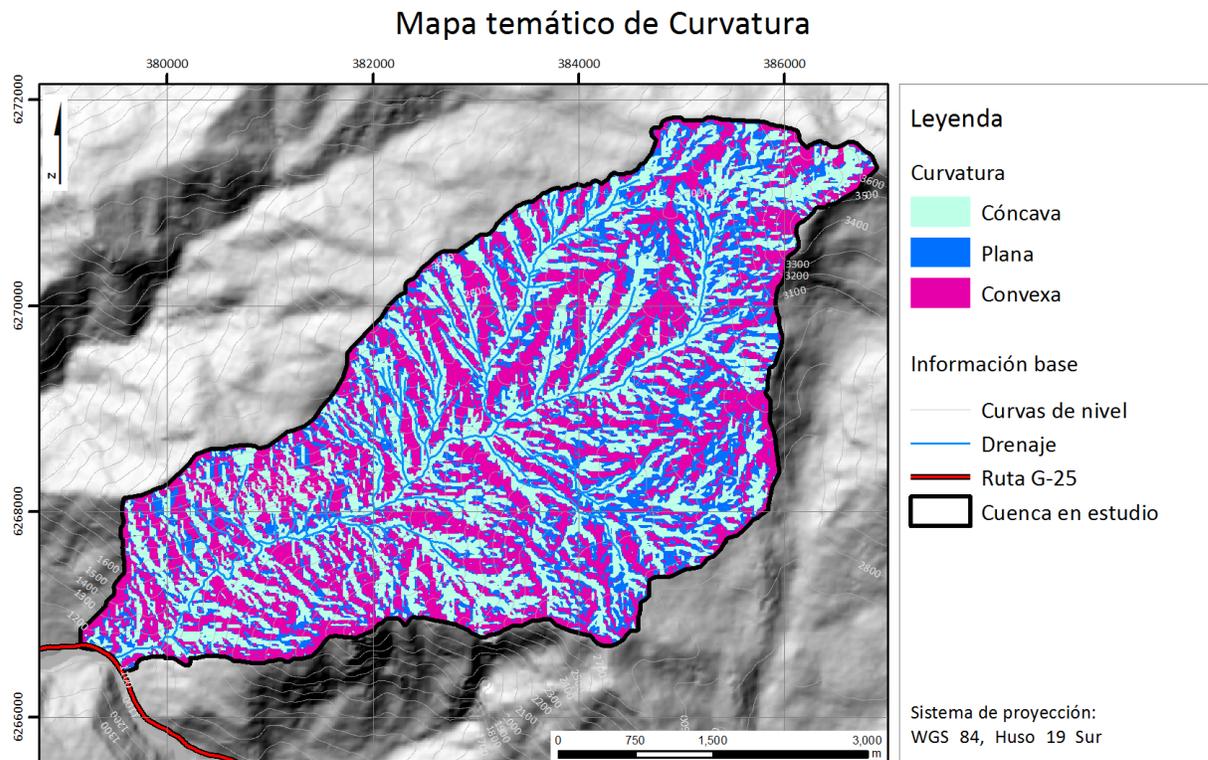


Figura 5.17. Mapa temático de Curvatura. Elaboración propia.

5.4 Reclasificación de mapas temáticos mediante AHP

Para reclasificar los mapas temáticos, se aplica la metodología propuesta en el Capítulo 3, *Metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos mediante AHP*, específicamente en el subcapítulo 3.5 *Reclasificación de mapas temáticos mediante AHP*.

En las Tablas 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14, 5.15 y 5.16; se exponen las comparaciones a pares entre los atributos de cada factor condicionante, en base a la susceptibilidad de generar flujos de detritos. Mientras que sus representaciones cartográficas se muestran en las Figuras 5.18, 5.19, 5.20, 5.21, 5.22 y 5.23. Además, a modo de comparación, en ellas se incluyen sus respectivos mapas temáticos. Notar que para el factor pendiente se hacen comparaciones para morfologías aluviales y no aluviales, por separado, pero luego se calcula un IS_n en común.

En el Anexo VI se incluyen las justificaciones de los valores utilizados en las tablas de comparación a pares. En ellas se ejemplifica con el atributo que resulta de menor relevancia para cada uno de los factores condicionantes. Cabe destacar que para cada comparación a pares se obtiene un error de consistencia menor a 5% y, por tanto, el modelo es aceptable.

Tabla 5.10. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Geomorfología. Elaboración propia

Comparación a pares													
Atributo	LC	IF	ZA	VA	AA	TA	P	CD	D	MF	ML	CG	C
LC	1	1	1/5	1/4	4	4	1/2	1/4	1/4	1/2	1	1/4	3
IF	1	1	1/5	1/4	4	4	1/2	1/4	1/4	1/2	1	1/4	3
ZA	5	5	1	2	9	8	5	3	2	3	5	2	9
VA	4	4	1/2	1	9	5	4	2	2	3	5	2	8
AA	1/4	1/4	1/9	1/9	1	1	1/3	1/4	1/5	1/3	1/4	1/6	1
TA	1/4	1/4	1/8	1/5	1	1	1/3	1/6	1/8	1/4	1/4	1/7	1
P	2	2	1/5	1/4	3	3	1	2	1/4	1	2	1/3	4
CD	4	4	1/3	1/2	4	6	1/2	1	1/2	2	4	1/2	6
D	4	4	1/2	1/2	5	8	4	2	1	3	4	1/2	7
MF	2	2	1/3	1/3	3	4	1	1/2	1/3	1	1	1/3	2
ML	1	1	1/5	1/5	4	4	1/2	1/4	1/4	1	1	1/4	2
CG	4	4	1/2	1/2	6	7	3	2	2	3	4	1	9
C	1/3	1/3	1/9	1/8	1	1	1/4	1/6	1/7	1/2	1/2	1/9	1
Error	3%												
Peso	4%	4%	20%	16%	2%	2%	6%	9%	13%	5%	4%	14%	2%
IS_n	20%	20%	100%	80%	8%	8%	30%	45%	62%	26%	20%	68%	8%
AA: Abanico aluvial, C: Cima, CG: Circo glacial, CD: Cono de deyección, D: Deslizamiento, IF: Interfluvio, LC: Ladera de caída, MF: Morrena de fondo, ML: Morrena lateral, P: Pantano, TA: Terraza aluvial, VA: Vía aluvial y ZA: Zona de arranque.													

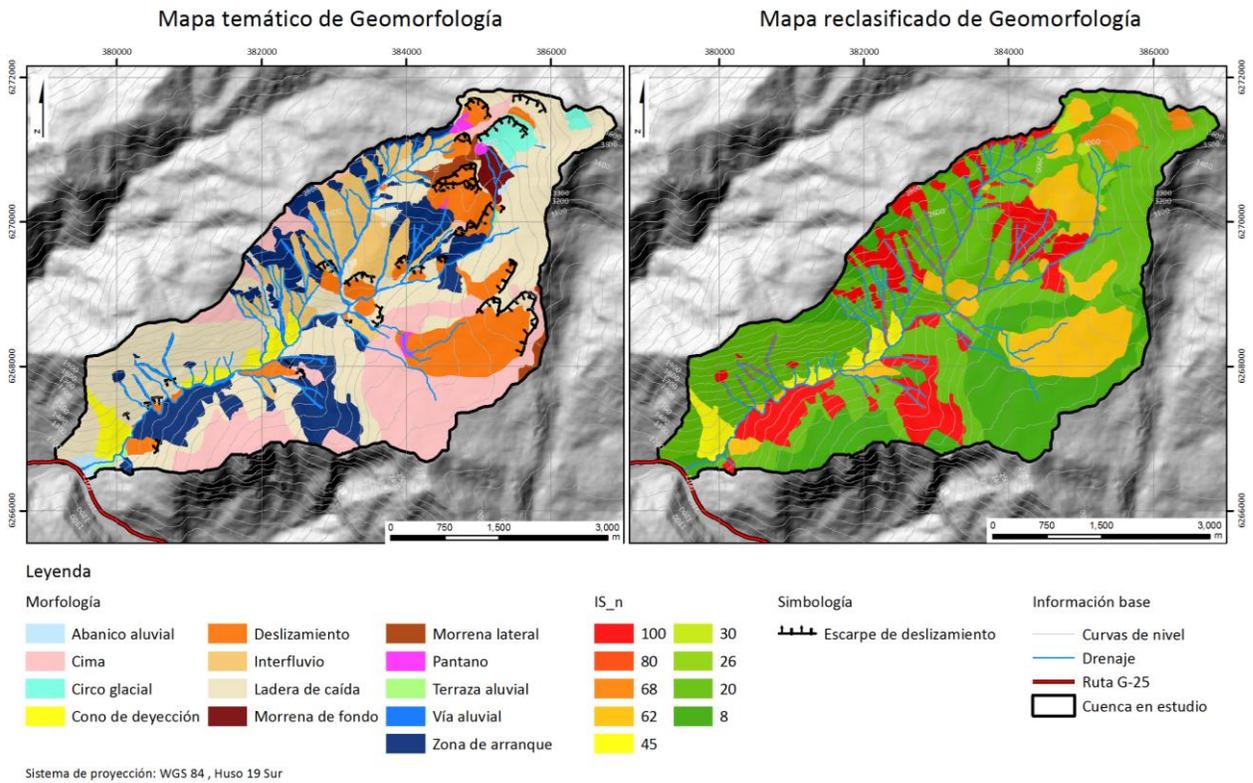


Figura 5.18. Mapas temático y reclasificado del factor Geomorfología. Elaboración propia.

Tabla 5.11. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Geología. Elaboración propia

Comparación a pares										
Atributo	Ah	Pp	Qal	Qc	Qd	Qg	Tf	Tiac	Tiaf	Tias
Ah	1	5	1/3	1/2	1/2	1/2	5	5	3	3
Pp	1/5	1	1/6	1/5	1/5	1/5	1	1	1/2	1/3
Qal	3	6	1	1	1	1	6	6	5	4
Qc	2	5	1	1	1	1	5	5	4	4
Qd	2	5	1	1	1	1	5	5	4	4
Qg	2	5	1	1	1	1	5	5	4	4
Tf	1/5	1	1/6	1/5	1/5	1/5	1	1	1/2	1/2
Tiac	1/5	1	1/6	1/5	1/5	1/5	1	1	1/2	1/2
Tiaf	1/3	2	1/5	1/4	1/4	1/4	2	2	1	1/2
Tias	1/3	3	1/4	1/4	1/4	1/4	2	2	2	1
Error	2%									
Peso	11%	3%	19%	17%	17%	17%	3%	3%	4%	5%
IS_n	59%	15%	100%	89%	89%	89%	15%	15%	23%	29%

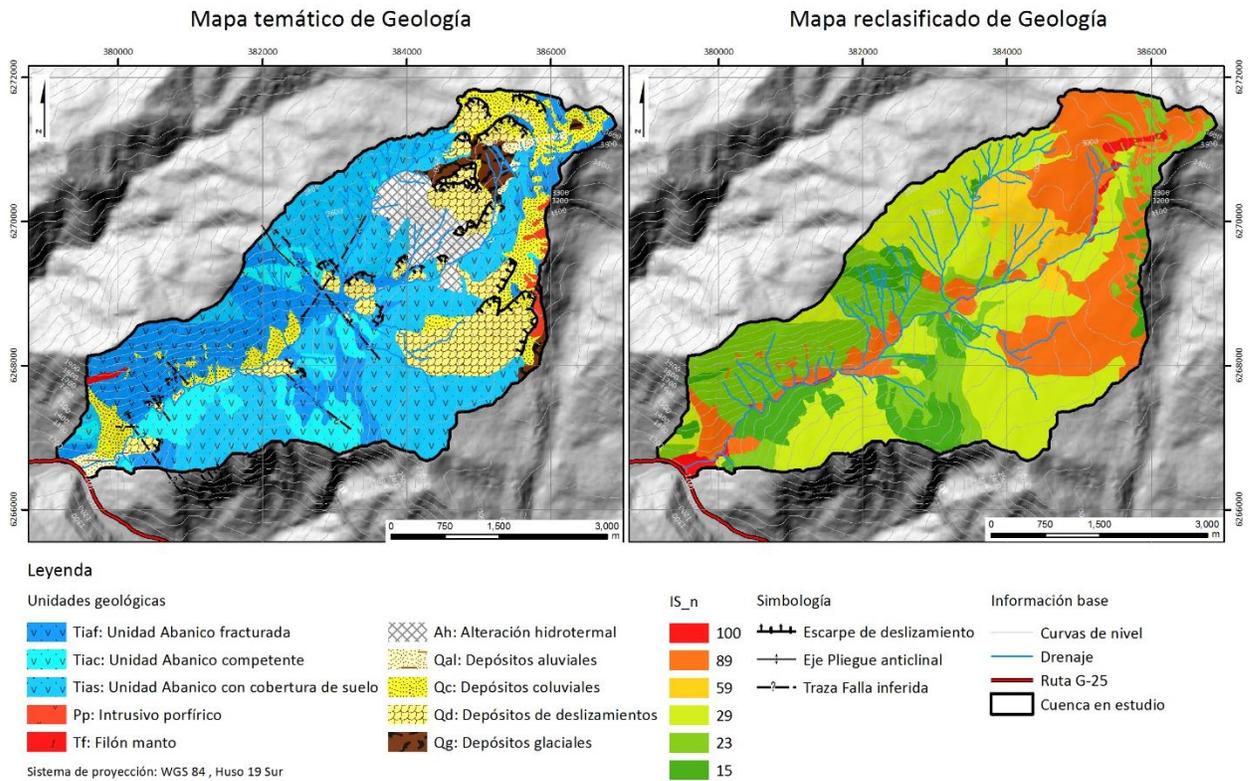


Figura 5.19. Mapas temático y reclasificado del factor Geología. Elaboración propia.

Tabla 5.12. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Pendiente de morfologías aluviales. Elaboración propia.

Comparación a pares							
Atributo	>45°	35-45°	25-35°	15-25°	10-15°	5-10°	<5°
>45°	1	1 1/6	1 2/5	1 3/4	2 1/3	3 1/2	7
35-45°	6/7	1	1 1/5	1 1/2	2	3	6
25-35°	5/7	5/6	1	1 1/4	1 2/3	2 1/2	5
15-25°	4/7	2/3	4/5	1	1 1/3	2	4
10-15°	3/7	1/2	3/5	3/4	1	1 1/2	3
5-10°	2/7	1/3	2/5	1/2	2/3	1	2
<5°	1/7	1/6	1/5	1/4	1/3	1/2	1
Error	0%						
Peso	25%	21%	18%	14%	11%	7%	4%
IS_n	100%	86%	71%	57%	43%	29%	14%

Tabla 5.13. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Pendiente de morfología predominantemente no aluviales. Elaboración propia.

Comparación a pares					
Atributo	>40°	30-40°	20-30°	10-20°	<10°
>40°	1	1 1/4	1 2/3	2 1/2	5
30-40°	4/5	1	1 1/3	2	4
20-30°	3/5	3/4	1	1 1/2	3
10-20°	2/5	1/2	2/3	1	2
<10°	1/5	1/4	1/3	1/2	1
Error	0%				
Peso	33%	27%	20%	13%	7%
IS_n	71%	57%	43%	29%	14%

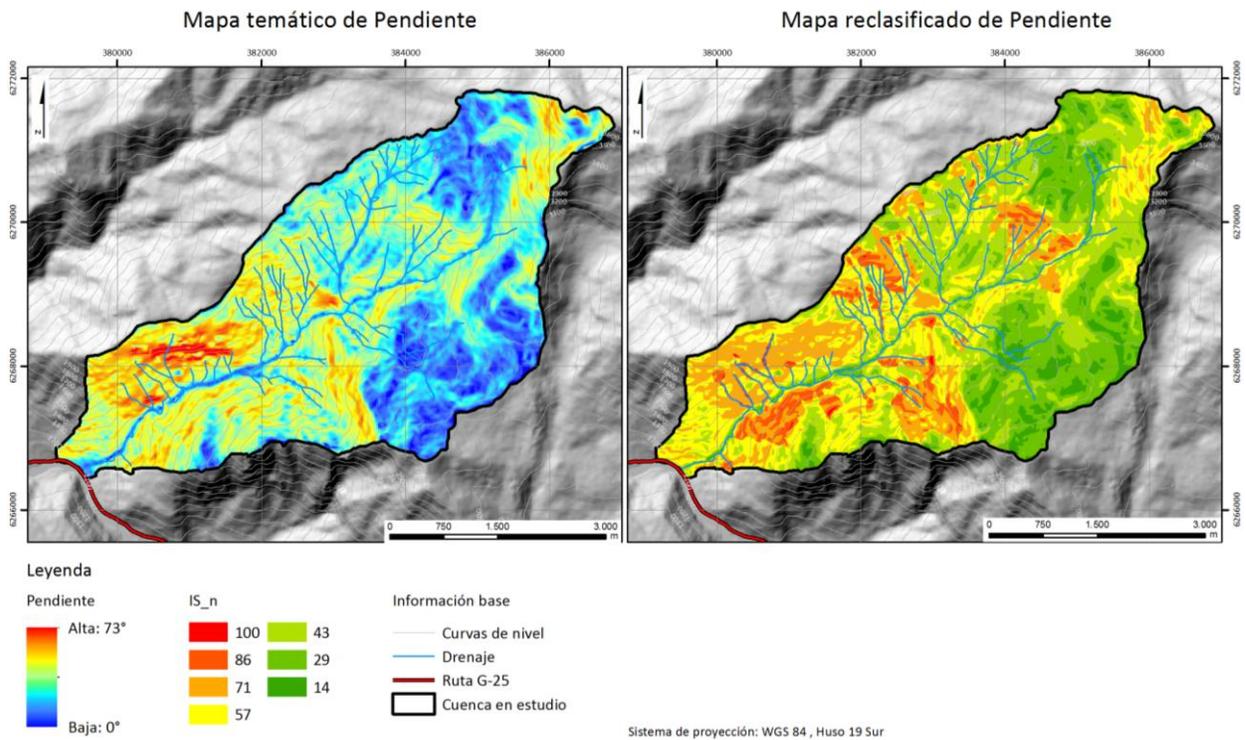


Figura 5.20. Mapas temático y reclasificado del factor Pendiente. Elaboración propia.

Tabla 5.14. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.

Comparación a pares				
Atributo	Alta	Media alta	Media baja	Baja
Alta	1	1 1/3	2	4
Media alta	3/4	1	1 1/2	3
Media baja	1/2	2/3	1	2
Baja	1/4	1/3	1/2	1
Error	0%			
Peso	40%	30%	20%	10%
IS_n	100%	75%	50%	25%

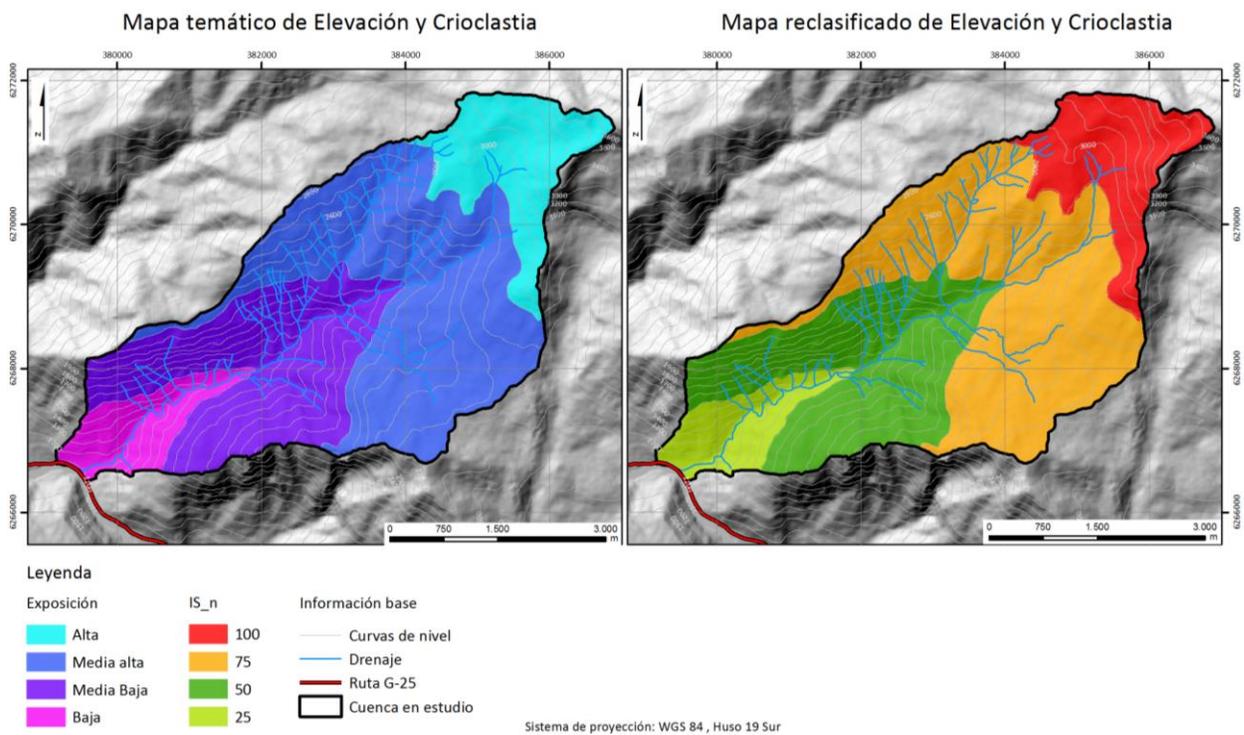


Figura 5.21. Mapas temático y reclasificado del factor Elevación y Crioclastia. Elaboración propia.

Tabla 5.15. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Antecedentes por subcuenca. Elaboración propia.

Comparación a pares			
Atributo	Importante	Regular	Poco importante
Importante	1	2	4
Regular	1/2	1	2
Poco importante	1/4	1/2	1
Error	0%		
Peso	57%	29%	14%
IS_n	100%	50%	25%

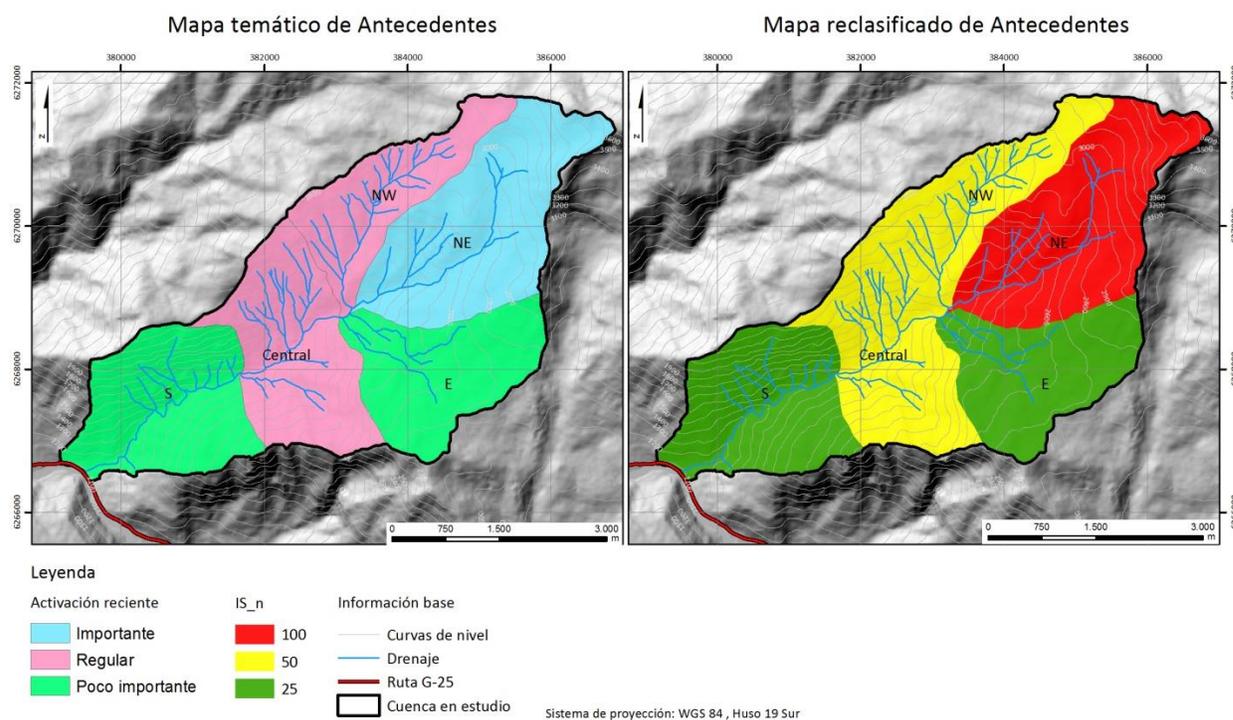


Figura 5.22. Mapas temático y reclasificado del factor Antecedentes. Elaboración propia.

Tabla 5.16. Comparación a pares, error de consistencia y peso asociado a cada atributo del factor Curvatura. Elaboración propia.

Comparación a pares			
Atributo	Cóncavo	Plano	Convexo
Cóncavo	1	3	9
Plano	1/3	1	4
Convexo	1/9	1/4	1
Error	1%		
Peso	68%	25%	7%
IS_n	100%	37%	10%

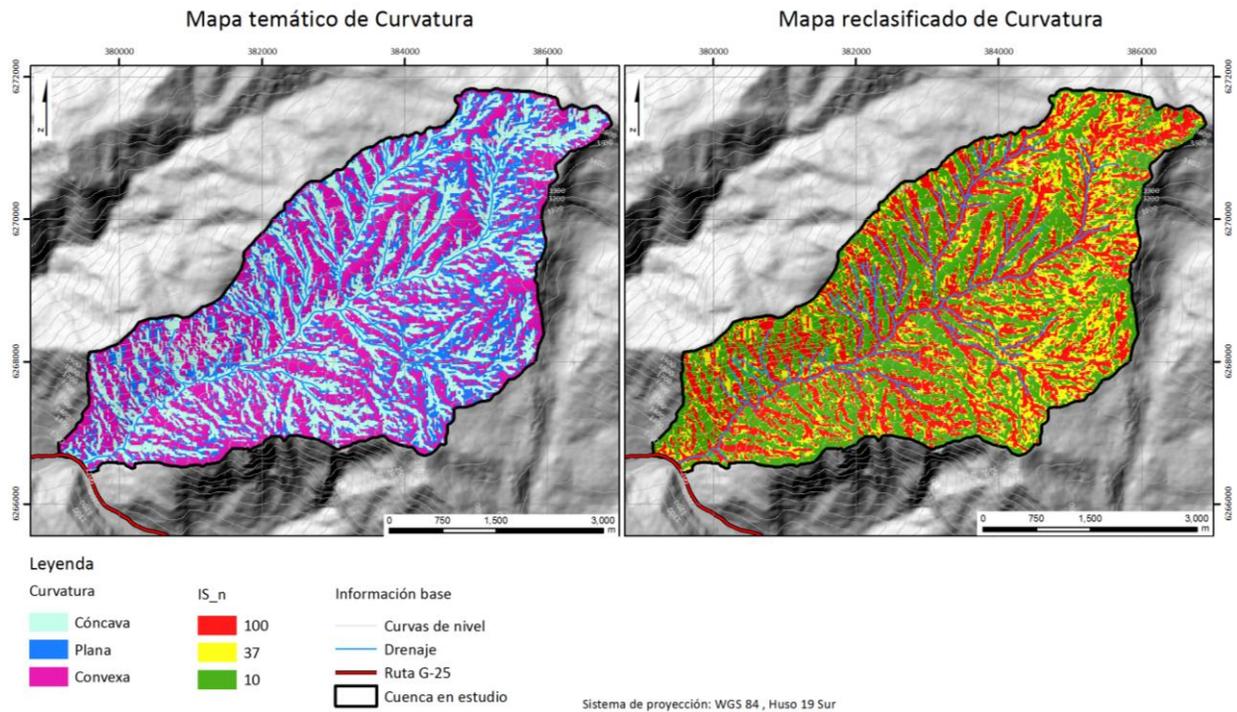


Figura 5.23. Mapas temático y reclasificado de Curvatura. Elaboración propia.

5.5 Elaboración de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos

Para la elaboración del mapa de susceptibilidad de flujos de detritos, se aplica la metodología propuesta en el Capítulo 3, específicamente en el subcapítulo 3.6 *Elaboración de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos*. En la Figura 5.24 se muestra la distribución de ponderación de los factores condicionantes tras la aplicación de la comparación a pares (ver Tabla 5.17). En ella destacan la Pendiente, la Geomorfología y la Geología, como los factores más relevantes.

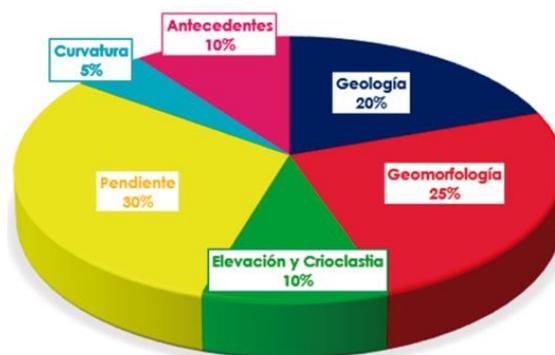


Figura 5.24. Distribución de ponderación de los factores condicionantes para la susceptibilidad de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.

La justificación de cada uno de los valores utilizados en la comparación a pares (ver Tabla 5.17), se muestran en el Anexo VI. Además, en ésta se observa un error de consistencia menor a 5%, es decir, el modelo es aceptable.

Tabla 5.17. Comparación a pares, error de consistencia y ponderación de cada factor condicionante. Elaboración propia.

Comparación a pares						
Factor	Geología	Geomorfología	Elevación y Crioclastia	Pendiente	Curvatura	Antecedentes
Geología	1	1	2	1/2	4	2
Geomorfología	1	1	4	1	4	2
Elevación y Crioclastia	1/2	1/4	1	1/3	3	1
Pendiente	2	1	3	1	6	3
Curvatura	1/4	1/4	1/3	1/6	1	1/2
Antecedentes	1/2	1/2	1	1/3	2	1
Error de consistencia	2%					
Ponderación	20%	25%	10%	30%	5%	10%

Al realizar el álgebra de mapas utilizando los ponderadores mostrados en la Figura 5.27, se obtiene un mapa con IS continuo. El cual al ser reclasificado mediante cortes naturales de Jenks, se zonifica en base a rangos de IS de 19-40, 40-56 y 56-95 aproximadamente, ajustándose bien a los resultados esperados (ver Figura 5.25).

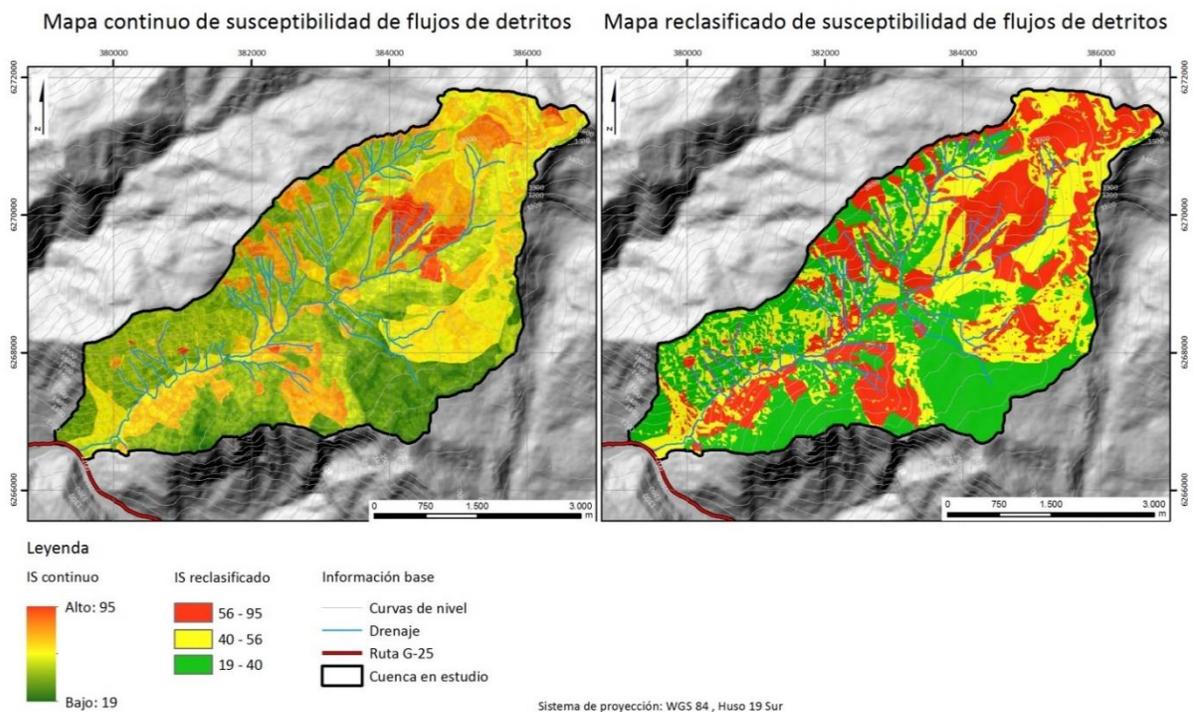


Figura 5.25. Mapas continuo y reclasificado de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.

Este último, se vectoriza y suaviza, hasta obtener el mapa final que se muestra en la Figura 5.26, cuya validación se muestra en el subcapítulo siguiente.

Mapa de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso

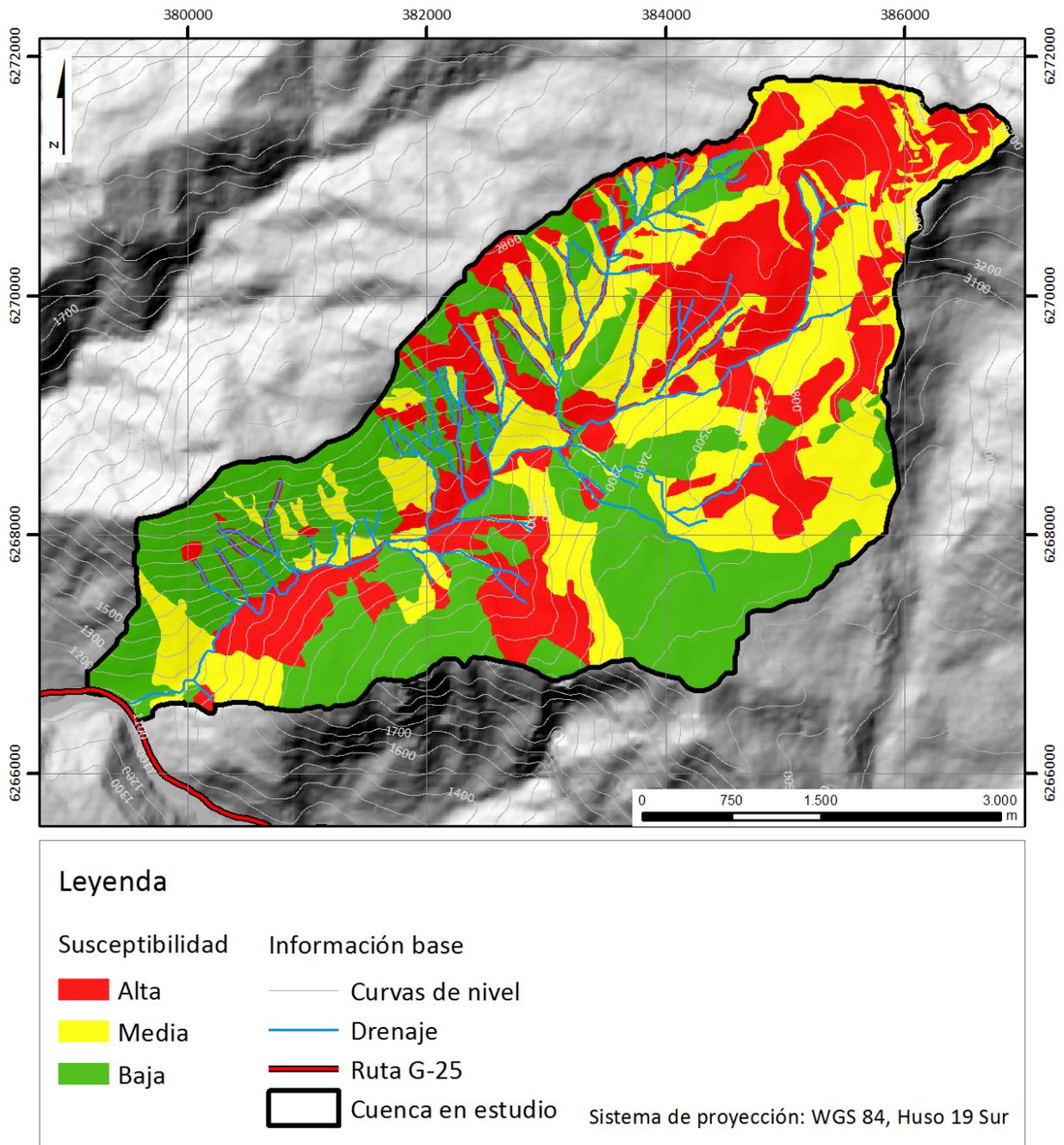


Figura 5.26. Mapa final de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Escala 1:20.000. Elaboración propia.

5.6 Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos

Para la validación del mapa de susceptibilidad de flujos de detritos, se aplica la metodología expuesta en el Capítulo 3, específicamente en el subcapítulo 3.7 *Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos*.

Al cruzar el catastro de puntos de activaciones recientes de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso, con el mapa final de susceptibilidad del mismo (ver Figura 5.26), se obtiene la distribución que se muestra en la Figura 5.27. De ésta, se desprende que el 77, 18 y 5%, de los puntos del catastro se distribuyen en zonas de alta, media y baja susceptibilidad, respectivamente (ver Figura 5.27). Cumpliéndose entonces la relación propuesta de $2 \times S_{\text{alta}} \geq 3 \times S_{\text{media}} \geq 12 \times S_{\text{baja}}$, por lo que se valida el mapa final de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca.

Validación de mapa de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso mediante la distribución del catastro

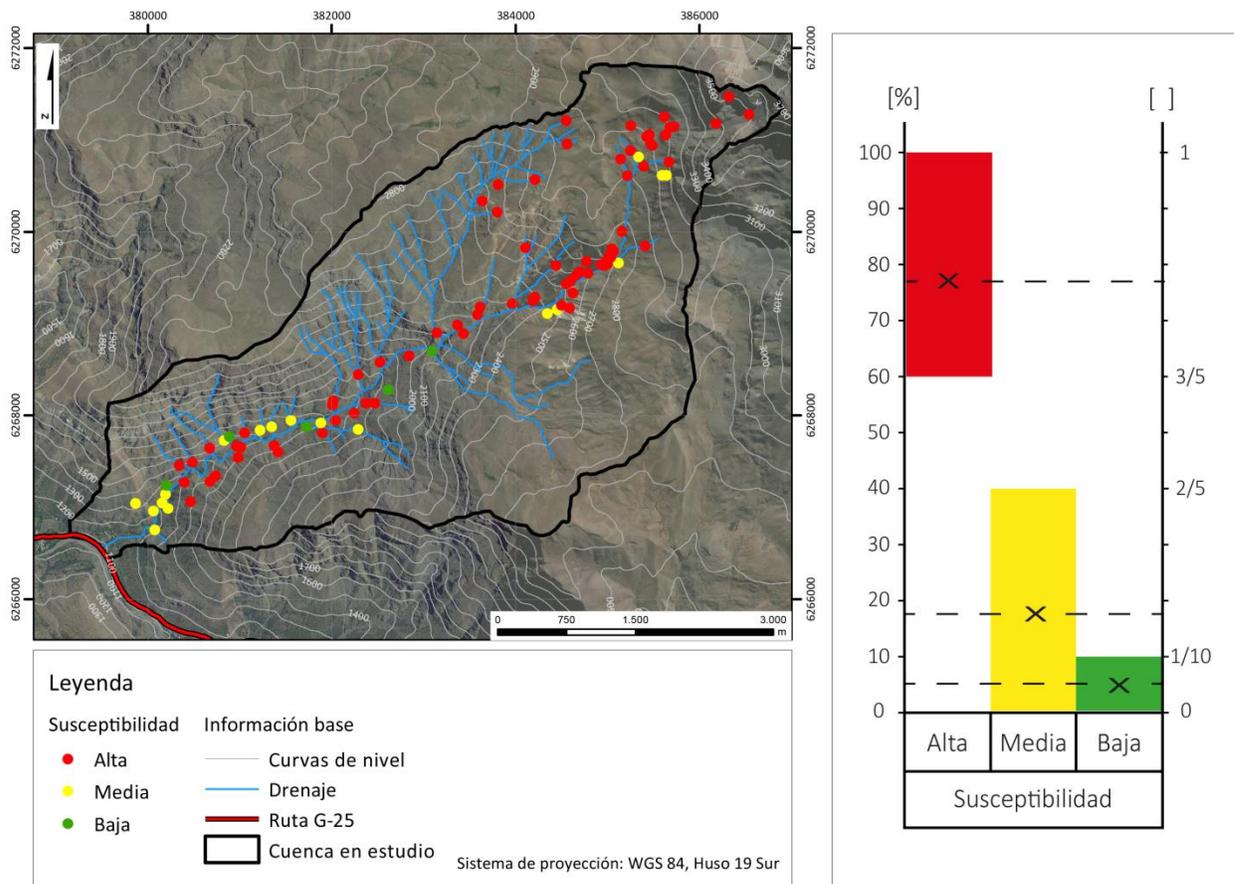


Figura 5.27. Izquierda: distribución del catastro al superponerlo sobre el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Derecha: valores dentro de los campos que validan el mapa anterior. Cada “x” representa porcentaje de puntos en cada zona de susceptibilidad. Elaboración propia.

6 Amenaza de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso

6.1 Introducción

Con el objetivo de generar un mapa para evaluar la amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso, en este capítulo se aplica la metodología propuesta. Se selecciona el evento ocurrido el 25 de febrero de 2017 para calibrar los parámetros de resistencia, dado que al ser un flujo de detritos reciente y de magnitud significativa (10^4 - 10^5 m³), se considera adecuado para aplicar la metodología que permite estimar parámetros físicos de un flujo de detritos a partir de trabajo en terreno y gabinete (MPF).

6.2 DEM corregido a partir de GPS diferencial

Para este trabajo se dispone de un DEM de 10 m de resolución espacial (DEM original). Tras la revisión de éste, se tiene que el drenaje generado a partir del mismo no coincide con la red mapeada en el mapa base (ver Figura 6.1). Mediante los puntos de elevación levantados con la ayuda de la Unidad de Geofísica del SERNAGEOMIN, utilizando un GPS diferencial GNSS, se corrige la topografía de la zona de interés y se ajusta la resolución a 5 m (ver Figura 6.1).

Notar que los puntos corregidos que están lejos de los puntos de elevación tomados en terreno pueden presentar error, ya que fueron complementados con el DEM original.

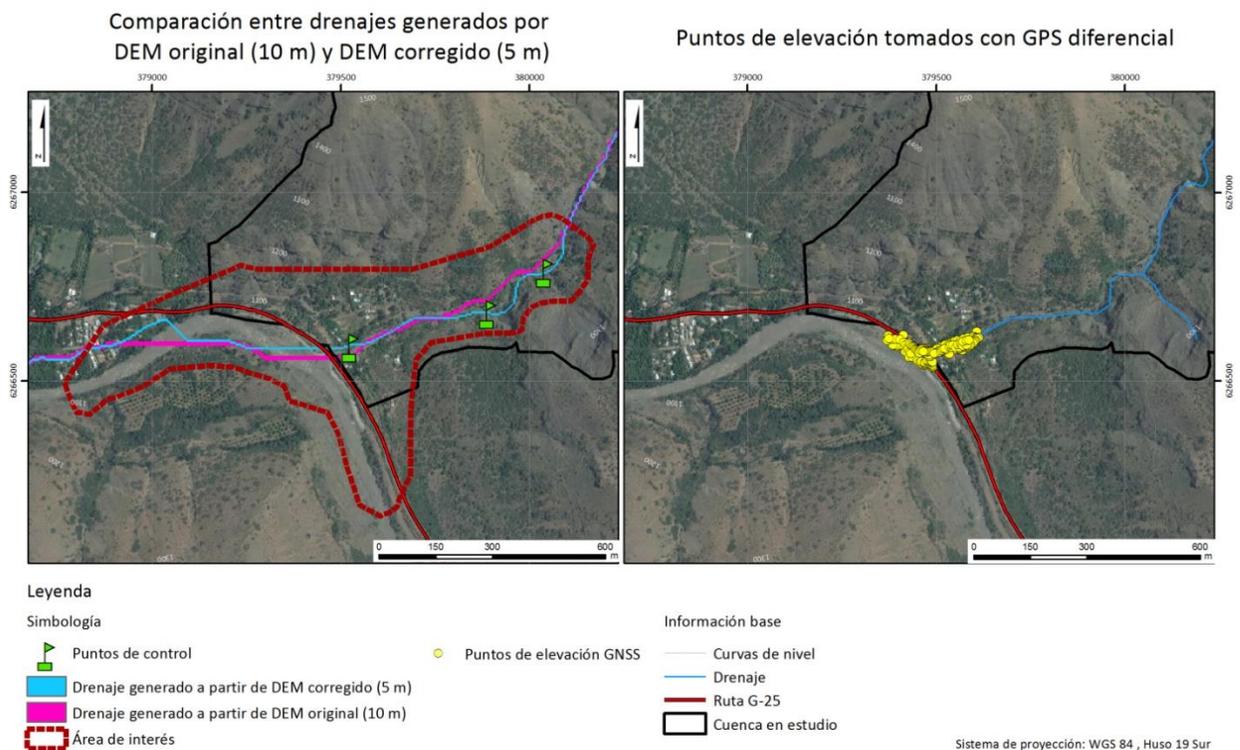


Figura 6.1. a) Comparación entre drenajes generados por DEM original (10 m) y DEM corregido (5 m) y, b) Puntos de elevación tomados con GPS diferencial. Elaboración propia.

6.3 Estimación de parámetros físicos del flujo de detritos

En este subcapítulo se muestran los datos obtenidos a partir de la aplicación de MPF en la cuenca del estero San Alfonso, para el evento ocurrido el 25 de febrero de 2017. Estos son:

- ✓ Trayectoria del flujo de detritos
- ✓ Puntos de control
- ✓ Volumen del flujo de detritos
- ✓ Densidad del flujo de detritos
- ✓ Hidrograma del flujo de detritos

6.3.1 Trayectoria del flujo de detritos

La trayectoria o paso del flujo de detritos fue mapeado a partir de imágenes aéreas y satelitales (pre y post evento) y observaciones en terreno. Este evento se generó en las cabeceras de las subcuencas de mayor altitud, principalmente en la subcuenca NW (ver Figura 5.16).

En el subcapítulo 5.1, *Descripción del área de estudio*, específicamente en el apartado 5.1.2.3 *Evento del 25 de febrero de 2017*, se muestra el paso de flujo de detritos para el evento en estudio, diferenciando procesos dominantes de erosión, transporte y depositación (ver Figura 5.6). Una vez generado este evento, descendió corriente abajo a través de las vías aluviales principales hasta desembocar y formar un abanico en el río Maipo. Con este último, y estimaciones de espesores se calculó el volumen de material depositado por este evento, en 46.000 m³ aproximadamente.

6.3.2 Puntos de control, volumen, densidad e hidrograma del flujo de detritos

Para determinar los puntos de control para la calibración del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017, se efectuó una visita a terreno, donde se realizaron mediciones a lo largo de su trayectoria, que comprenden mediciones locales de alturas, ángulos de peralte y áreas transversales (Terreno N°2, Anexo IV).

Se determinó que tres puntos eran adecuados para realizar mediciones que permitan calcular velocidades (V_c) y descargas máximas (Q_p), por lo que corresponden a los puntos de control utilizados en la calibración. Estos son D2_04, D2_05 y D2_09 (Terreno N°2, Anexo IV). La ubicación de cada punto de control se muestra en la Figura 6.2, que incluye las velocidades, descargas y alturas máximas para cada uno de ellos.

Puntos de control del evento del 25 de febrero de 2017

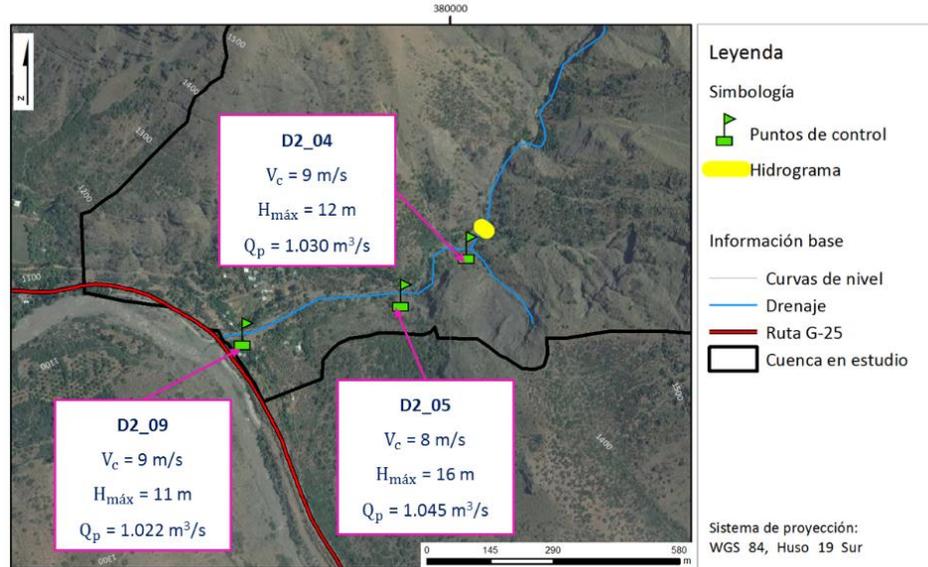


Figura 6.2. Puntos de control del evento del 25 de febrero de 2017 y localización de hidrograma. Elaboración propia.

Basado en Pierson (2005), a partir de la revisión de fotografías del evento tomadas por Marín *et al.* (2017) y observaciones de campo, se deduce que el evento del 25 de febrero de 2017 posee características mixtas entre un flujo de detritos y un flujo hiperconcentrado (Evidencias que permiten distinguir el tipo de flujo del evento del 25 de febrero de 2017, Anexo IV).

Estas observaciones se corresponden con los resultados obtenidos mediante las relaciones empíricas de Mizuyama *et al.* (1992) y Bovis & Jakob (1999) (ver Tabla 4.2), ya que en cada punto de control donde son aplicadas, se obtienen volúmenes de flujo (∇_t) que junto al volumen de sólidos (∇_s), dan cuenta de concentraciones volumétricas (C_v) de 48 y 57%, para la primera y la segunda relación, respectivamente (ver Tabla 6.1).

Tabla 6.1. Aplicación de relaciones empíricas para la estimación de volumen y concentración volumétrica del flujo. Elaboración propia.

Punto de control	C_v [%]	∇_s [m^3]	∇_t [m^3]	Mizuyama <i>et al.</i> (1992) Q_p [m^3/s]	Bovis & Jakob (1999) Q_p [m^3/s]
D2_04 y D2_05	48	46.000	95.833	1.037	1.217
	57	46.000	80.702	907	1.043
D2_09	48	45.300	94.375	1.025	1.201
	57	45.300	79.474	896	1.029

Con las C_v calculadas y considerando la densidad de la parte sólida (ρ_s) y líquida (agua) del flujo, se calcula la densidad de la mezcla (ρ_t), obteniéndose 1.768 y 1.912 kg/m^3 para Mizuyama *et al.* (1992) y Bovis & Jakob (1999), respectivamente (ver Tabla 6.2)

Tabla 6.2. Estimación de densidad del flujo. Elaboración propia.

Autor	Fórmula	C_v [%]	ρ_s [kg/m ³]	ρ_t [kg/m ³]
Mizuyama <i>et al.</i> (1992)	$Q_p = 0,135 * V_t^{0,78}$	48	2.600	1.768
Bovis & Jakob (1999)	$Q_p = 0,04 * V_t^{0,90}$	57	2.600	1.912

Para cada C_v calculada se construye un hidrograma de tres puntos (ver Figura 6.3), considerando para ambas, los datos del punto D2_04, porque es el punto de control más cercano a la localización de éste, es decir, al punto de medición D2_02 (ver Figura 6.2). Esto se justifica dado que en este tramo se mantiene una pendiente de canal (~8°), altura (~7 m) y confinamiento del flujo constante.

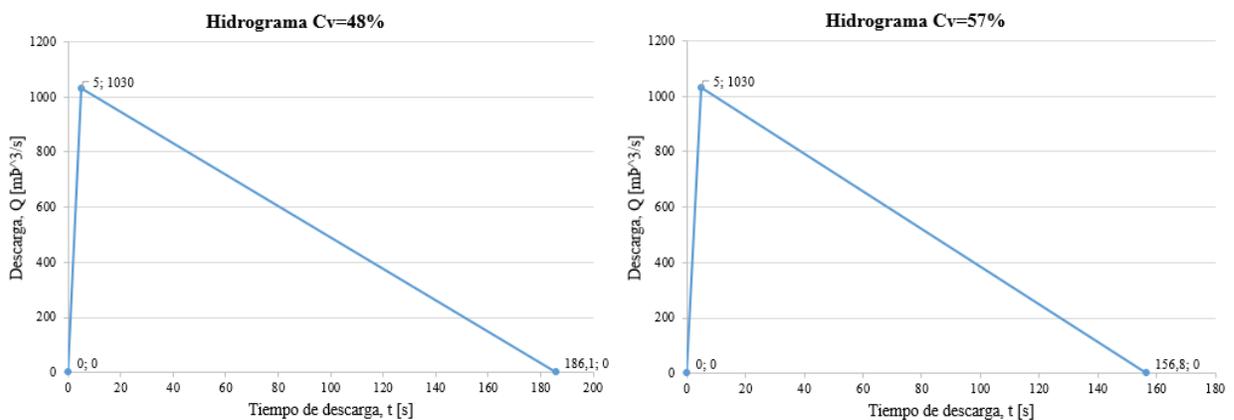


Figura 6.3. Hidrograma para una C_v de a) 48% y b) 57%. Elaboración propia.

6.4 Calibración de parámetros de resistencia

Tras la aplicación de MPF, se obtienen los datos necesarios para la calibración de los parámetros de resistencia del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017 (ver Tabla 6.3).

Tabla 6.3. Datos necesarios para la calibración de los parámetros de resistencia del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017. Elaboración propia.

Insumo	$C_v=48\%$	$C_v=57\%$
Trayectoria del flujo de detritos	Mapeado mediante imágenes aéreas y satelitales principalmente	
Puntos de control	Tres puntos con valores de altura y velocidad de flujo	
V_t	95.833 m ³	80.702 m ³
ρ_t	1.768 kg/m ³	1.912 kg/m ³
Hidrograma del flujo de detritos	Ver Figura 6.3	
DEM corregido	DEM de 10 m ajustado a uno de 5 m en el área de interés	

Con estos datos, se realizaron 31 simulaciones para diferentes valores de μ y ξ , considerando $C=0$ Pa. Esto último se justifica porque para las C_v propuestas, la concentración de finos en el flujo es $<10\%$, lo que implica que la dinámica de la mezcla está controlada por el contacto entre granos y no por el fluido intersticial, lo que indica que la tensión de fluencia (*yield stress*) tiende a cero. En la Tabla VII.1 del Anexo VII, se muestra un resumen para las diferentes simulaciones, en la cual se señala la razón de descarte de éstas, que en su mayoría corresponden al incumplimiento de la condición de detención, seguido por la velocidad y altura de flujo.

La simulación que reproduce mejor el evento conocido tiene $C_v=48\%$ y sus parámetros de resistencia asociados son: $\mu=0,08$, $\xi=600$ m²/s, y $C=0$ Pa. La Tabla 6.4 muestra el control de los parámetros de esta simulación con su error asociado. En el Anexo VII se muestra cada representación cartográfica de estos parámetros.

Tabla 6.4. Control de parámetros utilizados para la calibración del evento ocurrido el 25 de febrero de 2017 evento, para $C_v=48\%$, $\mu=0,08$, $\xi=600$ m²/s y $C=0$ Pa. Elaboración propia.

Parámetros de ajuste	Evento conocido	Modelo calibrado $C_v=48\%$	Error
Velocidad del flujo de detritos en punto de control D2_04	9 m/s	10 m/s	+10%
Velocidad del flujo de detritos en punto de control D2_05	8 m/s	12 m/s	+33%
Velocidad del flujo de detritos en punto de control D2_09	9 m/s	9 m/s	0 %
Altura máxima del flujo de detritos en punto de control D2_04	12 m	10 m	-17%
Altura máxima del flujo de detritos en punto de control D2_05	16 m	5 m	-69%
Altura máxima del flujo de detritos en punto de control D2_09	11 m	10 m	-9%
Área de alcance del flujo de detritos en su abanico	22.000 m ²	28.000 m ²	+27%
Altura máxima de depósito en abanico del flujo	3 m	3 m	0%
Alcance total del flujo de detritos	10,0 km	10,1 km	+1%
Promedio absoluto total			18%
Promedio absoluto sin considerar punto de control D2_05			9%

El mayor error en los valores de altura y velocidad de flujo se obtienen en el punto de control D2_05. Este sector corresponde a una curva muy cerrada (Punto D1_05, Anexo IV) que no es reconocida por el DEM corregido, por tanto, se incluye el error promedio absoluto del modelo sin considerar este punto de control. Notar que el error asociado se reduce a la mitad y es menor al 10% sugerido para validar una calibración.

6.5 Elaboración del mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso

Los criterios de zonificación para elaborar el mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso, están determinados por el abanico y las vías aluviales de la cuenca, por los eventos ocurridos el 21 de enero de 2013 y 25 de febrero de 2017 y, por un evento simulado con el programa *RAMMS-debris flow* (ver Tabla 6.5).

Tabla 6.5. Criterios de zonificación de grados de amenaza para la elaboración de mapa de amenaza de flujos de detritos para la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.

Grado de amenaza	Criterio de zonificación	Volumen de flujo [m ³]	Clase
Muy alto (MA)	Vías aluviales al interior de la cuenca, área de alcance de flujo generado el 21 de enero de 2013, cuyo volumen de flujo es menor, pero cercano, al límite de las Clases III y IV.	~10 ⁴	III
Alto (A)	Área de alcance de flujo generado el año 2017, cuyo volumen de flujo es menor, pero cercano, al límite de las Clases IV y V.	~10 ⁵	IV
Medio (M)	Área de alcance de un flujo simulado con <i>RAMMS-debris flow</i> , que posee las mismas características físicas del evento del 25 de febrero de 2017, cuyo volumen de flujo es menor, pero cercano, al límite de las Clases V y VI.	~10 ⁶	V
Bajo (B)	Área del abanico de la cuenca.	-	-

El flujo de detritos simulado define la zona del grado de amenaza medio. Este evento se simula como bloque liberado (*block release*) a partir de zonas de alta y media susceptibilidad, que disponen de material removible suficiente. Este material se asocia a depósitos aluviales, de deslizamientos, glaciales, coluviales y a zonas de alteración hidrotermal.

Las zonas de generación esperadas constan de una activación de centímetros de espesor y se ubican en las tres subcuencas de mayor altitud. Las áreas de liberación en bloque presentan alturas de flujo de 20 cm en zonas de alteración hidrotermal, 30 cm en depósitos de deslizamientos pequeños y depósitos aluviales y, 40 cm en grandes depósitos de deslizamientos. Lo que se traduce

en una activación de 10, 14 y 19 cm aproximadamente, del material removible proyectado en estas áreas, es decir, cerca del 10% de su volumen total.

En la Figura 6.4, se muestra la localización de las áreas de liberación y del alcance del evento simulado.

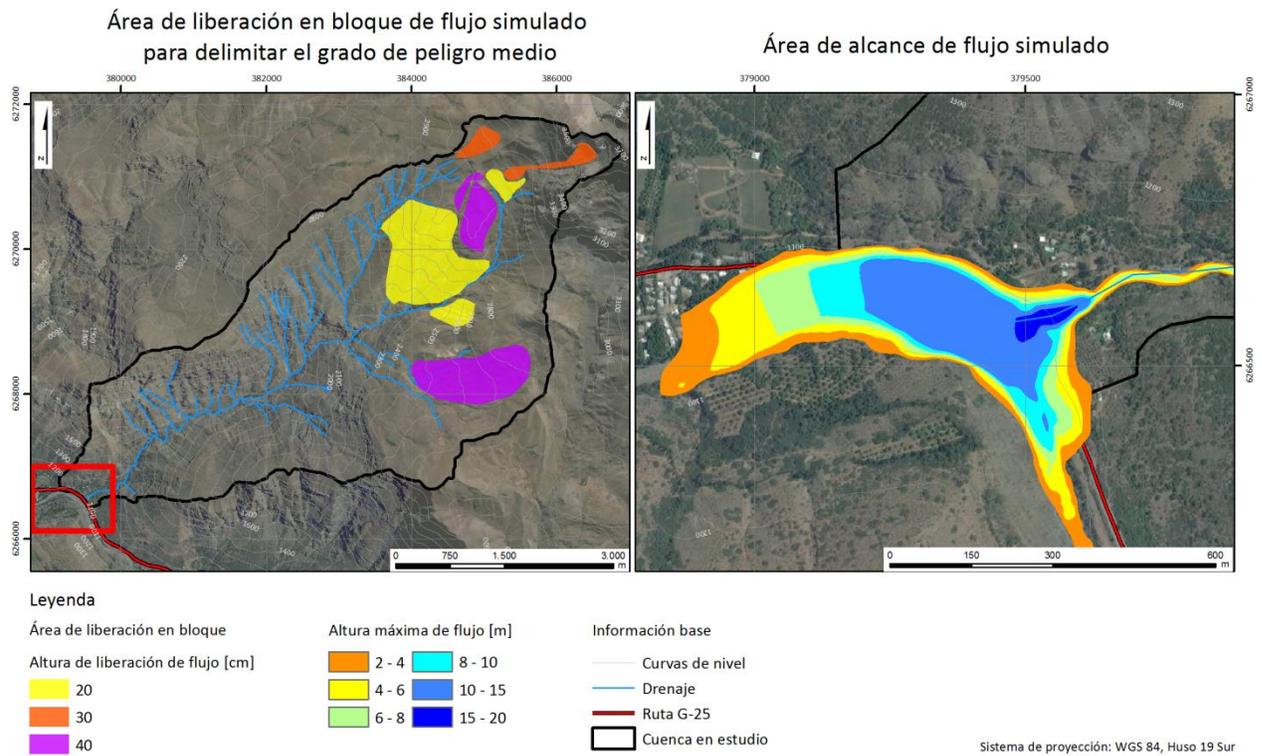
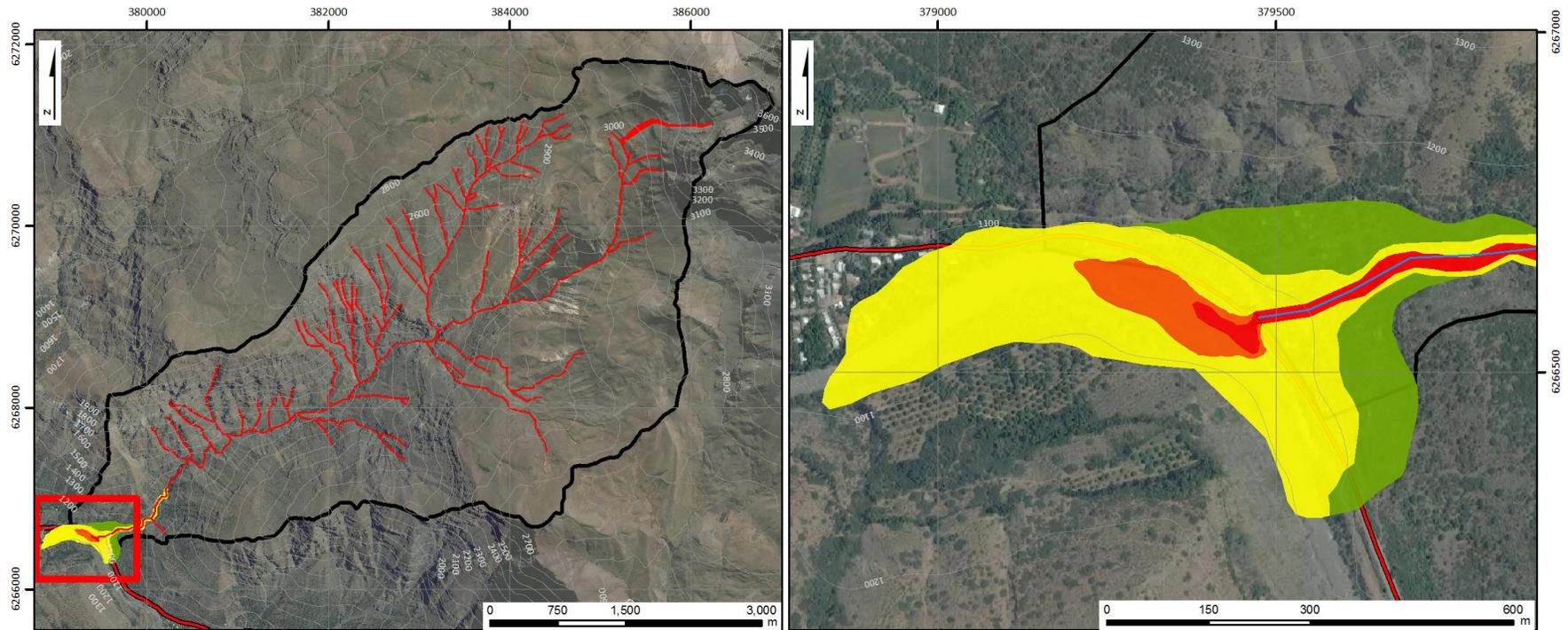


Figura 6.4. Localización de áreas de liberación en bloque y alcance del flujo simulado para zonificar el grado de amenaza medio de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.

Finalmente, en la Figura 6.5, se muestra el mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso a escala 1:20.000.

Mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso



Leyenda

Amenaza



Información base



Sistema de proyección:
WGS 84, Huso 19 Sur

Figura 6.5. Mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Escala 1:20.000. Elaboración propia.

7 Discusiones

7.1 Análisis de metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos

La metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos propuesta corresponde a una metodología mixta cuantitativa/cualitativa diseñada a partir de la ponderación de factores condicionantes, que a su vez presentan atributos que se representan cartográficamente en sus respectivos mapas temáticos. Estos mapas se reclasifican mediante el cálculo de un índice de susceptibilidad normalizado (IS_n) para cada atributo y finalmente se ponderan entre sí, para obtener un índice de susceptibilidad total (IS). Estos procesos que se basan en la aplicación de un análisis jerárquico de procesos (AHP), que a su vez se fundamenta en la tabla de comparación a pares propuesta por Saaty (2008) (ver Tabla 3.1).

En este estudio, la construcción de jerarquías corresponde a ordenar de mayor a menor jerarquía: la susceptibilidad (nivel 1), los factores condicionantes (nivel 2) y los atributos de cada factor (nivel 3). Con lo cual se confecciona un árbol jerárquico que permite realizar una evaluación de susceptibilidad de manera ordenada, desde los atributos hasta la elaboración del mapa de susceptibilidad de flujos de detritos (ver Figura 3.1).

A partir de la comparación a pares de un mismo nivel y de cada rama de proveniencia del árbol jerárquico, se puede determinar el peso o significancia de cada carácter asociado. Esto permite definir prioridades en cada nivel y establecer mediciones de propiedades que no tienen una escala de medición entre sí. Lo anterior, es equivalente a la valoración por consulta de expertos que utilizan otras metodologías, como la de Sepúlveda (1998). Sin embargo, en la metodología propuesta la significancia está determinada por decisiones lógicas del evaluador y apoyado de una base matemática sólida. Tal es el caso, que a partir de esta matemática se obtiene un valor para el error asociado a la consistencia lógica de las decisiones tomadas por el evaluador. Este error da cuenta de la precisión en la aplicación de la metodología, mientras que la exactitud está sujeta a tres factores principalmente: 1) la calidad del catastro de validación 2) el conocimiento del área de estudio y 3) la experiencia del geólogo.

Por otro lado, el uso de IS_n permite homogeneizar y estandarizar la valoración entre atributos de diferentes mapas temáticos, ya que para cada uno siempre existirá un atributo con IS_n=100%, lo que implica que el IS calculado también pueda variar de 0 a 100%. Además, para determinar la ponderación de cada factor condicionante se debe tener en cuenta que, al tener atributos de valoración similar dentro de un mismo mapa temático, estos tendrán un valor alto de IS_n, sin importar, su favorabilidad para generar flujos de detritos (e. g. terrazas y abanicos aluviales).

A diferencia de otras metodologías, en ésta no se definen cortes fijos para los rangos de IS en la elaboración del mapa de susceptibilidad de flujos de detritos. Sino que queda sujeta a los resultados esperados, que a su vez dependen de las observaciones de campo y la experiencia del

geólogo; que luego se validan con un catastro o, en su defecto, con la revisión de pares especialistas en remociones en masa y en el área de estudio, constatando que los $IS_n=100\%$ correspondan a zonas de alta o media susceptibilidad.

La calidad del catastro utilizado es fundamental en la validación de un mapa de susceptibilidad de flujos de detritos, y está condicionada por la disponibilidad de información y la capacidad de observación de sus autores. Por tanto, resulta relevante el conocimiento del área de estudio y la experiencia del geólogo al realizar estudios en zonas poco pobladas, ya que en estos lugares ocurren remociones en masa que no han sido identificadas. Así también, en zonas donde el catastro esté fuertemente condicionado a infraestructura vial, ya que esto usualmente está más relacionado con el alcance, que con la generación de flujos.

Esta metodología es aplicable a nivel de cuencas, en cualquier: i) escala de trabajo y ii) ambiente geológico. Ya que está diseñada de modo que la primera, dependa directamente de la escala de trabajo de cada mapa temático y, el segundo, de los factores condicionantes propios de cada área de estudio, reconociendo las características propias de cada ambiente. Este diseño permite extrapolar su aplicación a otros tipos de remoción en masa, tales como, caídas y deslizamientos. Para estos, de la misma forma que para flujos, se debe tener en cuenta las características propias de cada área de estudio y la clasificación de sus factores condicionantes. En general, la geología, la pendiente y la geomorfología estarán incorporados entre los factores condicionantes de cualquier área de estudio.

El enfoque planteado es geológico-geotécnico y geomorfológico, pero se puede adaptar al que el evaluador estime conveniente. No obstante, es recomendable mantener esta orientación, dado que, la geología-geotecnia permite conocer las características del material removible. Además, al considerar la geomorfología, como el estudio del paisaje de la superficie terrestre y de los procesos que interactúan en ella, permite identificar procesos morfogenéticos que resultan fundamentales para el entendimiento de procesos de remoción en masa y aluviales y, por tanto, en la aplicación de esta metodología.

Finalmente, el tiempo de trabajo empleado en la aplicación de esta metodología depende principalmente de la disponibilidad de insumos (*e.g.* DEM, mapa geológico), el tamaño del área de estudio y la escala de trabajo. A menor cantidad y/o calidad de insumos disponibles, mayor área de estudio y mayor escala de trabajo; mayor será el tiempo empleado. El conocimiento del área de estudio y experiencia del evaluador también pueden influir.

7.2 Análisis de metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos

La metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos propuesta corresponde a una metodología determinística, en la cual se zonifica considerando morfologías (abanico y vías aluviales) y áreas de alcance de flujos (conocidos y posibles), en base a la clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005), agregando como hipótesis que, a mayor volumen de flujo, menor probabilidad de ocurrencia y, por tanto, menor grado de amenaza.

Los posibles flujos se simulan con el programa *RAMMS-debris flow v.1.6* y sus áreas de generación se definen en base a una evaluación de susceptibilidad.

Los parámetros de resistencia para las simulaciones se adquieren del retroanálisis de un evento conocido. Si la información asociada a este evento no se puede obtener directamente de antecedentes y bibliografía, se propone aplicar la metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos mediante trabajo en terreno y gabinete (MPF) desarrollada en este estudio.

7.2.1 Análisis de metodología para estimar parámetros físicos de un flujo de detritos (MPF)

La estructura de MPF permite que sea aplicable para cualquier área de estudio. Sin embargo, es necesario disponer de un evento reciente (conocido); lo cual representa su principal limitación. Otro requisito es que se necesita tomar mediciones en curvas que tengan *levées* o marcas de olas y/o, en superficies que se dispongan perpendicularmente a la dirección de un flujo de detritos, para aplicar ecuaciones que permitan calcular su velocidad.

Utilizando la velocidad y área transversal de un flujo de detritos, MPF permite determinar su volumen a partir de sus descargas máximas. Para ello, implementa ecuaciones empíricas que responden a una relación estadística asociada a diferentes ambientes geológicos; los cuales pueden diferir con el área de estudio donde se deseen aplicar y, por tanto, pueden inducir errores de cálculo. Por ello, el conocimiento del área de estudio y las observaciones de terreno en base a Pierson (2005), son fundamentales para elegir la ecuación a utilizar, dado que permiten validar cada volumen de flujo calculado, mediante su concentración volumétrica (C_v) asociada. Por lo anterior, esta metodología debe ser aplicada por especialistas en remociones en masa.

En curvas muy cerradas la velocidad de un flujo de detritos calculada mediante la Ecuación de Selby (1993) tiende a ser mayor a su velocidad real (Bovis & Jakob, 1999). Lo mismo ocurre con aquellas velocidades calculadas mediante la Ecuación modificada de Pierson (1982), dado que se desprecia el roce entre ambos cuerpos. Por lo anterior, estas ecuaciones no son aplicables para flujos de lodo. Para un flujo de detritos lodoso se propone considerar una corrección. Esta consiste en multiplicar su velocidad calculada, por $1 - \tan(\beta)$, siendo β la pendiente de su depósito, dado que este ángulo se relaciona con el parámetro de resistencia asociado a la fricción seca de Coulomb, de la forma $\mu = \tan(\beta)$.

Si al retroanalizar un evento conocido se sobrestimara su velocidad, implicaría que sus descargas máximas y volumen también lo estarían. Mientras que su C_v y ρ_t serían menores a las reales. De esta forma, se tendría un evento más diluido que el real y se asumiría un escenario conservador desde el punto de vista de fricción.

Con una fricción menor a la real, el modelo calibrado alcanzaría mayores velocidades y alcance, y por conservación de volumen, tendría alturas menores. Si tal caso sucediera, esta

información tiene que ser considerada porque podría aumentar el error de calibración en el análisis de sensibilidad de los parámetros de resistencia del programa *RAMMS-debris flow*.

Finalmente, la aplicación de MPF entrega datos que permiten calcular otros parámetros físicos que no son utilizados por el *software RAMMS-debris flow*, pero pueden ser útiles en modelos físicos u otros programas que sirvan para modelar flujos. Estos son: energía de impacto, viscosidad y erosión del canal (ver Tabla 2.4). Notar que en la versión más reciente de *RAMMS-debris flow* se incorpora un parámetro asociado a erosión (WLS, 2017).

7.2.2 Uso de RAMMS-debris flow en la elaboración de un mapa de amenaza de flujos de detritos

Pese a ser muy sensible a la calidad del Modelo de Elevación Digital (DEM) que se utilice y a tomar el flujo como un modelo monofásico, el uso de *RAMMS-debris flow* es adecuado en esta metodología porque: i) incorpora datos propios de cada área de estudio, como la información de los parámetros físicos que dominan un evento ocurrido en ella; ii) su implementación no es compleja en el sentido de la cantidad de parámetros que utiliza y; iii) para cuencas pequeñas (<20 km²) los tiempos de simulación son razonables (minutos) dependiendo de la computadora y del volumen de flujo.

Incluir la revisión y corrección del DEM en la metodología propuesta es fundamental, dado que el *software RAMMS-debris flow* es muy sensible a la calidad de éste, es decir, a la resolución y georreferenciación espacial del mismo. Por ejemplo, Hussin (2012), obtiene que el modelo calibrado subestima hasta en un 45% la altura del flujo real. A su juicio, este error se justificaría por cambios en la geometría del canal desde el evento real, a errores de interpolación de puntos de elevación para la generación del DEM y la baja resolución espacial del mismo (5 m).

La escala de aplicación de esta metodología está limitada por la resolución espacial del DEM a utilizar. Para resoluciones menores a 10 m, los tiempos de cada simulación pueden resultar elevados (días) en computadoras no especializadas, sobre todo en áreas de gran tamaño (>50 km²) y/o flujos de grandes magnitudes (>10⁶ m³). En caso de aplicar MPF, se debe considerar que los datos son levantados a escala 1:1, lo que induciría un error asociado a la diferencia de escalas. Por tanto, el límite de error para validar la calibración depende de la escala de trabajo y consecuentemente a la resolución del DEM.

Al menos para escalas menores a 1:20.000 se sugiere mantener tanto, el límite de resolución espacial (<10 m) como, el error de calibración (<10%) propuestos en este trabajo. En general, a mayor escala de trabajo se debe contar con una mayor resolución espacial y un menor error de calibración. Esta información se debe considerar para estudios de mayor detalle y si se desea construir obras de mitigación.

Por otra parte, uno de los principales supuestos en el modelo *RAMMS*, es que el flujo se toma como un modelo monofásico (una fase), con una constante de la reología de Voellmy. Esto

significa que no hay ningún modelo de separación entre la fase sólida y la fluida del flujo, siendo una de las principales desventajas de los modelos monofásicos (Hussin, 2012). Además, en la versión utilizada en este trabajo no se incorpora la erosión provocada por el flujo, ni tampoco se puede variar la C_v del mismo.

Sumado a lo anterior, se debe tener en cuenta que, mantener los parámetros de resistencia y C_v para simular posibles flujos de detritos, es una simplificación de la realidad, dado que no necesariamente todos los flujos generados en una cuenca poseen las mismas características. Sin embargo, igualmente se considera adecuado utilizar simulaciones para zonificar ya que: i) ha ocurrido al menos un evento en el área de estudio, que puede ser reproducido utilizando sus parámetros de resistencia y C_v asociados; ii) sus áreas de generación son a partir de zonas de media o alta susceptibilidad de flujos de detritos que poseen suficiente material removible y; iii) dan cuenta de las zonas de erosión (arranque), transporte y depositación de posibles flujos.

Por otro lado, la clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005), es pertinente en esta metodología porque contribuye a definir los grados de amenaza de flujos de detritos y a determinar cuáles son los posibles flujos que se van a simular, especialmente en aquellas cuencas que no tienen información de eventos pasados. Esto último dado que los volúmenes asociados a las zonas de generación se pueden distribuir en amplios rangos.

Esta parte de la metodología es apropiada y robusta, porque para zonificar en grados de amenaza, incorpora características propias de cada cuenca, tales como, el alcance de eventos históricos, su abanico y vías aluviales. Además, al basarse en la clasificación de Jakob (2005), permite prever las potenciales consecuencias de un evento simulado que posee un determinado volumen.

Es importante señalar que el uso de nuevas tecnologías, como programas para modelar flujos, son aproximaciones de la realidad y nunca se deben primar por sobre las observaciones y mediciones de campo. Por esta razón, si tras la evaluación de amenaza, ocurre un evento de misma magnitud que los flujos simulados y, éstos no se corresponden correctamente, se debe actualizar el mapa de amenaza incorporando los nuevos datos disponibles.

Finalmente, esta metodología contribuye en el desarrollo de estudios técnicos de base, necesarios para el desarrollo de herramientas de ordenamiento territorial que contribuyen en la reducción de las condiciones de riesgos de las personas que habitan un determinado territorio, permitiéndoles conocer la amenaza y su grado de exposición frente a flujos de detritos.

7.3 Evaluación de la susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso

La aplicación de la metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos, desarrollada en este trabajo, se refleja en la elaboración del mapa de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. Los factores condicionantes considerados son: la Pendiente, la Geomorfología, la Geología, la Elevación y Crioclastia, los Antecedentes y la Curvatura. En ese orden de significancia relativa según los resultados obtenidos tras la aplicación de AHP.

La Pendiente se subclasifica de forma diferente para morfologías aluviales y no aluviales. Esto se justifica porque las primeras fueron modeladas por procesos aluviales y, por tanto, se esperaría que fueran más sensibles a los cambios de pendientes, en cuanto a la generación de flujos se trata (ver Tabla 5.6). Luego, en su reclasificación mediante AHP, las pendientes de morfologías aluviales alcanzan una mayor valoración (ver Figura 5.20). Por tanto, el factor Pendiente incorpora información del factor Geomorfología.

En cuanto a la Geomorfología, se reconocen 13 morfologías diferentes en el área de estudio, para las cuales se describe su forma y sus procesos morfogenéticos (ver Tabla 5.4). Tras su reclasificación, las morfologías que presentan una mayor significancia son: zonas de arranque, vías aluviales, circos glaciales, deslizamientos y conos de deyección. Esto se explica porque estas geoformas, a excepción de los circos glaciales, están asociadas a procesos de remoción en masa y aluviales. Mientras que los circos glaciales deben su alto valor principalmente a su forma. Cabe destacar que la incorporación de las zonas de arranque es un aporte de este estudio, dado que no han sido descritas desde un punto de vista geomorfológico, a pesar de que algunos autores, como Nhuchhen (2017), la reconocen como fuente (*source*) de flujos de detritos (ver Figura 4.3).

La Geología del área de estudio está dominada por la interacción de la Formación Abanico con los ambientes: aluvial, periglacial y paraglacial. En los cuales dominan los depósitos aluviales, glaciales y de remociones en masa. Los depósitos aluviales se distribuyen principalmente en zonas canalizadas, pero también se observan en zonas desconfiadas, como en el abanico de la cuenca. Sumado a lo anterior, se reconoce un depósito aluvial en la parte más alta de la subcuenca NE, que se sobrepone a depósitos glaciales y de deslizamientos (ver Figura 5.9). Este depósito presenta altas pendientes y según los antecedentes disponibles, se habría activado tanto el 21 de enero de 2013, como el 25 de febrero de 2017. Por lo que este depósito podría volver a activarse con facilidad al recibir precipitaciones intensas durante tormentas de verano.

En las partes altas de la cuenca se observa que los grandes depósitos de deslizamientos presentan una correlación espacial con los depósitos glaciales, particularmente de formas morrénicas (ver Figura 5.9). De esto surge la hipótesis que estos deslizamientos tienen relación con procesos paraglaciales, pero no se tiene evidencia suficiente para corroborarla.

Se reconocen dos dominios bien marcados de distribución de los depósitos coluviales. El primer dominio se encuentra en las subcuencas de mayor altitud y se asocia a principalmente a las

altas pendientes generadas por erosión glacial en el pasado; evidencia de ello son los depósitos glaciales y morfologías de morrenas. El segundo dominio se ubica en las subcuencas de menor altitud y se le atribuye un control más bien estructural, dado que se disponen principalmente en forma de conos de deyección en las faldas de la Unidad Abanico fracturado, que a su vez presenta fallas y un pliegue (ver Figura 5.9).

Las zonas de alteración hidrotermal (Ah) identificadas en este estudio se activaron para los eventos del 21 de enero de 2013 y del 25 de febrero de 2017. Además, presentan morfologías tipo zonas de arranque y vías aluviales, lo que sugiere la ocurrencia de flujos de detritos en el pasado geológico (ver Figura 5.9).

Junto a los depósitos glaciales, Ah se identifica como la principal fuente de sedimentos finos de los eventos ocurridos en la cuenca. Al igual que en la quebrada Las Amarillas (QLA), ubicada en la cuenca del río Maipo y descrita por Hauser (1991), las zonas de alteración hidrotermal presentan tonalidades marrón-amarillentas y anaranjadas y, están en superficies empinadas y geotécnicamente incompetentes e inestables, que generan un ambiente propicio para el desarrollo de flujos de detritos.

La Elevación y Crioclastia es un factor que relaciona la calidad geotécnica de los materiales con la elevación, que se asocian a procesos de hielo y deshielo, los cuales no son considerados en la geología ni en la geomorfología. En general, su reclasificación muestra que, a mayor altitud, es mayor la favorabilidad de generación de flujos de detritos (ver Figura 5.21).

El factor Antecedentes incorpora información de eventos recientes ocurridos en la cuenca, clasificando las subcuencas en la importancia de sus activaciones, que se remiten a los dos eventos mejor estudiados: 21 de enero de 2013 y 25 de febrero de 2017. Este factor difiere del catastro, ya que, en este último, no se considera la magnitud de las activaciones, es decir, aquellas activaciones menores tienen los mismos atributos que otras de mayor envergadura. Además, al trabajar este factor a nivel de subcuenca, permite identificar cuál es la más activa. Información importante para instalar sensores de monitoreo y/o medidas de mitigación. Tras su reclasificación, se desprende que la subcuenca NE presenta la mayor susceptibilidad mientras que la cuenca E está dentro de las de menor activación (ver Figura 5.22). Esto se explica por las bajas pendientes que poseen los depósitos de esta subcuenca (ver Figura 5.14).

El factor Curvatura clasifica las superficies en cóncava, plana y convexa. En su reclasificación se considera que las superficies cóncavas contribuyen en la saturación de agua de los materiales al estar asociada a la convergencia de un flujo, contribuyendo de esta manera en la posibilidad de alcanzar los límites de corte para que fluya el material.

Al ponderar los factores condicionantes, se elabora el mapa de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca. El cual es válido, ya que, al cruzarse con el catastro, se tiene que el 77, 18 y 5%, de sus puntos se encuentran en zonas de alta, media y baja susceptibilidad, respectivamente. Cumpliéndose la distribución propuesta de: $2 \times S_{\text{alta}} \geq 3 \times S_{\text{media}} \geq 12 \times S_{\text{baja}}$ (ver Figura 5.30).

7.4 Evaluación de la amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso

La aplicación de la metodología para evaluar la amenaza de flujos de detritos propuesta, se plasma en el mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso. El cual se zonifica en grados muy alto, alto, medio y bajo de amenaza.

De los antecedentes se desprende que existen dos eventos recientes que alcanzan el grado de amenaza muy alto de flujo de detritos: 21 de enero de 2013 y 20 de abril de 2017. Habiendo una diferencia de 4 años entre ambos. Ambos flujos pueden ser catalogados como flujos de detritos lodosos por su apreciable contenido de finos. El primero habría sido desencadenado por precipitaciones intensas, de corta duración, producidas por tormentas de verano de extensión muy localizada, mientras que el segundo por un sistema frontal. Las intensidades de precipitaciones, al menos diarias, para ambos eventos son muy distintas (ver Tabla 5.1) y se explica por las características del agente detonante. Estos eventos, bloquearon y dañaron la ruta G-25 y provocaron el corte del suministro de agua potable en gran parte para la ciudad de Santiago. Esta información es consistente con las potenciales consecuencias de la Clase III expuesta en la Tabla 4.3. Cabe destacar que la diferencia entre los factores detonantes de cada evento, podría haber inducido errores de cálculo si la metodología utilizada se basara en umbrales de precipitación.

El grado de amenaza alto está determinado por el evento del 25 de febrero de 2017. En la cuenca, no se tiene registro de otros eventos con estas características. Sin embargo, según testigos, a fines de los años 90's ocurrió un evento con la misma capacidad destructiva, que habría derribado el puente San Alfonso. Aunque no existe evidencia suficiente para asegurar este hecho, de comprobarse, ambos eventos tendrían una diferencia alrededor de 20 años. Por su parte, el evento del 25 de febrero de 2017 generó un embancamiento en el río Maipo, bloqueó el estero San Alfonso y destruyó su puente homónimo. Lo que se corresponde con las potenciales consecuencias de la Clase IV expuesta en la Tabla 4.3.

El grado de amenaza medio está definido por la simulación de un posible flujo de detritos que posee las mismas características físicas (distribución granulométrica, concentración volumétrica y densidad del flujo) y parámetros de resistencia, con las cuales se reproduce el evento del 25 de febrero de 2017, pero utilizando un volumen de flujo de $\sim 10^6$ m³. Este volumen se justifica con la activación del 10% de las zonas de alteración hidrotermal, los depósitos de deslizamientos y depósitos aluviales, que se encuentran en zonas de alta o media susceptibilidad y en las subcuencas de mayor altitud. Como este flujo se encuentra en límite de las clases V y VI, podría bloquear por completo el estero San Alfonso e incluso represar el río Maipo.

Para determinar las características físicas del evento simulado, se aplicó MPF sobre el flujo ocurrido el 25 de febrero de 2017 y se obtuvieron C_v de 57 y 48%. Siendo consistentes con las observaciones de terreno en base a Pierson (2005), que indican que este evento refleja características mixtas entre un flujo hiperconcentrado y un flujo de detritos.

A partir del análisis de sensibilidad de este evento, se desprende que la simulación que mejor lo reproduce tiene una $C_v=48\%$ y sus parámetros de resistencia son: $\mu=0,09$; $\xi=600 \text{ m}^2/\text{s}$ y $C=0 \text{ Pa}$. El valor asociado al parámetro μ supone un ángulo de depósito de abanico de este flujo de $\sim 5^\circ$ y el valor de ξ da cuenta de un flujo viscoso-turbulento. Mientras que el valor $C=0 \text{ Pa}$ se justifica, dado que la concentración de finos en la mezcla es $<10\%$, lo que implica que la dinámica de la mezcla está controlada por el contacto entre granos y no por el fluido intersticial. No obstante, aunque este último no domine la mecánica del flujo, igualmente se considera su influencia, pero está incorporada en el parámetro ξ y explica la turbulencia del mismo.

Al realizar el retroanálisis, el punto de control D2_05 muestra errores de calibración que tienden a duplicar el error total si este no se considerara (ver Tabla 6.4). Esto se explica porque este punto corresponde a una curva muy cerrada y estrecha, que no se reconoce en el DEM utilizado. Por tanto, como el *RAMMS-debris flow* es muy sensible a la calidad del DEM utilizado, es razonable y justificable haber descartado como punto de control, al punto D2_05.

Por otra parte, el área de depósito es el parámetro de ajuste de mayor error, con un $+25\%$. Esto se explica principalmente por la baja calidad del DEM. Lo cual se debe a que la toma de puntos de elevación se restringe al área de la parte norte del río Maipo, por lo que no hubo una corrección adecuada de la ladera sur del mismo, en donde el depósito del modelo calibrado sobrepasa esta barrera, lo que en la realidad no ocurrió (Figura VII.3, Anexo VII).

Otras características importantes que pueden estar asociados al error del modelo calibrado son: i) en las simulaciones no se considera el *momentum* asociado a la escorrentía del río Maipo, y ii) el DEM corregido no reconoce la profundidad del mismo, ni su capacidad de canalizar un flujo de detritos. Pese a lo anterior, el modelo calibrado presenta un error promedio absoluto de 9% , menor al límite propuesto (10%), por tanto, los parámetros de resistencia para simular el evento de $\sim 10^6 \text{ m}^3$, se consideran válidos.

En la zona distal del flujo calibrado se pierde resolución debido a las razones mencionadas anteriormente. Luego, a fin de ajustar el área a un fenómeno realista, se decidió no considerar las alturas menores a 2 m en el evento simulado que delimita la amenaza medio.

Con respecto a la zona de amenaza bajo, resulta difícil imaginar que en las partes altas de la cuenca se genere un flujo que pueda alcanzar estas zonas. No obstante, esta zona puede ser alcanzada por flujos generados en pequeñas quebradas que yacen en las laderas adyacentes al abanico de la cuenca. Además, están expuestas a otros procesos de remoción en masa como caídas y deslizamientos, debido a su proximidad con laderas pertenecientes a la Unidad Abanico fracturado de alta pendiente, pero para constatar esto último, se deben hacer estudios especializados, enfocados en estos procesos.

8 Conclusiones

Se cumplen todos los objetivos propuestos en este trabajo y además se concluye lo siguiente:

1. La metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos es aplicable a nivel de cuencas en cualquier ambiente geológico y escala de trabajo, y reconoce las características propias de cada área de estudio.
2. La utilización del análisis jerárquico de procesos (AHP) en la metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos, permite realizar un análisis comparativo entre propiedades que no tienen una escala de medición entre sí, bajo tres principios fundamentales: i) la construcción de jerarquías, ii) el establecimiento de prioridades, y iii) la consistencia lógica.
3. La descripción del área de estudio es fundamental en la aplicación de la metodología para evaluar la susceptibilidad de flujos de detritos. Esta se sustenta en la experiencia del evaluador y por su conocimiento y observaciones de campo específicas del área de estudio.
4. La aplicación de la metodología para estimar los parámetros físicos de un flujo de detritos mediante trabajo en terreno y gabinete (MPF), permite estimar la trayectoria, el volumen, caudales máximos, la concentración volumétrica y la densidad de un flujo de detritos y, a su vez, construir hidrogramas.
5. El programa *RAMMS-debris flow* es una herramienta útil para determinar las áreas de alcance de flujos. No obstante, es muy sensible a la calidad (resolución y georreferenciación espacial) del Modelo de Elevación Digital (DEM) utilizado, por lo que, para realizar simulaciones se deben reducir los errores asociados a este insumo.
6. La incorporación de la clasificación de tamaño de flujos de detritos de Jakob (2005) y las simulaciones de posibles flujos realizadas con el *software RAMMS-debris flow*, son útiles para zonificar los grados de amenaza asociados a este tipo de remoción en masa.
7. El mapa de susceptibilidad de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso, presenta zonas de alta, media y baja susceptibilidad y, según su catastro de activaciones reciente, es válido a una escala 1:20.000.
8. Los factores condicionantes que dominan la susceptibilidad de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso son: Pendiente, Geomorfología y Geología.
9. Las morfologías que favorecen la ocurrencia de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso son: zonas de arranque, vías aluviales, circos glaciales, deslizamientos y conos de deyección.
10. Las unidades geológicas que favorecen la ocurrencia de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso son: alteración hidrotermal y depósitos de deslizamientos, glaciales y aluviales (excepto por el depósito que forma el abanico de la cuenca).
11. La subcuenca NE es la más propensa a generar flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso.
12. El mapa de amenaza de flujos de detritos de la cuenca del estero San Alfonso, presenta grados de amenaza muy alto, alto, medio y bajo y, es válido a una escala 1:20.000.
13. Las consecuencias previstas según las clases de Jakob (2005) y los daños causados por los eventos históricos que delimitan los grados de amenaza muy alto (Clase III) y alto (Clase IV) de flujos de detritos, se corresponden para la cuenca del estero San Alfonso.

9 Recomendaciones

9.1 Estudios metodológicos futuros

En virtud de su estructura, se recomienda adaptar la metodología propuesta a otros tipos de remoción en masa, tales como, caídas, deslizamientos y avalanchas. Para ello se debe considerar que, para la susceptibilidad, es necesario elaborar mapas temáticos que cubran toda el área de estudio para evitar errores topológicos en el álgebra de mapas. Mientras que, para la amenaza, se sugiere usar *softwares* que modelen el alcance de caídas, deslizamientos y avalanchas, respectivamente.

Además, con el objetivo de evaluar el riesgo de este tipo de remociones en masa y formar habitantes resilientes, reduciendo sus condiciones de riesgos frente a desastres siconaturales; es oportuno adaptar y armonizar la metodología propuesta, con estudios de vulnerabilidad (social, política, física, económica, educativa, etc.) y capacidades de personas, que habitan un territorio expuesto a flujos de detritos (ver Figura 9.1).

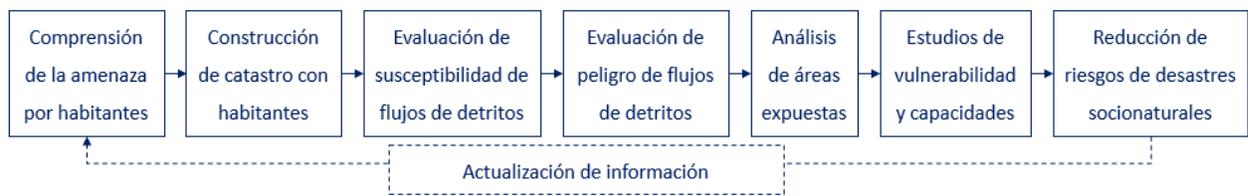


Figura 9.1. Propuesta de armonización de metodología expuesta con estudios de vulnerabilidad y de capacidades, para la reducción de riesgos de desastres siconaturales. Elaboración propia.

9.2 Estudios futuros de flujos de detritos en la cuenca del río Maipo

Los resultados obtenidos, sugieren realizar los siguientes estudios en la cuenca del río Maipo y sus afluentes:

1. Identificar los tipos de alteraciones hidrotermales propensas a generar flujos de detritos, tales como, la alteración presente en la quebrada Las Amarillas. Determinar en qué afluentes están presentes.
2. Determinar umbrales de precipitaciones y altura de isoterma 0°C que detonan flujos de detritos, según el tipo de tormenta.

9.3 Sistema de monitoreo de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso

A partir de este estudio se desprende que la cuenca del estero San Alfonso posee características propicias para la implementación de un sistema de monitoreo de flujos de detritos, debido a que: i) presenta activaciones históricas frecuentes, ii) se conoce la distribución de sus zonas de

susceptibilidad de generación de flujos de detritos y, iii) se conocen las áreas de alcance y de amenaza de este tipo de remoción en masa.

Para implementar un sistema de monitoreo de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso, se recomienda la instalación de herramientas como: cámaras de vigilancia, estaciones meteorológicas y sensores de movimiento. Se propone que la ubicación de las cámaras de vigilancia corresponda a los puntos de control D2_09 y D2_05, sobre 11 y 13 m con respecto a nivel de base local del estero, respectivamente (ver Figuras 6.2 y 9.2). Estas cámaras permitirían realizar mediciones de velocidad y descargas máximas y así, corroborar las estimaciones realizadas con la aplicación de MPF, e incluso, generar la información para determinar la relación empírica, Q_p v/s V_t , de este ambiente.

Las estaciones meteorológicas responden a la necesidad de determinar umbrales de precipitaciones y altitud de isoterma 0°C que activan los flujos de detritos. Se propone que se localicen en zonas de baja susceptibilidad para evitar su destrucción y, en las subcuencas de mayor altitud, como se muestra en la Figura 9.2.

Finalmente, se sugiere la instalación de, al menos, un sensor de movimiento aguas abajo de la junta entre las tres subcuencas de mayor altitud (ver Figura 9.2). De acuerdo con las simulaciones realizadas en este estudio, se calcula que tras pasar el flujo por este punto (i. e. al activar el sensor), éste tardaría entre 6 y 8 minutos alcanzar la desembocadura del estero San Alfonso, para un evento como el del 27 de febrero de 2017 (amenaza alta). Mientras que, para el evento que define la amenaza medio, se demoraría entre 3 y 5 minutos. Cabe destacar que estos tiempos son referenciales.



Figura 9.2. Localización de herramientas para un sistema de monitoreo de flujos de detritos en la cuenca del estero San Alfonso. Elaboración propia.

10 Glosario

1. **Amenaza o peligro geológico:** fenómeno o proceso geológico que puede afectar a un territorio determinado, causando daños en su estructura física y social, es decir, que podría ocasionar la muerte, lesiones u otros impactos a la salud, al igual que daños a la propiedad, la pérdida de medios de sustento y de servicios, trastornos sociales y económicos, o daños ambientales (modificado de UNISDR, 2009).
2. **Desastre socionatural:** interrupción seria en el funcionamiento de una comunidad o sociedad (socio) que ocasiona una gran cantidad de muertes al igual que pérdidas e impactos materiales, económicos y ambientales que exceden la capacidad de respuesta de la comunidad o sociedad afectada frente a un fenómeno o proceso geológico (natural) extremo mediante el uso de sus propios recursos (UNISDR, 2009). Por tanto, **los desastres no son naturales.**
3. **Factor condicionante:** agente que genera una situación de potencial inestabilidad sobre una unidad geológica (modificado de Proyecto Multinacional Andino, 2007).
4. **Factor desencadenante o detonante:** agente o estímulo externo que, tras su actividad, genera una respuesta directa e inmediata de una remoción en masa (modificado de Proyecto Multinacional Andino, 2007).
5. **Grado de exposición:** disposición a preservar sobre un territorio un conjunto de propiedades, población u otros elementos presentes en las zonas donde existen amenazas (UNISDR, 2009). Para su cálculo se debe considerar cuanto espacio (espacialidad) y por cuanto tiempo (temporalidad) recibe daño un territorio.
6. **Resiliencia:** más que un concepto es un paradigma. Corresponde a la capacidad de un sistema, comunidad o sociedad expuestos a una amenaza para anticipar, resistir, absorber, adaptarse y recuperarse de sus efectos de manera oportuna y eficaz, lo que incluye la preservación y la restauración de sus estructuras y funciones básicas (UNISDR, 2009).
7. **Riesgo geológico:** número esperado de vidas perdidas, personas damnificadas, daños a la propiedad o algún bien, que causaría la ocurrencia de un fenómeno peligroso (Varnes, 1984; Sepúlveda, 1998). Además, UNISDR (2009) señala que corresponde a las posibles pérdidas que ocasionaría un desastre en términos de vidas, las condiciones de salud, los medios de sustento, los bienes y los servicios, y que podrían ocurrir en una comunidad o sociedad particular en un período específico de tiempo en el futuro.
8. **Susceptibilidad:** capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado (Sepúlveda, 1998).
9. **Territorio:** concepto relacional que insinúa un conjunto de vínculos de dominio, de poder, de pertenencia o de apropiación entre una porción o la totalidad del espacio geográfico y un determinado sujeto individual y colectivo (Montañez, 2001; Rodríguez, 2010), siempre dinámico y en tensión.
10. **Vulnerabilidad:** disposición interna (características y circunstancias) de una comunidad, sistema o bien que los hacen susceptibles a los efectos dañinos de una amenaza (UNISDR, 2009), esto se traduce en una condición de inseguridad o de incertidumbre para el individuo o la comunidad frente a una amenaza.

11 Bibliografía

- ArcGIS, 2017. Conceptos del conjunto de herramientas Superficie ráster. [en línea] <<http://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/3d-analyst-toolbox/how-curvature-works.htm>> [visita: 15/08/2017].
- Bono, L., 2014. Modelación de los Lahares del Volcán Villarrica en el sector de Pucón, Región de la Araucanía. Memoria para optar al Título de Geóloga, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Börgel, R., 1983. Geografía de Chile: Geomorfología. Instituto Geográfico Militar, Chile. Santiago.
- Bovis, M.J., Jakob, M., 1999. The role of debris supply to determine debris flow activity in southwestern B. C. Earth Surface Processes and Landforms 24, 1039– 1054.
- Corominas, J., García A., 1997. Terminología de los movimientos de laderas, en Memorias. IV Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables, Granada, España, p. 1051–1072.
- Costa, J. E., 1988. Floods from dam failures. In: Baker, V.R., Patton, P.C. (Eds.), Flood Geomorphology. John Wiley and Sons, New York, pp. 439– 463.
- Coussot, P., Meunier, M., 1996. Recognition, classification and mechanical description of debris flows. Earth Science Reviews, No.40, p. 209–227.
- CR2 (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia), 2016. Archivos con valores diarios de precipitación en estaciones nacionales, desde enero 1950 a diciembre 2014. [en línea] <<http://www.cr2.cl/recursos-y-publicaciones/bases-de-datos/datos-de-precipitacion/>> [descarga: 15 enero de 2016].
- Cruden, D., 1991. A simple definition of a Landslide. Bulletin of the International Association of Engineering Geology. No. 43, p. 27–29.
- Cruden, D., Varnes, D. J., 1996. Landslide types and processes, in Turner, K., y Schuster, R.L., ed., Landslides investigation and mitigation: Washington D. C, National Academy Press, Transportation Research Board Special Report 247, p. 36–75.
- DGA (Dirección General de Aguas), 2017. Información Oficial Hidrometeorológica y de Calidad de Aguas en Línea <<http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>> [consulta: 15 junio de 2017, 08 diciembre de 2017].
- DMC (Dirección Meteorológica de Chile), 2017. Análisis de casos de aluviones para SERNAGEOMIN, 03 de agosto 2017. Unidad de Reanálisis. Sección Centro Nacional de Análisis. Dirección General de Aeronáutica Civil.

- DOH (Dirección de Obras Hidráulicas), 2017. Crecidas extraordinarias de cauces de quebradas en comuna de San José de Maipo, Provincia Cordillera, Región Metropolitana. Minuta técnica. Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Dykes, A. P., Warburton, J., 2007. Mass movements in peat: a formal classification scheme. *Geomorphology* 86:73–93.
- Einstein, A., 1909. A New Definition of Molecular Dimensions. *Annalen der Physik*: 4, 289–306.
- Farías, V., Escobar, P., Marín, M., Alfaro, A., Olea, P., Fernández, J., Arenas, M., Ramírez, P., 2016. Estudio exploratorio para el diseño de un sistema de monitoreo de remociones en masa, en las cuencas de San Ramón, Macul y Lo Cañas, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Informe Registrado IR-16-64.
- Fock, A., 2005. Cronología y tectónica de la exhumación en el Neógeno de los Andes de Chile central entre los 33° y los 34°S. Tesis de Magister. Universidad de Chile.
- Fuenzalida, H., 1982. A country of extreme climate. Chile: *Essence and Evolution*, H. García (Ed.), Instituto de Estudios Regionales de la Universidad de Chile, 27–35 pp.
- Fundación Aquae, 2014a. Estudio de diagnóstico hidrogeológico de susceptibilidad de Remociones en Masa en zonas del Cajón del Maipo con vistas al impacto sobre las fuentes de agua de Santiago. Informe técnico ITAA–04–Rev.C. Centro de Estudios e Investigación en Infraestructura (CEII), Departamento de Obras Civiles, Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Fundación Aquae, 2014b. Determinación de posibles impactos en la gestión de los abastecimientos humanos de agua situados en la zona Metropolitana de Chile, provocados por fenómenos asociados al cambio climático. *Aqua papers* N°5. Con colaboración de Universidad de Chile y Universidad Técnica Federico Santa María, Chile.
- Garreaud, R., 2013. Warm winter storms in Central Chile. *Journal of Hydrometeorology*, 14, 1515–1534.
- Garreaud, R., Rutllant, J., 1997. Precipitación estival en los Andes de Chile central: aspectos climatológicos. *Atmosfera* 10:191–211.
- Giambiagi, L. B., Alvarez, P. P., Godoy, E., Ramos, V. A., 2003. The control of pre-existing extensional structures on the evolution of the southern sector of the Aconcagua fold and thrust belt, southern Andes. *Tectonophysics*, 369(1), 1–19.
- González, O., 1963. Observaciones geológicas en el valle del Río Volcán. *Revista Minerale*s, Santiago, Vol. 17, N°81, p. 20-61.

- Guinau, M., Vilajosana, I., Vilaplana, J.M., 2007. GIS-based debris flow source and runout susceptibility assessment from DEM data – a case study in NW Nicaragua. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 7:703–716.
- Hauser, A. 1991. Estudio geotécnico de flujos detríticos en Quebrada Las Amarillas, sector Baños Morales Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería, Santiago, Chile.
- Hauser, A., Calatroni, A., Oñate, E., De Buen, A., 1996. Evaluación preliminar del riesgo aluvional en torno a la localidad de San Alfonso, Región Metropolitana. Servicio Nacional de Geología y Minería – Ministerio de Obras Públicas, Chile.
- Herrera, M.J., 2016. Estimación de las altitudes de las líneas de equilibrio en glaciares de montaña para el último ciclo glacial-interglacial en los Andes de Santiago, Chile central. Tesis de doctorado. Universidad de Chile.
- Hungr, O., 1981. Dynamics of rock avalanches and other types of slope movements. Ph.D. thesis, University of Alberta, Edmonton.
- Hungr, O., Evans, S.G., Bovis, M., y Hutchinson, J.N., 2001. Review of the classification of landslides of the flow type: *Environmental and Engineering Geoscience*, v. 7, p. 22–238.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides* (2014) 11:167–194.
- Hussin, H., 2011. Probabilistic Run-out Modeling of a Debris Flow in Barcelonnette, France. M.Sc. thesis, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), University of Twente, Enschede, Netherlands.
- Hussin H., Quan Luna B., van Westen C.J., Christen M., Malet J.P., 2012. Parameterization of a numerical 2-D debris flow model with entrainment: a case study of the Faucon catchment, Southern French Alps. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12(10):3075–3090.
- Iverson, R. M., 1997. The physics of debris flows. *Reviews of Geophysics*, v. 35, p. 245–296.
- Iverson, R. M., LaHusen, R. G., Major, J. J. and Zimmerman, C. L., 1994. Debris flow against obstacles and bends: dynamics and deposits', Abstract of poster presentation, Fall Meeting, American Geophysical Union.
- Jakob, M., 2005. A size classification for debris flows. *Eng. Geol.* 79, 151–161.
- Lara, M., 2007. Metodología para la Evaluación y Zonificación de amenaza de Remociones en Masa con Aplicación en Quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geóloga, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

- Marín, M., Contreras, J.P., Olea, P., 2017. Efectos geológicos del sistema frontal en la zona central del país, el 25 y 26 de febrero de 2017, comuna de San José de Maipo, Región metropolitana. INF-RM-01-2017. Servicio Nacional de Geología y Minería, Chile.
- Miller, A., 1976: The climate of Chile. *Climates of Central and South America*, W. Schwerdtfeger, Ed., Elsevier, 113–145.
- Mizuyama, T., Kobashi, S., Ou, G., 1992. Prediction of debris flow peak discharge. *Interpraevent. International symposium, Bern, Switzerland, Tagespublikation*, vol. 4, pp. 99–108.
- Montañez, G., 2001. *Razón y Pasión del Espacio y el Territorio. Espacios y Territorios: Razón, Pasión e Imaginarios*, Universidad Nacional de Colombia.
- Moreiras, S. M., Sepúlveda, S. A., 2013. The high social and economic impact 2013 summer debris flow events in Central Chile and Argentina. *Boll Geofis Teor Appl* 54 (2):181–184.
- Moreno, E., 2014. Elementos finitos mixtos estabilizados para flujos viscoplásticos. Tesis Doctoral, Programa de Doctorado en Ingeniería Estructural, Departamento de Resistencia de Materiales y Estructuras en la Ingeniería, Universidad Politécnica de Cataluña. España.
- Moreno, H., Thiele, R., Varela, J., 1991. Estudio Geológico y de Riesgos Volcánico y de Remoción en Masa del Proyecto Hidroeléctrico Alfalfal II y Las Lajas (Technical Report). CHILGENER S.A., Santiago, 78.
- Muñoz, A. A., 2016. Catastro y reconocimiento de zonas susceptibles de remociones en masa, inundaciones y socavones en la ruta G–25, Provincia Cordillera, Región Metropolitana. Informe de Proyecto II, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Nhuchhen, D. R., 2017. Physical Modeling of Debris Flow by Varying Sediment Concentration. Department of Civil and Environmental Engineering. University of Science and Technology. Norway.
- Padilla, C., 2006. Análisis de factores meteorológicos desencadenantes de remociones en masa en el sector oriente de Santiago. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Pierson, T. C., 1982. Flow behavior of two major lahars triggered by the May 18, 1980 eruption of Mount St. Helens, Washington: Proceedings, of the Symposium on Erosion Control in Volcanic Areas, Public Works Research Institute, Ministry of Construction, Japan, Vancouver, Washington, July 6-9, 1982, p. 99–129.
- Pierson, T.C., 1986. Flow behaviour of channelized debris flows, Mount St. Helen's, Washington, in Abrahams, A.D., ed., *Hillslope processes*: Boston, Allen and Unwin p. 269–296.

- Pierson, T. C., 2005. Distinguishing between debris flows and floods from field evidence in small watersheds. Reducing risk from volcano hazards. U.S. Geological Survey. U.S. Department of the Interior USGS Fact Sheet 2004–3142.
- Proyecto Multinacional Andino: Geociencias para las Comunidades Andinas, 2007. Movimientos en Masa en la Región Andina: Una guía para la evaluación de amenazas. Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional, No. 4.
- Quiroga, R., 2013. Análisis estructural de los depósitos cenozoicos de la Cordillera Principal entre el Cerro Provincia y el Cordón El Quempe, Región Metropolitana, Chile (33°18' y 33°25'S). Memoria para optar al Título de Geóloga, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Rauld, R., 2011. Deformación cortical y peligro sísmico asociado a la falla San Ramón en el frente cordillerano de Santiago, Chile central (33°S), Región Metropolitana. Tesis de doctorado, Departamento de Geología, Universidad de Chile.
- Rickenmann, D., 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards* 19, 47–77.
- Rodríguez, D., 2010. Territorio y territorialidad: Nueva categoría de análisis y desarrollo didáctico de la Geografía. UNI-PLURI/VERSIDAD Vol.10 No.3, 2010 –Versión Digital. Facultad de Educación, Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
- Saaty, T.L., 2008. Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making Why pairwise comparisons Are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors. *The Analytic Hierarchy/Network Process. Review Royal Spanish Academy of Sciences. Series A, Mathematics*, vol. 102, N°2, 251–318.
- Selby, M.J., 1993. *Hillslope Materials and Processes*, Oxford: Oxford University Press, pp 480.
- Sellés, D., Gana, P., 2001. Geología del área de Talagante-San Francisco de Mostazal, regiones Metropolitana y Libertador General Bernardo O'Higgins. Carta Geológica de Chile N°74, Subdirección Nacional de Geología, Servicio Nacional de Geología y Minería. Mapa escala 1:100.000.
- Sepúlveda, A., Patiño, J., 2016. Metodología para la evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia. Trabajo de Grado. Maestría en Ingeniería Civil. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá.
- Sepúlveda, S. A., 1998. Metodología para Evaluar la amenaza de Flujos de Detritos en Ambientes Montañosos: Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Departamento de Geología, Universidad de Chile.

- Sepúlveda, S. A., Moreiras, S.M., Lara, M., Alfaro, A., 2014. Debris flows in the Andean ranges of central Chile and Argentina triggered by 2013 summer storms: characteristics and consequences. *Landslides*, 2015 12:115–133.
- Sepúlveda, S. A., Padilla, C., 2008. Rain-induced debris and mud flow triggering factors assessment in the Santiago Cordilleran foothills, Central Chile. *Nat Hazards* 47:201–215.
- SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería), 2013a. Reconocimiento geológico de los eventos de remoción en masa ocurridos el 21 de enero de 2013, en el Cajón del Río Maipo, Región Metropolitana. Chile.
- SERNAGEOMIN (Servicio Nacional de Geología y Minería), 2013b. Reconocimiento de depósitos de flujos de detritos en cursos fluviales de la cuenca del río Maipo, resultantes de remociones en masa del 21 de enero y 8 de febrero de 2013, en la Región Metropolitana, y priorización para su eventual limpieza, a objeto de prevenir su impacto en el normal abastecimiento de agua potable para la Región Metropolitana. Chile.
- Solís, E., 1995. Modelación matemática de corrientes de detritos. Memoria para optar al Título de Ingeniero Civil, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Chile.
- Thiele, R., 1980. Geología de la Hoja de Santiago, Región Metropolitana. Carta Geológica de Chile No. 39. Instituto de Investigaciones Geológicas. 1 mapa. 51 p.
- UNISDR (United Nations International Strategy for Disaster Reduction), 2009. Terminology on Disaster Risk Reduction. United Nations.
- Viale, M., Garreaud, R., 2014. Summer Precipitation Events over the Western Slope of the Subtropical Andes. *Monthly Weather Review*, Vol. 146, pp. 1074–1092.
- WSL (Institute for Snow and Avalanche Research SLF), 2013. Rapid mass movements simulation (RAMMS): User Manual v1.5 Debris Flow. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Swiss Federal Institutes of Technology.
- WSL (Institute for Snow and Avalanche Research SLF), 2017. Rapid mass movements simulation (RAMMS): User Manual v1.7 Debris Flow. Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Swiss Federal Institutes of Technology.

ANEXOS

**METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA AMENAZA DE FLUJOS DE
DETRITOS UTILIZANDO UN ANÁLISIS JERÁRQUICO DE PROCESOS
Y EL SOFTWARE RAMMS, CON APLICACIÓN EN LA CUENCA DEL
ESTERO SAN ALFONSO, REGIÓN METROPOLITANA**

Anexo I

Clasificación de flujos

En este Anexo se describe brevemente cada una de las distintas remociones en masa que exhiben un movimiento tipo flujo (*flow-like*), según Hungr et al. (2014) y apoyado en Proyecto Multinacional Andino (2007). Es importante tener en cuenta el rango de velocidades descrito en la Tabla 2.2, ya que se usa para describir cada tipo de remoción en masa que se muestran a continuación:

1. **Avalancha de roca/hielo (*rock/ice avalanche*):** movimiento tipo flujo extremadamente rápido, masivo, de roca/hielo fragmentado. Generalmente se genera desde un gran deslizamiento de roca/hielo o caída de roca/hielo. El hielo de los glaciares suele estar involucrado en este proceso y puede formar una parte, o posiblemente toda la masa móvil, o una avalancha de roca puede moverse sobre la superficie de un glaciar (ver Figura I.1a)
2. **Flujo seco de arena/limo/detritos (*sand/silt/debris dry flow*):** movimiento tipo flujo lento o rápido de material granular suelto de buena o mala selección y puede estar seco, húmedo o subacuático, sin exceso de presión de poros. Los materiales granulares secos tienden a fallar por deslizamiento superficial a lo largo de superficies planas, inclinados en un ángulo de ladera que se encuentra unos grados bajo el ángulo (*estático*) superior de reposo (ver Figura I.1b).

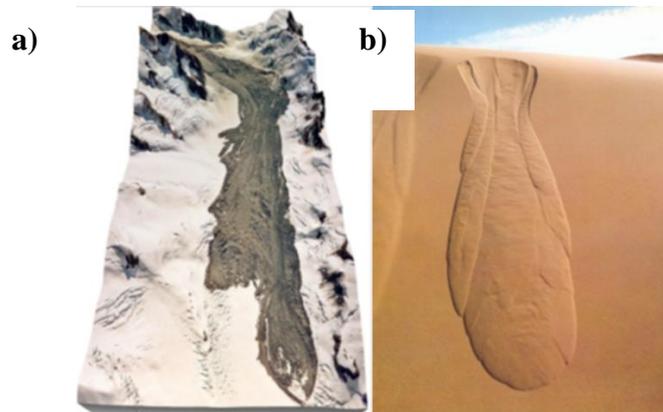


Figura I.1. Ejemplos de a) avalancha de roca y b) flujo seco de arena. Según Hungr et al. (2014).

3. **Deslizamiento por flujo de arena/limo/detritos (*sand/silt/debris flowslide*):** movimiento tipo flujo muy rápido a extremadamente rápido de material granular saturado de buena o mala selección, en laderas de pendiente moderada, involucrando un exceso de presión de poros o licuefacción (*in situ*) de material proveniente de la fuente de la remoción en masa. El material puede variar de arena suelta a detritos sueltos (residuos mineros o rellenos), *loess* y limo. Usualmente se originan como una falla retrogresivo. Puede ocurrir en ambiente subaéreo o subacuático (ver Figura I.2a).
4. **Deslizamiento por flujo de arcilla sensitiva (*sensitive clay flowslide*):** flujo o arcilla sensitiva licuada muy rápida a extremadamente rápida, debido al remoldeamiento durante una falla deslizante retrogresivo múltiple, en o cerca, el contenido de agua original. Rápidas pérdidas de esfuerzo por el repentino remoldeamiento en el contenido de humedad durante la falla, produce en las arcillas sensitivas un comportamiento similar en su efecto a la licuefacción (ver Figura I.2b)

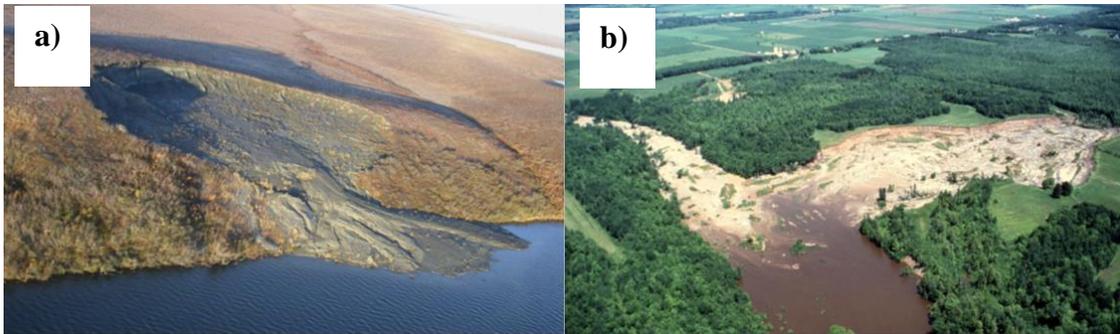


Figura I.2. Ejemplos de a) deslizamiento por flujo de arena/limo/detritos y b) deslizamiento por flujo de arcilla sensitiva. Según Hungr et al. (2014).

5. **Flujo de detritos (*debris flow*):** flujo muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados, no plásticos (Índice de Plasticidad menor al 5%) que transcurre principalmente confinado a lo largo de un canal o cauce con pendiente pronunciada (Proyecto Multinacional Andino, 2007). Presenta un fuerte arrastre de material y agua en la trayectoria del flujo hasta ser depositados en abanicos aluviales (ver Figura I.3a).
6. **Flujo de lodo (*mud flow*):** flujo canalizado muy rápido a extremadamente rápido de detritos saturados plásticos, cuyo contenido de agua es significativamente mayor al del material fuente (Índice de Plasticidad mayor al 5%). El carácter de este tipo de movimiento es similar al del flujo de detritos, pero la fracción arcillosa modifica la reología del material (Proyecto Multinacional Andino, 2007). Presenta un fuerte arrastre de material y agua en la trayectoria del flujo hasta ser depositados en abanicos aluviales (ver Figura I.3b).



Figura I.3. Ejemplos de depósitos de a) flujo de detritos y b) flujo de barro. Según Muñoz (2016) y Hungr et al. (2014), respectivamente.

7. **Crecida de detritos (*debris flood*):** flujo muy rápido de una crecida de agua que transporta una gran carga de detritos a lo largo de un canal, usualmente también llamados flujos hiperconcentrados (Hungr et al., 2001) o avenidas de detritos. Las crecidas de detritos se caracterizan por caudales *peak* 2 ó 3 veces mayores que el de una crecida de agua o inundación (ver Figura I.4a)
8. **Avalancha de detritos (*debris avalanche*):** flujo no canalizado de detritos saturados o parcialmente saturados, poco profundos, muy rápidos a extremadamente rápidos. Estos movimientos comienzan como un deslizamiento superficial de una masa de detritos que al

desplazarse sufre una considerable distorsión interna y toma la condición de flujo (Hungre et al., 2001; Proyecto Multinacional Andino, 2007). Presentan un menor grado de saturación que los flujos de detritos, y que no tienen un ordenamiento de la granulometría del material en sentido longitudinal, ni tampoco un frente de material grueso en la zona distal (Hungre et al., 2001) (ver Figura I.4b). Ocurren a toda escala.

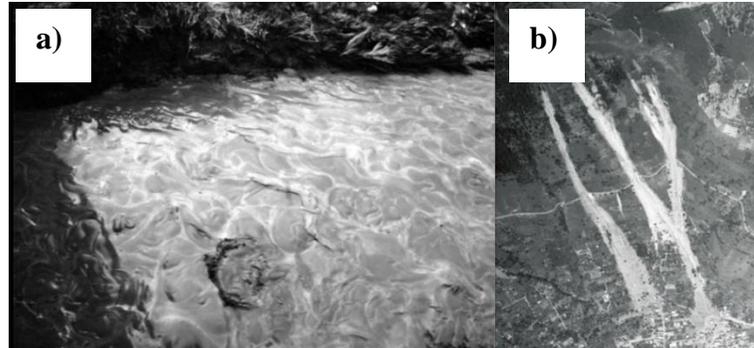


Figura I.4. a) Ejemplo de la superficie de flujo hiperconcentrado revelando un patrón reticulado, según Pierson (2005). b) Ejemplo de avalancha de detritos, según Hungre et al. (2014).

9. **Flujo de tierra (*earthflow*):** movimiento tipo flujo intermitente, rápido o lento, de suelo arcilloso plástico, facilitado por una combinación de deslizamiento a lo largo de múltiples superficies de cizalle discretas, y deformación de cizalle interna. A lo largo de periodos alternada dominancia relativa con *crecidas* más rápidas. Ocurren en suelos mixtos, perturbados y plásticos, los cuales subyacen cerca del Límite Plástico (ver Figura I.5a).
10. **Flujo de turba (*peat flow*):** flujo rápido de turba licuada, causado por una falla no drenada, es decir, que involucra una alta presión de poros. La turba es un material orgánico liviano con grados variables de textura fibrosa. Esta presencia de fibras orgánicas y granos minerales entregan a la turba un ángulo de fricción interna ligeramente alto en condiciones drenadas, sin embargo, durante carga no drenada el alto contenido de agua hace susceptible el material a un dramático debilitamiento (ver Figura I.5b).

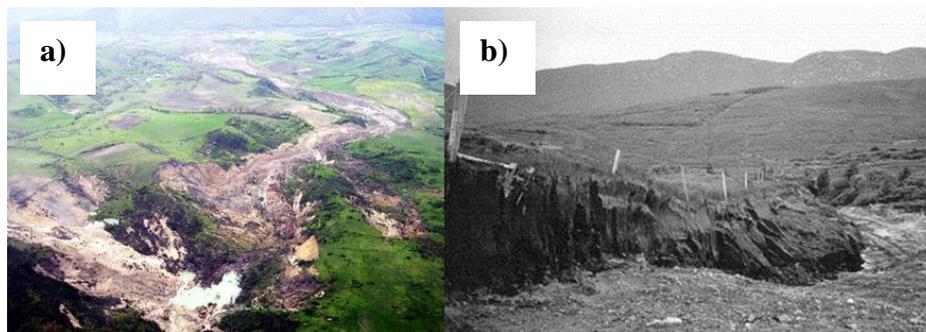


Figura I.5. a) Ejemplo de flujo de tierra, según Hungre et al. (2014). b) Ejemplo de flujo de turba según Dykes & Warburton (2007).

Anexo II

Resumen de modelos hidráulicos para flujos de detritos

En este Anexo, se resumen los modelos hidráulicos para flujos de detritos que se muestran en la Tabla II.1.

Tabla II.1. Modelos que muestran la fricción de un flujo. Modificado de Bono (2014).

Modelo	Ecuaciones, parámetros y descripción
<p>Modelo Mohr-Coulomb (Esfuerzo de cizalle)</p>	$\tau = c + \sigma'_n * \mu$ <p>τ: resistencia al corte c: cohesión $\sigma'_n = \sigma_n - \varrho$ σ_n: esfuerzo normal ϱ: presión de poros $\mu = \tan \Phi$ Φ: ángulo de fricción interna</p> <p>-Relaciona de manera simple los parámetros de resistencia de un material (τ, c, σ'_n, Φ), y permite la representación bidimensional de los estados de esfuerzos a través del Círculo de Mohr.</p>
<p>Modelo de Bingham (Coulomb-viscoso)</p>	$\tau_B = c + \sigma'_n * \mu + \eta * \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)$ <p>τ_B: resistencia al corte Bingham c: cohesión $\sigma'_n = \sigma_n - P$ σ_n: esfuerzo normal P: presión de poros $\mu = \tan \Phi$ Φ: ángulo de fricción interna η: viscosidad $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)$: gradiente de velocidades dentro del flujo</p> <p>-Describe el movimiento de flujos de lodo y arcilla (finos). Se infiere una barrera de arcillas rígida. Incorpora la viscosidad como parámetro de resistencia en el modelo de Mohr-Coulomb.</p>

Continuación de Tabla II.1.

Modelo	Ecuaciones, parámetros y descripción
<p>Modelo de Herschel-Bulkley (Tomado de Sepúlveda (1998))</p>	$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right) = 0 \Leftrightarrow \tau_B < \tau_C;$ $\tau_B = \tau_C + \eta * \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^n ; \eta, n > 0$ <p>τ_B: resistencia al corte del modelo τ_C: yield strength η: viscosidad n: número de potencia $\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)$: gradiente de velocidades dentro del flujo</p> <p>-Expresa que a concentración creciente, la mezcla se comporta sucesivamente como un fluido newtoniano, pseudoplástico, pseudoplástico con esfuerzo de fluencia y como un plástico de Bingham (ver Figura 14). El <i>yield strength</i> depende del grado de turbulencia, y cuantifica la cantidad de sólidos en la matriz, tal que si es sobrepasado, la masa se fluidiza. Si el comportamiento corresponde a un fluido newtoniano, $\tau_c = 0$, $n=1$ y K corresponde a la viscosidad. Para un plástico de Bingham, $\tau_c \neq 0$ y $n=1$.</p>
<p>Modelos combinados</p>	$\tau_B = \vartheta * (\rho_S * g * h - P) * \mu$ <p>τ_{Ba}: resistencia al corte ϑ: fracción de sólidos ρ_S: densidad de sedimentos g: gravedad h: altura del flujo $\mu = \tan \emptyset$ \emptyset: ángulo de fricción interna</p> <p>-Combina el modelo friccional de Coulomb y la pérdida en la colisión entre partículas.</p>

Continuación de Tabla II.1.

Modelo	Ecuaciones, parámetros y descripción
Modelo de Bagnold	$\tau_{Ba} = \vartheta * \rho_s * d^2 * \left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)^2$ <p>τ_{Ba}: resistencia al corte Bagnold ϑ: fracción de sólidos ρ_s: densidad de sedimentos d: diámetro de las partículas u: velocidad dentro del flujo $\left(\frac{\partial u}{\partial t}\right)$: gradiente de velocidades del flujo</p> $N = \frac{\rho_s * \lambda^2 * d^2}{\eta} * \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right);$ <p>$\left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)$: gradiente de velocidades dentro del flujo</p> $\lambda = \frac{C_m^{1/2}}{C_m^{1/2} - C_s^{1/3}}$ <p>C_m: máxima concentración volumétrica de sedimentos C_s: concentración volumétrica promedio de sedimentos</p> <p>-Divide los flujos desde un punto de vista mecánico, según la granulometría de los sólidos. Granulométricamente reconoce finos (<100-200 μm) y gruesos (>100-200 μm); para los primeros, la distribución de velocidades en el flujo se asocia a una ley constitutiva tipo Bingham, existiendo una zona superior con velocidad media constante y una zona inferior donde la velocidad crece con la altura. Mientras que los segundos los clasifica en flujo inercial, flujo macroviscoso y una zona transicional, según el <i>Número de Bagnold</i> (N). El flujo inercial está dominado por los choques intergranulares y la relación de esfuerzo-deformación es cuadrática; se asocia a $N > 450$. Para el flujo macroviscoso los efectos intersticiales, como la viscosidad, son preponderantes, la relación esfuerzo-deformación es lineal y se produce una distribución de velocidades de tipo laminar, con la viscosidad dependiendo de la concentración volumétrica de sólidos; se asocia un $N < 40$. Si $450 \geq N \geq 40$ se considera como una transición.</p>

Anexo III

Resumen de estudios orientados a evaluar la susceptibilidad de remociones en masa

En las Tabla 1 se muestra un resumen de estudios orientados a evaluar la susceptibilidad de remociones en masa en los cuales se utilizaron factores condicionantes.

Tabla III.1. Resumen de estudios orientados a evaluar la susceptibilidad de remociones en masa en los cuales se utilizaron factores condicionantes. Modificada de Sepúlveda & Patiño (2016).

Nº	Geología	Elevación	Pendiente	Curvatura	Orientación	Uso de suelo, vegetación o clima	Antecedentes	Geotecnia	Geomorfología	Hidrogeología	Morfometría	Antrópico	Autor	Documento
1	x		x		x	x	x	x	x	x		x	Sepúlveda (1998)	Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos: aplicación en la quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana
2	x		x		x	x	x	x	x	x		x	Lara (2007)	Metodología para la evaluación y zonificación de peligro de remociones en masa con aplicación en quebrada San Ramón, Santiago Oriente, Región Metropolitana
3	x		x		x	x	x	x	x	x		x	Muñoz (2013)	Susceptibilidad de remociones en masa y de respuesta sísmica asociada a fallas mayores en zonas urbanas
4	x	x	x		x		x						Esper (2014)	<i>Debris flow susceptibility mapping in a portion of the Andes and Preandes of San Juan, Argentina using frequency ratio and logistic regression models</i>

Continuación 1 de Tabla III.1.

Nº	Geología	Elevación	Pendiente	Curvatura	Orientación	Uso de suelo, vegetación o clima	Antecedentes	Geotecnia	Geomorfología	Hidrogeología	Morfometría	Antrópico	Autor	Documento
5						x		x	x				Roa (2013)	Aproximación al Mapa de Susceptibilidad y Amenazas por Deslizamientos de la Ciudad de Trujillo, Venezuela
6		x	x	x		x							Azañón et al. (2011)	Metodología para el análisis de la susceptibilidad frente a deslizamientos en el Parque Nacional de Sierra Nevada mediante SIG. España
7	x		x			x	x						Gómez et al. (2012)	SIG para determinar la susceptibilidad a movimientos en masa en la cuenca del río Campo alegre
8	x	x	x		x		x						Esper (2011)	Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos, mediante SIG, en una porción del departamento de iglesia San Juan
9	x		x		x	x	x	x	x	x		x	Molina (2016)	Análisis de susceptibilidad de remociones en masa en las Costas del Fiordo Comau, X Región, Chile
10	x	x	x			x	x						Lionel & Bilberto (2013)	Susceptibilidad a los movimientos en masa en la cuenca de la quebrada Hualanga. Patatz, La Libertad

Continuación 2 de Tabla III.1.

Nº	Geología	Elevación	Pendiente	Curvatura	Orientación	Uso de suelo, vegetación o clima	Antecedentes	Geotecnia	Geomorfología	Hidrogeología	Morfometría	Antrópico	Autor	Documento
11	x		x	x		x							Sepúlveda & Patiño (2016)	Metodología para la evaluación de riesgo por flujo de detritos detonados por lluvia
12	x		x			x			x				Moreiras (2004)	<i>Landslide susceptibility zonation in the Río Mendoza Valley, Argentina</i>
13	x		x			x			x		x		Mardones & Vidal (2012)	La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico: un instrumento para la planificación urbana
14	x	x	x	x		x							Zangeneh et al. (2011)	<i>Debris flow hazard zoning in urban watersheds using the bivariate method, a case study in Tehran, Iran</i>
15	x		x			x							Carrasco et al. (2013)	<i>Hazard Zoning for Landslides Connected to Torrential Floods in the Jerte Valley (Spain) by using GIS Techniques</i>
16							x					x	Correa (2011)	Análisis de la susceptibilidad de los fenómenos de remoción en masa de la carretera Loja-Zamora
17	x	x	x		x								Moreiras (2013)	Análisis estadístico probabilístico de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los ríos Las Cuevas y

Anexo IV

Trabajo en terreno

Puntos visitados en terreno

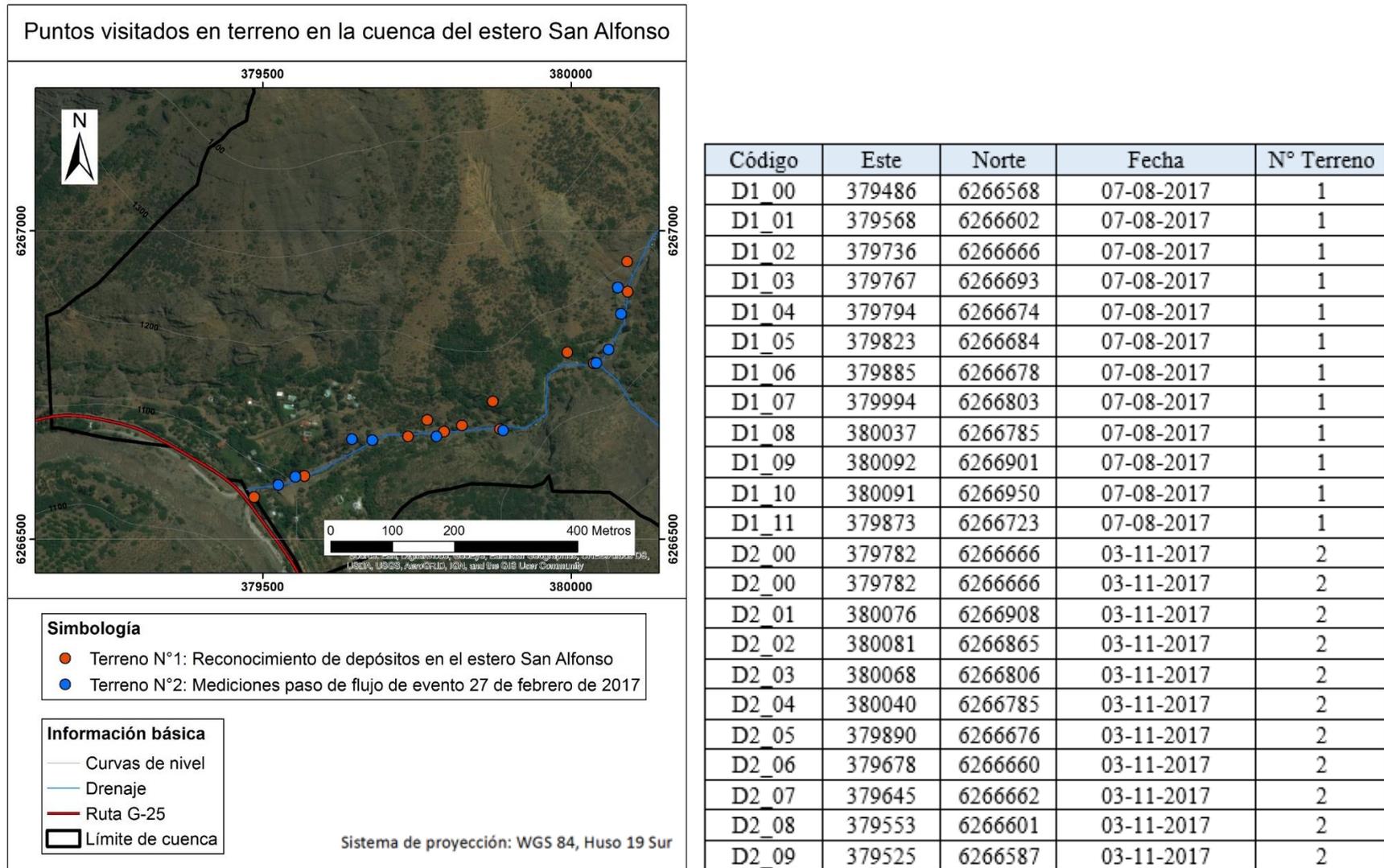


Figura IV.1. Puntos visitados en terreno en la cuenca del estero San Alfonso.

Terreno N°1: Reconocimiento de depósitos en el estero San Alfonso

Tabla IV.1. Reconocimiento en terreno de depósitos en el estero San Alfonso.

Código	Descripción
D1_00	<p>Se distinguen dos tipos de depósitos: 1) Depósito en el cauce del estero San Alfonso, bien gradado compuesto de clastos de color gris sub-angulosos a subredondeados, de baja esfericidad, principalmente entre 5 y 30 cm, pero hasta de 1 m de diámetro, sueltos en una matriz areno-limosa, con apreciable contenido de finos. Su espesor original no es apreciable dado que el material fue removido por trabajos de obra. 2) Depósito aterrazado pobremente gradado compuesto de clastos de color gris subredondeados, de baja esfericidad, entre 5 y 30 cm, pero hasta de 3 m de diámetro, inmersos en una matriz areno-limosa firme. Presenta además una cobertura de suelo orgánico en su parte superior, de hasta 1 m de espesor. La altura del depósito alcanza 6 m. La litología de ambos depósitos corresponde a areniscas, conglomerados y brechas sedimentarias.</p>
 <p>En la imagen se muestran los depósitos descritos anteriormente, además se incluye la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de depósitos (línea negra), el desprendimiento de bolones de bloque aterrazado en el cauce (flecha marrón) y los clastos de mayor tamaño de ambos depósitos; fucsia y marrón respectivamente.</p>	

Continuación 1 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_01	<p>Se distinguen tres tipos de depósitos: 1) Depósito en el cauce del estero San Alfonso, bien gradado compuesto de clastos de color gris sub-angulosos a subredondeados, de baja esfericidad, principalmente entre 5 y 30 cm, pero hasta de 1 m de diámetro, sueltos en una matriz areno-limosa, con apreciable contenido de finos. Su altura original no se distingue, dado que el material fue removido por trabajos de obra. 2) Depósito aterrazado que presenta granulometría variada, que permite diferenciar al menos 3 niveles estratigráficos. El miembro inferior presenta iguales características que el depósito descrito anteriormente, pero esta vez compacto y se observa laminación paralela. Seguido a este se tiene un nivel medio, principalmente compuesto de clastos de color gris subangulosos, de baja esfericidad, de tamaño grava, inmersos en una matriz areno-limosa; pudiéndose identificar estructuras como laminación cruzada en artesa. En su parte superior, presenta una cobertura de suelo orgánico de hasta 1 m de espesor. La altura del depósito alcanza 5 m. La litología de ambos depósitos corresponde a areniscas, conglomerados y brechas sedimentarias. Además, de éste, se desprende material formando 3) un depósito coluvial sobre el cauce del estero.</p>
	
	<p>En la imagen se muestran los depósitos descritos anteriormente, además se incluye la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de depósitos (líneas negra) y los límites entre los niveles del depósito aterrazado (líneas marrón).</p>

Continuación 2 de Tabla IV.1.

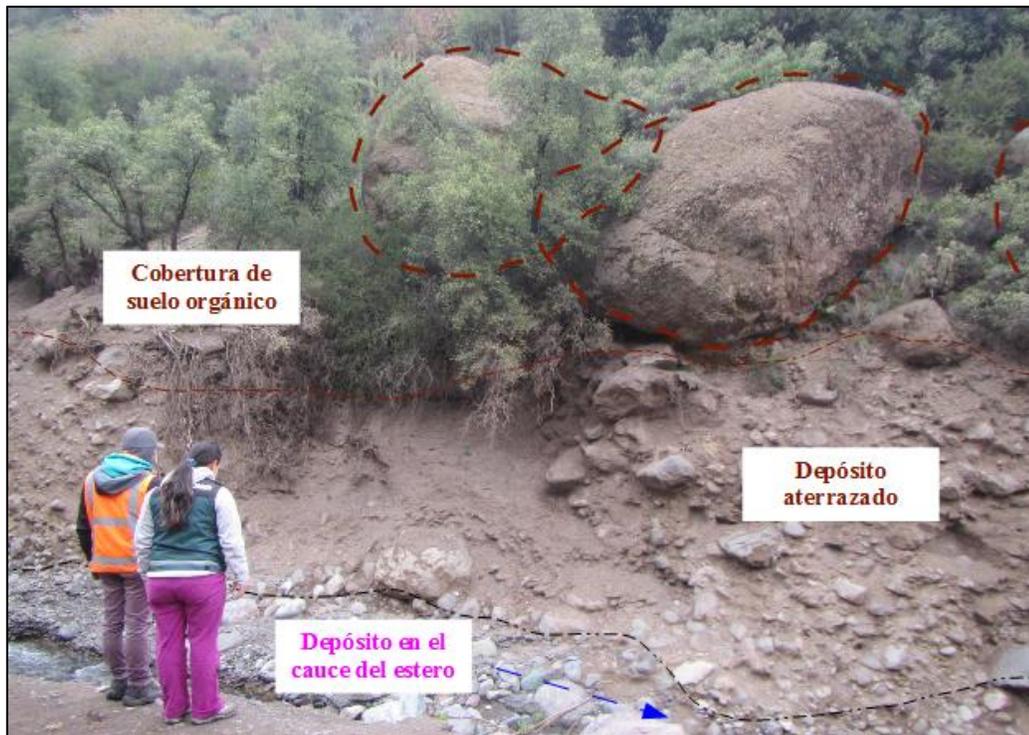
Código	Descripción
D1_02	Se distinguen dos tipos de depósitos: 1) Depósito en el cauce del estero San Alfonso, bien gradado compuesto de clastos de color gris sub-angulosos a subredondeados, de baja esfericidad, principalmente entre 10 y 50 cm, pero hasta de 2 m de diámetro, sueltos en una matriz arenosa. Su espesor está delimitado por los clastos de mayor tamaño. 2) Depósito aterrazado pobremente gradado compuesto de clastos de color gris subredondeados, de baja esfericidad, entre 5 y 30 cm, pero hasta de 2 m de diámetro, inmersos en una matriz arenolimosa, firme. Presenta, además una cobertura de suelo orgánico en su parte superior, de hasta 1 m de espesor. La altura del depósito alcanza 8 m. Las litologías de ambos depósitos corresponden a areniscas, conglomerados y brechas sedimentarias.



En la imagen se muestran los depósitos descritos anteriormente, además se incluye la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de depósitos (línea negra), el límites entre depósito aterrazado y su cobertura de suelo orgánico (líneas marrón), los clastos de mayor tamaño de ambos depósitos; fucsia y marrón respectivamente. Adicionalmente, se muestran los espacios dejados por el desprendimiento de bolones a partir del depósito aterrazado (línea roja).

Continuación 3 de Tabla IV.1.

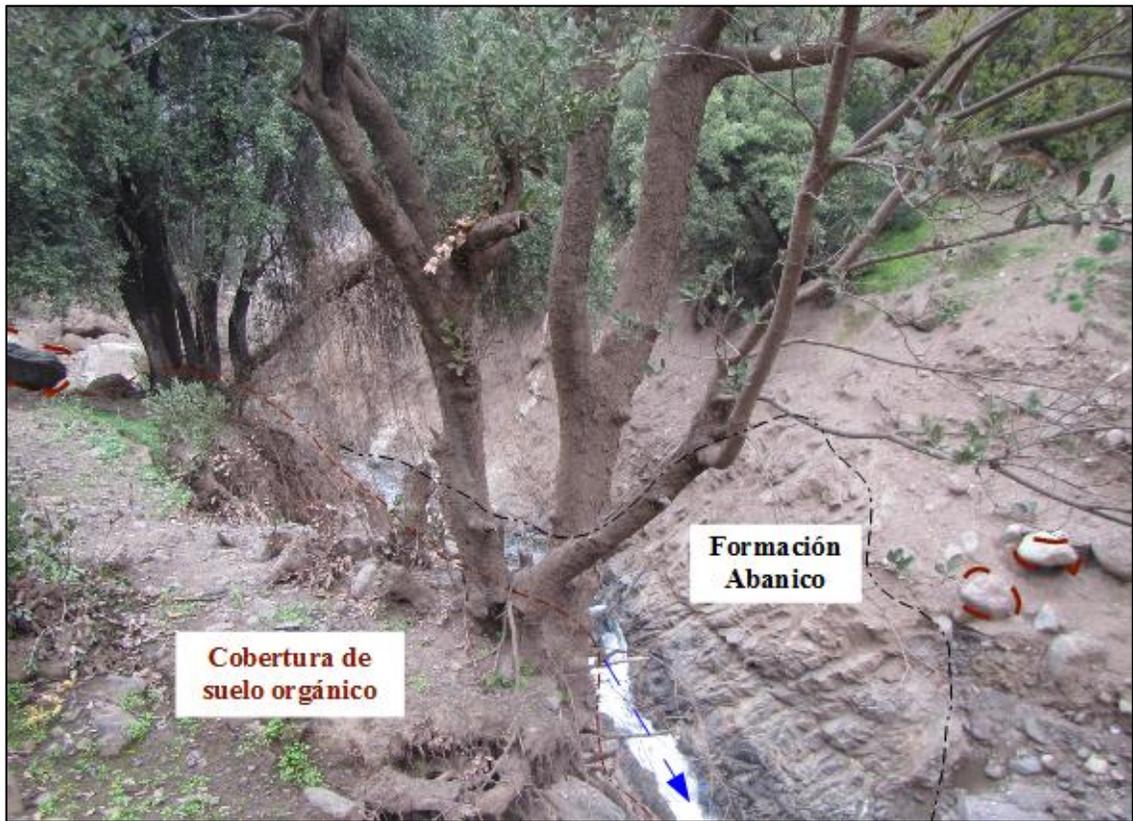
Código	Descripción
D1_03	Se observan los mismos depósitos de D1_02, pero <u>a diferencia de este, sobre el depósito aterrazado se observan 3 grandes bolones de cerca de 6 m de diámetro.</u> Además, en la ladera al NW del cauce, se observa otro depósito sobre el aterrazado, el cual corresponde a un depósito con clastos centimétricos a decimétricos, subredondeados de baja esfericidad, de misma composición que los anteriores, inmersos en una matriz areno-limosa firme, presenta una cubierta vegetal de densidad media.



En la imagen se muestran los tres grandes bolones (marrón). Además se incluye la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de depósitos (línea negra), el límites entre depósito aterrazado y su cobertura de suelo orgánico (líneas marrón). Personas observando desde la ladera NW.

Continuación 4 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_04	Se observan los mismos depósitos del punto D1_03, sin embargo, en lugar de los megabolones, se observan otros de menor tamaño, entre 1 y 2 m de diámetro. Y también en el cauce principal, se observa un afloramiento de roca que contiene el depósito en el cauce del estero.



En la imagen se muestran los clastos de menor tamaño (marrón). Además se incluye la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de depósitos (línea negra), el límites entre depósito aterrazado y su cobertura de suelo orgánico (líneas marrón).

Continuación 5 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_05	Se observan los mismos depósitos que en el punto D1_02. Sin embargo, la ladera SE del cauce, esta vez está delimitada por una pared rocosa, mientras que en la ladera NW se observan hasta decenas de bloques de gran tamaño entre 1 m y 3 m. Adicionalmente, es importante destacar que el canal es considerablemente más estrecho y profundo en comparación a los puntos anteriores (< 50%), siendo observable gargantas de considerable sinuosidad. Se distinguen 3 manifestaciones de la Formación Abanico: 1) Unidad Abanico fracturada, 2) Unidad Abanico competente y 3) Unidad Abanico cubierta de suelo.



En la imagen se muestran bolones (marrón) en la ladera NW. Además se incluye la dirección de escorrentía del estero (flecha azul) que muestra la sinuosidad del canal, los límites de litologías (línea negra), el límites entre depósito aterrazado y su cobertura de suelo orgánico (líneas marrón). Adicionalmente, se muestran 3 manifestaciones de la Formación Abanico.

Continuación 6 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_06	Mismas observaciones que el punto D1_05. Esta vez se puede apreciar la presión y capacidad erosiva del flujo del 25 de febrero de 2017, de tal forma que se observa evidencia del arranque de un trozo de roca de la pared rocosa. Y un charco de ola de una altura aproximada de hasta 16 m asociado al mismo evento del 25 de febrero de 2017.



En la imagen se muestra la zona arrancada por el paso del flujo del 25 de febrero de 2017 (línea roja). Además se incluye la dirección de escorrentía del estero (flecha azul) y los límites de litologías (línea negra).

Continuación 7 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_07	<p>Se distinguen tres tipos de depósitos: 1) Depósito en el canal de estiaje del estero San Alfonso, bien gradado compuesto de clastos de color gris subangulosos a subredondeados, de baja esfericidad, principalmente entre 5 y 20 cm, pero hasta de 1 m de diámetro, sueltos en una matriz arenosa. Su espesor está delimitado por los clastos de mayor tamaño. 2) Depósito ligeramente aterrazado, incidido por el cauce principal del Estero, pobremente gradado compuesto de clastos de color gris subangulosos, de baja esfericidad, entre 5 y 20 cm, pero hasta de 1 m de diámetro, inmersos en una matriz arenosa, relativamente firme. No presenta suelo orgánico, su espesor con respecto al depósito anterior, es de 1 a 3 m. 3) Depósito que sobre yace el anterior, aparentemente proveniente de pequeñas quebradas laterales (de hecho, se observa evidencia de activación de éstas), es pobremente gradado compuesto de clastos de color gris subangulosos, de baja esfericidad, reconociéndose dos poblaciones principales de tamaños, una entre 5 y 10 cm, y otra entre 50 cm y 1 m, dominancia de la primera, ambas inmersas en una matriz areno-limosa, relativamente firme. No presenta suelo orgánico, su espesor con respecto al depósito anterior, es de 1 a 2 m. Las litologías de todos estos depósitos corresponden a areniscas, conglomerados y brechas sedimentarias. Además, se reconoce la formación abanico en la ladera que encajona los depósitos.</p>
	
<p>En la imagen se muestran la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de depósitos (línea negra) y el cauce de una quebrada lateral (línea azul).</p>	

Continuación 8 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_08	Se observa mismo depósito que punto D1_07. Sin embargo, se observa en el lecho del canal el afloramiento de roca. Y una mayor cantidad de bloques sueltos de 1 a 2 m en el depósito ligeramente aterrazado. Además, se reconoce evidencia de erosión de flujo del 25 de febrero de 2017, alcanzando 3 m de altura.



En la imagen se muestran la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de litologías (línea negra) y la erosión por el paso de flujo del 25 de febrero de 2017 (línea roja).

Continuación 9 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_09	Se observa mismo depósito que punto D1_08. Además, se reconoce una mayor estrechez del valle. Cuyas laderas más altas observables, presentan rocas fuertemente fracturadas e incluso deformadas. La parte de mayor deformación está contigua con una pequeña quebrada lateral. Se reconoce un charco de ola de 7 m aproximadamente.



En la imagen se muestran la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de litologías (línea negra) y la erosión por el paso de flujo del 25 de febrero de 2017 (línea roja).

Continuación 10 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_10	Se observa mismo depósito que punto D1_06, pero esta vez en ambos lados de confinamiento del canal se observa afloramiento rocoso de disposición vertical, de gran estrechez (un poco más que el punto D1_06). <u>Se reconoce una erosión de 3 m, justo después de la salida de la garganta aguas abajo. Aguas arriba, en la garganta, se observa un bolón de 8 m de diámetro obstruyendo el canal de drenaje. Y un charco de ola de aproximadamente 13 m</u>



En la imagen se muestran la dirección de escorrentía del estero (flecha azul), los límites de litologías (línea negra) y la erosión por el paso de flujo del 25 de febrero de 2017 (línea roja).

Continuación 11 de Tabla IV.1.

Código	Descripción
D1_11	A partir de la ladera NW, se observa depósitos en altura de la ladera NE, por sobre los vistos anteriormente. Lo importante es que se reconoce un depósito de remoción en masa de clastos angulosos y sin estructuras reconocibles (posiblemente avalancha de detritos o deslizamiento), sobreyaciendo un depósito posiblemente aterrazado con clastos subredondeados a redondeados (¿fluvial o aluvial?), de baja esfericidad, con leve imbricación.



En la imagen se muestran los límites de depósitos (línea negra).

Terreno N°2: Mediciones de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017



Figura IV.2. Medición en punto D2_00 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.



Figura IV.3. Medición en punto D2_01 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.



Figura IV.4. Medición en punto D2_02 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.

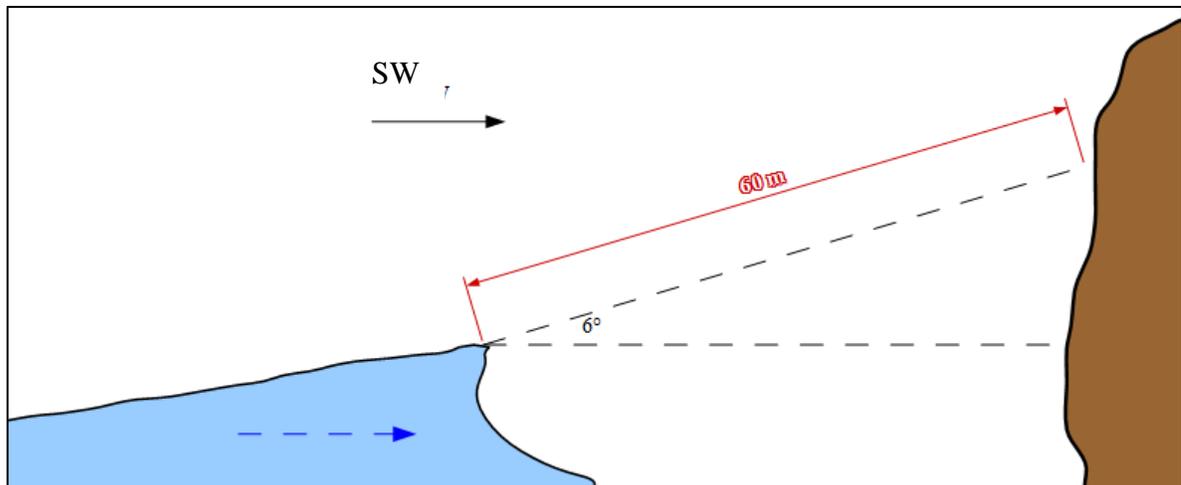


Figura IV.5. Medición en punto D2_03 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.

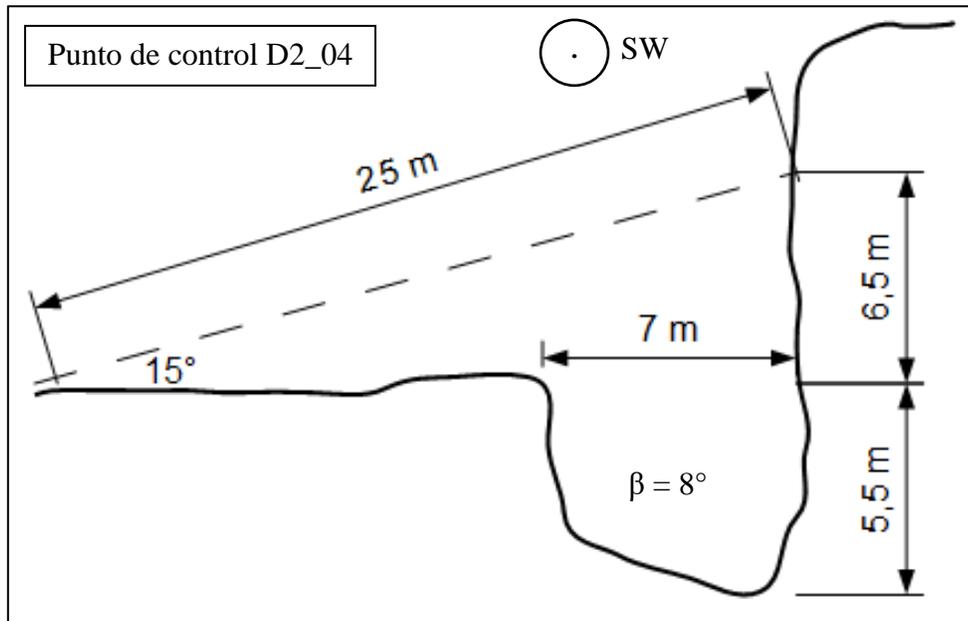


Figura IV.6. Medición en punto D2_04 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.

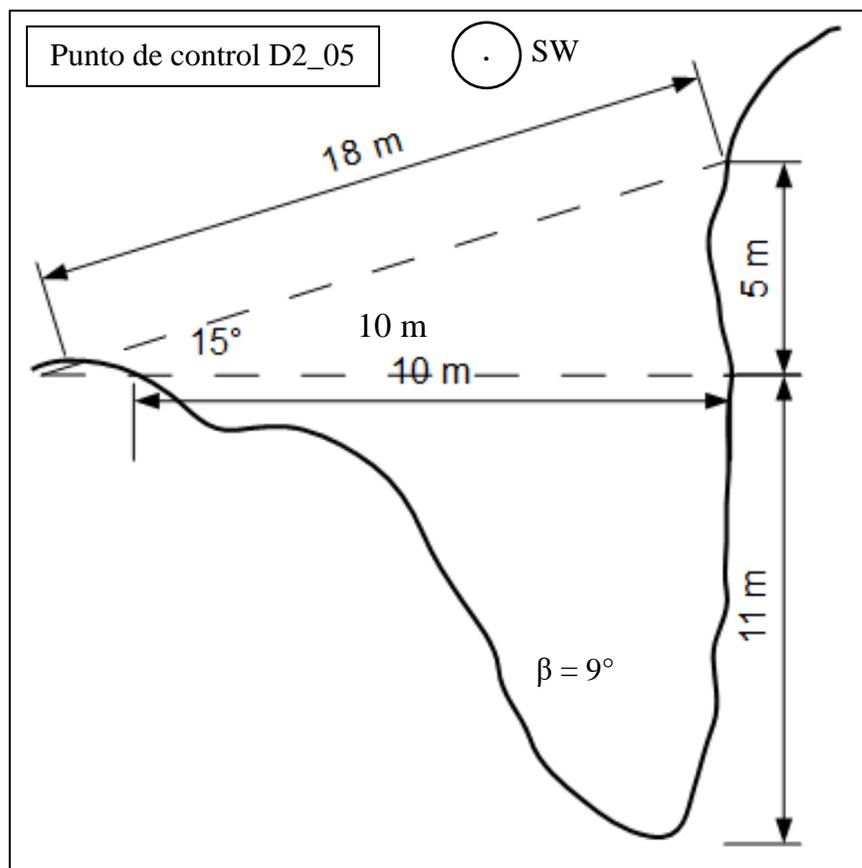


Figura IV.7. Medición en punto D2_05 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.



Figura IV.8. Medición en punto D2_06 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.



Figura IV.9. Medición en punto D2_07 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.



Figura IV.10. Medición en punto D2_08 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.



Figura IV.11. Medición en punto D2_09 de la trayectoria del flujo del 25 de febrero de 2017.

Terreno N°3: Puntos de elevación tomados con GPS diferencial

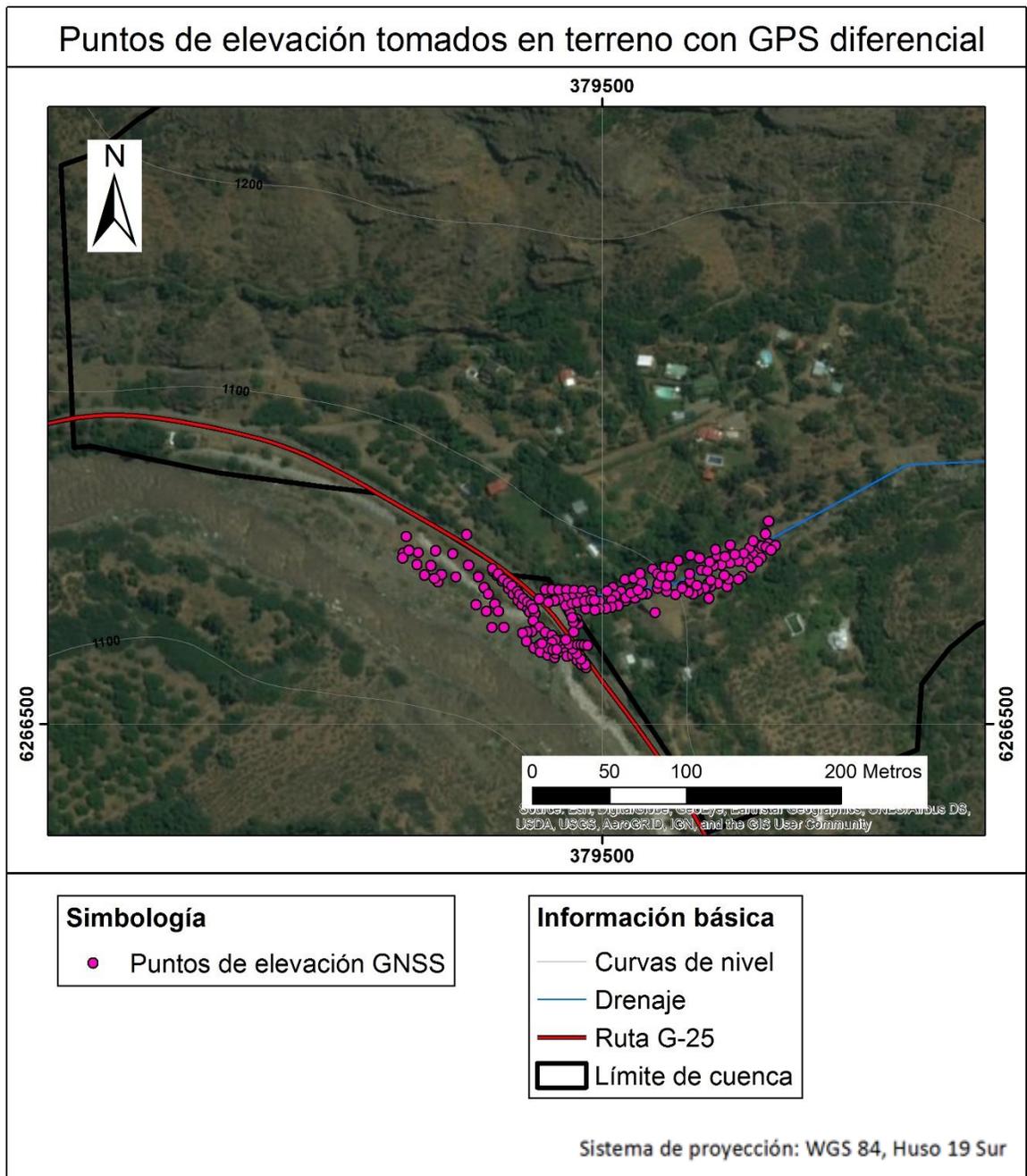


Figura IV.12. Puntos de elevación tomados con GNSS diferencial.

Evidencias que permiten distinguir el tipo de flujo del evento de 25 de febrero de 2017 basado en Pierson (2005)

Tabla IV.2. Formas y márgenes de depositación como evidencias para distinguir el tipo de flujo del evento de 25 de febrero de 2017. En color rojo se destaca lo observado para tal evento.

Inundaciones	Flujos hiperconcentrados	Flujos de detritos
Comunmente presentan dunas u ondulitas en la superficie	Sin dunas o ondulitas en la superficie	
Superficies cortadas por canales y depresiones de socavación	Superficies cortadas por canales y depresiones de socavación. Usualmente están incrustadas con <i>boulders</i> de forma más aleatoria que las inundaciones	Relieve positivo (morfología convexa de la superficie donde ocurre la detención del flujo). Superficies comúnmente incrustadas con <i>boulders</i>
Usualmente los <i>levées</i> no se forman, aunque los restos pueden acumularse en los márgenes de flujo	Márgenes lobulados. Acumulaciones de clastos gruesos en los márgenes. La distribución en la superficie de clastos gruesos es bastante aleatoria. Presenta <i>levees</i> pero no siempre se forman	
Sin recubrimientos de lodo en <i>boulders</i> , troncos o bancos	Comúnmente con revestimientos de lodo/arena en <i>boulders</i>, troncos y/o bancos	
Los clastos de grava pueden estar imbricados	Sin imbricación de grava	
Comúnmente, no se observan agrupaciones de sedimentos	Los sedimentos consolidados se agrupan en "rincones y grietas". Por ejemplo, entre las raíces de los árboles, en las cavidades de árboles, edificios, riberas, etc.	
Sin represamiento de sedimentos	Depósitos pueden estar represados localmente por pequeñas obstrucciones de troncos o cúmulos de rocas	Depósitos frecuentemente represados localmente por pequeñas obstrucciones de troncos o cúmulos de rocas

Además, se encontró:

1. Clastos transportados de gran tamaño (*boulders*).
2. Depósito cubierto por una capa de finos.
3. Ligero a moderado daño en la vegetación.

Tabla IV.3. Estratificación y texturas de sedimentos como evidencias para distinguir el tipo de flujo del evento de 25 de febrero de 2017. En color rojo se destaca lo observado para tal evento.

Inundaciones	Flujos hiperconcentrados	Flujos de detritos
La mayoría de los granos son redondeados a subredondeados. Cuya fuente son lechos de canales	La mayoría de los granos son subredondeados a subangulares. Cuya fuente son lechos de canales y laderas	Arena y granos finos de grava típicamente angulares a subangulares. Cuya fuente principal son laderas
Generalmente presenta estratificación: laminaciones y estratos distintos. Comúnmente con estratificación cruzada	Muestran leves estratificaciones horizontales a masivas, con grandes clastos de grava individuales y lentes, que a veces aparecen como diaméticos, masivos y poco consolidados	No presenta estratificación. Extremadamente mala selección, es decir, masivos y diaméticos
Se observan cambios abruptos en el tamaño de grano en secciones verticales. De moderada a buena selección dentro de cada estrato. Los clastos más gruesos pueden presentar imbricación	La selección es generalmente de pobre a muy pobre. No presenta generalmente cambios texturales abruptos	Gradación normal y/o inversa son comunes en secciones verticales. Clastos orientados al azar, excepto en los márgenes de flujo
Vacíos comunes entre clastos más grandes (textura con quedades)	Comunmente no presenta vacíos entre clastos más grandes (textura con oquedades)	Matriz llenando todos los vacíos, excepto en los márgenes, o donde ésta no se eliminó (no se observa)
Competencia de depósitos suelta y friable cuando está seca (es fácil excavar)	Competencia de depósitos ligeramente más consolidado que en inundaciones	Competencia firme o semi-dura. Los afloramientos son difíciles de excavar, se rompen en pequeños trozos cuando son golpeados o pateados
Superficies comúnmente tienen barras longitudinales (usualmente blindadas con clastos gruesos), dunas y/u ondulitas. Cambios abruptos en el tamaño de grano entre barras y <i>thalweg</i> de canales son típicos	Las superficies de depósito suelen ser convexas hacia arriba	Múltiples unidades de flujo comúnmente indistinguibles estratigráficamente. La distribución de los granos gruesos es bastante aleatoria en los centros de las superficies de depósito, pero está más concentrada en los márgenes de éstos. Las superficies de depósito suelen ser convexas hacia arriba

Anexo V

Sobrevuelo SERNAGEOMIN

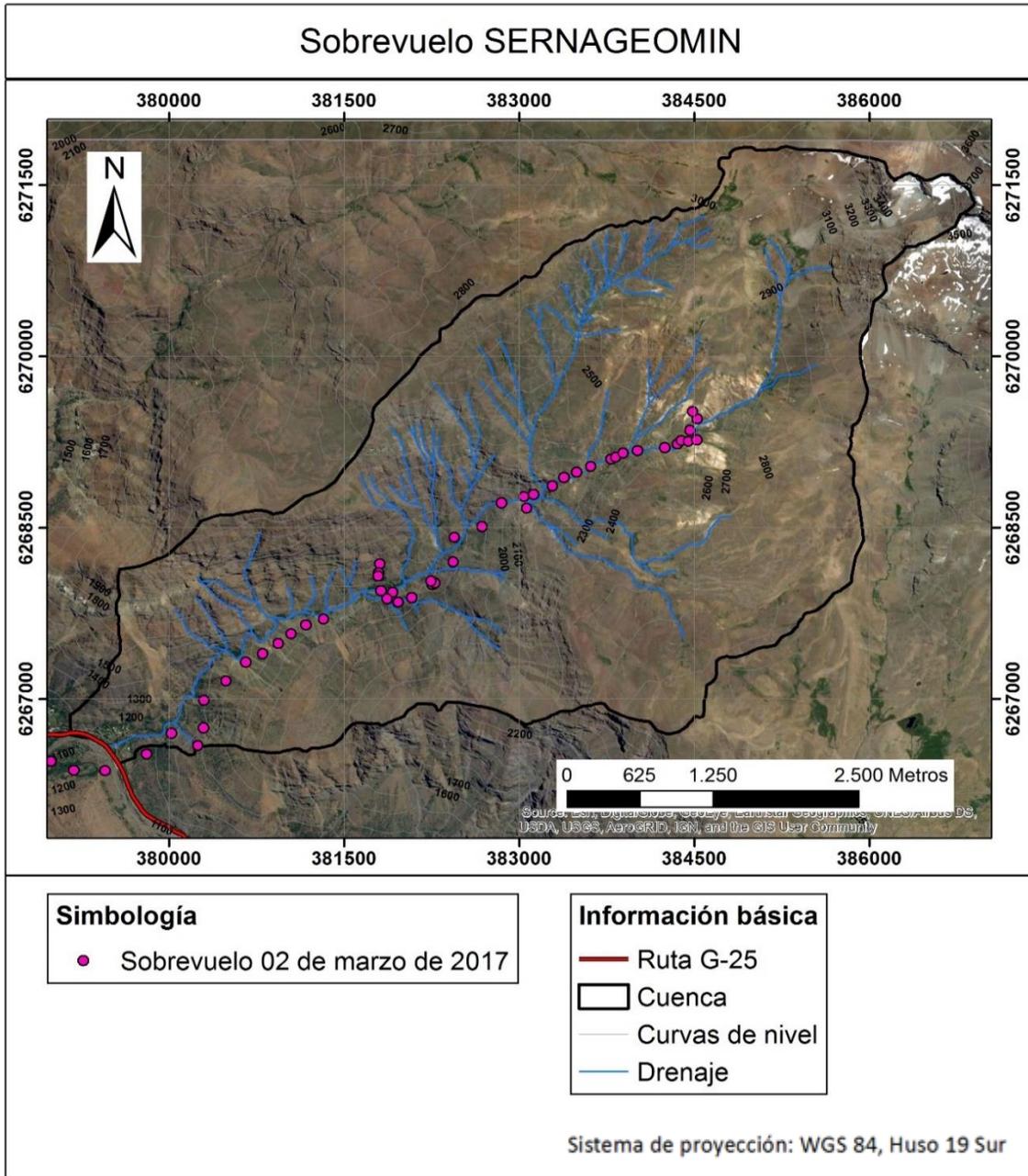


Figura V.1. Puntos de toma de fotos aéreas en sobrevuelo de SERNAGEOMIN del 02 de marzo de 2017. Gentileza de la Unidad de Peligro y Ordenamiento Territorial del SERNAGEOMIN.

Anexo VI

Justificación de comparación a pares mediante AHP

Comparación a pares entre atributos de cada factor condicionante

Tabla VI.1. Justificación de comparación a pares de los atributos del factor Geomorfología.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Cima
Ladera de caída	Una cima corresponde a una superficie plana de baja pendiente que se forma a partir de la fragmentación y meteorización in situ de material, es decir, no involucra procesos de remoción en masa de ningún tipo en ni en su origen ni forma, es por esta razón que se le atribuye menor importancia dentro de la comparación a pares. Mientras que una ladera de caída sí considera procesos de remoción en masa, aunque no necesariamente flujos. Dicho esto, es que se considera una moderada importancia de una ladera de caída sobre una cima. Valor en Escala de Saaty=3.
Interfluvio	Una cima corresponde a una superficie plana de baja pendiente que se forma a partir de la fragmentación y meteorización in situ de material, es decir, no involucra procesos de remoción en masa de ningún tipo en ni en su origen ni forma. Mientras que un interfluvio está asociado a un proceso aluvial en su origen, lo que sugeriría una importancia elevada con respecto a una cima. Sin embargo, su forma es convexa lo que disminuye su importancia. Por tanto, un interfluvio comparado con una cima es de moderada importancia. Valor en Escala de Saaty=3.
Zona de arranque	Una zona de arranque corresponde a una superficie cóncava, levemente confinada, de apariencia rasgada y generalmente con forma de micro cuenca; que se forma a partir de la erosión de roca y/o suelo y el transporte de dicho material, producto de cursos de agua incipiente o deslizamientos superficiales saturados en agua; es decir, se forma a partir de la generación de un flujo, por tanto se le transfiere la mayor importancia posible en comparación a la cima (además es de mayor importancia en comparación a todas las demás morfologías), esto es, de extrema importancia. Valor en Escala de Saaty=9.
Vía aluvial	Una vía aluvial corresponde a una superficie cóncava alargada, bien confinada, formando un canal; que se forma a partir de la combinación principalmente de erosión y transporte descendente de material fragmentado, mediante cursos de aguas, con un menor grado de deposición de éstos. Es por esta razón que se le atribuye el segundo grado de mayor importancia con respecto a una cima, dado que sigue siendo ligeramente menor que una zona de arranque, esto es una importancia muy fuerte a extrema. Valor en Escala de Saaty=8.
Abanico aluvial	Un abanico aluvial corresponde a una superficie convexa a plana, no confinada, con forma de abanico, que se forma por el desconfinamiento de cursos de agua, asociado a la desembocadura de éstos. De lo anterior se desprende que pese a ser una morfología aluvial, esta corresponde a una estabilización de este proceso, por tanto, en cuanto a la generación de flujos presenta la misma importancia que una cima. Valor en Escala de Saaty=1.

Continuación 1 de Tabla VI.1.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Cima
Terraza aluvial (agradacional)	Una terraza aluvial corresponde a una superficie de plataforma (plana), en los costados de uno o más cursos de agua y topográficamente a mayor elevación local que éstos; que se forma por disminución en la capacidad de transporte (evacuación) de sedimentos de un curso de agua. Por tanto, al igual que un abanico aluvial corresponde a una estabilización de procesos aluviales y por tanto presenta la misma importancia que una cima. Valor en Escala de Saaty=1.
Pantano	Un pantano corresponde a una depresión de poca profundidad rellena de agua estancada que se forma por este estancamiento, generalmente asociada a un desborde (inundación) de un cuerpo o curso de agua; es decir, está asociados a procesos aluviales, pero no así por procesos de remoción en masa. Por tanto, presenta una importancia moderada a fuerte en comparación con una cima. Valor en Escala de Saaty=4.
Cono de deyección	Un cono de deyección presenta una forma de cono, en las faldas de laderas de alta pendiente y se forma a partir de la acumulación de fragmentos por caída libre, rodamiento o saltación. Afectado por la gravedad. Es decir, a pesar de que no se forma a partir de un proceso aluvial, sí se genera por un proceso de remoción en masa. Por tanto, su importancia es fuerte a muy fuerte en comparación con una cima. Valor en Escala de Saaty=6.
Deslizamiento	Una morfología tipo deslizamiento, presenta una superficie lobulada (tipo <i>hummocky</i>), se reconoce una cicatriz en su fuente y se forma a partir del colapso descendente de una ladera de cerro, sobre una superficie de cizalle definida. Afectado por la gravedad. Al igual que un cono de deyección, no se forma a partir de un proceso aluvial, pero sí de un proceso de remoción en masa y, además, su superficie lobulada le transfiere una mayor importancia que un cono de deyección. Por lo anterior, un deslizamiento tiene una importancia muy fuerte en comparación con una cima. Valor en Escala de Saaty=7.
Morrena de fondo	Una morrena de fondo corresponde a una superficie lobulada (tipo <i>hummocky</i>), que se dispone por debajo de un glaciar, separándolo de su roca caja; en la actualidad o en tiempos pasados y, por tanto, se forma por la deposición de una gran cantidad de material mientras un glaciar se funde (retrocede). Por lo anterior, se sabe que no corresponde ni a una morfología aluvial ni de remoción en masa, sin embargo, la superficie lobulada le puede transferir una mayor importancia en comparación a una cima. Dicho esto, una morrena de fondo tiene una importancia leve en comparación con una cima. Valor en Escala de Saaty=2.

Continuación 2 de Tabla VI.1.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Cima
Morrena lateral	Una morrena lateral corresponde a una superficie convexa alargada, que separa un glaciar de las laderas de su roca caja; en la actualidad o en tiempos pasados y se forma por la dinámica de un glaciar, el cual transporta y acumula el material arrancado, en sus costados y paralelo a las laderas del valle. Su forma es similar a la de un interfluvio, pero no está originado por procesos aluviales o de remociones en masa, por ello, tiene menor importancia que éste. Dicho esto, una morrena lateral tiene una importancia leve en comparación con una cima. Valor en Escala de Saaty=2.
Circo glacial	Un circo glacial corresponde a una depresión con forma de anfiteatro de paredes abruptas; ubicada en las partes más altas de una montaña y se forma por erosión (excavación) glacial, en las partes más altas de una montaña. A pesar de que no se origina a partir de procesos aluviales o de remociones en masa, éste debido a su forma se ve recurrentemente afectado por estos procesos. Más aún, tanto el evento del 21 de enero de 2013 como el del 25 de febrero de 2017 se habrían generado principalmente en éstos. Dicho lo anterior, se le atribuye una importancia extrema con respecto a una cima. Valor en Escala de Saaty=9.
Cima	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Tabla VI.2. Justificación de comparación a pares de los atributos del factor Geología.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Tiac
Ah	La Unidad Abanico competente (Tiac), al ser una unidad de roca que presenta fracturamiento y meteorización leve y, además, tanto el evento del 21 de enero de 2013 como el del 25 de febrero de 2017 no se habrían generado a partir de éstos, por tanto, resulta muy poco favorable para la generación de flujos. Por el contrario, la Alteración Hidrotermal (Ah) es una zona de roca y regolito altamente alterada rica en arcillas y presenta activación en ambos eventos mencionados anteriormente, pero no corresponde a un depósito de sedimentos (suelo). Dicho esto, Ah presenta una importancia esencial o fuerte sobre Tiac. Valor en Escala de Saaty=5.
Pp	Desde un punto de vista geológico-geotécnico presenta características similares a Tiac, respecto a la favorabilidad de generación de flujos. Por tanto, presenta la misma importancia que Tiac. Valor en Escala de Saaty=1.

Continuación de Tabla VI.2.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Tiac
Qal	Los depósitos aluviales (Qal) son depósitos principalmente activos, sueltos a firmes y se encuentran asociados a flujos esporádicos de baja energía con volúmenes variables. Es decir, están directamente asociados a flujos y se presentan preponderantemente en los canales de la cuenca y, además, tanto el evento del 21 de enero de 2013 como el del 25 de febrero de 2017 se generaron principalmente a partir de éstos, por tanto, resulta muy poco favorable para la generación de flujos. Cabe destacar que también existen depósitos aterrazados, estables. Por todo lo anterior, se deduce que Qal presenta una importancia fuerte a muy fuerte sobre Tiac. Valor en Escala de Saaty=6.
Qc	Los depósitos coluviales (Qc) son depósitos en los cuales domina una compacidad baja y existe una escasa a nula cobertura vegetal, su origen está asociado a remociones en masa tipo caídas de rocas y, además, en el evento del 25 de febrero de 2017 se generaron flujos menores partir de éstos. Por todo lo anterior, se deduce que Qc presenta una importancia fuerte sobre Tiac. Valor en Escala de Saaty=5.
Qd	Los depósitos de deslizamientos (Qd) corresponden a acumulaciones de sedimentos de mayor envergadura (volumen) en comparación a Qc y corresponden a depósitos firmes y los de mayor volumen se encuentran en las sub-cuencas de mayor altitud. Pese a ser depósitos firmes, su origen está asociado a remociones en masa y, además, en el evento del 25 de febrero de 2017 se generaron flujos menores partir de éstos. Por todo lo anterior, se deduce que Qd presenta una importancia fuerte sobre Tiac. Valor en Escala de Saaty=5.
Qg	Los depósitos glaciales (Qg) corresponden a depósitos firmes con clastos angulosos inmersos en una matriz areno-limosa, con presencia de bloques. Pese a no ser de origen aluvial ni estar asociado a procesos de remociones en masa, tanto el evento del 21 de enero de 2013 como el del 25 de febrero de 2017 se generaron en segundo orden a partir de éstos. Por tanto, se desprende que presentan una importancia fuerte sobre Tiac. Valor en Escala de Saaty=5.
Tf	Al igual que Pp, desde un punto de vista geológico-geotécnico presenta características similares a Tiac, respecto a la favorabilidad de generación de flujos. Por tanto, presenta la misma importancia que Tiac. Valor en Escala de Saaty=1.
Qg	Los depósitos glaciales (Qg) corresponden a depósitos firmes con clastos angulosos inmersos en una matriz areno-limosa, con presencia de bloques. Pese a no ser de origen aluvial ni estar asociado a procesos de remociones en masa, tanto el evento del 21 de enero de 2013 como el del 25 de febrero de 2017 se generaron en segundo orden a partir de éstos. Por tanto, se desprende que presentan una importancia fuerte sobre Tiac. Valor en Escala de Saaty=5.
Tf	Al igual que Pp, desde un punto de vista geológico-geotécnico presenta características similares a Tiac, respecto a la favorabilidad de generación de flujos. Por tanto, presenta la misma importancia que Tiac. Valor en Escala de Saaty=1.
Tiac	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.
Tiaf	La Unidad Abanico fracturada (Tiaf), al ser una unidad de roca, pero al presentar un mayor grado de fracturamiento que Tiac, por tanto, presenta una importancia levemente superior en cuanto a la favorabilidad de generación de flujos. Valor en Escala de Saaty=2.

Continuación de Tabla VI.2.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Tiac
Tias	La Unidad Abanico cubierta de suelo (Tiaf), al ser una unidad de roca cubierta de suelo superficial residual estable, por tanto, presenta una importancia levemente superior que Tiac en cuanto a la favorabilidad de generación de flujos. Valor en Escala de Saaty=2.

Tabla VI.3. Justificación de comparación a pares de los atributos del factor Pendiente de morfologías predominantemente no aluviales.

Justificación comparación a pares	
Atributo	<10°
>40°	Lara (2007), establece un límite de pendientes de ladera para el origen de deslizamientos, flujos y caídas de roca, esto es 10°. Es por esto que, para morfologías modeladas por procesos no aluviales, pendientes menores a 10° presentan una escasa a nula posibilidad de generar flujos. Por el contrario, para morfologías no aluviales, con pendientes mayores a 40° la posibilidad de generar flujos es alta (se considera equivalente al rango 25-35° de morfologías aluviales). Dicho esto, se deduce que existe una importancia fuerte de pendiente de morfologías no aluviales >40° sobre otra del mismo tipo <10°. Valor en Escala de Saaty=5.
30-40°	Para morfologías modeladas por procesos no aluviales, pendientes menores a 10° presentan una escasa a nula posibilidad de generar flujos. Por el contrario, para morfologías no aluviales, con pendientes entre 30° y 40° la posibilidad de generar flujos es media alta (se considera equivalente al rango 15-25° de morfologías aluviales), esto es porque a mayor pendiente mayor inestabilidad. Por lo anterior, se deduce que existe una importancia moderada a fuerte de pendiente de morfologías no aluviales 30-40° sobre otra del mismo tipo <10°. Valor en Escala de Saaty=4.
20-30°	Para morfologías modeladas por procesos no aluviales, pendientes menores a 10° presentan una escasa a nula posibilidad de generar flujos. A pesar de que a mayor pendiente mayor es la inestabilidad, morfologías que no han sido formadas por procesos aluviales, con pendientes entre 20° y 30° poseen una posibilidad media baja de generar flujos (se considera equivalente al rango 10-15° de morfologías aluviales). Dicho esto, se tiene que existe una importancia moderada de pendiente de morfologías no aluviales 20-30° sobre otra del mismo tipo <10°. Valor en Escala de Saaty=3.
10-20°	Para morfologías modeladas por procesos no aluviales, pendientes menores a 10° presentan una escasa a nula posibilidad de generar flujos. A pesar de que a mayor pendiente mayor es la inestabilidad, morfologías que no han sido formadas por procesos aluviales, con pendientes entre 10° y 20° poseen una escasa posibilidad de generar flujos (se considera equivalente al rango 5-10° de morfologías aluviales). Por lo anterior, se deduce que existe una leve importancia de pendiente de morfologías no aluviales 10-20° sobre otra del mismo tipo <10°. Valor en Escala de Saaty=2.
<10°	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1 (se considera equivalente al rango <5° de morfologías aluviales).

Tabla VI.4. Justificación de comparación a pares de los atributos del factor Pendiente de morfologías predominantemente aluviales.

Justificación comparación a pares	
Atributo	<5°
>45°	Para morfologías modeladas por procesos aluviales, pendientes menores a 5° presentan una escasa a nula posibilidad de generar flujos. Por el contrario, para morfologías aluviales, con pendientes mayores a 45° la posibilidad de generar flujos es extrema, esto es porque a mayor pendiente mayor inestabilidad y, además, porque son morfologías que han estado expuestas a este tipo de procesos, es decir, presentan algún antecedente de haber sido afectado por estos. Dicho esto, se deduce que existe una importancia muy fuerte de pendiente de morfologías aluviales >45° sobre otra del mismo tipo <5°. Valor en Escala de Saaty=7. Cabe destacar que, no se utiliza un valor 9, es decir, una importancia extrema, dado que ésta se reserva para comparaciones con pendientes de morfologías que no tienen posibilidad de generar flujos.
35-45°	Tomando en cuenta las mismas consideraciones del párrafo anterior y considerando que para morfologías aluviales, con pendientes entre 35° y 45° la posibilidad de generar flujos es muy alta, se deduce que existe una importancia fuerte a muy fuerte de pendiente de morfologías aluviales 35-45° sobre otra del mismo tipo <5°. Valor en Escala de Saaty=6.
25-35°	Tomando en cuenta las mismas consideraciones del primer párrafo y considerando que para morfologías aluviales, con pendientes entre 25° y 35° la posibilidad de generar flujos es alta, se entiende que existe una importancia fuerte de pendiente de morfologías aluviales 25-35° sobre otra del mismo tipo <5°. Valor en Escala de Saaty=5.
15-25°	Tomando en cuenta las mismas consideraciones del primer párrafo y considerando que para morfologías aluviales, con pendientes entre 15° y 25° la posibilidad de generar flujos es media alta, se deduce que existe una importancia moderada a fuerte de pendiente de morfologías aluviales 15-25° sobre otra del mismo tipo <5°. Valor en Escala de Saaty=4.
10-15°	Tomando en cuenta las mismas consideraciones del primer párrafo y considerando que para morfologías aluviales, con pendientes entre 10° y 15° la posibilidad de generar flujos es media baja, se tiene que existe una importancia moderada de pendiente de morfologías aluviales 10-15° sobre otra del mismo tipo <5°. Valor en Escala de Saaty=3.
5-10°	Tomando en cuenta las mismas consideraciones del primer párrafo y considerando que para morfologías aluviales, con pendientes entre 5° y 10° la posibilidad de generar flujos es baja, se desprende que existe una leve importancia de pendiente de morfologías aluviales 5-10° sobre otra del mismo tipo <5°. Valor en Escala de Saaty=2.
<5°	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Tabla VI.5. Justificación de comparación a pares de los atributos del factor Elevación y Crioclastia.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Baja
Alta (2.900-4.500 m s.n.m.)	Bajo los 1500 m s. n. m. la cuenca posee una baja exposición a procesos de hielo y deshielo, eventualmente en época invernal, dado que esta cota corresponde valor mínimo de isoterma 0°C definido por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno. Por el contrario, sobre los 2900 m s. n. m. la cuenca posee una alta exposición a procesos de hielo y deshielo y ha sido afectada por procesos nivales en época invernal, ya que esta cota corresponde a el valor máximo de isoterma 0°C definidos por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno. Por lo anterior, se deduce que existe una moderada a fuerte importancia de >2.900 m s. n. m. que <1.500 m s. n. m. Valor en Escala de Saaty=4.
Media alta (2.300-2.900 m s.n.m.)	Bajo los 1.500 m s. n. m. la cuenca posee una baja exposición a procesos de hielo y deshielo, eventualmente en época invernal, dado que esta cota corresponde valor mínimo de isoterma 0°C definido por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno. Por otra parte, 2.300 y 2.900 m s. n. m. corresponden a la elevación de la línea de nieve típica en invierno (Garreaud, 2013) y el valor máximo de isoterma 0°C definido por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno, respectivamente; es por ello que esta zona presenta una exposición media a procesos de hielo y deshielo y, alta a procesos nivales en invierno. Por lo anterior, se tiene que existe una moderada importancia 2.300-2.900 m s. n. m. que <1.500 m s. n. m. Valor en Escala de Saaty=3.
Media baja (1.500-2.300 m s.n.m.)	Bajo los 1500 m s. n. m. la cuenca posee una baja exposición a procesos de hielo y deshielo, eventualmente en época invernal, dado que esta cota corresponde valor mínimo de isoterma 0°C definido por Garreaud & Ruttlund (1996) para tormentas de invierno. Por otra parte, 2.300 corresponden a la elevación entre la línea de nieve típica en invierno (Garreaud, 2013) para tormentas de invierno; por lo que esta zona presenta una exposición media a procesos de hielo y deshielo durante el invierno, pero en esta época no ha estado en general cubierta de nieve. Dicho esto, se tiene que existe una leve importancia de 1.500-2.300 m s. n. m. con respecto a <1.500 m s. n. m. Valor en Escala de Saaty=2.
Baja (≤1.500 m s.n.m.)	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Tabla VI.6. Justificación de comparación a pares de los atributos del factor Antecedentes.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Poco importante
Importante	Para realizar la clasificación se consideran los dos eventos estudiados (21 enero de 2013 y 25 de febrero de 2017). Considerando que una activación poco importante e importante, corresponden a las mismas en ambos eventos y que esta observación se remite a los datos disponibles y capacidad de observación es que, se infiere que existe una importancia moderada a fuerte de una activación importante sobre una poco importante. Valor en Escala de Saaty=4.
Regular	Tomando en cuenta los mismos argumentos que en el párrafo anterior, se deduce que existe una leve importancia de una activación regular sobre una poco importante. Valor en Escala de Saaty=2.
Poco importante	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Tabla VI.7. Justificación de comparación a pares de los atributos del factor Curvatura.

Justificación comparación a pares	
Atributo	Convexo
Cóncavo	Una geometría convexa produce la divergencia de un flujo, por tanto, en términos energéticos existe una importante disipación de energía. Por el contrario, una geometría cóncava produce la convergencia flujo, es decir, su canalización. Por tanto, se deduce que existe una extrema importancia de una curvatura cóncava sobre una convexa. Valor en Escala de Saaty=9.
Plano	Una geometría convexa produce la divergencia de un flujo, por tanto, en términos energéticos existe una importante disipación de energía. Mientras que una geometría plana podría producirla o permitir deslizamientos superficiales, por tanto, existe una disipación de energía variada. Dicho esto, se deduce que existe una moderada a fuerte importancia de una curvatura plana sobre una convexa. Valor en Escala de Saaty=4.
Convexo	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Comparación a pares entre factores condicionantes

Tabla VI.8. Justificación de comparación entre los factores Geomorfología y Geología.

Justificación comparación a pares	
Factor	Geomorfología
Geología	Tras la reclasificación del factor Geomorfología, se tiene que circo glacial, morfologías asociadas a procesos de remociones en masa y morfologías aluviales, principalmente zona de arranque y vía aluvial, presentan una mayor susceptibilidad de generación de flujos de detritos, mientras que para la Geología lo son los depósitos glaciales, coluviales, de deslizamientos y aluviales. Por tanto, las mayores susceptibilidades están asociadas a los mismos procesos, de los cuales, el primero da cuenta de la forma y el segundo del material depositado y, por ende, disponible para ser removido. Dicho esto, ambos factores tienen la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.
Geomorfología	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Tabla VI.9. Justificación de comparación a pares entre los factores Elevación y Crioclastia, Geomorfología y Geología.

Justificación comparación a pares	
Factor	Elevación y Crioclastia
Geología	La Geología da cuenta especialmente del material disponible a ser removido. Mientras que la Elevación y Crioclastia, relaciona la elevación con procesos de hielo y deshielo que tiene una influencia de segundo orden (después de la Geología) en la geotecnia del material. La geotecnia relacionada a la Geología por su parte está ligada principalmente a las estructuras y otros procesos que no considerar directamente el hielo y deshielo (remociones en masa, aluviales, glaciales, entre otros). Existen depósitos como los mencionados anteriormente que están en la parte más baja de la cuenca (≤ 1500 m s. n. m.; zona menos susceptible desde el punto de vista de Elevación y Crioclastia) que presentaron activación menor en el evento del 25 de febrero de 2017. Dicho esto, se tiene que la Geología tiene una importancia levemente superior a la Elevación y Crioclastia. Valor en Escala de Saaty=1.

Continuación de Tabla VI.9.

Justificación comparación a pares	
Factor	Elevación y Crioclastia
Geomorfología	La Geomorfología da cuenta principalmente de la forma y los procesos asociados a cada una de las morfologías presentes en el área de estudio. En ésta, no se consideran los procesos de hielo y deshielo de forma directa. Tras la reclasificación del factor Geomorfología, se tiene que circo glacial, morfologías asociadas a procesos de remociones en masa y morfologías aluviales, principalmente zona de arranque y vía aluvial, presentan una mayor susceptibilidad de generación de flujos de detritos. En el evento del 25 de febrero de 2017, la mayoría de estas morfologías que se encuentran bajo los 1500 m s. n. m., presentaron activaciones menores y las morfologías de la parte alta (circo glacial, zona de arranque y vía aluvial) presentaron la principal activación tanto para el evento del 25 de febrero de 2017 como para el del 21 de enero de 2013. Dicho esto, la Geomorfología tiene una importancia moderada a fuerte respecto a la Elevación y Crioclastia. Valor en Escala de Saaty=4.
Elevación y Crioclastia	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Tabla VI.10. Justificación de comparación a pares entre los factores Pendiente, Elevación y Crioclastia, Geomorfología y Geología.

Justificación comparación a pares	
Factor	Pendiente
Geología	La Geología da cuenta especialmente del material disponible a ser removido. Mientras que la Pendiente representa desde un punto de vista energético, la posibilidad de superar la resistencia al corte de roca, suelos y flujos, ya que a mayor pendiente mayor es más favorable superar esta resistencia. Ésta a su vez, incorpora en su reclasificación las morfologías aluviales, en su mayoría confinadas por tanto se favorece aún más la posibilidad de superar esta resistencia. Además, cabe destacar que la mayoría de los depósitos aluviales de pendientes bajas que no se activaron en el evento del 25 de febrero de 2017. Dicho esto, se tiene que la Pendiente es levemente más importante que la Geología. Valor en Escala de Saaty=1/2.

Continuación de Tabla VI.10.

Justificación comparación a pares	
Factor	Pendiente
Geomorfología	La Geomorfología da cuenta principalmente de la forma y los procesos asociados a cada una de las morfologías presentes en el área de estudio. Mientras que la Pendiente representa desde un punto de vista energético, la posibilidad de superar la resistencia al corte de un material o flujo. Las morfologías de mayor IS _n (circo glaciar, aluviales y remociones en masa) se corresponden bien con las zonas con mayor IS _n de pendientes (> 25°). Además, las zonas que presentaron mayor activación tanto para el evento del 25 de febrero de 2017 como para el del 21 de enero de 2013, también se caracterizan por pertenecer a ambos grupos mencionados anteriormente. Por todo lo anterior, se tiene que ambos factores tienen la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.
Elevación y Crioclastia	La Pendiente representa desde un punto de vista energético, la posibilidad de superar la resistencia al corte de un material o flujo. Mientras que la Elevación y Crioclastia relaciona la elevación con procesos de hielo y deshielo que tiene una influencia de segundo orden (después de la Geología) en la geotecnia del material. Además, comparativamente, en el evento del 25 de febrero de 2017, existen una mayor cantidad de zonas activadas que presentan alto IS _n de pendientes bajo los 1500 m s. n. m. que zonas que presentan bajo IS _n de pendientes sobre los 2900 m s. n. m. Por lo anteriormente expuesto, se tiene que la Pendiente es moderadamente importante que la Elevación y Crioclastia. Valor en Escala de Saaty=1/3.
Pendiente	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Tabla VI.11. Justificación de comparación a pares entre los factores Curvatura, Pendiente, Elevación y Crioclastia, Geomorfología y Geología.

Justificación comparación a pares	
Factor	Curvatura
Geología	<p>El factor Curvatura influye y permite reconocer la convergencia y divergencia del flujo, es decir, su canalización y acumulación a partir de la geometría de la cuenca. En términos energéticos es un factor que contribuye en la posibilidad de superar la resistencia al corte de flujos en segundo orden (superada esencialmente por la Pendiente). Por su parte, la Geología da cuenta especialmente del material disponible a ser removido. Tanto para el evento del 25 de febrero de 2017 como para el del 21 de enero de 2013, las zonas activadas se corresponden directamente con los depósitos de mayor IS_n habiendo una relación menos estrecha con la curvatura de éstos. Si bien, la mayoría de las zonas activadas en ambos eventos, corresponden a una curvatura cóncava (mayor IS_n del factor Curvatura) existe una mayor cantidad de zonas con dicha curvatura que no se activaron. Por todo lo anterior, se tiene que la Geología presenta una importancia moderada a fuerte con respecto a la Curvatura. Valor en Escala de Saaty=4.</p>
Geomorfología	<p>La Geomorfología da cuenta principalmente de la forma y los procesos asociados a cada una de las morfologías presentes en el área de estudio. Mientras que la curvatura da cuenta de la canalización y acumulación de un flujo a partir de la geometría de la cuenca. Además, tanto para el evento del 25 de febrero de 2017 como para el del 21 de enero de 2013, las zonas activadas se corresponden directamente con las morfologías de mayor IS_n habiendo una relación menos estrecha con la curvatura de éstos (por ejemplo, en un cono de deyección). Si bien, la mayoría de las zonas activadas en ambos eventos, corresponden a una curvatura cóncava (mayor IS_n del factor Curvatura) existe una mayor cantidad de zonas con dicha curvatura que no se activaron. Por todo lo anterior, se tiene que la Geomorfología presenta una importancia moderada a fuerte con respecto a la Curvatura. Valor en Escala de Saaty=4.</p>

Continuación de Tabla VI.11.

Justificación comparación a pares	
Factor	Curvatura
Elevación y Crioclastia	La Elevación y Crioclastia relaciona la elevación con procesos de hielo y deshielo que tiene una influencia de segundo orden (después de la Geología) en la geotecnia del material. Mientras que la curvatura da cuenta de la canalización y acumulación de un flujo a partir de la geometría de la cuenca. Además, tanto para el evento del 25 de febrero de 2017 como para el del 21 de enero de 2013, las zonas que presentaron una activación más importante se corresponden directamente con las zonas de mayor IS _n del factor Elevación y Crioclastia; mientras que, pese a que para la Curvatura también fue así, existe una mayor cantidad de zonas con curvatura cóncava que no se activaron. Por todo lo anterior, se tiene que la Elevación y Crioclastia presenta una importancia moderada con respecto a la Curvatura. Valor en Escala de Saaty=3.
Pendiente	El factor Pendiente representa desde un punto de vista energético, la posibilidad de superar la resistencia al corte de roca, suelos y flujos, ya que a mayor pendiente mayor es más favorable superar esta resistencia. Ésta a su vez, incorpora en su reclasificación las morfologías aluviales, en su mayoría confinadas por tanto se favorece aún más la posibilidad de superar esta resistencia. Por tanto, en términos energéticos supera esencialmente al factor Curvatura. Por ejemplo, para laderas de pendientes superiores a 40°, si en la generación de un flujo éste no presenta algún obstáculo que pueda provocar un represamiento, éste tenderá a descender por gravedad independientemente de su curvatura; sin embargo, si la curvatura resulta ser cóncava su movimiento en términos energéticos será mayor en comparación a otra curvatura. Dicho todo esto, se deduce que la Pendiente presenta una importancia fuerte a muy fuerte en comparación con la Curvatura. Valor en Escala de Saaty=6.
Curvatura	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Tabla VI.12. Justificación de comparación a pares entre los factores Antecedentes, Curvatura, Pendiente, Elevación y Crioclastia, Geomorfología y Geología.

Justificación comparación a pares	
Factor	Antecedentes
Geología	El factor Antecedentes da cuenta de la activación reciente de flujos relativos a cada sub-cuenca del área de estudio. Mientras que la Geología especialmente del material disponible a ser removido. Ambos factores presentan la misma importancia dado que los depósitos que presentan mayor IS _n en Geología fueron activados recientemente; correspondiéndose de esta forma ambos factores. Sin embargo, los antecedentes no tienen en consideración actividades pasadas, sino que sólo se remiten a la actividad de dos eventos y, además, está limitada por la capacidad de observación de ambos eventos y a la intensidad del factor detonante. Por tanto, pueden existir zonas donde no se haya registrado activación, pero no significa que no haya habido. Dicho esto, se tiene que la Geología es levemente más importante que los Antecedentes. Valor en Escala de Saaty=2.
Geomorfología	La Geomorfología da cuenta principalmente de la forma y los procesos asociados a cada una de las morfologías presentes en el área de estudio. Por tanto, debiera tener una importancia similar al factor Antecedentes. Sin embargo, basado en los mismos argumentos del párrafo anterior (reemplazando los depósitos de mayor IS _n por las morfologías de mayor IS _n), es que ésta se considera levemente más importante que los Antecedentes. Valor en Escala de Saaty=2.
Elevación y Crioclastia	Las zonas que presentaron una activación más importante tanto para el evento del 25 de febrero de 2017 como para el del 21 de enero de 2013, se corresponden con las zonas de mayor IS _n tanto de Elevación y Crioclastia como Antecedentes. Por tanto, se deduce que ambos factores presentan la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.
Pendiente	La Pendiente representa desde un punto de vista energético, la posibilidad de superar la resistencia al corte de un material o flujo y, además, como los antecedentes no tienen en consideración actividades pasadas, sino que sólo se remiten a la actividad de dos eventos y, además, está limitada por la capacidad de observación de ambos eventos y a la intensidad del factor detonante; se deduce que la Pendiente tiene una importancia moderada sobre los Antecedentes. Valor en Escala de Saaty=3.

Continuación de Tabla VI.12.

Justificación comparación a pares	
Factor	Antecedentes
Curvatura	La Curvatura es un factor que influye y permite reconocer la convergencia y divergencia del flujo, es decir, su canalización y acumulación a partir de la geometría de la cuenca. En términos energéticos es un factor que contribuye en la posibilidad de superar la resistencia al corte de flujos en segundo orden (superada esencialmente por la Pendiente). Mientras que los Antecedentes a pesar de estar limitada al estudio de dos eventos y a la capacidad de observación de éstos, se sustenta por datos duros propios de la cuenca; es por esta razón que los Antecedentes tienen una importancia levemente superior a la Curvatura. Valor en Escala de Saaty=1/2.
Antecedentes	Dado que se compara con sí mismo presenta la misma importancia. Valor en Escala de Saaty=1.

Anexo VII

Análisis de sensibilidad de simulaciones en RAMMS-debris flow

Tabla VII.1. Resumen de análisis de sensibilidad para la calibración de parámetros de resistencia.

Nº	C_v [%]	μ []	ξ [m ² /s]	V_t [m ³]	Condición de detención <i>Low flow</i>	$V_{m\acute{a}x}$ [m ² /s]	$H_{m\acute{a}x}$ [m]	Descartado por
1	48	0,14	600	95.841	No cumple	-	-	Detención
2	48	0,14	200	95.841	No cumple	-	-	Detención
3	48	0,12	600	95.841	No cumple	-	-	Detención
4	48	0,12	200	95.841	No cumple	-	-	Detención
5	48	0,10	600	95.841	No cumple	-	-	Detención
6	48	0,10	500	95.841	No cumple	-	-	Detención
7	48	0,10	400	95.841	No cumple	-	-	Detención
8	48	0,10	300	95.841	No cumple	-	-	Detención
9	48	0,10	200	95.841	No cumple	-	-	Detención
10	48	0,09	600	95.841	No cumple	-	-	Detención
11	48	0,09	500	95.841	No cumple	-	-	Detención
12	48	0,09	400	95.841	No cumple	-	-	Detención
13	48	0,09	300	95.841	No cumple	-	-	Detención
14	48	0,09	200	95.841	No cumple	-	-	Detención
15	48	0,08	700	95.841	Cumple	18	11	$V_{m\acute{a}x}$
16	48	0,08	600	95.841	Cumple	17	11	-
17	48	0,08	500	95.841	Cumple	17	11	$V_{m\acute{a}x}$
18	48	0,08	400	95.841	Cumple	16	11	$V_{m\acute{a}x}$
19	48	0,08	300	95.841	Cumple	15	11	$V_{m\acute{a}x}$
20	48	0,08	200	95.841	No cumple	-	-	Detención
21	48	0,07	600	95.841	No cumple	-	-	Detención
22	48	0,07	500	95.841	No cumple	-	-	Detención
23	48	0,07	400	95.841	No cumple	-	-	Detención
24	48	0,07	300	95.841	No cumple	-	-	Detención
25	48	0,07	200	95.841	No cumple	-	-	Detención
26	57	0,14	600	80.700	Cumple	15	12	$V_{m\acute{a}x}$
27	57	0,12	600	80.700	No cumple	-	-	Detención
28	57	0,10	600	80.700	No cumple	-	-	Detención
29	57	0,09	600	80.700	Cumple	17	11	$H_{m\acute{a}x}$
30	57	0,08	600	80.700	No cumple	-	-	Detención
31	57	0,07	600	80.700	Cumple	17	11	$H_{m\acute{a}x}$

Tabla VII.2. Resumen de simulación que mejor se ajusta al evento ocurrido el 25 de febrero de 2017.

Detalles de simulación		Parámetros	
DEM	DEM corregido de 5 m a partir de uno de 10 m	Volumen total [m ³]	95.841
Numerical scheme	Second order	Hidrograma	ver Anexo IX. Figura 3.
H cutoff	0.0001 m	Localización de Hidrograma	Punto de medición D2_02
Stopping criteria	5% momentum	Release height [m]	7
		μ []	0,08
		ξ [m ² /s]	600
		C [Pa]	0
		λ []	1

Control de velocidad en análisis de sensibilidad para evento del 25 de febrero de 2017

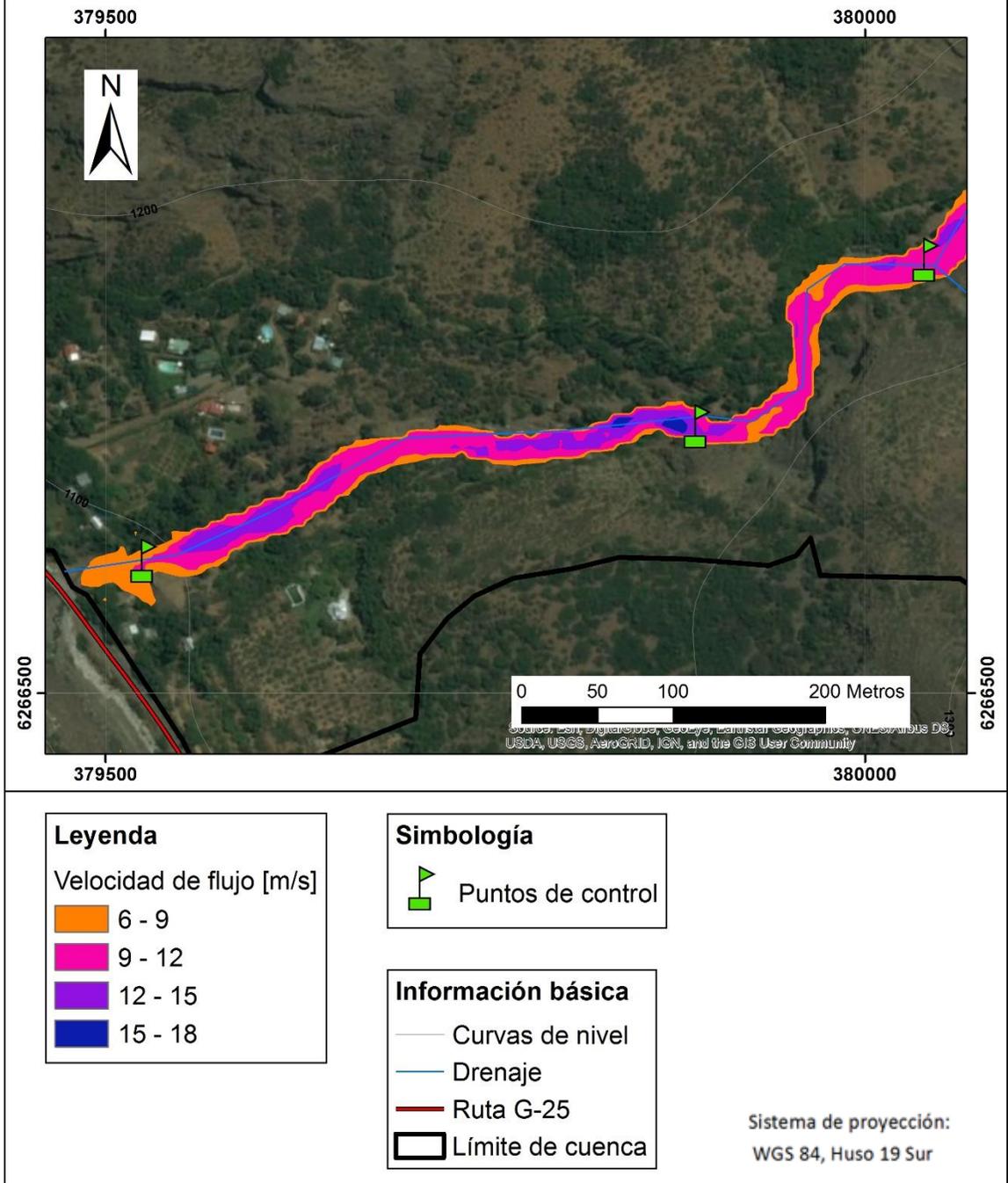


Figura VII.1. Control de velocidad en análisis de sensibilidad para evento del 25 de febrero de 2017.

Control de altura en análisis de sensibilidad para evento del 25 de febrero de 2017

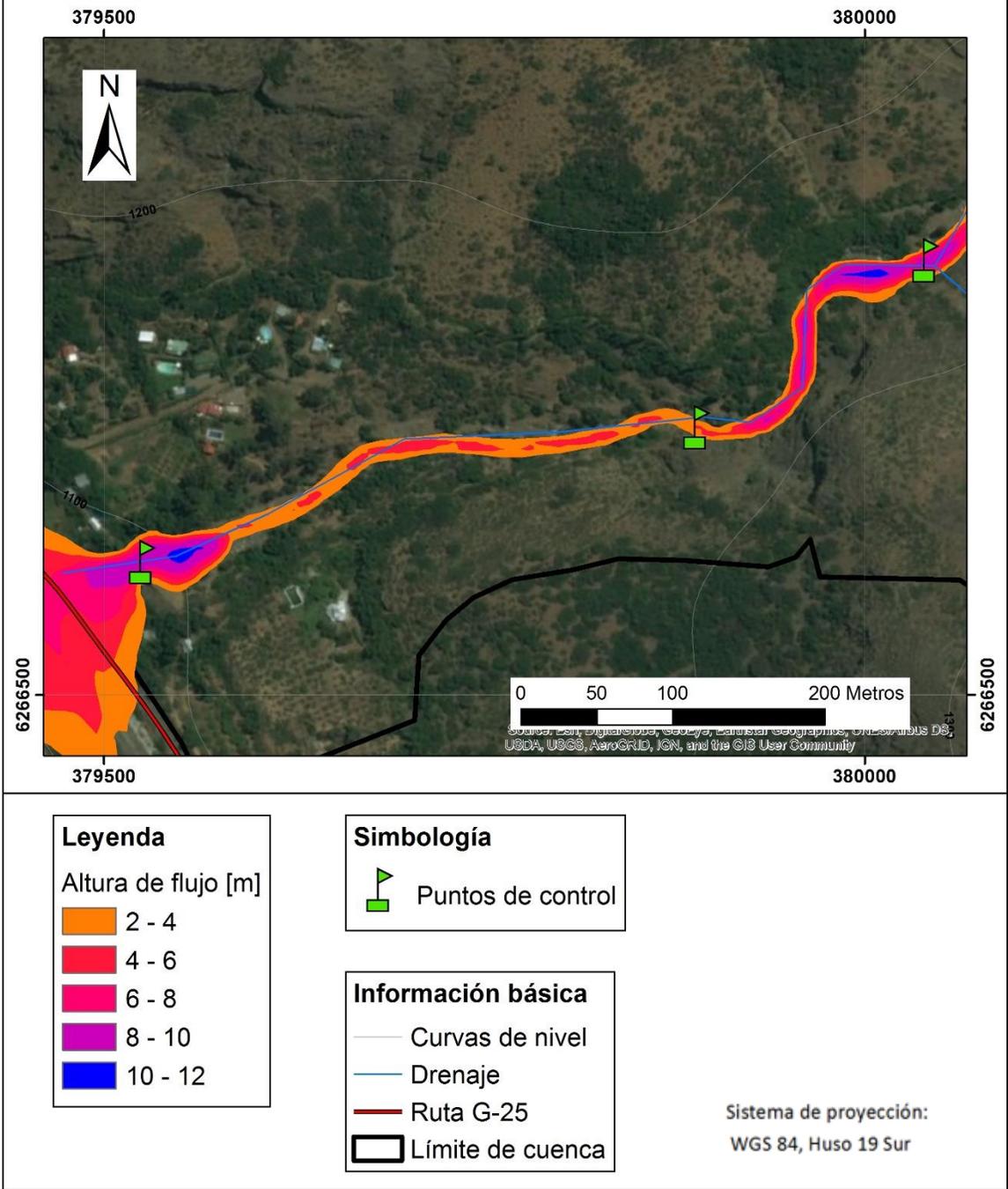


Figura VII.2. Control de altura en análisis de sensibilidad para evento del 25 de febrero de 2017.

Control de depósito en análisis de sensibilidad para evento del 25 de febrero de 2017

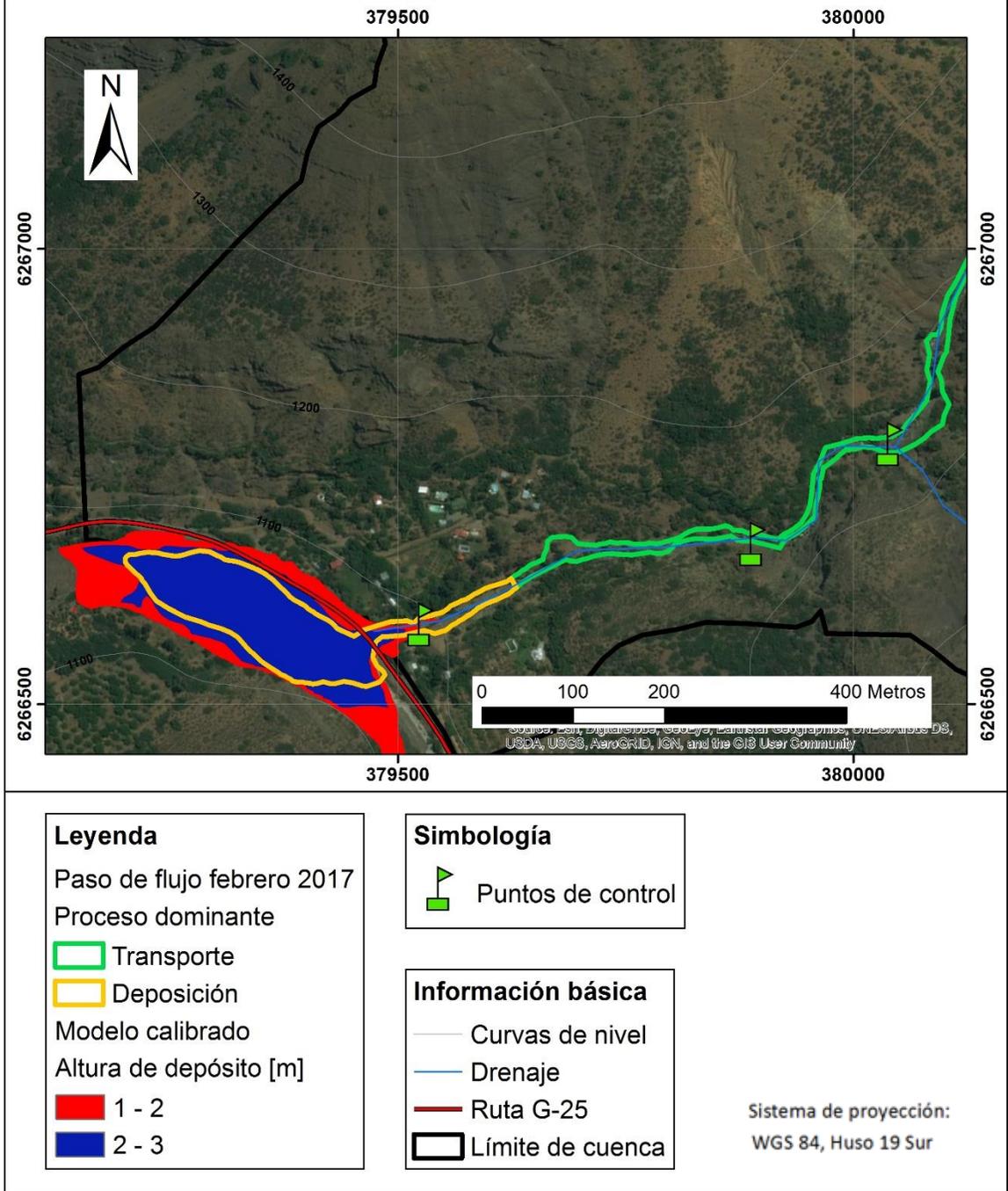


Figura VII.3. Control de depósito en análisis de sensibilidad para evento del 25 de febrero de 2017.