

# DESLIZAMIENTOS ASOCIADOS A LA DEGRADACIÓN DEL PERMAFROST: EVIDENCIAS GEOMORFOLÓGICAS EN EL PASADO Y PRESENTE EN LOS ANDES CENTRALES (31°-34°S)

## LANDSLIDES ASSOCIATED WITH PERMAFROST DEGRADATION: PAST AND PRESENT GEOMORPHOLOGICAL EVIDENCES IN THE CENTRAL ANDES (31°-34°S)

Stella M. Moreiras<sup>1,2</sup>, Pilar Jeanneret<sup>1</sup>, Carolina Lauro<sup>1</sup>, Iván Vergara Dal Pont<sup>1</sup>, Mariana Correas González<sup>1</sup>, Sebastián Junquera Torrado<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Mendoza, Argentina

<sup>2</sup> Universidad Nacional de Cuyo (UNCuyo), Mendoza, Argentina

Correspondência para: Stella M. Moreiras (moreiras@mendoza-conicet.gob.ar)

doi: 10.12957/geouerj.2019.45036

Recebido em: 3 set. 2019 | Aceito em: 9 out. 2019



### RESUMEN

Este trabajo presenta evidencias de la incidencia del ascenso de la temperatura en la degradación o fusión del permafrost y su asociación con descargas de flujos de detritos en la región andina (30°-32°S). Este resultado permite enfatizar la relación entre los colapsos de laderas y la temperatura permitiendo vincular la inestabilidad de las laderas en los Andes Centrales a condiciones ambientales en el pasado. Numerosos deslizamientos han sido vinculados a periodos interglaciares con escasos registros paleoclimáticos locales. Estos resultados además ponen en evidencia la necesidad de abordar este tipo de estudios a fin de reducir la vulnerabilidad de las comunidades andinas y atender medidas preventivas que disminuyan el evidente riesgo asociado en el contexto del calentamiento global.

**Palavras-chave:** Permafrost. Calentamiento global. Inestabilidad. Peligrosidad Natural.

### ABSTRACT

*This paper reveals evidences of permafrost degradation or fusion due to the temperature increase and its association with discharges of violent debris flow in the Central Andes region (30°-32°S). This result emphasizes the relationship between slope collapses and temperature allowing to link the slopes instability in the Central Andes to paleo-environmental conditions. Several landslides have been linked to interglacial periods with few local paleoclimatic records. These results also highlight the need to undertake this type of studies in order to reduce the vulnerability of the Andean communities and implement preventive measures to reduce the evident associated risk in the context of global warming.*

**Keywords:** Permafrost. Global warming. Instability. Natural Hazard

## INTRODUCCIÓN

Los deslizamientos entendidos en su concepto amplio como equivalente al término inglés “Landslides”, son eventos naturales generados usualmente por diferentes mecanismos disparadores y asociados a diferentes factores condicionantes. Tradicionalmente los deslizamientos en los Andes Centrales (AC) se han asociado a lluvias intensas o sismos de magnitudes superiores a 4 (Moreiras, 2005; Moreiras y Sepúlveda 2015), pero poco se conoce respecto a cómo los cambios en las condiciones climáticas

tendientes al calentamiento global influye o influirá en la inestabilidad de las laderas en las zonas montañosas. Una mayor actividad de deslizamientos en el siglo XX han sido propuesto como respuesta al calentamiento global y la intensificación del fenómeno El Niño (Moreiras, 2005; Sepúlveda y Moreiras, 2013; Moreiras et al. 2018); sin embargo estos resultados son parcialmente cuestionados en estudios recientes (Vergara Dal Pont et al., 2019). Asimismo, la retracción de los glaciares exponiendo pendientes pronunciadas y junto al efecto de reacomodamiento isostático luego del retiro de la masa glaciar ha favorecido procesos para-glaciaros en los Andes Patagónicos (Moragues et al., 2019) y a nivel mundial (Bovis, 1990; Ballantyne, 2002; Slaymaker 2009; McColl, 2012; Zemp et al 2015).

Este efecto no ha sido evaluado en los AC donde los glaciares tienen menor extensión, confinados en valles por lo cual tiene una gran longitud. Este hecho imposibilita conocer el riesgo de las comunidades andinas ya que los deslizamientos no sólo afectan las zonas próximas sino que pueden tener impacto a grandes distancias, incluso en el caso de represamientos y sus rupturas podrían alcanzar cientos de kilómetros aguas abajo a lo largo de los valles. En el caso de la ruptura de la laguna de Los Erizos (31° S, Argentina) la crecida resultante recorrió hasta 250 km afectando el suministro de agua de la ciudad de San Juan (Moreiras y Sepúlveda, 2015). En este marco, el presente trabajo aborda las evidencias geomorfológicas de deslizamientos asociados a la degradación del permafrost en el pasado y los recientes eventos de flujos de detritos que se han generado debido a la degradación del permafrost en el valle del Elqui (30° S, Chile) y Mendoza (32° S, Argentina). Los resultados enfatizan la urgente necesidad de considerar estos aspectos para reducir la vulnerabilidad de las comunidades andinas y atender medidas preventivas que disminuyan el evidente riesgo asociado.

## MÉTODOS Y TÉCNICAS

Esta investigación se llevó a cabo a través de la aplicación de la técnica de grupo focal que corresponde a una entrevista grupal que utiliza la comunicación entre el investigador y los participantes, con el propósito de obtener información, donde participan entre tres y 10 personas (Hamui y Varela, 2013). El grupo focal, con el que se trabajó, estuvo conformado por actores claves de las comunidades La Pastora y El Tapojo, destacando integrantes del Comité Comunal de Emergencias de La Pastora, miembros de la Asociación de Desarrollo Integral de La Pastora, de la Asociación Administradora de

Acueductos Rurales (ASADA) de La Pastora. La actividad tuvo como finalidad conocer la percepción de población a través del desarrollo de cartografía participativa, donde la población identificó de acuerdo con su percepción los peligros a los que se sentían expuestos, su distribución espacial y los elementos expuestos a daños, obteniendo así un mapa comunitario de percepción de riesgo.

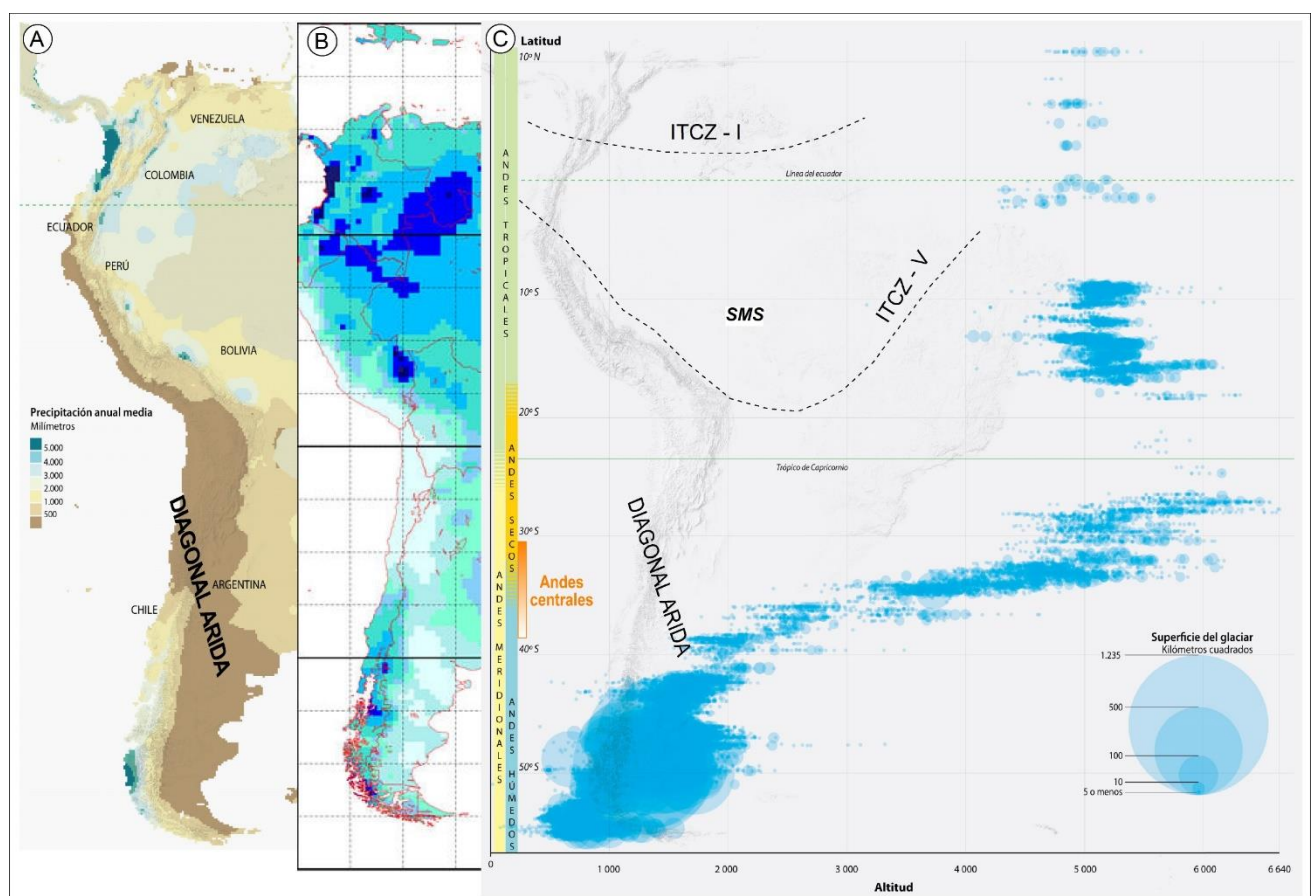
Los riesgos que se contemplaron en la elaboración del mapa comunitario se catalogaron de acuerdo con la clasificación de peligros volcánicos planteada por Tilling (1989), correspondientes a caída de ceniza, lluvia ácida, gases, flujos de lodo (lahares), sismos, deslizamientos, coladas de lava y flujos piroclásticos. Una vez elaborado el mapa comunitario de percepción de riesgos, la población participante elaboró un análisis grupal para de los riesgos identificados, el cual contempló cinco variables: riesgo, impacto esperado, medidas de prevención o mitigación y actores responsables; asimismo, se estableció un valor de importancia para cada riesgo, el cual correspondió a alto, medio y bajo según la percepción de los participantes. Posterior a ello, la información contenida en el mapa comunitario de percepción de riesgos, elaborado por el grupo focal, se integró en un SIG (Arc Gis 10.1) para su análisis. Además, se llevó a cabo trabajo de campo para identificar y caracterizar los riesgos señalados por la población, información que se contrastó con datos científicos, tal como el estudio elaborado por Soto (2012), así como la modelación de lahares elaborado por Ruiz et al. (2015) e informes técnicos del OVSICORI-UNA y la RSN: UCR-ICE sobre la dispersión de gases y actividad sísmica en el área de estudio, entre otros.

### **Área de estudio: características climáticas y geomorfológicas**

Los Andes Centrales (AC) o Subtropicales se extienden desde los 31° hasta los 35° de latitud sur, abarcando el sur la provincia de San Juan hasta la cuenca del Río Colorado (provincia de Neuquén) en Argentina y desde la cuenca del Limari en el norte (región de Coquimbo) hasta la cuenca del Cachapoal (región de Cachapoal) en Chile (Lliboutry, 1998). La extensión de los AC ha sido definida de manera diferente (Barcaza et al., 2017) pero este sistema montañoso es tomado como una zona de transición entre las condiciones hiperáridas y semiáridas de los Andes Áridos del Norte y los Andes húmedos del Sur en Patagonia. Esta zona de transición climática se ve forzada por la Diagonal Árida que separa los

patrones de precipitación estivales impulsados desde los trópicos y las precipitaciones invernales impulsadas por las corrientes del Oeste hacia el sur (Garreaud, 2009) (Fig. 1).

Los AC tienen una precipitación media anual de 70 a 900 mm y una temperatura media anual de  $-15$  a  $9^{\circ}\text{C}$ . La distribución de las precipitaciones, así como las temperaturas están fuertemente forzadas por la topografía y la latitud. A medida que la elevación de los cordones montañosos desciende hacia el sur, la cantidad de precipitaciones aumenta con la latitud. Los picos más altos de los Andes se albergan en esta región incluyendo el Aconcagua (6.958 m snm.) y el Mercedario (6.780 m snm.), donde los glaciares son uno de los principales agentes erosivos del paisaje. En este entorno de topografía abrupta, la vegetación está formada por plantas herbáceas dispersas y cobertura arbustiva. Los glaciares y las formas criogénicas propias de un ambiente glacial-periglacial predominan en las zonas de alta montaña por encima de los 3200 m snm, mientras que por debajo de esta altitud, son comunes los abanicos aluviales y los flujos de escombros canalizados.



**Figura 1.** Localización de los Andes Centrales ( $31^{\circ}$ - $35^{\circ}\text{S}$ ): A. Precipitación media anual 1950-2000 (Schoolmeester et al., 2018), B. Precipitaciones totales (Banco De Datos Del Agua en Sudamerica, Centroamerica y El Caribe, 2019), C. Distribución de glaciares en alturas (tomado del Schoolmeester et al., 2018).

## Degradación del permafrost: perspectivas a futuro

El permafrost describe esencialmente una condición térmica particular del suelo o sustrato rocoso con temperaturas de  $0^{\circ}\text{C}$ , o inferior, durante al menos un año independientemente del contenido de hielo o la litología presente en el sustrato (Haeberli et al., 2006). En los AC el frente de los glaciares de escombros se considera como el límite inferior del permafrost discontinuo (Brenning, 2003; Drewes et al., 2018), existiendo diferentes glaciares de tipos rocoso. Se entiende como glaciares cubiertos (debris-covered glacier) aquellos glaciares con una capa de detritos en áreas de permafrost (Haeberli et al., 2006); mientras los glaciares de roca o de escombros (rock glacier) responden a detritos con hielo en zonas de montañas no glaciadas que aun repta perennemente. Este tipo de glaciares almacenan gran cantidad de hielo y sedimentos (Azócar y Brenning, 2010). Se estima que los glaciares de escombros activos concentran entre 40 a 60% de material clástico (Haeberli, 1985; Barsch, 1996; Arenson et al., 2002) siendo unos de los principales mecanismos de movilización de material terrígenos en las cuencas montañosas (Bolch and Schröder, 2001).

Los glaciares de escombros predominan en los AC alcanzando más del 60% en el sector de Argentina, mientras un 30% de los glaciares en el sector chileno son cubiertos o rocosos (Janke et al. 2015, IANIGLA - Inventario Nacional de Glaciares, 2017; Drewes et al., 2018). Evidentemente, estas geoformas asociadas a suelo permanentemente congelado tendrán que adaptarse a nuevas condiciones térmicas tendiendo a desaparecer o fundirse con la elevación de las temperaturas. Posiblemente los glaciares rocosos serán los más sensibles al calentamiento global ya que se encuentran muchos de ellos por debajo de la isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$  en Argentina (Drewes et al., 2018) y en los AC chilenos (Azócar et al., 2017) (Fig. 2). Se estima que el 93% de los glaciares de escombros activos de los AC quedarán por debajo de la isoterma de  $0^{\circ}\text{C}$  para el año 2070 y el 95% en el caso de los Andes Desérticos del Sur (Drewes et al., 2018).

Si bien los glaciares de escombros son las geoformas más representativas de las zonas periglaciares evidenciando la presencia de permafrost activo; las crioplanicies y pendientes crióticas, estas últimas como la instancia previa a la formación de otras criofomas más evolucionadas, son también abundantes



en los AC por arriba del límite de la isoterma de 0°C y contienen gran cantidad de hielo intersticial que, de descongelarse, generan eventos de tipo flujo (Jeanneret y Moreiras, 2018).

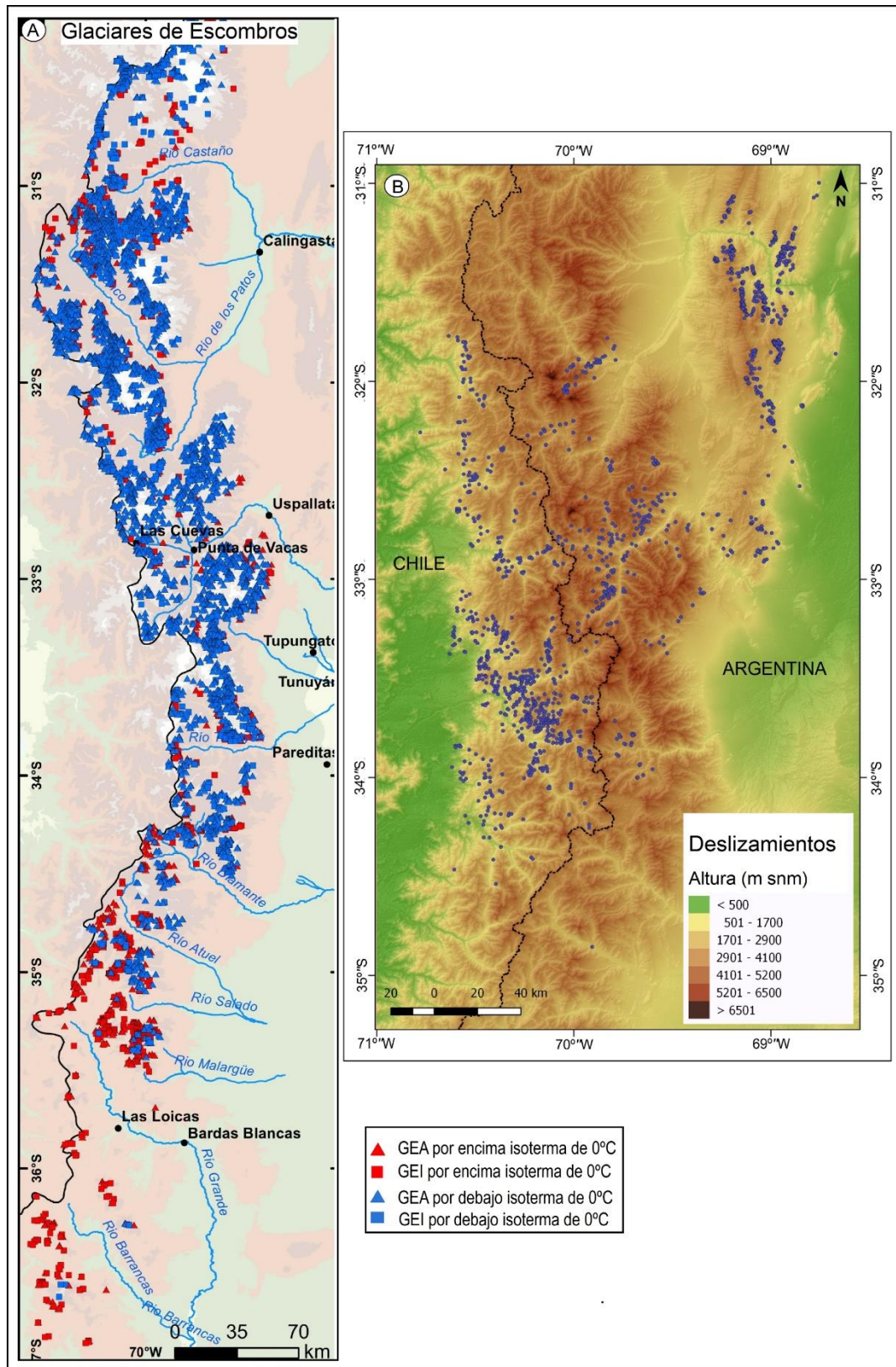
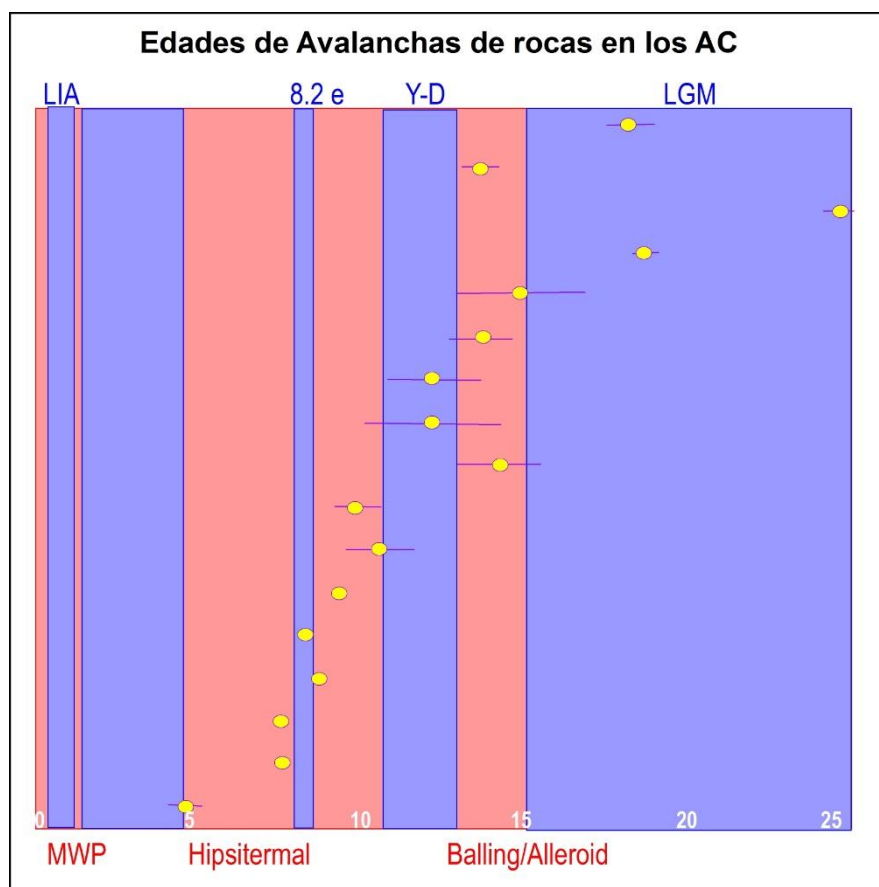


Figura 2. A. Distribución de los glaciares de escombros activos e inactivos en los AC Argentinos (tomado de Drewes et al., 2018) y B. Distribución de los deslizamientos en los AC. Fuente: tomado de Drewes et al., 2018)

## Grandes deslizamientos y condiciones paleoclimáticas de los Andes Centrales

En los sectores más altos de la cordillera andina ( $31^{\circ}$ - $34^{\circ}$  S) los grandes colapsos de laderas parecen coincidir con la ocurrencia de periodos interglaciares más cálidos. Muchos de estos eventos han sido vinculados a forzantes paleoclimáticos por relaciones crono-estratigráficas con till o depósitos glacigénicos (Moreiras y Sepúlveda, 2015; Hermanns et al., 2015; Moreiras et al., 2015) a pesar que los registros paleoclimáticos locales son escasos. En esta región árida, además, los fechados son acotados principalmente por la restricción en presencia o conservación de materia orgánica para dataciones radiocarbono. Por otro lado, las dataciones por tefrocronología ampliamente utilizada en el pasado debido a la alta dispersión de niveles cineríticos ha sido controversial (Moreiras et al., 2015). Sin embargo, si consideramos los fechados cosmogénicos de los eventos más extraordinarios durante los últimos 25 ka encontramos una correlación fuerte con interstadios (Fig. 3).



**Figura 3.** Edades cosmogénicas de las avalanchas de rocas identificadas en los Andes Centrales de Argentina y Chile durante los últimos 25.000 años (Moreiras y Sepúlveda, 2015; Moreiras et al., 2015 y Hermanns et al., 2015) en relación a los registros paleoclimáticos globales: LIA: Pequeña edad de hielo, 8.2 e: evento del 8.2 ka, Y-D: Younger Dryas, LGM: Último Máximo Glacial, MWP: Período Cálido Medieval. Los puntos representan la edad media y la línea el error 2 sigma del fechado.

En la región del Cerro Aconcagua (6.958 m snm) los deslizamientos abarcan un área total de 67,3 Km<sup>2</sup>, aproximadamente un 7,8% del área de la reserva provincial (Moreiras et al., 2008). La distribución espacial de estos eventos se encuentran por debajo de la altura del permafrost continuo, que se evidencia por la presencia de glaciares descubiertos, y coincide parcialmente con un ambiente de permafrost discontinuo a más de 3.200 m snm. Los eventos con mayor volumen y área afectada corresponden a colapsos complejos con más de un tipo de movimiento que involucran material detrítico de morrenas relictas. A lo largo del río Vacas, se identificaron enormes masas colapsadas de morrenas laterales relictas probablemente generadas después del retroceso del hielo del Pleistoceno Tardío en estos valles deglazados (Fig. 4).

En el sector de Cerro Mercedario (6.780 m snm), los deslizamientos incluyendo la reptación lenta de permafrost abarcan al menos el 30% de la zona de estudio distribuidos espacialmente por encima de los 3500 m de altura coincidiendo con el límite inferior del permafrost (Jeanneret y Moreiras, 2018). Particularmente colapsos gravitacionales profundos se han generado a partir de depósitos morrénicos en laderas de valles recientemente desglasados y valles colgantes indicando inestabilidad luego del retroceso de la masa glaciar de los valles y la pérdida de cohesión del material producto del derretimiento.

La falta de dataciones numéricas de precisión sumada a la gran variabilidad climática a través del tiempo, hacen difícil poder asegurar al factor climático como principal efecto desencadenante de estos eventos. Es por esto que resulta importante la utilización de proxies climáticos, y el registro geomorfológico de procesos de remoción en masa podría utilizarse como un indicador de condiciones climáticas más cálidas en el pasado.



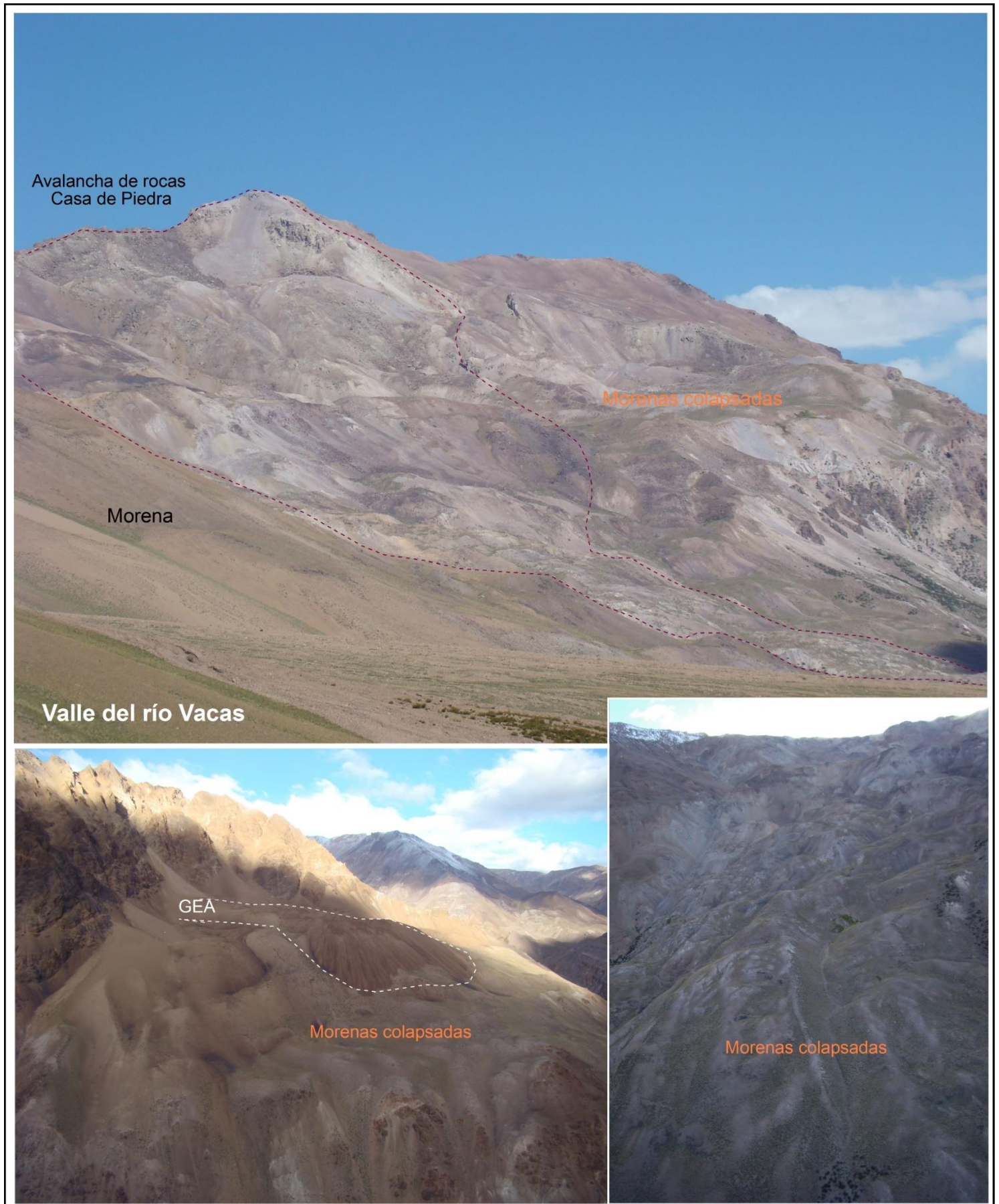


Figura 4. Grandes colapsos de laderas asociados a morenas en el valle del río Vacas, dentro de la reserva del Parque Aconcagua. Fuente: Propia.

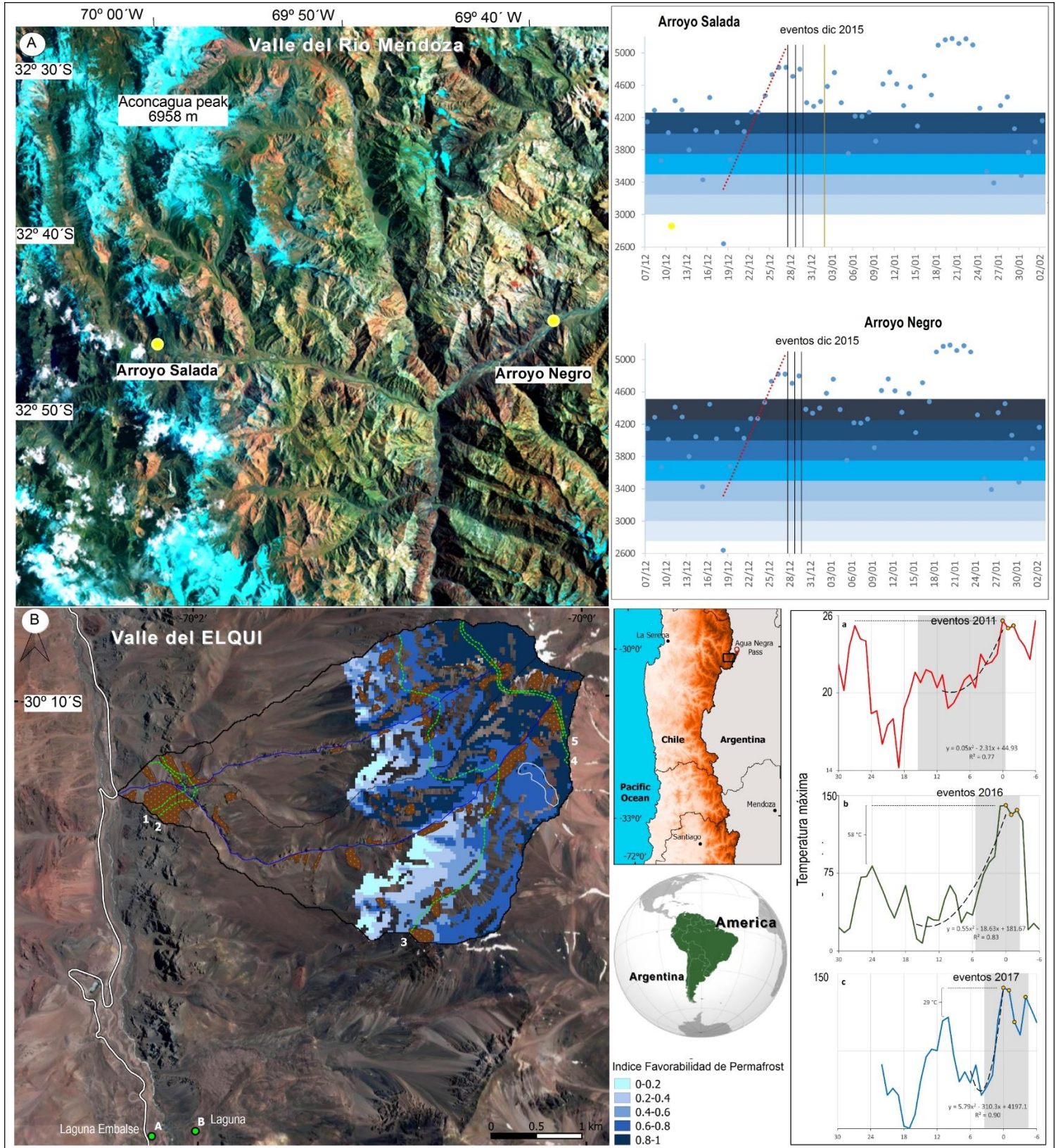
## Flujos de detritos a partir del derretimiento del permafrost

La ocurrencia de flujos de detritos ha sido mayormente asociada con lluvias intensas de verano en Sudamérica (Sepúlveda y Petley, 2015) y en los AC (Moreiras, 2005; Santos et al., 2015; Lauro et al., 2017; Vergara et al., 2018) mostrando un incremento durante la fase cálida del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO en inglés) (Moreiras, 2006; Mergili et al., 2015; Aguilar et al., 2015; Moreiras y Sepúlveda, 2015). Sin embargo, en los sectores de mayor altura donde las precipitaciones son níveas, los flujos se asocian a la fusión de nieve o degradación de permafrost en los meses más cálidos (Moreiras et al., 2012). La cantidad de agua generada por el derretimiento estival de nieve o la fusión de la capa activa del permafrost es aún incierta (Vergara et al, 2019).

Durante el calentamiento sucesivo del aire y la consecuente elevación de la isoterma de 0°C, se generan flujos de detritos en los AC (31°S) en aquellos sectores con presencia de permafrost (Vergara et al., 2019) aunque se desconoce la temperatura precisa del sustrato durante esos eventos. En el valle del río Mendoza, numerosos flujos de detritos ocurrieron en el diciembre de 2015 asociados al derretimiento de frentes de glaciares de escombros activos en la cuencas de los arroyos Salada, Negro (Moreiras et al., 2018) y los Grises (Aconcagua) luego de varios días de ascenso sucesivo de la temperatura del aire. En ese tipo de procesos generados por degradación de permafrost, los flujos de detritos se han producido en varios pulsos con eventos sucesivos durante varios días, a diferencia de los flujos disparados por lluvias, que tienen una descarga repentina en un solo evento (Fig. 5). Causas similares podrían ser las responsables de los eventos de flujo observados en la zona del Cerro Mercedario en San Juan (Jeanneret y Moreiras, 2018), pero al ser una zona remota no se tiene un inventario multitemporal asociado a datos meteorológicos precisos.

Estos resultados muestran que los flujos de detritos y lodo están directamente relacionados con la liberación de agua de deshielo de las geoformas del ambiente periglacial. Dado que estas geoformas se localizan en los sectores más bajos dentro de las cuencas, se estima que, en un contexto de calentamiento global, el ascenso de la isoterma de 0°C afectará estos ambientes aumentando la frecuencia de eventos de remoción de masa.





**Figura 5.** Flujos de detritus generados a partir de la fusión del permafrost. A. Ubicación de los arroyos Salada y Negro en el valle del río Mendoza, en los gráficos se indica alzamiento de la isoterma de 0° durante los días previos a la generación de flujos ocurridos el 28, 29 y 30 de diciembre de 2015 (tomado de *Moreiras et al., 2015*). B. Ubicación de la quebrada Difunta Correa Valle del Elqui con presencia de permafrost en las cabeceza de la cuenca reflejado por el Índice de Favorabilidad de Permafrost, con el alzamiento de la temperatura máxima en las horas previas de los eventos ocurridos en 2011 (26, 27 y 28 de diciembre), 2016 (20, 21 y 22 de enero) y 2017 (12, 13, 14 y 16 de enero) (tomado de *Vergara et al., 2019*).

## CONSIDERACIONES FINALES

El vínculo entre la ocurrencia de los deslizamientos entendidos como un proceso más amplio de remoción en masa y las precipitaciones intensas en los AC argentinos es un hecho ampliamente aceptado. Sin embargo, la incidencia de la temperatura en la inestabilidad de las laderas no ha sido comúnmente abordada en esta región. Este trabajo evidencia la incidencia del ascenso de la temperatura en la degradación o fusión del permafrost y su asociación con descargas de flujos de detritos en la región andina (30°-32°S). Este hallazgo permite enfatizar la relación compleja entre los colapsos y los parámetros ambientales como la precipitación y la temperatura permitiendo vincular la inestabilidad de las laderas en los AC a condiciones ambientales en el pasado.

Basados en el principio del actualismo, podríamos afirmar que los antiguos colapsos debieron tener un control ambiental posiblemente mayor ya que la extensión del ambiente periglacial durante el Último Máximo Glacial (LMG) fue más importante. En este caso, los efectos de la degradación de la criósfera se vieron magnificados por el efecto de relajación de los valles y la pérdida de soporte lateral luego del retiro de las masas de hielo. Es por ello que en el registro geológico encontramos el colapso de grandes masas originados a partir de material morénico. Este material saturado en agua luego de la fusión del hielo intersticial de las morenas, ubicado en sectores de altura con fuertes pendientes indefectiblemente estaba en condiciones de inestabilidad y cedió.

En el actual contexto del calentamiento global los deslizamientos podrían ser intensificados o bien ocurrir en sectores de alta montaña antes dominados por procesos criogénicos o glaciares. Estos eventos inesperados pueden afectar los recursos hídricos locales represando los cauces de ríos o incrementando el material sedimentario en dichos cursos, poniendo en peligro la provisión de agua potable en una región de clima árido – semiárido que depende exclusivamente del agua de deshielo.

## REFERENCIAS

Aguilar, G Cabré, A., Guaita, C., González F., Ortega F., Carretier S., Riquelme R., Comte D. (2015). Denudación por flujos de detritos durante las lluvias torrenciales de marzo de 2015 en Atacama. Congreso geológico Chileno



- Álvarez M.A., Mastrantonio L. y Moreiras S.M, 2019. Susceptibilidad a la ocurrencia de flujos de detritos a escala regional en el Parque Provincial Aconcagua, Mendoza, Argentina. Susceptibility to the occurrence of debris flows on regional scale in the provincial Park Aconcagua, Mendoza, Argentina. *Revista de la Facultad de Agrarias*. En prensa
- Arenson L, Hoelzle M, Springman S (2002) Borehole deformation measurements and internal structure of some rock glaciers in Switzerland. *Permafrost and Periglacial Processes*, 13(2), 117-135. DOI: 10.1002/ppp.414
- Azócar GF, Brenning A (2010) Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27–33 S). *Permafrost and Periglacial Processes*, 21(1), 42-53. DOI: 10.1002/ppp.669
- Azócar GF, Brenning A, Bodin X (2017). Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes. *The Cryosphere*, 11(2), 877-890. DOI: 10.5194/tc-2016-100
- Banco De Datos Del Agua en Sudamerica, Centroamerica y El Caribe. <http://www.r-hydronet.sr.unh.edu/grids/precipitation/sa.html>. Acceso 20 Agosto 2019.
- Ballantyne CK (2002) Paraglacial geomorphology. *Quaternary Science Reviews*, 21(18-19), 1935-2017. DOI: 10.1016/S0277-3791(02)00005-7
- Barcaza G, Nussbaumer SU, Tapia G, Valdés J, García JL, Videla Y, Albornoz A, Arias V (2017) Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75pt2), 166-180. DOI: 10.1017/aog.2017.28
- Barsch D (1996) *Rockglaciers*. Springer, Berlin. 331 pp.
- Bolch T, Schröder H (2001) Geomorphologische Kartierung und Diversitätsbestimmung der Periglazialformen am Cerro Sillajhuay (Chile/Bolivien). *Erlanger Geographische Arbeiten*, 28, Erlangen, 141 pp.
- Bovis MJ (1990) Rock-slope deformation at affliction creek, southern Coast Mountains, British Columbia. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 27(2), 243-254. DOI: 10.1139/e90-024
- Brenning A (2003) La importancia de los glaciares de escombros en los sistemas geomorfológico e hidrológico de la Cordillera de Santiago: fundamentos y primeros resultados. *Revista de Geografía Norte Grande*, 30, 7-22.
- Drewes J, Moreiras S, Korup O (2018) Permafrost activity and atmospheric warming in the Argentinian Andes. *Geomorphology*, 323, 13-24. DOI: 10.1016/j.geomorph.2018.09.005
- Garreaud RD (2009) The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 22, 3-11. DOI: 10.5194/adgeo-22-3-2009
- Haeberli W (1985) Creep of mountain permafrost: internal structure and flow of alpine rock glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH*, 77, 142 pp. Zürich.
- Haeberli W, Hallet B, Arenson L, Elconin R, Humlum O, Kääb A, Kaurmann V, Ladanyi B, Matsuoka N, Springman S, Mühl DV (2006) Permafrost creep and rock glacier dynamics. *Permafrost and periglacial processes*, 17(3), 189-214. DOI: 10.1002/ppp.561
- Hermanns RL, Fauqué L, Wilson CG (2015) <sup>36</sup>Cl terrestrial cosmogenic nuclide dating suggests Late Pleistocene to Early Holocene mass movements on the south face of Aconcagua mountain and in the Las Cuevas–Horcones valleys, Central Andes, Argentina. *Geological Society, London, Special Publications*, 399(1), 345-368. DOI: 10.1144/SP399.19
- IANIGLA - Inventario Nacional de Glaciares, 2017. Inventario Nacional de Glaciares. CONICET MENDOZA. URL <http://www.glaciaresargentinos.gob.ar/> (acceso 30 de mayo 2017).
- Janke JR, Bellisario AC, Ferrando FA (2015) Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. *Geomorphology*, 241, 98-121. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.03.034



- Jeanneret P, Moreiras SM (2018) Inventario de procesos de remoción en masa en la cuenca baja del Río Blanco (31° S), Andes Centrales Argentinos. *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 35(3), 215-227. DOI: 10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.787
- Lauro C, Moreiras SM, Junquera-Torrado S, Vergara Dal Pont I, Tournal R, Wolf J, Tutzer R (2017) Summer rainstorm associated with a debris flow in the Amarilla gully affecting the international Agua Negra Pass (30° 20' S), Argentina. *Environmental earth sciences*, 76(5), 213. DOI: 10.1007/s12665-017-6530-z
- Lliboutry, L (1998) Glaciers of the dry Andes. In: *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World: South America*. United States Geological Survey Professional Paper, P 1386-I [Available online at <http://pubs.usgs.gov/prof/p1386i/index.html>]
- McCull ST (2012) Paraglacial rock-slope stability. *Geomorphology*, 153, 1-16. DOI: 10.1016/j.geomorph.2012.02.015
- Mergili M, Marchant C, Moreiras SM (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.
- Moragues S, Lenzano MG, Moreiras S, Vecchio AL, Lannutti E, Lenzano L. (2019) Slope instability analysis in South Patagonia applying multivariate and bivariate techniques on Landsat images during 2001–2015 period. *Catena*, 174, 339-352. DOI: 10.1016/j.catena.2018.11.024
- Moreiras SM (2005) Landslide susceptibility zonation in the Rio Mendoza valley, Argentina. *Geomorphology*, 66(1-4), 345-357. DOI: 10.1016/j.geomorph.2004.09.019
- Moreiras SM (2006) Frequency of debris flows and rockfall along the Mendoza river valley (Central Andes), Argentina: Associated risk and future scenario. *Quaternary International*, 158(1), 110-121. DOI: 10.1016/j.quaint.2006.05.028
- Moreiras SM, Hermanns RL, Fauqué L (2015) Cosmogenic dating of rock avalanches constraining Quaternary stratigraphy and regional neotectonics in the Argentine Central Andes (32° S). *Quaternary Science Reviews*, 112, 45-58. DOI: 10.1016/j.quascirev.2015.01.016
- Moreiras SM, Lenzano MG, Riveros N (2008) Inventario de procesos de remoción en masa en el Parque Provincial Aconcagua, provincia de Mendoza-Argentina. *Multequina*, (17), 129-146.
- Moreiras S.M., Lisboa S. & Mastrantonio L. (2012) The role of snow melting upon landslides in the central Argentinean Andes. *Earth Surface and Processes Landforms*. Special issue on Historical Range of Variability. Guest editors: Ellen Wohl and Sara Rathburn Volume 37 (10) 1106–1119, DOI 10.1002/esp.3239.
- Moreiras SM, Sepúlveda SA (2015) Megalandslides in the Andes of central Chile and Argentina (32°–34° S) and potential hazards. *Geological Society, London, Special Publications*, 399(1), 329-344. DOI: 10.1144/SP399.18
- Moreiras SM, Vergara Dal Pont I, Araneo D (2018) Were merely storm-landslides driven by the 2015-2016 Niño in the Mendoza River valley?. *Landslides*, 15(5), 997-1014. DOI: 10.1007/s10346-018-0959-3
- Santos J.R., Norte F., Moreiras S.M., Araneo D., Simonelli S. (2015) Predicción de episodios de precipitación que ocasionan aludes en el área montañosa del noroeste de la Provincia de Mendoza, Argentina. *Precipitation events prediction that causes debris flow and landslides over mountainous area on norwest region of Mendoza province, Argentina GEOACTA* 40(1): 65-75.
- Sepúlveda SA, Moreiras SM (2013) Large volume landslides in the central Andes of Chile and Argentina (32°-34°S) and related hazards. In Genevois, R., Prestinzini, A. (Eds.), *International Conference on Vajont 1963-2013: Thoughts and analyses after 50 years since the catastrophic landslide*. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Book Series 6, 287-294. DOI: 10.4408/IJEGE.2013-06.B-26.
- Sepúlveda SA, Petley DN (2015) Regional trends and controlling factors of fatal landslides in Latin America and the Caribbean. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(8), 1821-1833. DOI: 10.5194/nhess-15-1821-2015

Slaymaker O (2009) Proglacial, periglacial or paraglacial?. *Geological Society, London, Special Publications*, 320(1), 71-84. DOI: 10.1144/SP320.6

Schoolmeester T., Johansen K.S., Alfthan B., Baker E., Hesping M. y Verbist, K. (2018) Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. UNESCO y GRID-Arendal.

Vergara Dal Pont I, Ossa FAS, Araneo D, Acuña FJF, Moreiras SM (2018) Determination of probabilities for the generation of high-discharge flows in the middle basin of Elqui River, Chile. *Natural Hazards*, 93(1), 531-546. DOI: 10.1007/s11069-018-3313-0

Vergara Dal Pont I, Moreiras SM, Santibañez Ossa F, Araneo D, Ferrando F. (2019) Debris flows triggered from melt of seasonal snow and ice within the active layer in the semi-arid Andes. *Permafrost and Periglacial Processes*, 1–12. DOI: 10.1002/ppp.2020

Zemp M, Frey H, Gärtner-Roer I, Nussbaumer SU, Hoelzle M, Paul F, Haeberli W, Denzinger F, Ahlstrom AP, Anderson B, Balracharya S, Baroni C, Braun LN, Cáceres BE, Casassa G, Cobos G, Dávila LR, Delgado Granados H, Demuth MN, Espizua L, Fischer A, Fujita K, Gadek B, Ghazanfar A, Hagen JO, Holmlund P, Karimi N, Li Z, Pelto M, Pitte P, Popovnin VV, Portocarrero CA, Prinz R, Sangewar CV, Severskiy I, Sigurdsson O, Soruco A, Usubaliev R, Vincent C (2015) Historically unprecedented global glacier decline in the early 21st century. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745-762. DOI: 10.3189/2015JoG15J017.