

Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina

Martin Mergili*

University of Natural Resources and Life Sciences (BOKU), Viena – Austria
Universidad de Viena, Viena – Austria

Carla I. Marchant Santiago**

Universidad Austral de Chile, Valdivia – Chile

Stella M. Moreiras***

Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CONICET, Mendoza – Argentina

Resumen

Las remociones en masa son agentes geomorfológicos comunes en la región Andina, las cuales pueden producir desastres, cuya ocurrencia y propiedades son determinadas por la interacción de varios factores geológicos, topográficos, climáticos y las actividades antropogénicas. La comprensión de sus características se beneficia de estudios comparativos sobre áreas climáticas, geomorfológicas y socioeconómicas. Colombia, con su clima húmedo tropical y una alta densidad poblacional, es uno de los puntos globales de más alto riesgo de remociones en masa, como deslizamientos y flujos, accionados por La Niña o la actividad de volcanes glaciados, los cuales contrastan con las caídas de rocas y flujos detríticos en el árido y escasamente poblado centro-oeste argentino, donde los eventos son generalmente asociados a El Niño.

Palabras clave: mitigación del riesgo, procesos de remoción en masa, región Andina.



DOI: [dx.doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211](https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.50211)

RECIBIDO: 5 DE MAYO DEL 2014. ACEPTADO: 4 DE NOVIEMBRE DEL 2014.

Artículo de revisión sobre la comprensión de remociones en masa y la aptitud de reducir el riesgo asociado, permitiendo el desarrollo de estudios comparativos sobre áreas climáticas, geomorfológicas y socioeconómicas contrastantes, tal como Colombia y el centro-oeste argentino, a los cuales se refiere este artículo.

COMO CITAR ESTE ARTICULO: Mergili, Martin, Carla I. Marchant Santiago y Stella M. Moreiras. 2015. “Causas, características e impacto de los procesos de remoción en masa, en áreas contrastantes de la región Andina”. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía* 24 (2): 113-131. DOI: 10.15446/rcdg.v24n2.50211

* Dirección postal: Peter-Jordan-Strasse 70, 1190 Viena, Austria.
Correo electrónico: martin.mergili@boku.ac.at

** Dirección postal: Instituto de Ciencias Ambientales y Evolutivas, Universidad Austral de Chile, Avenida Rector Eduardo Morales Miranda, Edificio Emilio Pugín, Isla Teja, Valdivia.
Correo electrónico: carla.marchant@uach.cl

*** Dirección postal: Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA), CCT, CONICET, Av. Dr. Ruiz Leal s/n, Parque, 5500 Mendoza, Argentina.
Correo electrónico: moreiras@mendoza-conicet.gob.ar

Causas, características e impacto dos processos de remoção em massa em áreas contrastantes da região Andina

Resumo

As remoções em massa são agentes geomorfológicos comuns na região andina e podem produzir desastres, cujas ocorrência e propriedades são determinadas pela interação de vários fatores geológicos, topográficos, climáticos e as atividades antropogênicas. A compreensão de suas características beneficia-se de estudos comparativos sobre áreas climáticas, geomorfológicas e socioeconômicas. A Colômbia, com seu clima úmido tropical e uma alta densidade populacional, é um dos pontos globais de mais alto risco de remoções em massa, como deslizamentos e fluxos, acionados pelo fenômeno *La Niña* ou pela atividade de vulcões glaciares, que contrastam com as quedas de rochas e fluxos detríticos no árido e escassamente povoado centro-oeste argentino, onde os eventos são geralmente associados com *El Niño*.

Palavras-chave: mitigação do risco, processos de remoção em massa, região andina.

Causes, Characteristics and Impacts of Landslide Processes in Contrasting Areas of the Andean Region

Abstract

In the Andean region, landslides are common geomorphological agents that can cause disasters. The occurrence and properties of landslides in this region are determined by the interactions of several geological, topographic and climatic factors as well as by anthropogenic activities. A better understanding of the characteristics of landslides can be obtained from comparative studies on climatic, geomorphological and socioeconomic issues. Colombia, which has a tropical, wet climate and a high population density, has one of the highest landslide risks in the world. These landslides are induced by displacements and flows caused by *La Niña* or the activity of glaciated volcanoes; in contrast, in central-western Argentina, which is arid and sparsely populated, landslides are triggered by rock falls and debris flows and are generally associated with *El Niño*.

Keywords: risk mitigation, landslide processes, Andean region.

Introducción

Diversas áreas de la región Andina, reconocidas por su actividad sísmica y volcánica, se caracterizan por su abrupta topografía con pronunciadas diferencias de elevación en pequeñas distancias que resultan en una alta energía del relieve. Una gran variedad de procesos geomorfológicos contribuyen a la reducción de estos desequilibrios energéticos, i. e. erosión y transporte de sedimentos de los ríos. Un medio muy eficaz de transporte son los movimientos gravitacionales en masa, incluidos los flujos, deslizamientos o caídas de rocas, detritos, barro o tierra. Mientras que el agua es a menudo un importante agente de tales movimientos, la gravedad es la fuerza dominante. A pesar de que el deslizamiento no es siempre el tipo de movimiento predominante, este concepto es utilizado frecuentemente como sinónimo de movimiento de masas gravitacionales. Los procesos de remoción en masa en la región Andina han sido objeto de una amplia investigación, ejemplos de ello son los proporcionados por Schuster y Highland (2001), Schuster, Salcedo y Valenzuela (2002) y PMA-GCA (2007), centrándose principalmente en eventos desastrosos.

Las condiciones naturales para el desarrollo de procesos de remoción en masa varían considerablemente de un lugar a otro, específicamente en cuanto a topografía, geología, actividad sísmica y volcánica, clima y vegetación; lo mismo ocurre con el grado y la forma de intervención antrópica. En este artículo se compararán en profundidad las correspondientes causas, los mecanismos, las características y los impactos de los procesos de remoción en masa en dos áreas contrastantes de la región Andina: en Colombia la región húmedo-tropical y en Argentina, la zona subtropical-árida del centro-occidente. La revisión de la literatura existente se combina con los resultados de la investigación primaria realizada por los autores. Junto a la revisión de desastres ocurridos por remociones en masa históricas y la discusión de las semejanzas o diferencias entre estos procesos, será posible una mejor comprensión de la variación geográfica de los procesos de remoción en masa y los impactos que generan en la región Andina.

Para construir un marco de análisis comparativo adecuado, se revisaron patrones generales de eventos históricos de remoción en masa en la región Andina y sus características climáticas, geológicas y antropogénicas.

Revisión de desastres históricos producidos por eventos de remoción en masa

Estadística de desastres por eventos de remoción en masa

Las remociones en masa de gran magnitud, en términos de volumen o área afectada, ocurren con menor frecuencia que eventos de baja magnitud; esta es una regla válida para muchos tipos de procesos en la naturaleza. A pesar de que se crea que eventos de gran magnitud afectarían a mayor número de personas, a diferencia de los eventos de menor magnitud, no existe una relación lineal al respecto; si eventos de gran magnitud ocurren en áreas escasamente pobladas, sin personas o bienes económicos expuestos, el riesgo y, por tanto, el impacto, es nulo (excepto si las cadenas de procesos de larga distancia son provocadas por ejemplo, por el impacto de un movimiento de masa en un lago). Por otra parte, los eventos de remoción en masa no son vistos solo como un desastre natural, sino también como un desastre socioeconómico, causado por la falta de estrategias de mitigación (Felgentreff y Glade 2008).

La figura 1 muestra las curvas de magnitud-frecuencia para los desastres por remoción en masa, de la región Andina y del mundo. Asimismo, se presentan curvas para desastres naturales en el ámbito global. La magnitud es representada por la cantidad de víctimas mortales. Mientras las gráficas para desastres de remoción en masa en el mundo y en la región Andina son casi idénticas, el número de desastres naturales es dominado por un pequeño número de graves epidemias, sequías e inundaciones, que alcanzan 1 millón de víctimas fatales

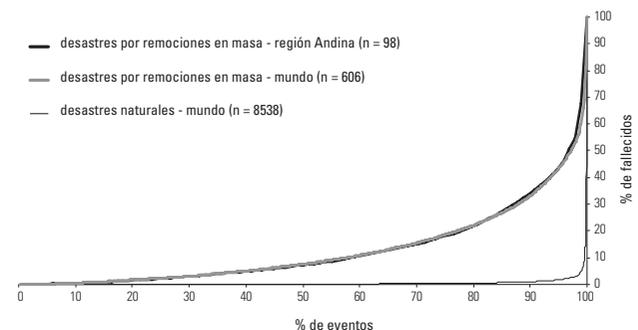


Figura 1. Comparación región Andina con el resto del mundo: curvas de magnitud-frecuencia de desastres naturales, en general, y por remoción en masa, en particular, periodo 1901-2011. Fuente: EM-DAT 2011.

Tabla 1. Número de desastres por remoción en masa y víctimas fatales en cada país Andino, periodo 1901-2011

País	n.º de eventos (R)	n.º de víctimas fatales (F)	Relación F/R	País	n.º de eventos (R)	n.º de víctimas fatales (F)	Relación F/R
Argentina	3	79	26,33	Ecuador	13	1,106	85,08
Bolivia	6	218	36,33	Perú	33	10,512	318,54
Chile	4	229	57,25	Venezuela	4	164	41
Colombia	41	3,171	77,34	Total	104	15,479	

Fuente: EM-DAT 2011.

(EM-DAT 2011). Igualmente, las remociones en masa de mayor volumen (de varios km³) afectan generalmente áreas más pequeñas que las inundaciones, las sequías o las epidemias.

La Base de Datos Internacional de Desastres —en adelante, EM-DAT— considera solo eventos con al menos 10 víctimas mortales, 100 personas afectadas, la solicitud de ayuda internacional y/o la declaración de estado de emergencia. Sin embargo, los datos pueden estar sesgados por una cantidad significativa de desastres no considerados, particularmente aquellos ocurridos en áreas remotas en los primeros años del siglo XX. La tabla 1 resume los desastres por remociones en masa ocurridos en cada país de la región Andina. Colombia y Perú son los países más afectados con mayor número de víctimas fatales. Estos resultados concuerdan con lo expuesto por Nadim et ál. (2006), quienes señalaron que en el mundo, la parte noroeste de Sudamérica es una de las zonas más propensas a los riesgos por remoción en masa. La EM-DAT brinda también información sobre la cantidad de personas afectadas y el daño económico asociado; sin embargo, la información es incompleta y no abierta públicamente.

El número de víctimas no está relacionado directamente con la cantidad de desastres naturales, sino más bien con la magnitud de esos eventos, en cuanto a volumen, área afectada y alcance, donde es fundamental la vulnerabilidad de las comunidades andinas. La localización de la población, así como las medidas preventivas, entre ellas la preparación de las comunidades ante los peligros naturales, son clave. Por ejemplo, en el caso de Perú, las principales ciudades se encuentran en dominio montañoso, lo cual explica el alto número de víctimas registrado.

Cadena de procesos y desastres causados por remociones en masa

El número de víctimas fatales y los daños causados por un evento específico, a menudo varían, dependiendo de la fuente de datos. Por otra parte, muchos de los

movimientos en masa están involucrados en las cadenas de procesos, que incluyen terremotos, erupciones volcánicas o inundaciones. Las remociones en masa por lo tanto no siempre son consideradas como eventos individuales, por ello algunos de los mayores desastres producidos por esta causa en la región Andina, no están incluidos en las estadísticas señaladas en la figura 1 y en la tabla 1. Tres de los eventos de movimientos en masa más desastrosos en la región Andina desde 1901 no son definidos como remociones en masa en la base de datos EM-DAT: el evento de Armero, en 1985, es considerado como desastre volcánico; el evento de Huascarán, en 1970, es considerado como consecuencia del terremoto y, el evento de Vargas, de 1999, como una inundación (tabla 2). La transición desde un flujo de detritos, el cual puede ser considerado como un proceso de remoción en masa, a una inundación es gradual, por lo tanto no hay forma de distinguir el número de personas víctimas de cada uno de estos procesos individualmente. El evento de Vargas, de 1999, es un ejemplo de ello, donde las inundaciones se combinaron con múltiples remociones en masa, producidos por el desencadenamiento de lluvias que generaron flujos de detritos (PMA-GCA 2007).

Otra cadena de procesos destructivos se desarrolló por una erupción relativamente menor del Nevado del Ruiz (5.321 m) en la Cordillera Central de Colombia: el derretimiento parcial de los casquetes de hielo del volcán generó gran cantidad de agua que movilizó parte importante de los piroclastos de las laderas del volcán, desencadenándose un lahar, que se desplazó varios kilómetros, destruyendo la ciudad de Armero y otros asentamientos humanos (Lowe et ál. 1986; Thouret et ál. 2007). Previamente, el área fue designada como una zona de alto riesgo, pero no se tomaron medidas adecuadas (Voight 1990). Los lahares son fenómenos comunes, particularmente en las zonas húmedas de los Andes, desencadenados por el derretimiento de casquetes de hielos durante la erupción de estratovolcanes o por precipitaciones.

Tabla 2. Desastres causados por remoción en masa en la región Andina, con mayor número de víctimas fatales, periodo 1901-2011

Año	País	Evento	Agente desencadenador	Número de víctimas fatales
1999	Venezuela	Vargas: deslizamientos y flujo de detritos	Precipitaciones	30.000* (1)
1985	Colombia	Nevado del Ruiz: lahar (Armero)	Erupción volcánica	21.800 (1)
1970	Perú	Huascarán avalancha de roca, flujo de detritos (Yungay)	Terremoto	6.000 (2)
1941	Perú	Huaraz: flujo de detritos	Falla de represa natural	5.000 (1)
1994	Colombia	Páez: deslizamientos y flujo de detritos	Terremoto	1.100** (3)
1962	Perú	Huascarán: avalancha de roca, flujo de detritos (Ranrahirca)	Desconocido	650 (2)
1987	Colombia	Villatina: deslizamiento (Medellín)	Fugas de canal	640 (1)
1971	Perú	Chungar: deslizamientos y ola de inundaciones	Desconocido	600 (1)

Fuentes: 1) EM-DAT 2011); 2) Evans et ál. 2009; 3) Ávila et ál. 1995.

Notas: *Incluye víctimas fatales por inundación.

**Incluye víctimas fatales por el terremoto desencadenante del evento.

Otro tipo de interacciones entre procesos incluyen también casquetes de hielo: el evento de Huascarán, en 1970, en la cordillera Blanca de Perú, se inició por una avalancha de rocas y hielo, producida por un terremoto en una ladera del Nevado Huascarán (6.768 m). La remoción en masa arrastró una gran cantidad de material y se convirtió en un flujo de detritos y barro, que recorrió 20 km a más de 300 km/h. Parte importante del material fue depositado en el cono de detritos en el sector de Ranrahirca, el cual había sido destruido por un evento similar, 8 años antes. Asimismo, debido a su alta energía, parte del material sepultó la ciudad de Yungay (Evans et ál. 2009; Schuster, Salcedo y Valenzuela 2002).

La cadena de procesos, a menudo aumenta la magnitud de los eventos de remoción en masa y causa efectos secundarios, más severos que los procesos iniciales. En 1971, la ciudad minera de Chungar, Perú, fue destruida por una inundación desencadenada por una avalancha de rocas en un lago. La rotura de una represa contenedora de morrenas en la cordillera Blanca, en 1941, desencadenó un flujo de detritos que devastó la ciudad de Huaraz (Schuster, Salcedo y Valenzuela 2002). Por su parte, las inundaciones repentinas de lagos glaciares son un problema generalizado en la cordillera Blanca (Carey 2005;

Hegglin y Huggel 2008) y en el sur de los Andes (Worni et ál. 2010). En el 2010, una avalancha de hielo impactó un pequeño lago glaciar en la cordillera Blanca. La resultante ola de inundación rebasó la presa y causó daños y algunas muertes, aguas abajo (Haerberli, Portocarrero y Evans 2010). El riesgo ya había sido identificado y el nivel del lago disminuido debido a un túnel de drenaje; de otra forma, el daño causado habría sido probablemente mucho mayor.

Dado que las remociones en masa son eventos suficientemente extensas, cuyos depósitos puedan bloquear valles enteros, también pueden desbordar lagos. La mayoría de los lagos represados por remociones en masa, drenan un año después de su formación (Costa y Schuster 1988), causando potenciales peligros de olas de inundación. Los dos ejemplos más significativos de este evento desencadenante y de una serie de procesos asociados, son: el evento de Mayunmarca (Perú 1974) y La Josefina (Ecuador 1993). La presa de Mayunmarca falló después de 43 días y, en el caso de La Josefina, después de 33 días. En ambos casos, las resultantes olas de inundación fueron previstas; a pesar de la gran destrucción causada aguas abajo, no se registraron víctimas fatales, debido a la evacuación oportuna de las zonas de riesgo (Schuster, Salcedo y Valenzuela 2002).

Procesos de remoción en masa y su impacto en las áreas densamente pobladas de los Andes húmedos tropicales colombianos

Situación general

Las montañas de Colombia, ubicadas en la parte norte (tropical) de la región Andina, se dividen en tres cadenas paralelas (cordilleras Oriental, Central y Occidental). Estas se encuentran separadas por dos valles longitudinales de grandes dimensiones y se caracterizan por su gran actividad sísmica.

La Cordillera Central posee varios estratovolcanes activos, de los cuales cuatro tienen un casquete de hielo; el Nevado del Ruiz es el de mayor altura con 5.364 metros sobre el nivel del mar. Mientras los valles longitudinales reciben intensas precipitaciones estacionales, las zonas más altas de la cadena montañosa son extremadamente húmedas durante todo el año.

De todos los países andinos, Colombia es uno de los más afectados por remociones en masa (véase tabla 1) y es, en el mundo, uno de los *hot spots* de riesgos más importante (Nadim et ál. 2006). Para algunos sectores, se ha identificado un riesgo mayor a 0,01 víctimas fatales por año/km2. Las causas que producen estos

fenómenos pueden ser agrupadas en cuatro factores principales: 1) clima tropical húmedo, 2) actividad sísmo-tectónica, 3) actividad volcánica, 4) crecimiento urbano en pendientes abruptas. La susceptibilidad al desarrollo de un evento de remoción en masa es determinada por una compleja interrelación de todos los factores mencionados (figura 2). El desencadenamiento de remociones en masa ocurre usualmente por eventos específicos que intervienen el equilibrio dinámico de las pendientes. La figura 3 muestra la localización de los ejemplos anteriormente citados.

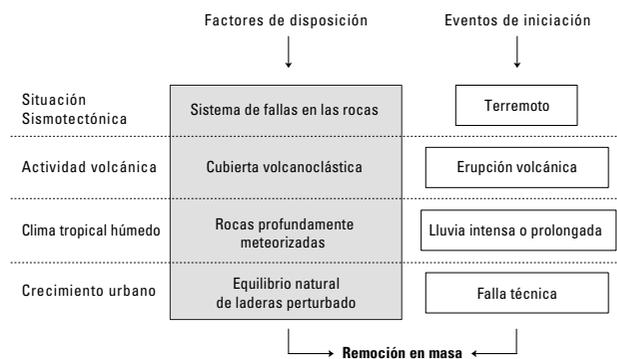


Figura 2. Factores que aumentan la incidencia de remociones en masa en Colombia.

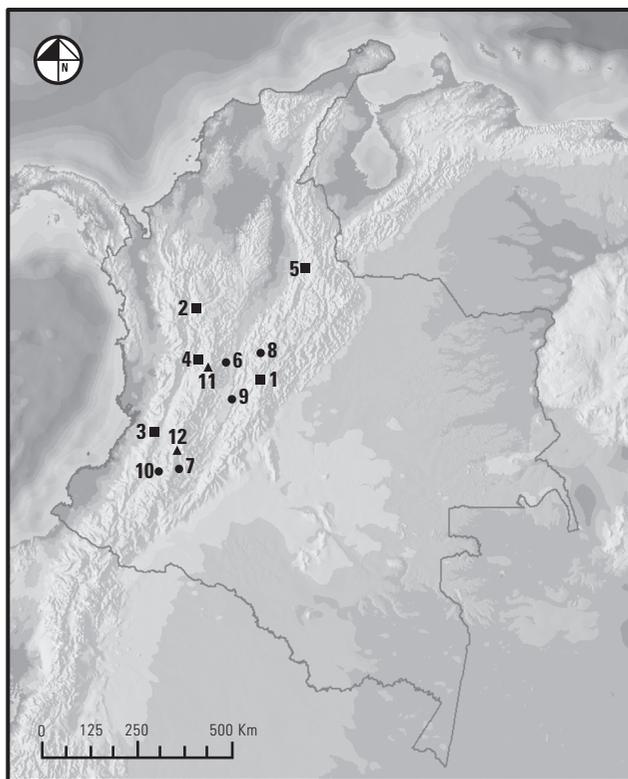


Figura 3. Localización de los ejemplos de remoción en masa en Colombia.

Referencias

1. Bogotá
2. Medellín
3. Cali
4. Manizales
5. Bucaramanga
6. Armero
7. Páez
8. San Cayetano
9. Girardot
10. Valle del Cauca superior
11. Nevado del Ruiz
12. Nevado del Huila

Clima húmedo tropical

Colombia se encuentra en la zona de convergencia intertropical, la cual se caracteriza por sus altas temperaturas durante todo el año y dos marcadas temporadas lluviosas. Las fuertes precipitaciones y un alto porcentaje de procesos geomorfológicos exógenos debidos al clima tropical húmedo han evitado el desarrollo de una topografía muy abrupta (pendientes pronunciadas se encontrarían en desequilibrio). Sin embargo, debido a rápidos procesos erosivos y remociones en masa naturales típicos de esta área, el relieve ha sido modelado y sus formas suavizadas. Junto a la densa vegetación superficial que estabiliza las pendientes, la topografía controla la ocurrencia de diferentes tipos de remociones en masa: caída de rocas son solo relevantes en cañones y cadenas montañosas muy pronunciados, donde las glaciaciones del Pleistoceno han tenido una incidencia importante en la evolución del paisaje. Este último es el caso de la cordillera Blanca en Perú (1970, evento en Huascarán) y en un grado mucho menor, la Cordillera Central de Colombia. Aquí los procesos de deslizamientos y flujos son los dominantes. Planos de deslizamiento pueden formarse a lo largo de fallas tectónicas o en rocas meteorizadas (figura 4), mientras que los flujos se producen mayoritariamente en depósitos residuales de materiales piroclásticos erosionados, a menudo en combinación con agua. Lo que empieza

como un deslizamiento, se transforma rápidamente en un proceso de flujo. Los procesos de remoción en masa ocurren, por lo general, como una combinación de flujo y deslizamiento, que puede alcanzar diversas velocidades. Movimientos relativamente lentos pueden causar también daños considerables, como ocurrió en el evento de San Cayetano en la provincia de Cundinamarca.

A pesar de que los sistemas morfológicos de Colombia y, por consiguiente, las pendientes están adaptadas a la alta disponibilidad de agua, debido a abundantes montos de precipitaciones, eventos excepcionales de precipitaciones (ya sea por duración y/o intensidad) pueden perturbar el equilibrio del sistema y desencadenar remociones en masa. Las fuertes o prolongadas precipitaciones son, de lejos, el factor desencadenante más importante en Colombia; un ejemplo de ello, es el evento de 1999 en San Cayetano, el cual muestra cómo la interacción de condiciones geológicas y un evento desencadenante de precipitaciones extremas (219 días de precipitaciones ininterrumpidas) permitieron la movilización de los suelos arcillosos de la zona. Este complejo movimiento comprendió diferentes tipos de remociones en masa, que tuvieron como resultado la fluidización del suelo de un área aproximada a los 2 km². Aunque la velocidad del evento fue moderada (centímetros o metros por día) y no se produjeron víctimas fatales, la destrucción fue considerable y forzó la



Figura 4. (a) Deslizamientos de tierra-flujo de detritos en rocas meteorizadas en la parte alta del Valle del Cauca, y (b) en el Valle de Magdalena, cerca de Girardot. Fotografías de Mergili, 2011.

migración de más de 5.000 personas. El área es, en general, sensible a movimientos en masa de este tipo; dicho evento fue la reactivación de una remoción en masa ocurrida 50 años antes. En total 10 km² fueron afectados por este evento. Este tipo de fluidización del suelo, en sustratos compuestos de material arcilloso-arenoso, es común en otras partes del mundo; otro ejemplo destacado es el evento de Gschlifgraben, en Austria (Weidinger, Niesner y Millahn 2011). Este evento resultó de un periodo lluvioso que tuvo una duración de varios meses. Para estos movimientos en masa profundos, frecuentemente son los largos periodos lluviosos los que actúan como desencadenantes. Las lluvias prolongadas inducen variaciones freáticas, porque saturan niveles profundos del terreno y facilitan el desencadenamiento o la reactivación de grandes inestabilidades, con superficies de rotura profundas. En cambio, las lluvias intensas de corta duración tienden a producir inestabilidades superficiales. Observaciones similares fueron realizadas en otras regiones del mundo, como Portugal (Zêzere, Trigo y Trigo 2005).

En el área de Medellín, hay fuertes evidencias de un aumento de la ocurrencia de remociones en masa, durante años Niña, con significativos montos promedio de precipitaciones, mayores que en los años Niño (Klimeš y Ríos Escobar 2010). Este mismo comportamiento es homologable en numerosas partes de los Andes Colombianos. El evento La Niña del 2010-2011 se caracterizó por intensas inundaciones y remociones en masa, que afectaron tanto zonas agrícolas como la conectividad por tierra. La carretera principal de Bogotá a Manizales fue seriamente dañada por remociones en masa que se extendieron hasta julio del 2011.

Actividad sísmica y tectónica

Los movimientos sísmicos son otro importante desencadenante de remociones en masa. Scott et ál. (2001) proveen una detallada revisión del evento de Páez en 1994, basándose en una exhaustiva selección de referencias bibliográficas. Un sismo de 6,5 grados de magnitud desencadenó múltiples deslizamientos y avalanchas de detritos en la Cordillera Central, en la ladera sur del volcán Nevado del Huila. En un área de 100 km², aproximadamente 50% de la ladera se desplomó. Más de 3.000 remociones en masa individuales, con profundidad de 3 a 7 metros, fueron registradas (Ávila et ál. 1995). La presencia de capas de depósitos piroclásticos pobremente consolidados y la saturación del terreno, debida a las precipitaciones recientes, fueron probablemente los mayores factores condicionantes en este caso. A pesar de que la mayoría de las

remociones en masa no fueron de tamaño considerable, estas se fusionaron en un gran flujo de detritos, conocido como La Avalancha, que tuvo un espesor de entre 40 a 60 metros. El flujo continuó su trayecto, aguas abajo, por más de 30 km a velocidades de entre 15 a 25 m/s con una descarga máxima de 100 m³/s. Este flujo de detritos provocó 1.000 víctimas fatales y gran destrucción en las comunidades de Dublín, Irlanda, Tóez y Belalcázar. Por la rápida secuencia: evento sísmico-deslizamiento-flujo de detritos, no fue posible distinguir cuantas víctimas fatales son atribuibles a cada etapa; sin embargo, se cree que la avalancha fue la más destructiva. Una cadena de procesos similar se produjo por el terremoto de Wenchuan, China, en 2008, donde la ciudad de Beichuan fue destruida por la secuencia de movimientos telúricos y varios tipos de movimientos en masas (Yin, Wang y Sun 2009).

No obstante, en Colombia la historia sismotectónica del país es aún más relevante, dado que es un factor que favorece la ocurrencia de estos eventos, debido a la presencia de masas de rocas fracturadas y desestabilizadas, que pueden ser fácilmente removidas en el caso de eventos de precipitación intensa. Este fenómeno no solo es reconocido en la región Andina, sino también en otras áreas de actividad sísmica activa en el mundo (i. e. Lin et ál. 2006). Así también en Colombia, la fracturación de las rocas y la generación de una gran cantidad de material detrítico suelto, producto de la larga historia sísmica del área, es un elemento que está involucrado en el desencadenamiento de remociones en masa, como factor condicionante.

Actividad volcánica

La actividad volcánica es igualmente importante, produciendo lahares en los cuatro volcanes con casquetes de hielo existentes en el país, los cuales constituyen un peligro natural. Ejemplo de ello es el desastre del Nevado del Ruiz, Armero, en 1985, descrito anteriormente.

En el 2007, después de un largo periodo de inactividad, el volcán Nevado del Huila comenzó a reactivarse. La actividad geotermal y las erupciones afectaron el casquete de hielo, generando lahares que llegaron al valle del río Páez (Worni et ál. 2012). El lahar del 2008 fue comparable, en volumen, al flujo de detritos de 1994 (ver más adelante) y causó una gran destrucción. Sin embargo, el peligro asociado a una posible erupción del Nevado del Huila era conocido (Huggel et ál. 2007) y luego de la experiencia del evento del Nevado del Ruiz en 1994, se instaló un sistema de alerta temprana, por lo cual el número de víctimas fatales fue considerablemente menor (solo 10 personas).

En algunos lugares, la actividad volcánica ha desarrollado una cubierta densa y pobremente consolidada de material piroclástico, el cual puede ser fácilmente movilizado si se produce un evento desencadenante. La función de las capas piroclásticas para el evento Páez, de 1994, se describió anteriormente. Los depósitos provocaron también una alta frecuencia de remociones en masa, generados por precipitaciones en el valle de Combeima, en los alrededores del volcán Nevado del Tolima, donde también se instaló un sistema de alerta temprana (Huggel et ál. 2010). Asimismo, depósitos piroclásticos han producido constantemente remociones en masa en la ciudad de Manizales (Terlien 1997).

En el 2003 las fuertes precipitaciones condujeron a un aumento de la presión de los poros en la interfase entre la capa superficial y el lecho de roca subyacente, formando un plano de deslizamiento, el cual generó un flujo de detritos de 2.400 m³ que produjo 16 víctimas fatales y destruyó 8 casas (Ojeda y Donnelly 2006). El mismo evento excepcional de precipitaciones causó más de 200 remociones en masa en el área de Manizales. Ríos y Hermelin (2004) reportaron sobre remociones en masa en las cenizas volcánicas, desencadenadas por el terremoto de Armenia, en 1999, en la ciudad de Pereira, cerca de Manizales.

Desarrollo urbano en pendientes abruptas

Los ejemplos de Manizales y Pereira dan cuenta de otro factor crítico: el poblamiento en Colombia se concentra en las áreas de montaña. La gran parte de los centros urbanos del país se ubica en los Andes. La situación política durante la segunda mitad del siglo pasado, influyó el proceso de migración a grandes ciudades. Por la escasez de superficie, los migrantes de recursos limitados fueron desplazados hacia las afueras de las ciudades, en las partes más altas y de mayor pendiente. Este fenómeno es observable tanto en Colombia en las ciudades de Bogotá, Medellín, Cali, Bucaramanga, como en ciudades andinas de otros países (Caracas, Quito, La Paz). Muchas de las laderas están formadas por roca residual fuertemente fracturada y meteorizada, altamente susceptible a remociones en masa (figuras 5 y 6). Asimismo, inadecuadas obras de ingeniería, no adaptadas a las pendientes (por ejemplo, la construcción sobre taludes de pendientes pronunciadas), han aumentado la susceptibilidad a la ocurrencia de remociones en masa. La situación es crítica, dado que los asentamientos pueden estar envueltos en el movimiento en masa inicial de las remociones en masa o ser afectados por estos. Lo anterior es la causa de que un gran número de personas se encuentre expuesto al riesgo.

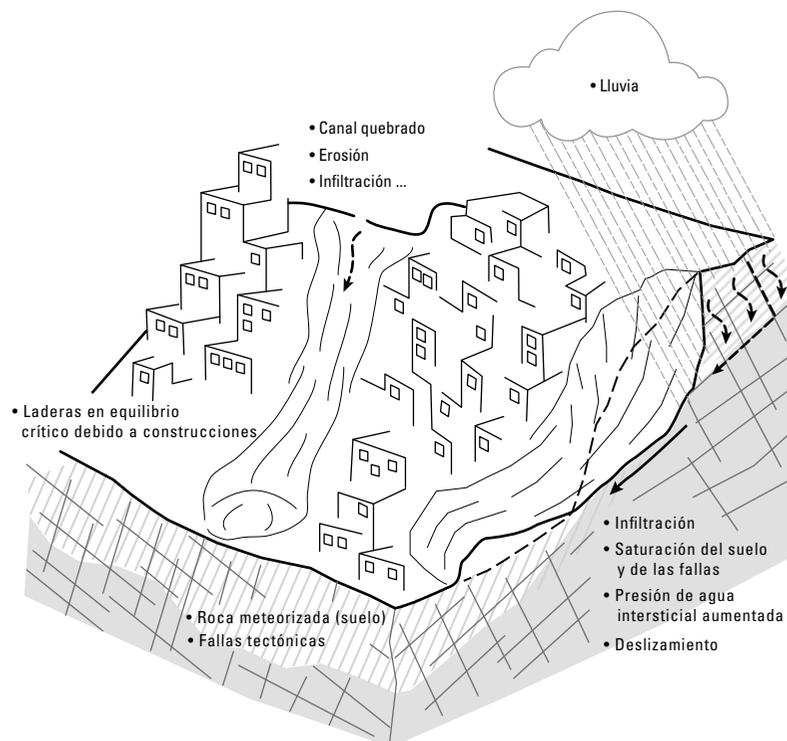


Figura 5. Desarrollo de una remoción en masa, en pendientes pronunciadas, con áreas pobladas.

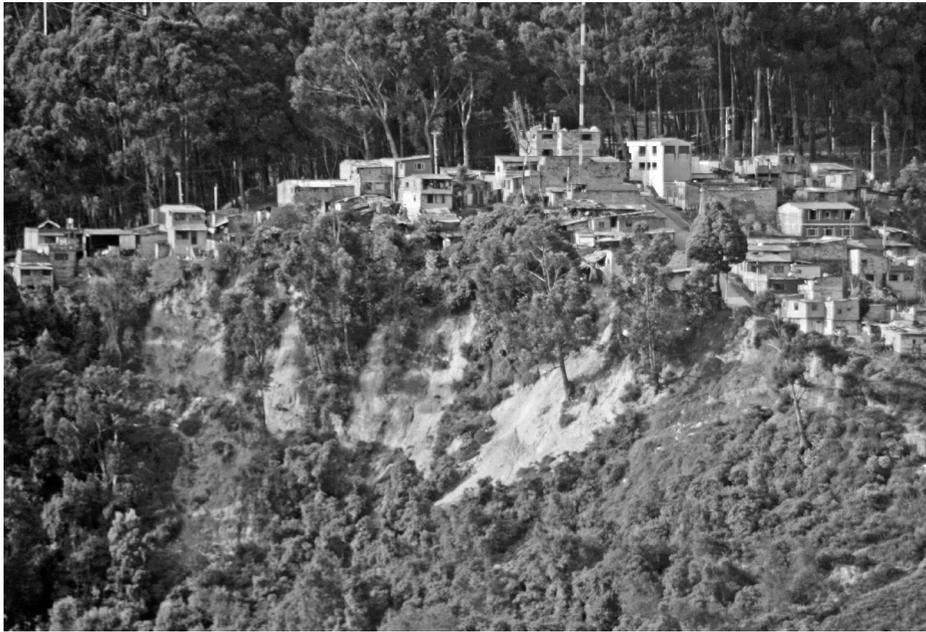


Figura 6. Barrios de estratos bajos en la parte este de Bogotá, afectados por remociones en masa. Fotografía de Mergili, 2011.

Klimeš y Ríos Escobar (2010) enumeraron 15 eventos de gran escala en las pendientes del valle de Medellín entre 1880 y el 2008. Esta área es un reconocido foco de remociones en masa, en zonas urbanas en Colombia. En 1987, aproximadamente 500 personas murieron y 120 casas fueron destruidas por el evento de Villatina (40.000 m³). En este caso el evento desencadenante puede ser atribuido a la intervención antrópica: la fuga de agua, desde un canal artificial, significó un aumento de presión en los poros del suelo, causando una desestabilización de la ladera (Ojeda y Donnelly 2006). El flujo de detritos resultante golpeó el asentamiento urbano. Estos fenómenos son comúnmente generadores de remociones en masa. Asimismo, la mayor parte de los desprendimientos de ladera ocurren durante o después de precipitaciones.

A pesar de que actualmente existe una mayor conciencia de la necesidad de manejar el riesgo asociado a las remociones en masa, todavía es necesario mejorar el manejo de laderas para reducir el riesgo, como se realizó, por ejemplo, en Hong Kong hace varias décadas (Malone 1998). En Bogotá, se estableció una zonificación de riesgo y se implementó un plan de prevención y mitigación (Ojeda y Donnelly 2006). En Medellín, se desarrolló una serie de bases de datos relevantes para el análisis y el manejo del riesgo, pero el desarrollo de estrategias efectivas de mitigación todavía es una tarea pendiente, debido a la falta de recursos y de legislación adecuada (Klimeš y Ríos Escobar 2010).

Remociones en masa y manejo de pendientes en zonas rurales

Los procesos de remoción en masa tienen también un impacto en la tierra de uso agrícola, lo que amenaza la base económica de la población rural. La deforestación y la actividad minera o agrícola inapropiada contribuyen a aumentar la vulnerabilidad a remociones en masa (Harden 2006) y pueden haber tenido incidencia en los eventos de Páez en 1994 (Scott et ál. 2001), de San Cayetano (1999) (PMA-GCA 2007) y de muchos otros eventos de remoción en masa en Colombia. Mejorar las estrategias de manejo del suelo, puede contribuir a la estabilidad de las laderas. La parte alta de la cuenca del Cauca, dominada por el pastoreo de ganado, pertenece a la Reserva de la Biósfera Cinturón Andino y cuenta como un ejemplo exitoso de fortalecimiento del capital social para mejorar el manejo del suelo, promover desarrollo rural sustentable y la adaptación al cambio climático (Borsdorf, Mergili y Ortega 2013). El manejo de laderas considera la regularización de las actividades de pastoreo de ganado, la construcción de terrazas, el mantenimiento de bosques protegidos y vegetación adaptada. A pesar de que estos métodos son utilizados principalmente para evitar la erosión del suelo y la degradación de la tierra, también pueden contribuir a la estabilidad de las laderas, en términos de balance hídrico y a la estabilidad mecánica. Asimismo, es necesario un cuidado especial y el mantenimiento de los canales de agua.

Procesos de remoción en masa en los Andes áridos y semiáridos del centro de Argentina

Los Andes argentinos

En Argentina, los Andes se extienden a lo largo de su borde occidental, unos 4.000 km, variando su amplitud en sentido latitudinal. Alcanzan su mayor extensión en el sector central y abarcan cuatro provincias geológicas: la cordillera principal, la cordillera frontal, la precordillera y las sierras pampeanas. Adelgazan significativamente en Patagonia, en extensión de unos 250 km (figura 7). Las elevaciones topográficas de los Andes argentinos contrastan significativamente desde la Puna, planicie elevada por encima de los 3.700 msnm, hasta el coloso de América: el cerro Aconcagua (6.958 msnm) ubicado a 32° latitud S, superado en altura solo por los picos del Himalaya, a escala planetaria. Esta topografía que disminuye hacia el sur patagónico y los procesos endógenos responden al ángulo con que subduce la placa de Nazca por debajo de la placa sudamericana. El segmento comprendido entre los 28° y los 32° latitud S, vinculado a un plano de subducción subhorizontal, se caracteriza por una actividad sísmica intensa y nulo vulcanismo. Los volcanes activos de los Andes argentinos se localizan al norte y al sur de este segmento.

Los Andes argentinos abarcan climas extremadamente áridos, como en la Puna, con precipitaciones anuales que no superan los 100 mm a sistemas húmedos fríos

en la Patagonia con precipitaciones anuales del orden de los 3.500 mm. Las variaciones climáticas se presentan tanto latitudinalmente como longitudinalmente, ya que las masas húmedas del Anticiclón del Pacífico suelen precipitar en forma de nieve en los cinturones orográficos occidentales más altos, disminuyendo su efectividad en los llanos o piedemontes que resultan influenciados por el comportamiento del Anticiclón del Atlántico y la dinámica térmica topográfica de la depresión del noroeste argentino (DNOA) (Agosta y Compagnucci 2008).

Los Andes en Argentina abarcan un tercio de su territorio y las principales ciudades capitales se localizan en el extremo opuesto sobre la costa Atlántica, asociadas a los antiguos puertos o a las pampas húmedas. Las provincias occidentales que forman parte del ambiente montañoso andino presentan sus capitales en el sector del pie de monte de los Andes. Las denominadas comunas andinas se tratan más bien de pueblos o pequeñas villas con un desarrollo urbanístico muy limitado, destinadas a actividades turísticas y de esparcimiento. Este aspecto es fundamental en el reducido impacto que tienen los procesos de remoción en masa en Argentina, sin embargo, las vías de conexión estratégicamente importantes son afectadas frecuentemente, en particular la ruta internacional n.º 7 que conecta a Mendoza con Chile central, la cual es clave para el desarrollo del Mercosur. Esta ruta es altamente vulnerable y atractiva para el desarrollo de

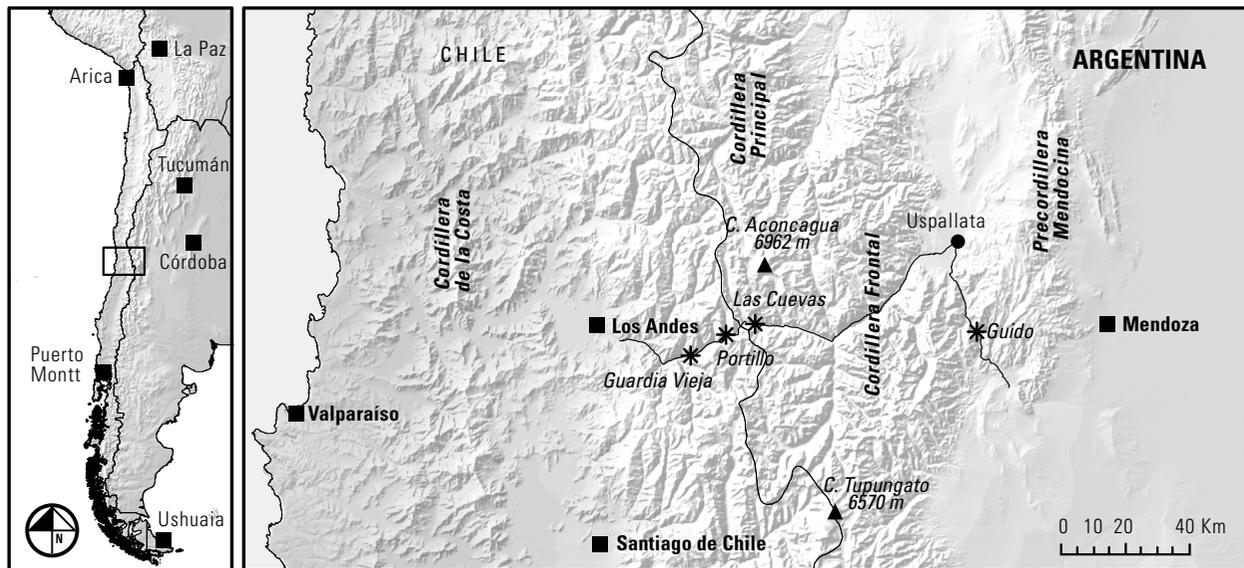


Figura 7. Localización de los Andes centrales chilenos-argentinos. La línea oscura representa la sección crítica del camino internacional n.º 7 Mendoza-Chile central.

Fuente: modificado de Jarvis et ál. 2008.

numerosas investigaciones (ej. Espizúa, Bengochea y Aguado 1993; Mikkan 1997; Moreiras 2004a, 2004b; Morerías y Coronato 2010; Mergili, Moreiras y Stötter 2012). Si bien, la ruta internacional ha sido rara vez afectada por eventos catastróficos, la interrupción del tránsito internacional por uno o dos días en este corredor bioceánico implica considerables pérdidas económicas, aunque no existe aún un análisis económico exhaustivo de los impactos. Recientemente, en el verano del 2013, dicha vía permaneció interrumpida por 10 días debido a más de 50 flujos de detritos, generados por lluvias intensas de verano (Sepúlveda et ál. 2014).

Disparadores

Las lluvias intensas de verano son las principales causantes de flujos de detritos en los sistemas áridos y semiáridos (Alonso y Wayne 1992; ASAGAI 2004; Solís, Chayle y Ramírez 2004); mientras en Patagonia las precipitaciones invernales ocasionadas por las corrientes húmedas del oeste son las que favorecen la generación de deslizamientos y caídas (Domínguez, Rabassa y Cabral 1981). Las precipitaciones en los meses estivales, asociadas al comportamiento del anticiclón del Pacífico tienden a incrementarse considerablemente durante las fases cálidas del El Niño - Southern Oscillation (ENSO), conocidas como El Niño, generando mayor inestabilidad en las laderas, principalmente en el centro-norte de Chile. Mayor número de eventos se han registrado en el valle del río Mendoza, cuando estas masas húmedas del oeste logran sobrepasar los Andes (Moreiras 2005). Un efecto tardío se observa en el verano siguiente a estos periodos extraordinarios de precipitaciones sólidas en altura, con una generación de mayores de flujos de detritos (Moreiras, Lisboa y Mastrantonio 2012). La actividad volcánica ha generado la formación de algunos lahares, cuyas consecuencias han sido imperceptibles para las comunidades andinas, localizadas mucho más abajo en los valles. Sin embargo, este tipo de procesos ha tenido un gran impacto en la Patagonia chilena. Violentos lahares sepultaron las villas de Pucón y Villarrica con las erupciones del volcán Villarrica, en marzo de 1964 y diciembre de 1971. Mientras que los sismos de magnitudes $M > 3.9$ son comunes generadores de caídas de rocas y deslizamientos superficiales, principalmente en la porción norte y centro de Argentina, conocida por su alta sismicidad de intraplaca (Moreiras y Coronato 2010).

La urbanización en sitios inadecuados, el corte de taludes en los caminos de montaña, la construcción de

represas y la saturación del terreno por irrigación, suelen generar inestabilidad de los terrenos. La inserción de especies exóticas ha tenido incidencia también en la generación de flujos de detritos. Tal es el caso de las represas inestables que construyen los castores en Ushuaia (Moreiras y Coronato 2010).

Procesos de remoción en masa a los 32° latitud S

Este segmento particular de los Andes (véase figura 7) se caracteriza por tener el cerro más alto del hemisferio occidental, un clima árido y ser sísmicamente activo. Los procesos descritos corresponden principalmente a caídas de rocas, flujos de detritos, flujos de avenidas o aluviones y deslizamientos superficiales. Inmensas moles de rocas fueron descritas durante los principales sismos históricos de Mendoza en el sector de la precordillera. Estos sismos locales de intraplaca se asocian a fallamientos activos de sentido N-S desarrollados desde el piedemonte mendocino al borde oriental de la cordillera Principal. No existen fallamientos activos en el segmento comprendido entre la cordillera Principal y la cordillera Frontal. Sin embargo, numerosas caídas se han registrado en estos sistemas durante sismos con epicentros en Chile (Moreiras 2004c; Wick et ál. 2010).

Grandes depósitos de distintos tipos de procesos de remoción en masa prehistóricos han sido identificados en esta latitud. El mecanismo disparador de los mismos es desconocido aún. La figura 8 muestra el depósito de la avalancha de rocas de Las Cuevas que ha tenido reactivaciones históricas. El plano de ruptura que sigue los planos de estratificación de los depósitos jurásicos es claramente visible. En este caso, la estratificación con un alto grado de buzamiento y la alternancia de potentes capas, con erosión diferencial, han favorecido el colapso. En otras ocasiones, las fracturas son generadas o exacerbadas por la acción del crioclastismo, siendo condicionantes para la inestabilidad de las laderas generalmente asociadas a caídas. Debido al clima árido y frío, los rangos de meteorización química son bajos y las rocas expuestas por un rápido levantamiento tectónico son pobres en suelo y vegetación, aumentando su susceptibilidad a las caídas (figura 9).

A pesar de ser la región de mayor peligrosidad sísmica de Argentina, los sismos no constituyen el principal disparador de los procesos de remoción en masa; más bien estos eventos están vinculados a condiciones climáticas que variarán en función del sector analizado. Los flujos de detritos son generados por intensas lluvias estivales que responden al comportamiento del anticiclón del



Figura 8. Avalancha de rocas de Las Cuevas con el plano de ruptura en el fondo.
Fotografía de Mergili, abril 2006.

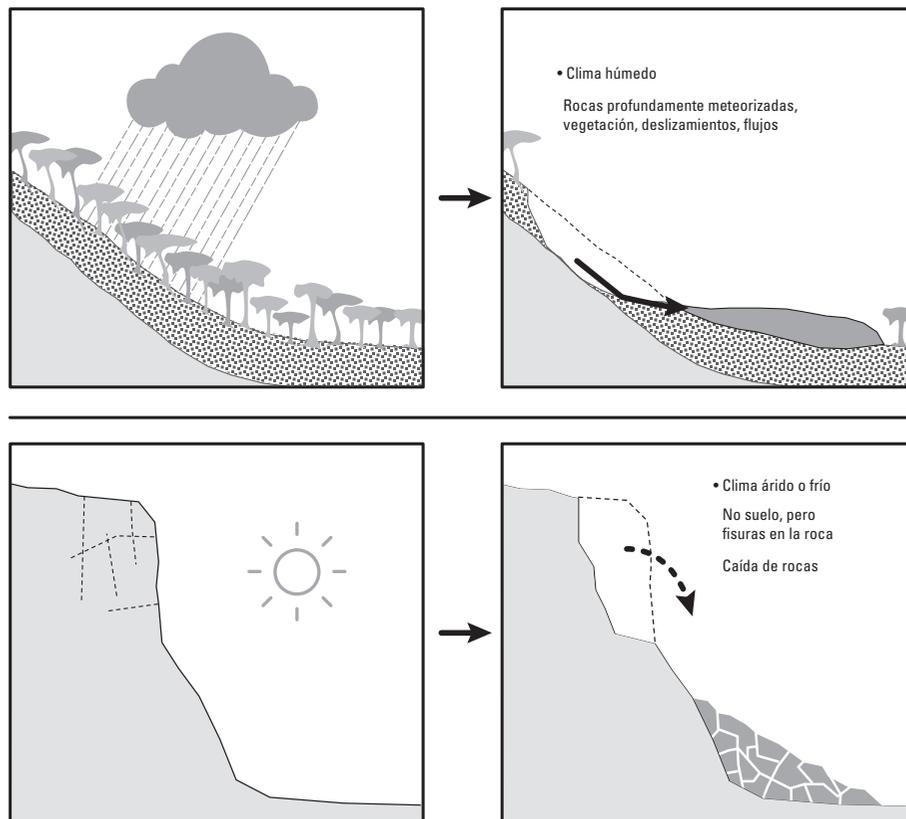


Figura 9. Influencia del clima y la erosión en las pendientes y tipos dominantes de movimientos en masa.



Figura 10. Máquinas viales despejando la caída de bloques del Túnel n.º 3 de la Ruta Internacional n.º 7, originada el 14 de noviembre del 2011 por lluvias intensas durante 2 días.
Fuente: Titiro 2011.

Atlántico en precordillera (Moreiras 2004c); por ende, los ciclos más húmedos asociados a este anticiclón se relacionan con la mayor inestabilidad de las laderas en esta provincia geológica. Debido al clima árido de la región, con menos de 200 mm de precipitación media anual registrados en la estación de Guido y la alta pendiente, el sistema de las cuencas está pobremente adaptado a un mayor ingreso de agua y, en consecuencia, tormentas comparativamente moderadas pueden movilizar flujos de detritos y caídas de rocas. Eventos, en pequeña escala, de caídas de rocas sobre la Ruta internacional a Chile han afectado a los vehículos repetidamente, registrando una víctima fatal en noviembre del 2011 (figura 10). En marzo de 1996, lluvias de 9,2 mm y 40 mm generaron flujos de detritos en el sector de Guido, obstruyendo el tráfico internacional. Aproximadamente 16.000 m³ de detrito tuvieron que ser movilizadas para restablecer la circulación vehicular (Espejo 1996). El flujo de detritos se originó principalmente en pendientes y barrancos de granito meteorizado.

Las precipitaciones generadoras de flujos en la vertiente occidental de la Cordillera Frontal provienen del Pacífico, de tal manera que son sensibles al comportamiento de El Niño. Los periodos cálidos (El Niño) se asocian a un mayor número de eventos en la cordillera frontal (Moreiras 2005, 2006). Durante el evento de El Niño de 1987, la ladera occidental de la cordillera principal en Chile recibió una precipitación extraordinariamente alta. El 13 de agosto de ese año, la ruta internacional, cerca de Guardia Vieja, fue severamente

afectada por un flujo de detritos con un volumen de 45.000 m³. Luego debió ser reconstruida en el lado opuesto del valle. Durante el día del evento se registraron 148 mm en la estación meteorológica más cercana. La precipitación de los cinco días previos alcanzó los 309,5 mm (Hauser 2000a).

El efecto de El Niño resulta tardío en la inestabilidad de la cordillera principal en la ladera oriental de los Andes. En este sector de mayor topografía, las precipitaciones de tipo nival resultan más copiosas durante la fase cálida, de tal manera que su fusión en el verano siguiente produce mayor saturación e inestabilidad del terreno (Moreiras, Lisboa y Mastrantonio 2012). Flujos de detritos desencadenados por una intensa fusión de nieve, han obstruido la ruta internacional, cerca de Portillo, Chile, próximo al límite con Argentina. El agua de fusión se acumuló en un antiguo túnel del ferrocarril abandonado, y cuando se liberó, repentinamente en noviembre del 2000, ocasionó la erosión de un canal y un flujo de detritos sobre la ruta (Hauser 2000b, 2005).

Conclusiones

Colombia y el área central de Argentina fueron elegidas para una revisión comparativa de procesos de remociones en masa en la región Andina; en este contexto, ambos ejemplos representan interesantes puntos de contraste, tanto desde el punto de vista climático como de densidad de población. Asimismo, presentan contrastes marcados en gran parte de las variables geográficas, excepto por

el relieve de alta montaña. La parte norte de los Andes colombianos muestra un entorno mucho más dinámico que la parte central de Argentina. Los factores que mayor energía imprimen al sistema ambiental son: 1) el clima tropical, y 2) la actividad volcánica.

A pesar de que en el aspecto sísmico las dos áreas son igualmente activas y la actividad sísmica desempeña un papel predominante como factor desencadenante de remociones en masa, las precipitaciones son, en ambos casos, el factor principal. No obstante los regímenes de lluvias, en Colombia y Argentina son absolutamente diferentes; en Colombia se registra un mayor número de remociones en masa durante los periodos La Niña, esto también es válido para la parte occidental de los Andes en el centro de Argentina, durante los periodos de El Niño. Precipitaciones de baja magnitud pueden causar remociones en masa en el área central semiárida y árida de Argentina, donde los sistemas se encuentran mucho menos adaptados al aporte de agua. En la parte norte de los Andes colombianos, las rocas son intensamente erosionadas y el equilibrio dinámico de las pendientes densamente cubiertas por vegetación, apenas soporta las caras verticales de roca desnuda. Los desprendimientos de roca son, por tanto, más comunes en la parte central de Argentina (véase figura 9). Estos depósitos pueden facilitar el desarrollo de procesos de flujos de detritos.

En Colombia, como en Ecuador, Perú y Bolivia, las áreas de montaña proveen condiciones favorables para la vida y las actividades económicas. Tradicionalmente el paisaje cultural se extiende sobre una gran variación vertical. Muchas de las actuales ciudades más grandes, que concentran alta densidad poblacional, se encuentran en las áreas montañosas. Por el contrario, en los Andes argentinos, donde la densidad poblacional es baja y las áreas de montaña son vistas a menudo como espacios desfavorables, que tienen que ser superados para

poder conectar las áreas metropolitanas en las tierras bajas. Los procesos de remoción en masa son, entonces, amenazas para las vías de comunicación, pues aunque causan escasas víctimas fatales, producen serios daños económicos. El mismo problema existe con las vías de comunicación en los Andes del norte. En este contexto, tanto asentamientos urbanos como rurales están en riesgo y un gran número de personas son directamente afectadas (véase tablas 1 y 2). Como consecuencia, los tipos de medidas de mitigación requeridas para la reducción del riesgo difieren considerablemente en las dos áreas. De todas formas, la mitigación del riesgo ya se ha iniciado con la aplicación de estándares de construcción, dado que fallas técnicas han provocado remociones en masa en ambas áreas.

Los procesos de remoción en masa son normalmente parte de una cadena de procesos que, a menudo, se inicia con eventos de precipitación, terremotos o actividad volcánica. Esta cadena generalmente continúa con consecuencias socioeconómicas. La obstrucción de las vías de comunicación (i. e. Camino Internacional Mendoza en Chile central) han provocado consecuencias transnacionales, como el desarrollo de medidas de mitigación conjuntas en varias etapas del ciclo de manejo del riesgo. Este tipo de cooperación internacional es muy relevante, dado que la cadena de procesos naturales no distingue límites administrativos. Movimientos sísmicos, con epicentro en un país, pueden afectar igualmente a otros; lo mismo es válido para las erupciones volcánicas. Un ejemplo reciente es la erupción del volcán Puyehue en el Cordón del Caulle, al sur de Chile, en junio del 2011, el cual emanó una extensa nube de cenizas volcánicas que se depositaron en la frontera con Argentina. Parte de estos depósitos fueron movilizados como significantes flujos de detritos durante eventos de precipitación (Rovira, Rojas y Díez 2013).

Martin Mergili

Doctor en Ciencias Naturales (Geografía) de la Universität Innsbruck (Austria, 2008), investigador y profesor asistente en la University of Natural Resources and Life Sciences - BOKU (Viena, Austria). Desde el 2014, participa como investigador asociado en la Universidad de Viena. Su investigación se enfoca en el desarrollo de aplicaciones de sistemas de información geográfica para modelar procesos de movimiento en masa, así como en el análisis de las implicancias y cambios medioambientales producidos por estos en territorios montañosos, especialmente en los Andes, Asia central y el centro y sur de Europa.

Carla I. Marchant Santiago

Doctora en Ciencias Naturales (Geografía) de la Universität de Innsbruck (Austria, 2013). Desde el 2014 se desempeña como investigadora y profesora asistente en la Universidad Austral de Chile (Valdivia, Chile). Su interés académico se centra en el análisis de los cambios ambientales, socioeconómicos y en los efectos de la globalización en regiones de montaña de los Andes y los Alpes.

Stella M. Moreiras

Doctora en Ciencias Geológicas de la Universidad Nacional de San Juan (Argentina, 2004). Desde el 2006 es investigadora de CONICET y docente de la Universidad Nacional de Cuyo (Argentina). La temática de sus investigaciones se vincula con el Cuaternario, principalmente tratando de entender la relación entre los procesos de remoción en masa con el clima y la tectónica en los Andes centrales.

Referencias

- Agosta, Eduardo Andrés y Rosa Hilda Compagnucci. 2008. "Procesos atmosféricos/oceánicos de baja frecuencia sobre la cuenca sudoeste del Atlántico Sur y la variabilidad de la precipitación en el centro-oeste de Argentina". *Geoacta* 33:21-30.
- Alonso, R. N. y W. J. Wayne. 1992. "Riesgos geológicos en el norte argentino". *Congreso Geológico Boliviano, Boletín* 27:213-216.
- ASAGAI (Argentinean Association of Applied Geology and Engineering). 2004. *Special Issue n.º 4*. Buenos Aires: ASAGAI.
- Ávila, G. E., P. E. Caro, H. Cepeda, M. Moreno, P. Torres y A. Agudelo 1995. "Zonificación para uso del suelo en la cuenca del río Páez". *Memorias de las VII Jornadas Geotécnicas*, 6:79-6.103. Sociedad Colombiana de Ingenieros y Sociedad Colombiana de Geotécnica.
- Borsdorf, Alex, Martin Mergili y Luis Alfonso Ortega. 2013. "La reserva de la biósfera Cinturón Andino, Colombia: ¿una región modelo de estrategias de adaptación al cambio climático y de desarrollo regional sustentable?". *Revista de Geografía Norte Grande* 55:7-18. DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022013000200002>.
- Carey, Mark. 2005. "Living and Dying with Glaciers. People's Historical Vulnerability to Avalanches and Outburst Floods in Perú". *Global and Planetary Change* 47:122-134. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2004.10.007.
- Costa, John E. y Robert L. Schuster. 1988. "The Formation and Failure of Natural Dams". *Geological Society of America Bulletin* 100:1054-1068. DOI: 10.1130/0016-7606(1988)100<1054:TF AFON>2.3.CO;2.
- Domínguez, Eduardo, Jorge Rabassa y Ricardo Cabral. 1981. "Estudio del aluvión de Melipal, San Carlos de Bariloche, Provincia de Río Negro". *Actas del VIII Congreso Geológico Argentino*, 2:221-233. San Luis, Argentina.
- EM-DAT (The International Disaster Database). 2011. "The OFDA/CRED International Disaster Database". Université Catholique de Louvain. www.emdat.be
- Espejo, Jorge. 1996. "Reportes inéditos sobre remociones en masa afectando la ruta internacional Mendoza-Chile Central". Documentos inéditos.
- Spizúa, L. E., J. D. Bengochea y C. Aguado. 1993. "Mapa de riesgo de remoción en masa en el valle del río Mendoza". *Actas del XII Congreso Geológico Argentino y II Congreso de Exploración de Hidrocarburos* 6:323-332.
- Evans, Stephen G., Nicholas F. Bishop, Lionel Fidel Smoll, Patricio Valderrama Murillo, Keith B. Delaney y Anthony Oliver-Smith. 2009. "A Re-examination of the Mechanism and Human Impact of Catastrophic Mass Flows Originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Perú in 1962 and 1970". *Engineering Geology* 108:96-118. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.06.020.
- Felgentreff, Carsten y Thomas Glade, orgs. 2008. *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Kolumbien: Springer.
- Haeberli, Wilfred, César Portocarrero y S. Evans. 2010. "Nevado Hualcán, Laguna 513 y Carhuaz 2010". Observaciones, evaluación y recomendaciones (un corto informe técnico luego de las reuniones y visita de campo en julio del 2010). Reporte inédito de parte de la Comunidad Provincial de Carhuaz.
- Harden, Carol P. 2006. "Human impacts on headwater fluvial systems in the northern and central Andes". *Geomorphology* 79:249-263. DOI: 10.1016/j.geomorph.2006.06.021.
- Hauser, Arturo. 2000a. *Remociones en masa en Chile (versión actualizada)*. Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología.
- Hauser, Arturo. 2000b. *Flujos detríticos en segmento del Camino Internacional a Argentina, sector Juncal-Paso Los Libertadores: causas, efectos, medidas de control*. Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología. Reporte inédito.
- Hauser, Arturo. 2005. *Evaluación de vulnerabilidad y propuesta de procedimientos para el control de flujos detríticos o aluvionales en segmento Juncal-Portillo, del Camino Internacional a la República Argentina*. Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, Subdirección Nacional de Geología. Reporte inédito.
- Hegglin, Esther y Christian Huggel. 2008. "An Integrated Assessment of Vulnerability to Glacial Hazards". *Mountain Research and Development* 28 (3): 299-309. DOI: <http://dx.doi.org/10.1659/mrd.0976>.
- Huggel, Christian, Jorge Luis Ceballos, Bernardo Pulgarín, Jair Ramírez y Jean-Claude Thouret. 2007. "Review and Reassessment of Hazards Owing to Volcano-Glacier Interactions in Colombia". *Annals of Glaciology* 45 (1): 128-136. DOI: 10.3189/172756407782282408.
- Huggel, Christian, Nikolay Khabarov, Michael Obersteiner y Juan Manuel Ramírez. 2010. "Implementation and Integrated Numerical Modeling of a Landslide Early Warning System: A Pilot Study in Colombia". *Natural Hazards* 52:501-518. DOI: 10.1007/S11069-009-9393-0.
- Klimeš, Jan y V. Ríos Escobar. 2010. "A Landslide Susceptibility Assessment in Urban Areas Based on Existing Data: An Example from the Iguañá Valley, Medellín City, Colombia". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10:2067-2079. DOI: 10.5194/nhess-10-2067-2010.

- Lin, Ching-Weei, Shou-Heng Liu, Sen-Yuan Lee y Cheng-Chien Liu. 2006. "Impacts of the Chi-Chi Earthquake on Subsequent Rainfall-induced Landslides in Central Taiwan". *Engineering Geology* 86 (1-2): 87-101. DOI: 10.1016/j.enggeo.2006.02.010.
- Lowe, Donald R., Stanley Williams, Henry Leigh, Charles B. Connort, Bruce Gemmell y Richard E. Stoiber. 1986. "Lahars Initiated by the 13 November 1985 Eruption of Nevado del Ruiz, Colombia". *Nature* 324:51-53. DOI: 10.1038/324051a0.
- Malone, A.W. 1998. "Risk Management and Slope Safety in Hong Kong. Proceedings of the Hong Kong". *Geotechnical Division Annual Seminar on Slope Engineering in Hong Kong* 1:3-20.
- Mergili, Martin, Wolfgang Fellin, Stella M. Moreiras y Johann Stötter. 2012. "Simulation of debris flows in the Central Andes based on Open Source GIS: Possibilities, limitations, and parameter sensitivity". *Natural Hazards* 61 (3): 1051-1081. DOI: 10.1007/s11069-011-9965-7.
- Mikkan, R., 1997. "Geomorfología y dinámica de vertientes del valle del río Mendoza entre las estaciones Guido y Uspallata, provincia de Mendoza - Rep. Argentina". *Revista de Estudios Regionales CEIDER* 17:81-135.
- Moreiras, Stella Maris. 2004a. "Landslide Incidence Zonation in the Río Mendoza Valley, Mendoza Province, Argentina". *Earth Surface Processes and Landforms* 29:255-266. DOI: 10.1002/esp.1056.
- Moreiras, Stella Maris. 2004b. "Landslide Susceptibility Zonation in the Río Mendoza Valley, Argentina". *Geomorphology* 66:345-357. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.09.019
- Moreiras, Stella Maris. 2004c. "¿Qué características tienen los procesos de remoción en masa en Cordillera Frontal y Pre-cordillera Mendocina?". En *Peligrosidad geológica en Argentina*, editado por M. Gonzalez y N. J. Bejerman, 4:423-428. Buenos Aires: Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Publicación Especial.
- Moreiras, Stella Maris. 2005. "Climatic Effect of ENSO Associated with Landslide Occurrence in the Central Andes, Mendoza Province, Argentina". *Landslides* 2 (1): 53-59. DOI: 10.1007/s10346-005-0046-4.
- Moreiras, Stella Maris. 2006. "Frequency of Debris Flows and Rockfall Along the Mendoza River Valley (Central Andes), Argentina: Associated Risk and Future Scenario". *Quaternary International* 158:110-121. DOI:10.1016/j.quaint.2006.05.028
- Moreiras, Stella Maris y Andrea Coronato. 2010. "Landslide Processes in Argentina". En: *Developments in Earth Surface Processes* 13: *Natural Hazards and Human-Exacerbated Disasters In Latin-America; Special Volume of Geomorphology*, editado por Edgardo Latrubesse, 301-331. DOI: <http://dx.doi.org/10.1659/mrd.mmo86>.
- Moreiras, Stella Maris, Maria Sol Lisboa y Leandro Mastrantonio. 2012. "The Role of Snow Melting Upon Landslide in Argentinean Central Andes". *Earth Surface Processes and Landforms* 37 (10): 1106-1119.
- Nadim, Farrokh, Oddvar Kjekstad, Pascal Peduzzi, Christian Herold y Christian Jaedicke. 2006. "Global Landslide and Avalanche Hotspots". *Landslides* 3:159-173. DOI: 10.1007/s10346-006-0036-1.
- Ojeda, Jacobo y Laurance Donnelly. 2006. "Landslides in Colombia and their Impact on Towns and Cities". *IAEG Paper* 112:1-13.
- PMA-GCA (Proyecto Multinacional Andino-Geociencias para las Comunidades Andinas). 2007. *Conozcamos los peligros geológicos en la región andina*. Santiago de Chile: Servicio Nacional de Geología y Minería, Publicación Geológica Multinacional 5.
- Ríos, D. A. y Michel Hermelin. 2004. "Prediction of Landslide Occurrence in Urban Areas Located on Volcanic ash Soils in Pereira, Colombia". *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 63:77-81. DOI: 10.1007/s10064-003-0210-9.
- Rovira, Adriano, Carlos Rojas y Silvia Díez. 2013. "Efectos de una erupción volcánica andina: el caso del Cordón Caulle, sur de Chile (2011)". En *Forschen im Gebirge: Investigating the Mountains*, editado por Axel Borsdorf, Georg Grabherr y Johann Stötter, 289-304. Austria: Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften.
- Sepúlveda, Sergio A., Stella M. Moreiras, Marisol Lara y Alejandro Alfaro. 2014. "Debris Flows in the Andean Ranges of Central Chile and Argentina Triggered by 2013 Summer Storms: Characteristics and Consequences". *Landslides* (online). DOI: 101007/s10346-014-0539-0.
- Schuster, Robert y Lynn M. Highland. 2001. *Socioeconomic and Environmental Impacts of Landslides in the Western Hemisphere*. U. S.: Dept. of the Interior, U. S. Geological Survey.
- Schuster, Robert, Daniel A. Salcedo y Luis Valenzuela. 2002. "Overview of Catastrophic Landslides of South America in the Twentieth Century". *Reviews in Engineering Geology* 15:1-34.
- Scott, Kevin M., Jose Luis Macías, Jose Antonio Naranjo, Sergio Rodríguez y John P. McGeehin. 2001. "Catastrophic Debris Flows Transformed from Landslides in Volcanic Terrains: Mobility, Hazard Assessment and Mitigation Strategies". *USGS Professional Paper* 1630:1-59.
- Solís, N., W. Chayle y A. Ramírez. 2004. "¿Que características tiene la remoción en masa en el noroeste argentino?". En *Peligrosidad geológica en Argentina: Metodologías de análisis*

- sis y mapeo, editado por M. González y N. J. Bejerman, Publicación especial 4, 366-377. Buenos Aires: Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería.
- Terlien, Mark T. J. 1997. "Hydrological Landslide Triggering in Ash-covered Slopes of Manzales (Colombia)". *Geomorphology* 20 (1-2): 165-175. DOI:10.1016/S0169-555X(97)00022-6.
- Thouret, Jean-Claude, Jair Ramírez, B. Gibert-Malengreau, C. A. Vargas, J. L. Naranjo, J. Vandemeulebrouck, F. Valla y M. Funk. 2007. "Volcano-glacier Interactions on Composite Cones and Lahar Generation: Nevado del Ruiz, Colombia, Case Study". *Annals of Glaciology* 45:115-127. DOI: 10.3189/172756407782282589.
- Títiro, Miguel. 2011. "La ruta 7, entre peligros y deficiencias". Diario *Los Andes*, 15 de Noviembre. <http://www.losandes.com.ar/article/ruta-entre-peligros-deficiencias-606691>
- Voight, Barry. 1990. "The 1990 Nevado del Ruiz Volcanic Catastrophe: Anatomy and Retrospection". *Journal of Volcanology and Geothermal Research* 44 (3-4): 349-386. DOI:10.1016/0377-0273(90)90027-D.
- Weidinger, Johannes Thomas, Erich Niesner y Karl Millahn. 2011. "Chronicle of an Earth-flow Foretold - The 2008 Gschliefgraben Event, Austria". *Zeitschrift für Geomorphologie* 55 (3): 373-405. DOI: 10.1127/0372-8854/2011/0055S3-0067.
- Wick, E., V. Baumann y M. Jaboyedoff. 2010. "Report on the impact of the 27 February 2010 earthquake (Chile, Mw 8.8) on rockfalls in the Las Cuevas valley, Argentina". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 10:1989-1993. DOI:10.5194/nhess-10-1989-2010.
- Worni, Raphael, Markus Stoffel, Alejandro Casteller, Martin Mergili, Jean F. Schneider y Christian Huggel. 2010. "Two Dimensional Modeling of Large Glacier Lake Outburst Floods (GLOF) in the Patagonian Andes and the Pamir/Alay Range". *Geophysical Research Abstracts* 12, EGU2010-8293.
- Worni, Raphael, Christian Huggel, Markus Stoffel y Bernardo Pulgarín. 2012. "Challenges of Modeling Very Large Lahars at Nevado del Huila Volcano, Colombia". *Bulletin of Volcanology* 74:309-324. DOI: 10.1007/s00445-011-0522-8.
- Yin, Yin, Fawu Wang y Ping Sun. 2009. "Landslide Hazards Triggered by the 2008 Wenchuan Earthquake, Sichuan, China". *Landslides* 6:139-151. DOI: 10.1007/s10346-009-0148-5.
- Zêzere, Jose Luis, Ricardo M. Trigo e Isabel F. Trigo. 2005. "Shallow and Deep Landslides Induced by Rainfall in the Lisbon Region (Portugal): Assessment of Relationships with the North Atlantic Oscillation". *Natural Hazards and Earth System Sciences* 5:331-344. DOI: 10.5194/nhess-5-331-2005.

Bibliografía

- Jarvis, Andy, Hannes Isaak Reuter, A. Nelson y E. Guevara. 2008. "Hole-filled Seamless SRTM Data V4. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT)". <http://srtm.csi.cgiar.org>
- Moreiras, Stella Maris. 2009. "Análisis de las variables que condicionan la inestabilidad de las laderas en los valles de los ríos Las Cuevas y Mendoza". *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65 (4): 780-790.