

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DEL PELIGRO DE FLUJOS DE DETRITOS EN AMBIENTES MONTAÑOSOS

METHODOLOGY FOR DEBRIS FLOWS HAZARD EVALUATION IN MOUNTAINOUS ENVIRONMENTS

Sergio Sepúlveda V.

Departamento de Geología, Universidad de Chile. Plaza Ercilla 803, Santiago, Chile.

RESUMEN

Se propone una metodología para evaluar el peligro o amenaza de flujos detríticos en zonas de relieve montañoso. Una evaluación de peligros geológicos consiste en identificar los tipos de eventos peligrosos, determinar la frecuencia de tales eventos y definir las condiciones espaciales y temporales de su ocurrencia. La metodología centra el estudio en el reconocimiento de los factores condicionantes y mecanismos gatillantes de flujos de detritos presentes en la zona de estudio, para poder determinar la susceptibilidad a la generación de aluviones y concluir el grado de peligro existente. Se definen índices cuantitativos de susceptibilidad, considerando lluvias intensas como mecanismo de generación, y de importancia del peligro para sectores determinados, sobre la base de un análisis cualitativo de la información obtenida.

ABSTRACT

A methodology to evaluate the hazard of debris flows in an area of mountainous relief is proposed. A hazard evaluation consists of the identification of hazardous processes, the determination of their frequency and the definition of their spatial and temporal occurrence conditions. The methodology aims the study to the recognition of conditioning factors and triggering mechanisms of debris flows that are present in the area of study, followed by the determination of the susceptibility of generation of debris flows and the conclusion of the hazard degree in the area. Quantitative indexes of susceptibility, regarding heavy rains as triggering mechanism, and of hazard importance for specific areas are defined, which are based in a qualitative analysis of the obtained information.

INTRODUCCIÓN

Se entiende por peligro geológico, o amenaza, a una condición o proceso geológico potencialmente catastrófico. La evaluación

de peligros es una técnica de naturaleza predictiva cuyo objetivo es identificar los tipos de eventos peligrosos, determinar la fre-

cuencia y magnitud de tales eventos y definir las condiciones espaciales y temporales de su ocurrencia (Tadashi, 1995). Un estudio de este tipo precede a los análisis de riesgos que predicen la magnitud del daño sobre la población u obras civiles.

En este trabajo se propone una metodología que permite evaluar el peligro de flujos de detritos, conocidos también en Chile como aluviones, en una determinada zona de relieve montañoso. No se incluyen en el análisis los flujos de detritos volcánicos o lahares, por estar asociados en su generación a procesos volcánicos, los que no se consideran en el estudio. Este artículo extracta los resultados más relevantes de un trabajo de mayor envergadura (Sepúlveda, 1998), donde se estudiaron antecedentes acerca de los flujos de detritos de la literatura y se aplicó la metodología aquí propuesta en un caso real (Sepúlveda y Rebolledo, 2000).

En adelante serán empleados indistintamente los términos flujo de detritos y aluvión.

CARACTERIZACION DE LOS FLUJOS DE DETRITOS

Un flujo de detritos es un proceso de remoción en masa del tipo flujo y que afecta a un suelo (en su sentido geotécnico), en el que el material removido está saturado en agua y tiene una concentración de sólidos tal que se comporta mecánicamente como un fluido no newtoniano. En estos flujos las partículas pueden variar en tamaño desde arcillas hasta bloques métricos, en diferentes proporciones. Generalmente los flujos de detritos se desplazan por cauces preexistentes y normalmente lo hacen a gran velocidad, del orden de decenas de kilómetros por hora (Varnes, 1978). Los volúmenes de material movilizado son corrientemente superiores a 10^5 m^3 .

Es común que los eventos de flujos de detritos se presenten como varios pulsos de

frentes de olas sucesivas, o bien como una ola que se mueve con olas más pequeñas sobreimpuestas viajando a velocidades mayores que la velocidad del flujo mismo (Selby, 1993). En el primer caso, la periodicidad de las olas es variable entre decenas de segundos a decenas de minutos e incluso varias horas (Sauret, 1987). Los frentes se caracterizan por tener tres partes principales: Una cabeza, con forma de lóbulo frontal, donde se trasladan los grandes bloques y material granular; un cuerpo, que contiene un gran porcentaje del total de material arrastrado, con una granulometría menor que el frente; y una cola con mucho menor porcentaje de material sólido (Figura 1). La cabeza fluye con un carácter más turbulento que hacia la cola, donde el comportamiento del fluido es laminar (Wan & Hua, 1993). La altura de cada ola es del orden de 1 a 10 metros.

Mecanismos de Generación

Casi todos los flujos de detritos que se desarrollan en ambiente subaéreo tienen un elemento común que es fundamental para su generación: la incorporación de agua al suelo. El aumento de la cantidad de agua debe ser tal que se sobrepase la capacidad de infiltración del suelo, para alcanzar un grado de saturación igual o muy cercano al 100%. La presión de poros aumenta, produciendo una drástica disminución de la resistencia al corte en la masa de suelo. Se generan presiones intersticiales a lo largo de potenciales planos o superficies de fractura, el nivel freático asciende y se ve afectada la cohesión entre las partículas. Al mismo tiempo, la escorrentía superficial aumenta, generando una erosión mayor. Si estos cambios se producen en condiciones apropiadas, se puede producir la movilización del suelo, generándose un deslizamiento y/o un flujo detrítico.

Lluvias de intensidades anormalmente altas constituyen el proceso gatillante de flu-

jos de detritos más común e importante, según la literatura. Si se sobrepasa un cierto umbral de intensidad y duración de las precipitaciones, que depende de la morfología y geología de la cuenca de recepción, se provocan las inestabilidades que generan los flujos. Este umbral puede estimarse con métodos estadísticos (Caine, 1980; Hauser, 1985; Takahashi, 1991; Sandersen *et al.*, 1996).

En todo caso, la mayoría de los flujos no son procesos aislados de remoción en masa, sino se asocian en su etapa inicial a deslizamientos y/o desprendimientos, activados en periodos lluviosos, que derivan en aluviones al saturarse en agua. Una alternativa, aunque menos común, para generar un aluvión es la fluidización o licuefacción de un suelo saturado, ya sea por el colapso de otra masa de suelo o roca sobre él o como respuesta a vibraciones producidas por sismos u otra causa.

Además de las lluvias, existen otros procesos de incorporación de agua como es la fusión de nieve, hielo o suelo congelado, ya sea por alza de las temperaturas, lluvias sobre la nieve u otros factores. El colapso de presas, naturales o artificiales, por rebase, *piping* o al mezclarse el agua embalsada con el material de la presa, también puede producir aluviones.

Factores Condicionantes

Además del mecanismo gatillante, para la generación de flujos de detritos es necesaria la presencia de factores que configuren una condición potencialmente inestable, tal que al producirse la rápida incorporación de agua se genere la remoción del suelo. Estos factores y su incidencia en la ocurrencia de los flujos de detritos son:

Relieve y Geomorfología

Los flujos de detritos son favorecidos por un modelado de laderas empinadas, lo que las hace potencialmente inestables al producir la aceleración de los materiales deslizados y favorecer el escurrimiento de agua en detrimento de la infiltración. Pendientes mayores a 25° son favorables para el desarrollo de aluviones (Hauser, 1993), aún cuando algunos pueden generarse sobre pendientes que no sobrepasan los 15° (Sauret, 1987). También es importante la pendiente del perfil hidráulico en los cauces por los que se desplazaría el flujo, factor que incide en su velocidad y capacidad de mantenerse en movimiento.

La superficie y forma de la cuenca receptora son importantes para determinar el tiempo de concentración del agua, siendo éste mayor en cuencas alargadas que circulares, debido a que en estas últimas se genera un sistema de escurrimiento centrípeto radial.

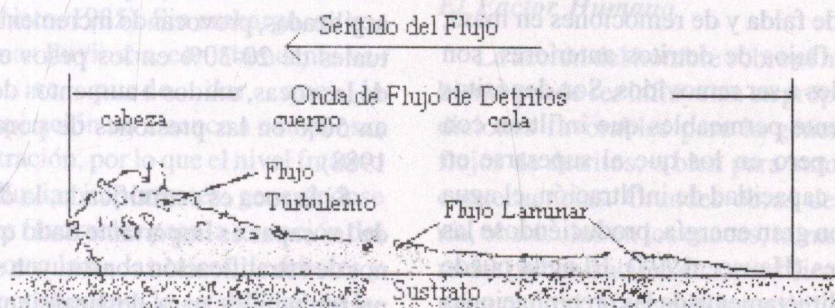


Figura 1. Perfil de un frente típico de un flujo de detritos.
Profile of a typical debris flow front.

Si los valles están orientados en dirección este - oeste, en la ladera donde incide el sol se generan pendientes menores y mayor desarrollo de suelos, en el sentido geotécnico del término, con menor o sin cubierta vegetal, por la exposición al sol en verano y la acción de heladas y deshielos en invierno, lo que provoca una mayor participación de los agentes de meteorización (Hauser, 1985).

A una escala más global, el relieve juega un papel importante para producir lluvias intensas, por el llamado Efecto de Barrera Orográfica. Este consiste en que el macizo montañoso actúa como una barrera contra los frentes de mal tiempo, forzando a ascender a las masas de aire, lo que provoca precipitaciones intensas. Estas pueden tener notables variaciones espaciales como resultado de este control orográfico (Hauser, 1993).

Geología

La geología de la zona controla en gran parte la existencia de suelos susceptibles de movilizarse. Además de los suelos de las laderas, hay que considerar también el material que ocupa el lecho de los cauces, el que también puede ser movilizado por los mecanismos ya señalados, o bien ser incorporado al flujo por erosión, incrementando la carga sólida.

En general, los depósitos aluviales, coluviales, volcanoclásticos, glaciales, de escombros de falda y de remociones en masa, incluidos flujos de detritos anteriores, son susceptibles a ser removidos. Son depósitos normalmente permeables que infiltran con facilidad, pero en los que al superarse en exceso su capacidad de infiltración, el agua escurre con gran energía, produciéndose las remociones (Hauser, 1997). El agua puede provenir directamente de las precipitaciones o bien por escurrimiento desde las cabecezas, infiltrándose en el cono aluvial o coluvial. Las laderas afectadas por solifluxión y

reptación son también susceptibles de generar flujos.

La composición y granulometría de los materiales son relevantes al influir en el grado de estabilidad de estos depósitos en las laderas, representado por el ángulo de fricción interna. La posición del nivel freático también es importante, ya que si éste se encuentra cercano a la superficie, la infiltración del agua puede producir su ascenso, acelerando el proceso de saturación del suelo superficial.

La disgregabilidad de la roca es otro factor relevante, ya que es el generador del material detrítico. Hay que considerar diversos elementos de control. La litología influye en la resistencia a la deformación y a la meteorización. Hay materiales inherentemente débiles o que llegan a debilitarse por cambios en el contenido de agua u otros: materiales orgánicos, arcillas y lutitas, rocas descompuestas, tobas argilizadas, o materiales compuestos por mica, talco o serpentina (Varnes, 1978). En este sentido, zonas con intensa alteración hidrotermal son altamente susceptibles a experimentar erosión. Las estructuras presentes en la roca, por otro lado, como fracturas, fallas y foliaciones, inciden en la cantidad y tamaño de detritos que se generan así como en la permeabilidad y capacidad de infiltración del macizo rocoso. La infiltración se acentúa en terrenos constituidos por rocas fisuradas o argilizadas, provocando incrementos porcentuales de 20-30% en los pesos específicos de las rocas, unidos a aumentos de al menos un 50% en las presiones de poros (Sheko, 1988).

Si la roca es estratificada, la disposición de las capas es importante dado que los planos de estratificación constituyen superficies preferenciales para deslizamientos y desprendimientos que generan material suelto, y pueden generar canales que facilitan la infiltración

La sismicidad es otro agente generador de material detrítico en rocas intensamente fracturadas, al disgregar el macizo con las vibraciones.

Clima y Vegetación

Los aluviones pueden ocurrir en una variedad de climas. El régimen de precipitaciones, la intensidad, frecuencia y duración de éstas, así como las distribuciones de temperaturas y de las estaciones secas y lluviosas son variables que inciden en las condiciones óptimas para la generación de flujos de detritos (Prieto, 1985).

Los ambientes áridos y semiáridos son escenarios comunes de flujos de detritos pues las lluvias, aunque escasas, suelen ser intensas y de corta duración. La escasa o nula cobertura vegetal contribuye a la generación de aluviones, ya que la escorrentía y la erosión son mayores, mientras hay baja infiltración y evapotranspiración (Prieto, 1985). En general, la cobertura vegetal actúa como una defensa contra la erosión. Sus principales efectos son la protección contra el impacto directo de las gotas de lluvia, la dispersión y quiebre de la energía de las aguas de escurrimiento superficial, el aumento de la infiltración por la producción de poros en el suelo por acción de las raíces y el incremento de la capacidad de retención de agua por efecto de la producción e incorporación de materia orgánica al suelo (Bertoni & Lombardi Neto, 1985). Sin embargo, en zonas de climas lluviosos, con abundante vegetación, se puede dar que la evapotranspiración no alcance a compensar la alta infiltración, por lo que el nivel freático sube ante lluvias importantes, generándose condiciones favorables para la remoción del suelo. Por otro lado, las raíces de árboles y arbustos contribuyen a la estabilidad de laderas de pendiente moderada, pero si la pendiente es fuerte, la acción del viento remece los árboles removiendo el terreno, lo que

acelera la meteorización (Prieto, 1985).

Un factor relevante es la ocurrencia de las llamadas lluvias antecedentes. Estas son precipitaciones de baja intensidad pero persistentes que van saturando el suelo, por lo que al ocurrir una lluvia intensa sin mediar un periodo seco que permita la infiltración y evaporación, el suelo rápidamente deja de admitir agua, privilegiando así el escurrimiento sobre la infiltración y favoreciendo la generación de aluviones.

En zonas montañosas, un alza en la ubicación de la isoterma de 0°C, por sobre la cota normal en determinada época del año, produce fusión de la nieve acumulada y/o una ampliación de la cuenca receptora de aguas lluvias, lo que implica un aumento en la incorporación de agua al suelo. Un buen ejemplo de este caso fueron los aluviones ocurridos en 1993 en las quebradas de San Ramón y Macul, en Santiago (Naranjo & Varela, 1996), cuando coincidieron un alza de la isoterma 0°C con lluvias muy intensas.

La acción mecánica de las gotas de lluvia, al impactar el suelo, propicia la disgregación de las partículas detríticas superficiales (Hauser, 1997). Estas gotas pueden mover partículas de más de 10 mm, y de ese modo el material grueso puede ser disgregado por la remoción del apoyo que le prestan los sedimentos finos (Naranjo & Varela, 1996).

El Factor Humano

La acción del hombre sobre el medio ambiente puede ser influyente en propiciar condiciones favorables para la generación de flujos de detritos, o bien para aumentar sus consecuencias. Grandes obras de ingeniería, obstáculos en los cauces, minas abandonadas, urbanización, etc., modifican la dinámica natural, afectando la estabilidad de laderas, la capacidad de infiltración, el escurrimiento y la recepción eficiente de las aguas por parte de la red de drenaje. La ex-

plotación irracional del suelo y la deforestación generan una sensibilidad alta a la erosión hídrica. En tanto, los rellenos artificiales y centros de extracción de áridos son depósitos fácilmente erosionables por los flujos (Naranjo & Varela, 1996).

Incidencia e Importancia Relativa

El origen y magnitud de los aluviones, en términos volumétricos y de energía de avance, son controladas por la superficie de la hoya de drenaje, perfil hidráulico, suministro de detritos, grado de saturación del suelo, especialmente si es de tipo granular de alta permeabilidad, y condición climática, jugando un rol fundamental la intensidad de las precipitaciones. La velocidad del flujo, en tanto, es principalmente función de la concentración de sólidos y la pendiente local (Hauser, 1993).

Los factores más relevantes para el desarrollo de los flujos de detritos son, en primer término, todos aquellos que inciden directamente en la capacidad de infiltración, susceptibilidad a la erosión y estabilidad de la masa de suelo. Estos son la pendiente local, la vegetación, el régimen de lluvias, la acción humana sobre la vegetación y la estabilidad de los taludes, y propiedades del suelo como su composición, distribución granulométrica, permeabilidad y grado de saturación, entre otras. En segundo término se encuentran los factores que tienen una relación indirecta con las variables mencionadas.

ESQUEMA METODOLÓGICO

La metodología propuesta consiste de cuatro fases o etapas principales: estudios preliminares, campaña de terreno y análisis de laboratorio, procesamiento de los datos obtenidos y conclusiones. El detalle de la secuencia a seguir en cada una de estas etapas se muestra en la Figura 2. El grado de

detalle y la capacidad para efectuar todos los pasos propuestos depende de los objetivos del proyecto, así como del tiempo y los recursos disponibles.

Fase 1: Estudios Preliminares

La primera etapa consiste en definir el área de estudio y la escala de trabajo, para luego recopilar y analizar críticamente antecedentes de la bibliografía y cartografía existente. En base a este estudio, junto a la interpretación de fotografías aéreas, se procede a la confección de mapas que servirán como base para el trabajo de terreno y borrador para algunos de los mapas temáticos finales. A continuación, se eligen los *Sectores Críticos*, es decir, aquellos lugares que serían más propensos a ser el origen de flujos de detritos y que serán objeto de un estudio más detallado. Una vez hecha esta elección, se puede planificar la campaña de terreno.

Definición del Área de Estudio y Escala de Trabajo

La delimitación del área de estudio está condicionada por el proyecto para el cual se pidió hacer la evaluación. El área a estudiar debe comprender zonas donde estén presentes elementos morfológicos y geológicos que condicionen la generación de flujos de detritos. Por ello, esta etapa debe retroalimentarse con la revisión de los antecedentes del lugar. Debe imponerse que el área quede referenciada por zonas estables adyacentes a las de potencial inestabilidad. También debe considerarse que se debe incluir toda la extensión de potenciales flujos, por lo que hay que fijarse en quiebres de pendiente y cambios en el confinamiento de los cauces.

Junto a la delimitación preliminar del área de estudio, es conveniente definir la escala de trabajo. Debido a la magnitud y extensión normal de los flujos de detritos, de algunos

kilómetros, se recomienda usar escalas medias, entre 1:10.000 y 1:25.000, para estudios locales, como proyectos de ingeniería o de ordenamiento territorial y mitigación de desastres. Si el estudio es de carácter regional, escalas pequeñas como 1:50.000 o

1:100.000 son apropiadas, considerando que a estas escalas ya se está perdiendo algún detalle, no pudiendo representarse eventos menores. En todo caso, para los sectores críticos, es preferible hacer un estudio a una escala mayor a la general.

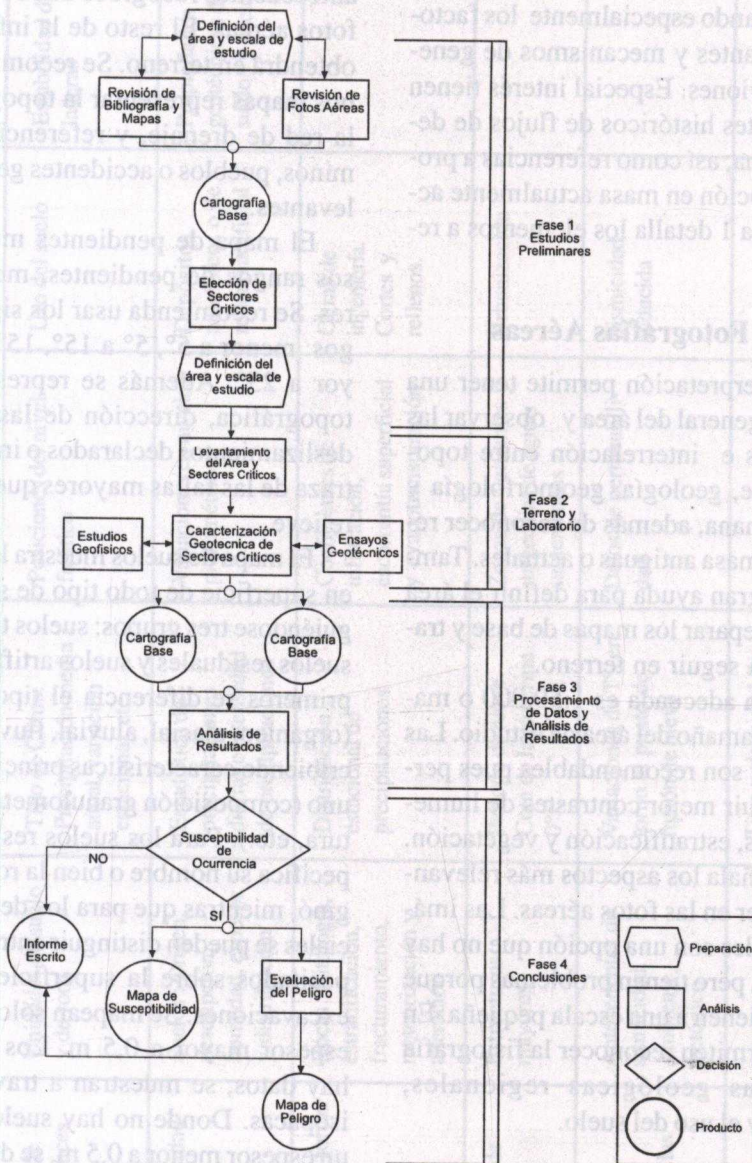


Figura 2. Esquema de la metodología propuesta para la evaluación del peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos.

Flowchart for debris flows hazard evaluation in mountainous environments.

Bibliografía y Cartografía Existente

Esta etapa consiste en revisar estudios anteriores de la zona, junto a los mapas disponibles. Deben estudiarse los antecedentes relativos a la geología, geomorfología, clima, vegetación, datos meteorológicos, hidrogeológicos, geotécnicos y de actividad humana, buscando especialmente los factores condicionantes y mecanismos de generación de aluviones. Especial interés tienen los antecedentes históricos de flujos de detritos en la zona, así como referencias a procesos de remoción en masa actualmente activos. La Tabla 1 detalla los elementos a revisar.

Revisión de Fotografías Aéreas

La fotointerpretación permite tener una mejor visión general del área y observar las características e interrelación entre topografía, drenaje, geología, geomorfología y actividad humana, además de reconocer remociones en masa antiguas o actuales. También prestan gran ayuda para definir el área de estudio, preparar los mapas de base y trazar las rutas a seguir en terreno.

Una escala adecuada es 1:50.000 o mayor, según el tamaño del área de estudio. Las fotos en color son recomendables pues permiten distinguir mejor contrastes de humedad, contactos, estratificación y vegetación. La Tabla 2 señala los aspectos más relevantes a reconocer en las fotos aéreas. Las imágenes satelitales son una opción que no hay que descartar, pero tienen problemas porque usualmente vienen a una escala pequeña. En todo caso, permiten reconocer la fisiografía y estructuras geológicas regionales, morfologías y el uso del suelo.

Elaboración de Cartografía Base

Debido a que dos condicionantes indispensables para la ocurrencia de flujos de

detritos son la disponibilidad de material y pendientes altas, se propone como cartografía base la confección de un mapa de suelos y un mapa de pendientes, ambos a la escala de trabajo definida inicialmente. Estos mapas se elaboran en esta etapa del estudio en forma preliminar, a partir de los antecedentes recogidos de la bibliografía y fotos aéreas. El resto de la información se obtendrá en terreno. Se recomienda en ambos mapas representar la topografía, trazar la red de drenaje, y referencias como caminos, pueblos o accidentes geográficos relevantes.

El mapa de pendientes muestra diversos rangos de pendientes, mediante colores. Se recomienda usar los siguientes rangos: menor a 5°, 5° a 15°, 15° a 25° y mayor a 25°. Además se representa la base topográfica, dirección de las laderas, los deslizamientos declarados o incipientes y la traza de las fallas mayores que controlen el relieve.

El mapa de suelos muestra la distribución en superficie de todo tipo de suelos, distinguiéndose tres grupos: suelos transportados, suelos residuales y suelos artificiales. En los primeros se diferencia el tipo de depósito (orgánico, glacial, aluvial, fluvial, etc.), describiendo características principales de cada uno (composición granulométrica, color, textura, etc.). Para los suelos residuales se especifica su nombre o bien la roca que lo originó, mientras que para los depósitos artificiales se pueden distinguir entre aquéllos depositados sobre la superficie o dentro de excavaciones. Se mapean sólo los suelos de espesor mayor a 0,5 m. Los espesores, si hay datos, se muestran a través de curvas isópacas. Donde no hay suelo o este tiene un espesor menor a 0,5 m, se deja en blanco, significando que ahí hay roca. Además, se pueden colocar deslizamientos declarados o incipientes y elementos antrópicos de uso del suelo.

Tabla 1. Antecedentes que deben ser recogidos durante la revisión de la bibliografía y cartografía existente.
Information that must be collected during the revision of bibliography and cartography.

Geomorfología	Geología	Clima y Vegetación	Hidrogeología	Actividad Humana	Estudios Geotécnicos	Antecedentes Históricos
Pendientes de laderas y cauces	Unidades de suelo y de roca	Tipo de Clima: Precipitación media anual, variación estacional, etc.	Posiciones del nivel freático	Uso del suelo	Estabilidad de laderas	Flujos de detritos : edad, época del año, extensión, características
Tipo y densidad del drenaje	Suelos : Origen, descripción, humedad, espesor y distribución	Estadística de precipitaciones diarias e intensidad de precipitaciones	Variaciones en niveles piezométricos	Depósitos antrópicos o de relleno artificial	Propiedades geotécnicas de suelos y rocas	Otras remociones en masa : distribución, edad, características
Superficie y forma de la hoya	Rocas : Litología, estratificación, fracturamiento, meteorización y alteración	Distribución estacional de precipitaciones	Coefficientes de infiltración, escorrentía superficial y evapotranspiración	Obras de ingeniería. Cortes y rellenos.		Remociones en masa activas : reptación, solifluxión, deslizamientos
Orientación de laderas	Estructuras mayores	Periodo de nieve. Cota de la isoterma 0°C	Zonas de vertientes y surgencias de aguas subterráneas	Urbanización		
Presencia de glaciares en cabeceras de las hoyas	Antecedentes de sismicidad. Ambiente tectónico	Variaciones de T°, en torno al punto de fusión de nieve	Datos de permeabilidad	Sismicidad inducida		
	Tipo y densidad de vegetación					

Tabla 2. Aspectos más relevantes a reconocer mediante la fotointerpretación.
Most important features that should be recognized by photointerpretation.

Geomorfología	Geología	Otros
Red de drenaje Zonas de mayor pendiente	Unidades de suelo y roca	Tipo y densidad de vegetación
Indicadores de deslizamientos antiguos, actuales o potenciales	Suelos : Origen, humedad, distribución, espesor	Uso del suelo
Morfologías de depósitos, abanicos aluviales y coluviales. Flujos de detritos antiguos	Rocas : Litología, estratificación, alteración, fracturamiento Estructuras : Fallas, pliegues, zonas de cizalle	Obras de ingeniería

Elección de Sectores Críticos

En esta etapa se eligen aquellos lugares que, *a priori*, son los que presentan un mayor potencial para originar flujos de detritos. Un sector crítico debe cumplir con tener un volumen importante de suelo disponible alojado en un sector de pendiente alta (al menos mayor a 15°, con mayor potencial si es mayor a 25°), ya sea en laderas o canales de drenaje. En el primer caso, se necesita además la presencia de un canal de drenaje con pendiente alta al pie de la ladera, que sirva como ruta al material removido. Esta combinación de elementos se logra superponiendo los mapas de suelo y de pendientes. Además, para acotar la elección, se deben utilizar otros criterios adicionales, como son una escasa cobertura vegetal en las laderas, tipo de suelo, presencia de deslizamientos antiguos, declarados o incipientes, laderas con solifluxión o reptación, densidad del drenaje alta, zonas de vertientes, surgencias o con datos de la presencia de un nivel freático cercano a la superficie, zonas de rocas fuertemente fracturadas o con alteración hidrotermal intensa, presencia de nieve o hielo en ciertas épocas del año y antecedentes de flujos de detritos an-

tiguos, que pueden orientar la búsqueda a través de la red de drenaje.

Planificación de la Campaña de Terreno

Ya definidos los sectores críticos, se procede a planificar el trabajo en terreno. Si se puede elegir la época en que irá a terreno, es mejor aquélla menos favorable para la estabilidad de las laderas, para evitar omitir elementos que influyen en la inestabilidad y que pueden no apreciarse con buenas condiciones climáticas (Sowers & Royster, 1978). En lo posible, se debe decidir si se van a realizar ensayos geotécnicos y/o estudios geofísicos, para llevar los equipos de medición o para toma de muestra necesarios y definir el tipo y número de muestras que se van a tomar. El equipo geológico a llevar es el típico, más un clinómetro y un pozómetro si hay pozos donde se puedan hacer mediciones de nivel freático.

FASE 2: CAMPAÑA DE TERRENO Y ANÁLISIS DE LABORATORIO

La segunda fase comprende el trabajo en terreno y eventuales análisis de laboratorio.

Se hace un reconocimiento general de la zona, completando o corrigiendo los mapas base y ratificando o modificando la elección de los sectores críticos, y conjuntamente se realiza una caracterización geotécnica en los sectores críticos, la que puede ser complementada con ensayos geotécnicos y/o mediciones geofísicas si es necesario y oportuno.

Levantamiento del Area y de los Sectores Críticos

Esta etapa consiste en reconocer en terreno la zona de estudio. La tarea fundamental, es la toma de datos para completar y hacer las modificaciones necesarias a los mapas base. Conjuntamente, se debe ratificar o corregir el listado de sectores críticos, según los criterios señalados anteriormente.

El levantamiento consiste básicamente en medir pendientes en laderas y canales de drenaje; describir geológicamente las unidades de suelo y roca existentes; reconocer las zonas donde haya remociones en masa declaradas; revisar las características hidrogeológicas, como presencia de vertientes y profundidad del nivel freático; describir el tipo y densidad de vegetación y las alteraciones antrópicas del paisaje. Se deben además investigar antecedentes de aluviones anteriores en la zona, y reconocer sus depósitos, estimando los volúmenes de material movilizado, lo que se puede hacer mediante la construcción de perfiles en distintos puntos del depósito. Para conocer la edad de tales depósitos, pueden realizarse dataciones de C^{14} en restos orgánicos tales como madera.

Caracterización Geotécnica de Sectores Críticos

Para cada sector crítico se debe hacer una caracterización detallada de las propiedades geológicas y geotécnicas de las unidades de roca y de suelo presentes. Este

estudio debería hacerse a una escala mayor que la elegida como escala general de trabajo. En primer lugar debe hacerse una descripción general del lugar, señalando la distribución relativa de las unidades, el tamaño de la zona inestable, las pendientes de las laderas y canales de drenaje, la vegetación presente, indicios de agua subterránea, forma y color de las unidades, etc. Conviene acompañar la descripción con perfiles geológicos a escala de la zona inestable, resaltando las pendientes y el espesor estimado de la capa de suelo. Además, debe estimarse el volumen de suelo que puede ser potencialmente removido.

Unidades de Roca

La caracterización de las unidades de roca debe apuntar a la formación de suelos y a la potencial generación de deslizamientos y desprendimientos que puedan luego convertirse en un flujo de detritos. Los aspectos más significativos a estudiar son:

• Litología

Basta con hacer una buena descripción macroscópica de campo, usando las clasificaciones estándares. Son útiles observaciones sobre la resistencia de las distintas litologías.

• Meteorización y Alteración

Se debe establecer el grado de meteorización de las rocas. En cuanto a la alteración hidrotermal, hay que mencionar el tipo, enfatizando cuán deleznable está la roca. Particular interés tienen las alteraciones de tipo argílico.

• Discontinuidades

Las superficies de estratificación y de foliación pueden constituir planos de debilidad que favorezcan deslizamientos, si mantean en el sentido de la pendiente con un ángulo

menor a ésta. Deben hacerse mediciones locales de las actitudes de estas superficies, espesor de las capas y litologías involucradas. Es recomendable graficar en una red estereográfica la relación de las actitudes de los sets de fracturas con la orientación de las laderas. Son importantes también la extensión, el espesor de zonas de cizalle o de salbanda, la abertura de fracturas y su conectividad, que influye en la permeabilidad del macizo rocoso, la frecuencia de fracturas, la rugosidad y el tipo de relleno o cemento.

Unidades de Suelo

La caracterización geotécnica de las unidades de suelo será eventualmente complementada por la realización de ensayos geotécnicos. La descripción visual de terreno debe contemplar los siguientes puntos:

• Discontinuidades

Los planos de discontinuidad presentes en la masa de suelo, como estratificación, fallas, grietas y planos de cizalle, así como el contacto con la roca subyacente, deben ser medidos rigurosamente, caracterizando su espaciamiento y rugosidad.

• Meteorización

El material del suelo puede ser afectado por agentes químicos y mecánicos de manera similar a la roca, situación que debe ser reconocida. Limos y arcillas pueden presentar estructuras columnares o disgregación granular, mientras en los clastos se forman escamas concéntricas.

• Compacidad o Resistencia

Una estimación del grado de compacidad del suelo es muy importante al dar una señal de la susceptibilidad a la erosión hídrica del suelo.

• Humedad

Una estimación cualitativa de la humedad natural es recomendable para hacer una caracterización completa.

• Color

El color del suelo, tanto en estado seco como húmedo, puede dar señales de su composición.

• Composición y Clasificación

La composición de los suelos se aprecia de forma visual, señalando la mineralogía presente. Además, debe efectuarse una clasificación preliminar del suelo, recomendándose el sistema USCS.

Ensayos Geotécnicos de Suelos

Se propone la realización de ensayos geotécnicos - densidad, clasificación y corte directo - sobre las unidades de suelo más susceptibles de ser movilizadas, para obtener mejores datos sobre la calidad geotécnica de los suelos y evaluar la estabilidad de las laderas. La realización de los ensayos estará condicionada por la disponibilidad de tiempo y recursos, así como por la calidad de los accesos a los sectores críticos para el traslado de equipos y muestras. El ensayo de corte directo puede reemplazarse por el triaxial consolidado - no drenado, el que entrega una mayor precisión en los datos pero a un costo y tiempo mayores.

Determinación de la Densidad In Situ

La densidad *in situ* puede medirse en suelos sin una cantidad apreciable de material sobre 1½" mediante el método del cono de arena (ASTM D-1556), o llevando una muestra inalterada al laboratorio. En caso de tener mucho material grueso, tendrían que realizarse otros ensayos (*e.g.* ASTM D-4914).

Ensayos de Clasificación

Reciben este nombre un conjunto de ensayos que identifican algunas propiedades básicas del suelo (ASTM, 1996), como peso específico (G), humedad natural (w), límites líquido y plástico, distribución granulométrica y clasificación USCS de laboratorio.

Ensayos de Corte Directo

Este ensayo (ASTM D-3080) determina la resistencia al cizalle de la masa de suelo, en un plano definido por el aparato. Se pueden obtener valores de cohesión y ángulo de fricción interna para la aplicación de distintos esfuerzos normales. Se propone la realización de al menos 4 ensayos a una densidad seca constante e igual a la medida *in situ* y humedades variables, hasta alcanzar la saturación, para el posterior análisis de estabilidad. El ensayo es aplicable en general para suelos con granos de hasta 2". Si el suelo tiene partículas más gruesas, puede hacerse igual retirando aquéllas. En este caso, el valor de la cohesión es aceptable, porque esta propiedad depende de los materiales finos de la matriz. Sin embargo, el ángulo de fricción interna puede estar controlado en buena parte por el material grueso, por lo que debería estimarse en terreno intentando medir el ángulo de reposo de un amontonamiento de suelo, o usar valores tabulados de la literatura.

Estudios Geofísicos

Pueden ser útiles algunos estudios geofísicos en la zona inestable, orientados a estimar la distribución, el espesor y volumen de la masa de suelo. Los métodos geofísicos no reemplazan a los ensayos en el último caso, sino se pueden usar como suplemento. La interpretación debe hacerse con extremo cuidado, utilizando criterios geológicos y calibrando los valores obtenidos con otros conseguidos por otros medios, pues sino los

resultados pueden ser muy erróneos. Considerando lo anterior, los métodos de resistividad, sísmica de refracción y gravimetría pueden ser útiles, siendo recomendable la aplicación de al menos uno de ellos.

FASE 3: PROCESAMIENTO DE DATOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En una tercera etapa, se procesan los datos de terreno y laboratorio, integrándolos con toda la información obtenida de los estudios preliminares. Para tal efecto, se propone la confección de una base de datos, aplicando los mismos en diversos mapas temáticos. Finalmente, se analizan los resultados obtenidos. Se reconocen los posibles factores condicionantes y mecanismos de generación de flujos de detritos y se hacen análisis de estabilidad de laderas sobre la base de los resultados de los ensayos de laboratorio. A partir del análisis de resultados se decide si se cuenta con todos los datos suficientes como para poder concluir sobre la potencial ocurrencia de flujos de detritos en la zona.

Elaboración de una Base de Datos

Un primer paso para analizar los datos obtenidos es reagrupar éstos, provenientes de las fases 1 y 2, integrando la información por tema y registrándola en una base de datos, y así tener un acceso fácil y una visión general de los resultados de la investigación. Se sugiere hacer la base de datos a través de tablas. Los datos se agrupan en tópicos como hidrogeología, remociones en masa declaradas, en especial flujos de detritos, clima, vegetación, actividad humana, y geomorfología. Los datos geológicos y geotécnicos obtenidos en las etapas anteriores se deben integrar en la definición de unidades geológico - geotécnicas, es decir, uni-

dades de suelo y de roca con características similares, tanto geológicas (edad, origen, composición, disposición, etc.) como geotécnicas.

Elaboración de Mapas Temáticos

Como respaldo a la base de datos, y con el fin de una mejor visualización de los principales resultados derivados del estudio, se propone la elaboración de diversos mapas temáticos.

Mapa de Suelos

Este es la versión modificada del mapa de suelos utilizado como mapa base para el levantamiento del área, con las correcciones y nuevos datos que surgieron de esta etapa. Las unidades de suelo deben corresponder a las definidas en el punto anterior. Es un mapa que incluye toda la zona de estudio, a la escala de trabajo definida inicialmente.

Mapa de Pendientes

Al igual que el mapa de suelos, es la versión definitiva del mapa base de pendientes utilizado para el trabajo en terreno, confeccionado a la escala general de trabajo.

Mapas Geológico - Geotécnicos

Se propone la confección de mapas geológico - geotécnicos que abarquen los sectores críticos. La escala de estos mapas debe ser acorde a la utilizada para la caracterización geotécnica de aquéllos. Estos mapas deben mostrar las unidades geológico - geotécnicas definidas previamente en la base de datos. Si hay una cobertura de suelo menor a 0,5 m, entonces debe aparecer la unidad de roca subyacente. Además, en estos mapas se pueden mostrar los espesores de las unidades de suelo mediante curvas isópacas, si se dispone de datos confiables, datos hidrogeológicos como posición del ni-

vel freático, vertientes y surgencias, las pendientes locales, la disposición local de los estratos y las fallas y estructuras geológicas más importantes.

Análisis de Resultados

Teniendo todos los datos y antecedentes, se procede a analizar éstos integralmente. Si se encuentra con que faltan elementos para poder llegar a una conclusión, debe volverse a alguna etapa anterior (Figura 2). El análisis debe considerar como información relevante aquélla relacionada con aluviones y otras remociones en masa históricas, la cual debe compararse e integrarse con los datos de la situación actual.

Factores Condicionantes

La elección de sectores críticos involucró el reconocimiento de dos factores condicionantes esenciales como son la disponibilidad de material detrítico y pendientes fuertes. Ahora debe reconocerse la presencia o ausencia de otros factores condicionantes, para hacer una evaluación cualitativa y poder concluir si se dan condiciones favorables para el desarrollo de aluviones. Se deben examinar las características geológico - geotécnicas de rocas y suelos, los elementos morfológicos, condiciones de la vegetación y posibles factores antrópicos que puedan favorecer el desarrollo de aluviones.

Mecanismos de Generación

En el análisis de posibles mecanismos de generación juega un papel importante el conocimiento de los mecanismos que generaron flujos anteriores. Debe revisarse las estadísticas de precipitaciones de la zona para ver si lluvias intensas han estado relacionadas con aluviones en el pasado, y si esas precipitaciones intensas siguieron a lluvias antecedentes que hayan contribuido a saturar

el suelo, o si bien se dieron en forma aislada. Este estudio puede entregar un valor aproximado de la intensidad umbral de precipitaciones necesaria para generar flujos de detritos en la zona de estudio. También deben considerarse otros mecanismos de generación como fusión de nieve o deslizamientos y desprendimientos, para lo cual se deben utilizar antecedentes históricos y observaciones de terreno.

Análisis de Estabilidad de Laderas

Si se efectuaron ensayos de corte directo de la forma propuesta, entonces se cuenta con los elementos suficientes para hacer un análisis de la estabilidad de las laderas potencialmente inestables, en términos de esfuerzos totales. Los datos son los elementos geométricos de la ladera y potenciales planos de deslizamiento, como su perfil, pendiente(s) y espesor de la cubierta de suelo; la cohesión y ángulo de fricción interna para cada humedad en que hicieron ensayos, más la densidad total correspondiente a aquella humedad, la que se calcula con ecuaciones conocidas de peso-volumen. Mediante algún software y usando un método de análisis apropiado, se calcula un factor de seguridad correspondiente a las condiciones naturales de la ladera y a cada humedad impuesta. Para efectos de interpretación es más conveniente usar el grado de saturación en vez de la humedad, haciendo las conversiones necesarias.

Con los resultados se grafica la cohesión y el ángulo de fricción interna versus la saturación y se estudian posibles quiebres que impliquen una pérdida de resistencia a ciertos grados de saturación. Conjuntamente, se grafica el factor de seguridad (F) en función del grado de saturación (S), para obtener el valor de S tal que $F=1$, condición umbral de inestabilidad de la ladera. Este valor de S debe analizarse comparativamente con las curvas de cohesión y ángulo de fric-

ción interna y con el límite líquido. Este análisis se basa en una simulación de la realidad, por lo que si bien los resultados son de interés al dar condiciones cuantitativas de la inestabilidad, en ningún caso es concluyente por si mismo, y debe complementarse con el análisis cualitativo anterior.

FASE 4: CONCLUSIONES

En la fase final, se concluye sobre si existe peligro de aluviones en la zona estudiada. Primero, se determina la susceptibilidad de ocurrencia. De haber lugares con susceptibilidades importantes de generar aluviones se elabora un mapa de susceptibilidad que indica aquellos lugares. Para completar la evaluación del peligro de flujos de detritos, se hace un estudio de la frecuencia y alcance que éstos tendrían y con ello se determina la importancia del peligro. Se confecciona un mapa de peligro, ilustrando esta importancia y las condiciones espaciales de ocurrencia. Los resultados y conclusiones se entregan a través de un informe escrito más la cartografía elaborada.

Determinación de la Susceptibilidad a la Ocurrencia de Flujos de Detritos

Del análisis de resultados se desprende si existen lugares en la zona de estudio donde se superponen diversos factores condicionantes de flujos de detritos. Si además en estos puntos puede potencialmente presentarse un mecanismo de generación, entonces se puede concluir que tales lugares son susceptibles de generar un flujo de detritos.

El grado de susceptibilidad, es decir, la potencialidad de que se genere un aluvión en ese sitio bajo el mecanismo predicho, puede establecerse según el tipo, magnitud y número de factores condicionantes presentes. Además, en general un lugar escenario de flujos de detritos en el pasado es muy

susceptible de repetirlos. Se sugiere usar grados de susceptibilidad muy alto, alto, moderado y bajo. Según los objetivos del proyecto se debe establecer un grado de susceptibilidad sobre el cual se sigue con la evaluación o bien se determina que la susceptibilidad es suficientemente baja como para terminar el estudio. Se propone una estimación numérica para el grado de susceptibilidad en cada punto susceptible, basada en la consideración de una lluvia intensa como mecanismo de generación. Se consideran los factores condicionantes más los antecedentes históricos, con una ponderación del 35% para los factores geomorfológicos, otro 35% para los geológicos y geotécnicos, un 10% tanto para clima y vegetación como el factor humano, y un 12% para los antecedentes históricos. Dentro de cada grupo hay diversos tópicos, los cuales tienen variables a las que se les asigna un valor, como se muestra en la Tabla 3. La ponderación elegida para cada ítem es coherente con la importancia relativa asignada en la literatura. Así, los factores de mayor peso en el cálculo del índice de susceptibilidad son la pendiente del lugar donde se encuentra la masa de suelo, las características geotécnicas de éste y la existencia de antecedentes de aluviones históricos generados en ese punto.

Luego, se hace una suma ponderada para calcular un índice de susceptibilidad (*IS*), dado por:

$$IS = 0,35 \Sigma GM + 0,35 \Sigma GG + 0,10 \Sigma CV + 0,08 \Sigma FH + 0,12 AH \quad (F1)$$

donde ΣGM = Suma de valores asociados a factores geomorfológicos; ΣGG = Suma de valores asociados a factores geológicos y geotécnicos; ΣCV = Suma de valores asociados a factores de clima y vegetación; ΣFH = Suma de valores asociados al factor humano; AH = Valor asociado a los antecedentes históricos.

Los valores establecidos en la Tabla 3 entregan un rango de variación para *IS* entre

0,3 y 5. Con ello, se establecen los límites para asignar el grado de susceptibilidad (Tabla 4).

Elaboración del Mapa de Susceptibilidad

Los lugares susceptibles de ser el origen de flujos de detritos se pueden mostrar cartográficamente en un mapa de susceptibilidad. Este identifica con un nombre o símbolo cada zona con potencial de remoción, la que es delimitada arealmente. El grado de susceptibilidad se expresa mediante un color. Es útil mantener la base topográfica para una mejor ubicación del sector y tener presentes las características morfológicas y del drenaje. En la leyenda se resumen, para cada punto, los factores condicionantes que controlan la incidencia y distribución de la inestabilidad, el potencial mecanismo de generación y su grado de susceptibilidad.

Evaluación del Peligro

Con los antecedentes y resultados obtenidos de las etapas previas, se está en condiciones de evaluar el peligro de flujos de detritos en la zona de estudio. Si hay evidencias o antecedentes de aluviones anteriores desarrollados en la misma zona, entonces el peligro es considerado «declarado», sino se trata de un peligro «potencial». Las condiciones de ocurrencia, espaciales y temporales, están dadas por cuáles son los factores condicionantes y en especial por el tipo de mecanismo de generación, más la frecuencia con que se producirían y el alcance que tendrían. La magnitud se puede intentar predecir estimando el volumen que tendrían potenciales aluviones bajo distintas condiciones y comparando tal volumen con el estimado para flujos de detritos anteriores.

Análisis de Frecuencia o Probabilidad de Ocurrencia

La variable más difícil de despejar en un estudio de carácter predictivo como la eva-

luación del peligro de aluviones es la temporal. La herramienta más utilizada es el análisis estadístico de eventos pasados, para calcular un periodo de retorno o una intensidad umbral del fenómeno gatillante del evento. Si sólo hay peligros potenciales sin antecedentes previos, la predicción se basa solamente en la observación e intuición del analista. El análisis de estabilidad de laderas propuesto puede ser una herramienta muy útil en este caso, pues entrega una condición de saturación crítica de los suelos inestables, con lo que habría que buscar la forma de interpretar en qué condiciones se daría esa saturación.

Estudios de intensidad de precipitaciones ligadas a eventos de aluviones han arrojado funciones que ligan la intensidad umbral de precipitaciones con la duración de éstas. El estudio puede efectuarse para una región en particular utilizando el dato de la precipitación normal anual, como en Sandersen *et al.* (1996). Se grafica el agua caída, asociada a la lluvia intensa, como porcentaje de la precipitación anual, versus la duración. La curva que forma el límite inferior de los puntos ploteados en el gráfico se expresa como una función de la forma

$$R = KD^n \quad (F2)$$

donde R es el agua caída crítica para generar flujos, expresada en porcentaje de la precipitación normal anual y D la duración en horas, siendo K y n constantes que dependen de la región en estudio y que se obtienen de la curva. Así, con una precipitación normal anual conocida, se puede calcular la cantidad de lluvia para un cierto número de horas que sería crítica para la generación de flujos de detritos en la zona estudiada.

Otros autores expresan este umbral de precipitaciones a través del cálculo de un cierto periodo de retorno o probabilidad de excedencia, utilizando el método de Weibull (Hauser, 1985; Sepúlveda, 1998). Se hace

una lista con los datos de precipitación asociados a eventos de aluviones en orden decreciente, y se calcula la probabilidad de excedencia (Pe) para cada uno como

$$Pe = \frac{m}{N + 1} \quad (F3)$$

donde m el número de orden en la lista decreciente y N el total de datos. El periodo de retorno, en años, es el inverso de Pe . Se grafica la precipitación versus Pe , y se elige el periodo de retorno o la probabilidad de excedencia a utilizar, por ejemplo el 50%, la que lleva una intensidad umbral asociada. Esto mismo podría hacerse para una intensidad de precipitación calculada con el método anterior, usando unidades coherentes de intensidad.

De esta forma, se puede establecer una condición temporal crítica de ocurrencia de potenciales aluviones, suponiendo que se generan por precipitaciones intensas. Si la causa es fusión de nieve, podría hacerse un análisis similar usando las temperaturas. Otras causas son más difíciles de predecir. Este análisis busca entregar las condiciones temporales de ocurrencia de flujos de detritos, sin que necesariamente el resultado se traduzca en una probabilidad de ocurrencia en términos matemáticos. Sí se puede concluir en una probabilidad baja, media o alta de que ocurra el aluvión, sobre la base del criterio empleado para el análisis. Debe considerarse que esta probabilidad aumenta en un grado en periodos de lluvias moderadas pero persistentes (lluvias antecedentes).

Estimación del Alcance Máximo Potencial

Otra variable fundamental para evaluar el peligro de eventuales flujos de detritos el área que se vería afectada por el paso y depositación de éstos. Se debe intentar predecir los lugares que serían alcanzados por potenciales flujos con algún grado de proba-

bilidad, dado por la magnitud del flujo y características morfológicas del lugar. Esta probabilidad puede definirse como muy alta (en el cauce actual por donde corrieron flujos recientes, por ejemplo), alta, media o baja.

Al igual que la frecuencia, este parámetro es de difícil predicción. Si bien se ha podido modelar en laboratorio la detención del flujo ante quiebres de pendiente o disminución del encajamiento (Takahashi, 1991; Laigle, 1997), las variables a considerar no son predecibles, en especial la concentración de sólidos. Por lo tanto, la estimación del alcance se debe basar en el estudio del alcance de aluviones anteriores, si hay datos, y en características morfológicas existentes como ubicación de quiebres de pendientes, la profundidad del canal, la extensión del abanico aluvial y la topografía. Dado que los flujos de detritos en ambientes montañosos suelen ser relativamente periódicos, es común la existencia de un abanico que marca los alcances de anteriores flujos. Además, se puede incorporar estimaciones del volumen de material susceptible a remoción, valor que acota el área que sería presumiblemente cubierta.

Determinación de la Importancia del Peligro

Para tener una mejor visión sobre un peligro geológico, es bueno manejar una escala de graduación del peligro que indique la importancia de éste, concepto que involucra su susceptibilidad a generarse, recurrencia y magnitud, en distintos lugares. Los criterios de graduación serán la susceptibilidad de la zona de estudio a generar aluviones, la probabilidad de ocurrencia de éstos, sean potenciales o declarados, y la probabilidad de que el lugar en particular sea afectado por aquéllos. La susceptibilidad está determinada en el mapa correspondiente, aunque ahora debe tenerse una visión más global de la zona. Así, si los cauces de potenciales alu-

viones convergen a uno solo, debe considerarse una susceptibilidad en su conjunto. La probabilidad de ocurrencia está dada por la intensidad umbral o el periodo de retorno esperado para el mecanismo de generación. La probabilidad de ser alcanzado por el flujo se determina según los criterios señalados en el punto anterior, en una estimación cualitativa.

De esta forma, se define la importancia del peligro, a partir de una escala que lo califica de muy importante, importante, moderado o débil, con subdivisiones de estos grados si se estimase conveniente. El grado de importancia se puede obtener mediante algún sistema de *ranking* similar al usado para estimar el grado de susceptibilidad, como se propone en la Tabla 5, la que se aplica para todo lugar donde la probabilidad de alcance del peligro se considere no nula. Se le otorga igual peso a cada criterio, por lo que el grado de importancia se puede definir a partir de la suma de los valores asignados a cada uno de ellos. Se define el índice de importancia del peligro (*IIP*) como:

$$IIP = GS + PO + PA \quad (F4)$$

donde *GS*, *PO* y *PA* son los valores asignados a partir de la Tabla 5 para el grado de susceptibilidad de generación en la fuente del peligro considerado, la probabilidad de ocurrencia estimada para ese peligro y la probabilidad de que el lugar en consideración sea afectado por el peligro, respectivamente. En la Tabla 5 no se considera la variable «muy alta» para la probabilidad de ocurrencia por el mayor grado de incerteza en la definición de este parámetro. Los valores posibles de *IIP* son números enteros entre 1 y 9. Así, se define el grado de importancia de un cierto peligro de flujos de detritos para un sitio en particular (Tabla 6).

Con este paso, se concluye la evaluación del peligro, pues ya se tiene identificado el evento peligroso, su frecuencia y las

condiciones espaciales y temporales de su ocurrencia, objetivos de esta evaluación.

Elaboración de Mapa de Peligro

La mejor manera de comunicar los resultados de la evaluación de peligros es a través de la confección de un mapa de peligros. Un mapa de este tipo debe mostrar la extensión máxima probable de los peligros, tanto potenciales como declarados, el tipo de peligro y la importancia asociada a cada uno. Además, es conveniente dejar la base topográfica y ubicar localidades, fábricas, caminos y otras obras para una mejor visión de las posibles consecuencias.

La Figura 3 ilustra un ejemplo de un mapa de peligro. Se propone utilizar una convención de representación cartográfica de riesgos (Sepúlveda, 1998). En ésta el tipo de peligro geológico se representa por un símbolo. La importancia se expresa mediante un color. El límite del aluvión se traza con línea llena o discontinua, según la extensión de aquél esté bien definida o sea imprecisa. Si el peligro es potencial, se utiliza un símbolo relleno en blanco, o bien relleno en negro si fuese un peligro declarado. Cuando se superponen zonas de peligros del mismo estado (potencial o declarado) sólo se menciona el más importante. Si la superposición es entre un peligro potencial y uno declarado, entonces la zona común lleva el valor del peligro declarado, el que por haberse presentado anteriormente se presume tiene una gravedad superior. Si existen otros peligros de remoción en masa declarados y reconocidos en la zona, es conveniente también colocarlos en el mapa para evitar un sesgo en la entrega de la información.

Informe Escrito

Los resultados del estudio deben respaldarse con un informe escrito. Este debe ser breve y preciso, siguiendo las pautas normales de un informe profesional. Como figuras se colocan los mapas de susceptibilidad y de peligros, mientras que como anexos se deben adjuntar los mapas temáticos y la base de datos, más cálculos, fotografías, etc.

DISCUSION

La metodología se caracteriza por concentrar el interés en el reconocimiento de los factores condicionantes y mecanismos de generación de potenciales flujos de detritos, destacando la caracterización geotécnica de los materiales involucrados como fuente de datos.

La susceptibilidad y la importancia del peligro son los conceptos más relevantes que se desprenden de la metodología propuesta. Estos parámetros se definen de manera semi-cuantitativa, mediante sumas ponderadas de calificaciones que se le entregan a las variables con incidencia sobre estos parámetros, determinando un «grado» para cada uno. Muchas de estas variables adquieren su calificación sobre la base de criterios cualitativos. La metodología no busca establecer cuantitativamente variables físicas como su densidad, viscosidad, o la concentración de sólidos, por su gran dificultad de predicción en el caso de eventos naturales. Al considerar diversos parámetros con influencia en la ocurrencia de aluviones, la metodología tiene ductilidad para ser aplicada en diversos ambientes montañosos, como son por ejemplo los distintos segmentos de la cordillera chilena, con diferentes características climáticas, geológicas, geomorfológicas, hidrogeológicas y geotécnicas.

Tabla 3. Valores asociados a factores condicionantes y antecedentes históricos para el cálculo del índice de susceptibilidad, considerando precipitaciones intensas como mecanismo de generación (modificado de Sepúlveda, 1998).

Scores for conditioning factors and historical antecedents, for calculation of the Susceptibility Index, regarding heavy rain as the triggering mechanism.

FACTOR	VARIABLE	VALOR
GEOMORFOLOGÍA (35%)		
Pendiente de ladera donde se acumula suelo susceptible	>25°	2
	25°-15,1°	1
	15°-5°	0,5
	<5°	0
Pendiente canal de drenaje por donde escurriría el flujo	>10°	1,5
	10°-5°	1
	<5°	0,5
Encajamiento canal de drenaje	Alto	1
	Medio	0,5
	Bajo	0
Orientación de ladera	Cara al sol	0,5
	Otra	0
GEOLOGÍA Y GEOTECNIA (35%)		
Características geotécnicas del suelo : Favorables para remoción	Muy favorables	2
	Favorables	1
	Poco favorables	0
Profundidad nivel freático	<2m	1
	>2m	0
Características geotécnicas de rocas : Favorecen formación de suelo	Sí	1
	No	0
Grado de saturación crítico según análisis de estabilidad	<60%	1
	60-80%	0,5
	>80%	0
CLIMA Y VEGETACIÓN (10%)		
Acumulación de nieve	Permanente o Eterna	3
	Estacional	2
	Esporádicamente	v
	Nunca	0
Cobertura vegetal	Nula a Baja	2
	Moderada	1
	Alta	0
INTERVENCIÓN ANTRÓPICA (8%)		
Obstrucción de canal de drenaje por represas de tierra o rellenos, zonas de extracción de áridos, cortes viales, canales de regadío, etc.	Importante	3
	Moderada	2
	Baja	1
	Nula	0
Desestabilización artificial de laderas	Importante	2
	Poco importante	1
	Nula	0
ANTECEDENTES HISTÓRICOS (12%)		
'Aluviones' o deslizamientos declarados	'Aluviones' históricos	5
	'Aluviones' prehistóricos	2
	Deslizamientos declarados	3
	Sin antecedentes	1

Tabla 4. Relación entre el Índice de Susceptibilidad y el Grado de Susceptibilidad.
Relationship between Susceptibility Index and Susceptibility Degree.

Índice de Susceptibilidad (IS)	Grado de Susceptibilidad
<1,48	Bajo
1,48 - 2,65	Moderado
2,66 - 3,83	Alto
>3,83	Muy Alto

Tabla 5. Valores asociados a los criterios utilizados para la determinación del Índice de Importancia del Peligro.
Scores related with the criteria used to determine the Hazard Importance Index.

CRITERIO	VARIABLE	VALOR
Grado de Susceptibilidad en la Fuente	Muy Alto	3
	Alto	2
	Moderado	1
	Bajo	0
	Alta	3
Probabilidad de Ocurrencia	Media	2
	Baja	1
Probabilidad de Alcance del Peligro en un Area Dada	Muy Alta	3
	Alta	2
	Media	1
	Baja	0

Tabla 6. Relación entre el Índice de Importancia del Peligro y el Grado de Importancia del Peligro.
Relationship between the Hazard Importance Index and the Hazard Importance Degree.

Índice de Importancia del Peligro (IIP)	Grado de Importancia del Peligro
<3	Débil
4-5	Moderado
6-7	Importante
8-9	Muy Importante

Los análisis de frecuencia, que conducen a estimar una probabilidad de ocurrencia, se basan generalmente en estudios estadísticos relacionados con los mecanismos de generación. Esto es debido a que la distancia en el tiempo entre eventos aluvionales es muy amplia para los registros históricos, habiendo muy pocos datos al respecto como para hacer estadística. En el caso de los ambientes montañosos, se ha comprobado que el mecanismo de generación más común es la ocurrencia de lluvias muy intensas. Esto implica que una buena estadística de precipitaciones permite hacer buenas estimaciones de la probabilidad de ocurrencia de aluviones, si se incluyen registros de las lluvias asociadas a los eventos históricos. Esta estadística debe permitir estudiar la intensidad de precipitaciones en términos de cantidad de lluvia por hora, para lo cual se requieren pluviógrafos. La gran limitación en Chile es la escasez de estos instrumentos, sumado a la baja densidad de estaciones meteorológicas. El análisis de precipitaciones diarias, dato que se puede obtener comúnmente en Chile a través de pluviómetros, es muy poco preciso para hacer estimaciones de frecuencia o probabilidades de ocurrencia. Es necesario insistir en la necesidad de equipar con pluviógrafos las zonas más susceptibles a flujos de detritos, para poder hacer predicciones más precisas en el futuro.

Esta metodología incorpora la realización de ensayos geotécnicos y análisis de estabilidad de laderas en los sectores críticos. La idea es intentar obtener datos más cuantitativos sobre la zona de estudio. Sin embargo, en la práctica se ha demostrado que la aplicación de estos ensayos es limitada (Sepúlveda, 1998). Un primer problema son los accesos a zonas montañosas que pueden dificultar el transporte de grandes cantidades de muestra como se necesita según los ensayos planteados. Otro inconveniente relacionado con la ejecución de ensayos

geotécnicos es la granulometría. Los ensayos están diseñados fundamentalmente para material fino (a lo más hasta grava fina), mientras que muchos flujos de detritos incluyen mucho material de mayor tamaño. El problema en general se origina en que los ensayos conocidos han sido diseñados para otros objetivos, fundamentalmente estudios para obras de ingeniería, existiendo generalmente accesos buenos a la zona de interés en aquellos casos. Esta diferencia de objetivos incluye también los parámetros geotécnicos a determinar, hecho que descartó la alternativa de hacer ensayos *in situ*, lo que evitaría el traslado de muestras. Estos ensayos fueron profundamente estudiados, llegándose a la conclusión de que sus resultados serían poco útiles para este tipo de estudio.

Las propiedades físicas de los flujos detríticos han podido ser medianamente bien descritas por estudios experimentales. Sin embargo, la correcta predicción de tales variables en el caso de los eventos naturales es altamente difícil de realizar. Por esto, la estimación del alcance y predicción de lugares de detención y depositación de los potenciales 'aluviones' debe basarse en un buen conocimiento teórico del fenómeno y el estudio de eventos anteriores en la misma zona.

Este trabajo pretende ser una orientación a los profesionales que deban investigar sobre los peligros de aluviones en alguna zona determinada, ya sea con fines de prevención de riesgos para la comunidad o para algún centro de desarrollo económico. Este tipo de investigación es básico para la elaboración de planes de emergencia ante catástrofes naturales y de ordenamiento territorial, así como para el diseño de obras de protección. Un buen conocimiento del fenómeno natural y una zonación del terreno afecto al peligro debe ser así la base de los estudios de vulnerabilidad, análisis de riesgos y los tipos de planificaciones anteriormente mencionados.



CONCLUSIONES

Los flujos de detritos son procesos que por sus características constituyen un peligro geológico. La técnica para identificar peligros de esta naturaleza y sus condiciones de ocurrencia se conoce como evaluación de peligros.

La metodología propuesta sugiere la ejecución de cuatro fases principales: estudios preliminares, campaña de terreno y eventuales análisis de laboratorio, procesamiento de datos y análisis de resultados, y conclusiones. Los resultados de la investigación se entregan en un informe escrito y en mapas de peligros y de susceptibilidad a la generación de flujos de detritos, más una base de datos y mapas temáticos.

La metodología centra el estudio en el reconocimiento de los factores condicionantes y mecanismos de generación de flujos de detritos presentes en la zona de estudio, para con ellos poder determinar la susceptibilidad de ocurrencia de 'aluviones' y concluir sobre las condiciones espaciales y temporales de su ocurrencia, definiendo grados de importancia del peligro para sectores determinados de una manera semi-cuantitativa.

La evaluación del peligro de flujos de detritos es un estudio predictivo que acota y caracteriza las condiciones de ocurrencia de aquéllos, lo que es relevante para la elaboración de medidas de prevención ante eventuales catástrofes causadas por este tipo de fenómenos naturales y para planes de ordenamiento territorial.

AGRADECIMIENTOS

El autor agradece las valiosas contribuciones y comentarios a este trabajo de los geólogos Sofía Rebolledo, Carlos Lamperein y Arturo Hauser y del ingeniero Ramón Verdugo.

REFERENCIAS

- ASTM, 1996. Annual Book of ASTM Standards, v. 4.08.
- Bertoni, J.O. ; Lombardi Neto, F., 1985. Conservacao do solo. Livroceres, Piracicaba, 368 p.
- Caine, N., 1980. The rainfall intensity-duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler*, v.62(A), p.23-27.
- Hauser, A. 1985. Flujos de barro en la zona preandina de la Región Metropolitana : Características, causas, efectos, riesgos y medidas preventivas. *Revista Geológica de Chile*, No.24, p.75-92.
- Hauser, A., 1993. Remociones en masa en Chile. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No.45, 75 p.
- Hauser, A. 1997. Los aluviones del 18 de junio en Antofagasta : Un análisis crítico, a 5 años del desastre. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No.47, 47 p.
- Laigle, D., 1997. A two-dimensional model for the study of debris-flow spreading on a torrent debris fan. *In Proceedings of 1st Int. Conference Debris Flow Hazard Mitigation : Mechanics, Prediction and Assesment*, ASCE, New York, p.123-131.
- Naranjo, J.A ; Varela, J. 1996. Flujos de detritos y barro que afectaron el sector oriente de Santiago el 3 de mayo de 1993. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín No. 47, 42 p.
- Prieto, C., 1985. Inestabilidades y erosión de laderas asociadas a riadas. *In Geología y Prevención de Riesgos por Inundaciones*. Instituto Geológico y Minero de España, p.117-192.
- Sandersen, F. ; Bakkehoi, S. ; Hestnes, E. ; Lied, K., 1996. The influence of meteorological factors on the initiation

- of debris flows, rockfalls, rockslides and rockmass stability. *In Landslides*. Baalkema, Rotterdam, p.97-114.
- Sauret, B., 1987. Coulées de débris canalisées. *Compte rendu bibliographique. In Risques Naturels. Bulletin de liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, No.150-151, p.65-77.
- Selby, M.J., 1993. Hillslope materials and processes. Oxford University Press, 2a. ed., 451 p.
- Sepúlveda, S., 1998. Metodología para evaluar el peligro de flujos de detritos en ambientes montañosos. Aplicación en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana. Memoria para optar al Título de Geólogo, Depto. de Geología, U.de Chile. Inédito, 93 p.
- Sepúlveda S., Rebolledo, S., 2000. Evaluación del peligro de flujos de detritos en la Quebrada Lo Cañas, Región Metropolitana, Actus IX Congreso Geológico Chileno, vol. 1, p. 116-120.
- Sheko, A.I., 1988. Factors involved in the formation and development of landslides and mudflows. *In Landslides and Mudflows*, UNESCO-UNEP, Moscow, v.1, p.14-35.
- Sowers, G.F.; Royster, D.L., 1978. Field investigation. *In Landslides, Analysis and Control*, Special Report N°176. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington D.C., p.81-111.
- Tadashi, A., 1995. Riesgos geológicos urbanos. *In Aspectos Geológicos de Protección Ambiental*. UNESCO, v.1, p.89-101.
- Takahashi, T., 1991. Debris flows. IAHR Monograph, 165 p.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. *In Landslides, Analysis and Control*, Special Report N°176. Transportation Research Board, National Academy of Sciences. Washington D.C., p.11-33
- Varnes, D.J., 1984. Landslides hazard zonation: A review of principles and practice. *Natural Hazard 3*, UNESCO, 63 p.
- Wan, Z.; Hua, J., 1993. Analysis of pulsing phenomenon in viscous debris flows. ASCE Hydraulics Division - National Conference on Hydraulic Engineering, p.1610-1650.

GLOSARIO

Catástrofe

Repentina y violenta perturbación de la naturaleza, atribuida a causas naturales excepcionales, que afecta las condiciones físicas de la superficie terrestre.

Desastre

Interacción de un fenómeno geológico extremo (de tipo catastrófico) y una comunidad u obra humana, que causa alteraciones intensas en las personas, los bienes, los servicios y/o el ambiente. Es la ocurrencia efectiva de un fenómeno peligroso que, como consecuencia de la vulnerabilidad de los elementos expuestos, causa efectos adversos sobre los mismos.

Vulnerabilidad

Es el grado de exposición a un peligro que puede presentar un área, asentamiento humano u obra. Puede ser medido en una proporción (0 a 100%) del costo susceptible a ser perdido por la ocurrencia de un evento peligroso dado.

Susceptibilidad

Capacidad o potencialidad de una unidad geológica o geomorfológica de ser afectada por un proceso geológico determinado.

Peligro Geológico o Amenaza

Es una condición o proceso geológico potencialmente catastrófico. Igualmente se entiende por peligro a la probabilidad de que suceda un evento de este tipo durante un cierto periodo de tiempo en un sitio dado.

Riesgo Geológico

Corresponde al número esperado de vidas perdidas, personas damnificadas, daños a la propiedad, etc., que causaría la ocurrencia de un fenómeno peligroso (Varnes, 1984). Se expresa como el producto de la probabilidad de ocurrencia del fenómeno por la vulnerabilidad y por el valor de los elementos bajo riesgo. Nótese que, a diferencia del peligro geológico, el riesgo se puede medir en unidades monetarias o por medio de algún índice similar.

Evaluación de Peligros

Técnica de naturaleza predictiva cuyo objetivo es identificar los tipos de eventos peligrosos, determinar la frecuencia de tales eventos y definir las condiciones espaciales y temporales de su ocurrencia (Tadashi, 1995).

Análisis de Riesgos

Técnica que, a partir de la evaluación de peligros, trata de cuantificar las informaciones, correlacionando la probabilidad de ocurrencia de eventos peligrosos con la probabilidad de consecuencias indeseables, estimándose los daños y realizándose estudios de vulnerabilidad (Tadashi, 1995).