

Ambiente periglacial y regiones geocriológicas en los Andes de San Juan (28°-33°S)

Carla TAPIA BALDIS¹, Dario TROMBOTTO LIAUDAT¹ y Ana Lía AHUMADA^{2,3}

¹ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales, Centro Científico Tecnológico - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas, Mendoza, Argentina.

² Fundación Miguel Lillo. San Miguel de Tucumán, Argentina.

³ Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET).

Email: ctapia@mendoza-conicet.gob.ar

Editor: Alfonsina Tripaldi

RESUMEN

Este trabajo trata sobre la extensión regional, límites y características del ambiente periglacial en los Andes Secos (28° a 33° S y 70°30' a 69° O) de la provincia de San Juan (Argentina). Para tal fin, se caracterizaron los tres elementos determinantes del ambiente periglacial: 1) extensión y duración de los procesos de congelamiento/descongelamiento, 2) geoformas y procesos periglaciales indicativos y 3) presencia de permafrost. Se elaboró un modelo regional de temperatura del aire con grillas de reanálisis (NCEP-CSFR, 1979-2010) para delimitar distintas regiones geocriológicas de acuerdo con la duración de los ciclos de congelamiento. Se recolectaron y analizaron todos los antecedentes (propios y de otros autores) sobre geoformas, indicadores y procesos periglaciales en el área de estudio, clasificados posteriormente de acuerdo con la región geocriológica de pertenencia. Por último, se compararon los resultados con dos modelos probabilísticos de extensión de permafrost. De este modo, fue posible establecer la extensión espacial del ambiente periglacial, considerando también la transición hacia ambientes no periglaciales, en el presente y en el pasado.

Palabras clave: *Geomorfología Periglacial, Ciclos de Congelamiento/Descongelamiento, Permafrost, Andes Secos.*

ABSTRACT

Periglacial Environment and Geocryological Regions in the Andes of San Juan (28°-33° S).

This work deals with the extension, limits and characteristics of the periglacial environment of the Dry Andes of San Juan (Argentina). To achieve this objective, the three key-indicators of the environment were characterized: 1) extension and duration of frost-thaw cycles, 2) periglacial geomorphology and processes and, 3) permafrost occurrence. A regional model of air temperature was made using reanalysis of data-grids (NCEP-CSFR, 1979-2010) to delimit the geocryological regions according to the frost-thaw cycles duration. Bibliographical references and own works regarding periglacial landforms and periglacial processes were recollected and analysed and, later classified into the corresponding geocryological zones. Finally, results were compared with two probabilistic models of permafrost occurrence. The exposed methodology allows to establish the spatial extension of the periglacial environment, towards present and past environment.

Keywords: *Periglacial Geomorphology, Frost/Thaw Cycles, Permafrost, Dry Andes.*

INTRODUCCIÓN

Mucho se ha discutido en los últimos años sobre el concepto de ambiente periglacial, sobre sus procesos y geoformas características y, en especial, sobre su extensión geográfica. En la provincia de San Juan, los estudios sobre geoformas y procesos

periglaciales se vienen llevando a cabo desde la década de 1980 (Garleff 1977, Aguado 1983, Simon 1984, Corte 1985, Schrott 1991, 1996, Scholl 2002, Croce y Milana 2002, Claypool y Arenson 2009, Perucca y Éspér Angillieri 2008, Éspér Angillieri 2011, 2017, Arenson *et al.* 2010, Villarroel 2013, Pitte 2014, Schreiber 2015,

Tapia Baldis y Trombotto Liaudat 2015, Forte *et al.* 2016, Milana 2016, Taillant *et al.* 2017, García 2018, Tapia Baldis 2018), en distintas localidades de la cordillera de los Andes, empleando una gran variedad de técnicas de observación, detección o inferencia de elementos característicos, reflejados en un vasto número de publica-

ciones con distinto grado de detalle. Sin embargo, al momento de limitar o acotar la extensión del ambiente periglacial, son pocos los consensos alcanzados.

Escapa a los fines de este trabajo realizar una revisión histórica de los conceptos y postulados básicos utilizados en geocriología, por lo que sólo se hará una breve mención de los términos más importantes. La definición del ambiente periglacial estuvo históricamente ligada a la de clima periglacial, puesto que el ambiente periglacial es aquel que posee un clima homónimo con procesos y geoformas asociadas. Las primeras propuestas para delimitar los climas periglaciales fueron efectuadas por Tricart y Cailleaux (1965), Jahn (1975) y French (2007). Para Barsch (1993), por ejemplo, el ambiente periglacial sólo debería existir en regiones con climas polares, es decir, regiones dominadas por los climas tipo E (Ef y ET) de Köppen (1936). Según Trombotto Liaudat *et al.* (2014), en los Andes de Sudamérica el ambiente periglacial es un ambiente frío y criogénico, pero no glaciario, ubicado por encima del límite superior del bosque, si es que éste existe, con presencia de permafrost. En regiones de alta montaña áridas y semiáridas como la del presente estudio, la separación entre ambiente periglacial y no periglacial puede ser una tarea complicada al no existir la línea de bosque. De acuerdo a los autores anteriores, el ambiente periglacial andino posee tres elementos característicos: a) dominio de procesos de congelamiento, que actúan en forma cíclica con períodos de C/D, que afectan a las rocas y a la porción superficial del suelo; b) presencia de geliflución y otros procesos criogénicos (crioclastia, crioturbación, selección, etc.) que generan geoformas periglaciales en micro o mesoescala y, c) posible presencia de permafrost o suelo congelado permanentemente en profundidad y presencia de hielo subterráneo atrapado y preservado bajo condiciones naturales por largo tiempo.

El permafrost es definido como un espesor de suelo o roca, que puede incluir o no hielo y/o materia orgánica, que permanece a temperatura igual o inferior a 0 °C por espacio de dos o más años consecutivos (van Everdingen 1998, Trombotto Liaudat *et al.* 2014). De este modo, el término hace referencia a condiciones exclusiva-

mente térmicas y temporales del espesor de material considerado. En áreas con permafrost subyacente puede existir una capa superficial de suelo y/o roca que sufre ciclos anuales de C/D, denominada capa activa (van Everdingen 1998). La acción del congelamiento es el proceso criogénico básico que origina variaciones de temperatura en los distintos tipos de materiales (sedimentos, suelo orgánico, roca) como así también en el agua que puede estar presente en los mismos, a través de los ciclos de C/D (Corte 1987). Por otro lado, la soliflución (*s.l.*), es uno de los procesos criogénicos y de remoción en masa lenta más extendidos en el ambiente periglacial (y no periglacial); se produce como resultado de la difusión y sobresaturación hidrológica de un suelo, que puede potenciar movimientos de remoción en masa sobre el mismo; por ejemplo, la reptación se produce si el desplazamiento del suelo se produce de forma lenta, pendiente abajo al superar al ángulo de reposo de los materiales que los conforman. De acuerdo con Washburn (1979), es recomendable restringir el uso del término geliflución al ambiente periglacial para referirse a un proceso de soliflución en áreas con permafrost.

En este trabajo se ha elaborado una metodología que contempla tres criterios fundamentales definidos por Trombotto Liaudat *et al.* (2014), para la delimitación del ambiente periglacial en el sector cordillerano de la provincia de San Juan: a) dominio de procesos de congelamiento, b) geliflución y procesos criogénicos que generan estructuras en micro- y mesoescala características y c) posible presencia de permafrost.

La delimitación de la región en la que dominan los procesos de congelamiento se realizó en base a los trabajos históricos de Gorbunov (1978), Corte (1983) y Corte y Minetti (1984). Para Gorbunov (1978), tanto las condiciones de congelamiento perenne, congelamiento estacional y/o congelamiento episódico de suelo y/o roca en una región de estudio, varían de acuerdo con su posición geográfica y altitud, siendo posible clasificar taxonómicamente a los dominios de congelamiento en: cinturones, sub-cinturones y regiones geocriológicas. De acuerdo con este autor, los Andes Centrales de Sudamérica,

poseen cuatro cinturones principales: cinturón de congelamiento perenne, cinturón con suelos congelados estacionalmente, cinturón con suelos congelados periódicamente por cortos períodos de tiempo y, cinturón sin sustrato congelado. La característica principal de los Andes Centrales de Sudamérica es que la región con congelamiento perenne se extiende por debajo de la línea de nieves, proceso similar al que se produce en el Tíbet (Gorbunov 1978). Corte (1983), empleando un enfoque similar al de Gorbunov (1978), divide a las distintas regiones geocriológicas de acuerdo con sus procesos y geoformas características, e introduce los términos de Región Geocriogénica y Para-Geocriogénica. Corte y Minetti (1984), ampliando el trabajo anterior, establecen los criterios climáticos para delimitar las regiones geocriológicas en Argentina. En el presente trabajo, se discriminaron cinco regiones geocriológicas, empleando modelos regionales de temperatura del aire de acuerdo con la duración de los ciclos de congelamiento y descongelamiento imperantes en cada una de ellas.

Para el segundo criterio característico del ambiente periglacial, se recopilaron y analizaron todos los antecedentes disponibles, que mencionaran/describieran geoformas y procesos periglaciales en la región de estudio, realizando un exhaustivo control de campo en las regiones accesibles (Fig. 1). Garleff (1977), por ejemplo, en un trabajo pionero en los Andes Centrales, efectuó la primera clasificación de los pisos periglaciales basadas en evidencias geomorfológicas y en un criterio altitudinal. Por otro lado, Trombotto (1991), compara los pisos periglaciales de Garleff (1977) con los niveles de vegetación existentes en los Andes mendocinos, dando a entender que los pisos periglaciales no sólo responden al gradiente altitudinal, sino que reflejan condiciones ambientales más generales. En el presente trabajo se procede de manera inversa a lo propuesto por Garleff (1977): las evidencias geomorfológicas son clasificadas y comparadas con las regiones geocriológicas definidas previamente.

De acuerdo con Barsch (1983) y Trombotto Liaudat *et al.* (2014), la presencia de permafrost debe ser considerada como el elemento esencial para definir la región

periglacial en Sudamérica y constituye el tercer criterio abordado por este trabajo. Según Schrott y Götz (2013), emplear la extensión real o probabilística del permafrost por sí sola resulta insuficiente para definir los límites del ambiente periglacial, ya que puede producir importantes subestimaciones de superficie. Se han incluido las estimaciones de permafrost basadas en modelos probabilísticos de extensión regional, cumpliendo con los tres criterios requeridos para la estimación del ambiente periglacial en la zona de estudio.

MARCO REGIONAL

El área de trabajo se encuentra comprendida entre 28° a 33° de latitud Sur y 70°30' a 69° de longitud Oeste (Fig. 1). Desde el punto de vista tectónico se ubica dentro del segmento de subducción horizontal de la placa de Nazca (27° a 33°30' de latitud Sur). Este segmento está caracterizado por su intensa actividad sísmica (Isacks *et al.* 1982), expresada por importantes fallas activas y por el desarrollo de un frente tectónico que pliega los depósitos cuaternarios (Ramos *et al.* 1997), sumado a la ausencia de volcanismo activo desde el Mioceno superior (Jordan *et al.* 1983). Las mayores altitudes en esta región, Aconcagua (6967 m s.n.m.), Mercedario (6850 m s.n.m.) y La Ramada (6400 m s.n.m.) son terrenos tectónicamente elevados que coinciden con el segmento de subducción horizontal de la placa de Nazca. Si bien el dominio de los procesos tectónicos juega un papel clave en la configuración del paisaje en los Andes, generando altas altitudes por elevación tectónica e isostática, el clima controla la intensidad de los procesos superficiales y desarrolla un rol fundamental en la configuración morfológica del paisaje (Brózovic *et al.* 1997, Montgomery *et al.* 2001).

La cadena montañosa de los Andes presenta una gran variabilidad climática y topográfica a lo largo de toda su extensión hemisférica, que favorece la existencia de condiciones climáticas locales y microclimas particulares. Desde los 17°30' hasta los 35° de latitud Sur, los Andes Centrales de Sudamérica se denominan, desde el punto de vista climático, Andes Secos por sus bajas tasas de precipitación (100-

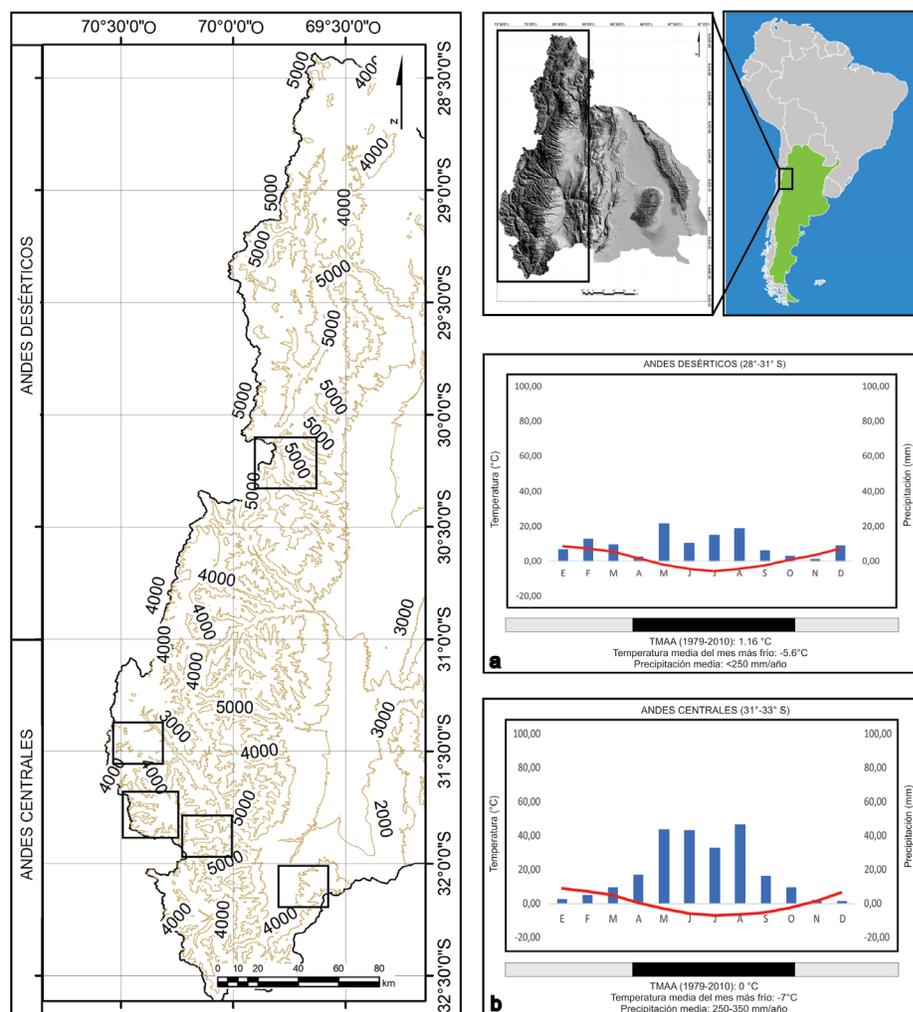


Figura 1. Ubicación del área de estudio y características climáticas regionales. Los recuadros en negro representan las zonas con verificación de campo y estudios realizados por los autores del presente trabajo. a) Clima-diagramas de los Andes Desérticos; b) Clima-diagrama de los Andes Centrales, modificados de Tapia Baldís (2018). En ambos casos la línea roja representa la TMAA promedio y las barras azules la precipitación mensual. Debajo de cada clima-diagrama se representan los meses con temperaturas promedio negativas (barra negra) y positivas (barra gris).

400 mm/año) (Lliboutry 1998). La radiación solar también es muy intensa, con un promedio regional diario de más de 400 W/m² para el periodo 1979-2006 (Vuille y Ammann 1997). En la región de los Andes Secos, el ascenso forzado de los vientos del oeste por la cadena montañosa de los Andes da como resultado un incremento de las precipitaciones frontales del lado occidental de esta barrera, hasta aproximadamente los 30° S (Viale y Norte 2009). El efecto de ascenso orográfico de las masas de aire produce precipitaciones anuales en las altas altitudes de los Andes (> 3000 m s.n.m.), registrando tasas 2 a 3 veces mayores que en la costa chilena a la misma latitud (Falvey y Garreaud 2007). En cuanto a la temporalidad de las preci-

pitaciones, los Andes Secos están caracterizados por un régimen estacional bien definido con un marcado pico de precipitaciones durante los meses fríos (abril a octubre) y escasas precipitaciones durante la estación cálida (noviembre a marzo) (Figs. 1a, b). La nieve acumulada en las montañas durante el invierno permanece hasta el inicio de la temporada de fusión (generalmente octubre-noviembre). Los Andes Secos, a su vez, pueden ser divididos en dos grandes regiones de norte a sur: los Andes Desérticos (17°30' S a 31° S) y los Andes Centrales de Argentina y Chile (s.s. 31° S a 35° S) (Fig. 1). La discriminación entre ambas regiones está basada, no en el origen y estacionalidad de las precipitaciones, sino en la tasa anual

de precipitación (Figs. 1a, b). De hecho, los Andes Desérticos, donde las precipitaciones anuales son inferiores a los 250 mm (Fig. 1a), responden a la expresión fisiográfica de la Diagonal Árida o Arreica (Bruniard 1982, De Martone 1957).

MATERIALES Y METODOLOGÍAS

Clasificación de regiones geocriológicas

De acuerdo con Gorbunov (1978), los procesos de congelamiento en una región pueden ser temporalmente perennes, estacionales o episódicos y, varían de acuerdo a su posición geográfica y altitud. En este trabajo, se consideró que existen condiciones atmosféricas que propician procesos de congelamiento cuando la temperatura del aire es inferior a 0° C.

Para reproducir la gran variabilidad lateral y altitudinal de los procesos de congelamiento a escala regional se requiere de una gran cantidad de datos, distribuidos de manera uniforme en el territorio y bajo un formato estandarizado. Una de las maneras más rápidas y efectivas para obtener este tipo de datos en regiones remotas es emplear datos grillados y modelos de elevación de muy alta resolución espacial (Riseborough *et al.* 2008). Si bien las mediciones *in situ* generalmente otorgan valores muy precisos para un sector puntual, la escasez de observaciones meteorológicas en la zona de estudio ya sea por una inadecuada distribución de los puntos de observación, discontinuidad temporal de los registros o de las variables de medición o bien, inexistencia absoluta de los mismos; dificulta la tarea de obtener datos sobre los procesos atmosféricos con un cierto margen de confianza.

La diferencia de escala entre las grillas de datos de superficie y datos atmosféricos se elimina empleando un proceso de adecuación. Este proceso consiste en aumentar la escala de la grilla de menor detalle (generalmente de datos atmosféricos) a través de un proceso de desagregación (*downscaling*). El supuesto básico de esta propuesta es que el gradiente vertical de temperatura, condicionado por la topografía es mucho más importante que los gradientes horizontales (Cao *et al.* 2017). Por otro

lado, Arenson *et al.* (2004), indican para la construcción de escenarios climáticos relacionados a estudios de permafrost se deben emplear series temporales de larga duración (>30 años), un criterio posible de obtener con series de datos grillados.

Para este trabajo, se eligió como serie temporal de larga duración el set de datos de temperatura del aire del *National Center for Environmental Prediction* (NCEP) y del *Climate Forecast System Reanalysis* (CFSR) (Saha *et al.* 2010), que están disponibles en la web <http://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr>. La grilla NCEP-CSFR es un producto de reanálisis global que emplea un modelo de atmósfera, océano y superficie acoplado con asimilación de variaciones en cuatro dimensiones. Las variables individuales pueden solicitarse a diferentes niveles de presión o a sus respectivos equivalentes altitudinales. Para el caso de la temperatura del aire, el modelo estima los valores cuatro veces al día (00:00, 06:00, 12:00 y 18:00 UTC), promediados a 0,5° de resolución espacial en los distintos niveles de referencia.

La clasificación de las regiones geocriológicas definidas para este trabajo se realizó comparando la temperatura media anual del aire (TMAA), la temperatura media del aire en la estación cálida (noviembre a marzo: TMA EC) y la temperatura media del aire en la estación fría (abril a octubre: TMA EF). Los parámetros climáticos seleccionados para definir cada región son los siguientes:

Congelamiento perenne (CP; TMAA < 0 °C; TMA EC < 0 °C y TMA EF < 0 °C): se producen fenómenos de congelamiento todo el año, tanto en la estación cálida como en la estación fría.

Descongelamiento estacional (DE; TMAA < 0 °C; TMA EC > 0 °C): se producen fenómenos de congelamiento casi todo el año, excepto durante la estación cálida.

Congelamiento estacional (CE; TMAA > 0 °C; TMA EF < 0 °C): se producen fenómenos de congelamiento sólo durante la estación fría.

En primer lugar, se seleccionaron los datos horarios de temperatura media del aire (TMA), para el periodo comprendido entre el 01/01/1979 y 31/12/2010 (31 años de referencia). La variable TMA representa la temperatura del aire en la interfase de contacto superficie-atmósfera, medida a

2 m sobre el nivel del suelo (sobre la altitud local del punto de observación), denominada también temperatura superficial del aire (Cao *et al.* 2017). La temperatura media anual del aire (TMAA), se obtuvo calculando sucesivamente la temperatura media diaria, media mensual, media anual y, posteriormente, media del periodo total 1979-2010 (o media climatológica). Las temperaturas medias del aire en estación cálida y estación fría (TMA EC y EF) se obtuvieron, asimismo, calculando los promedios sucesivos diarios, medios, mensuales y anuales para el mismo periodo de 1979-2010.

Para adecuar los datos de la grilla NCEP-CSFR con la configuración topográfica de los Andes Secos, se siguió el procedimiento descrito por Fiddes y Gruber (2014), denominado reducción de escala simple (*simple downscaling*) que emplea el gradiente térmico estándar de -6,5 °C/1000 m, en lugar de gradientes térmicos locales u obtenidos a partir de diferentes niveles equipotenciales (Cao *et al.* 2017). Como modelo digital de elevación se empleó el MDE-AR, de 45 m de resolución espacial, obtenido a través de la página: <http://www.ign.gov.ar>. La metodología anterior fue repetida sucesivamente para calcular la TMA, tanto para la estación cálida (TMA EC) como para la estación fría (TMA EF).

Geoformas, indicadores y procesos periglaciales

Se recopilaron y analizaron todos los antecedentes bibliográficos con descripciones de geoformas, indicadores (Corte 1997, Trombotto 1991, 2000, Trombotto *et al.* 1999) y procesos periglaciales en el área de estudio. Asimismo, se incluyeron las menciones de geoformas periglaciales y procesos de remoción en masa encontrados en distintos aportes. Entre los antecedentes mencionados se incluyen, también, contribuciones previas realizados por los autores del presente estudio. Las regiones que fueron estudiadas y verificadas en campo se muestran en la figura 1; la figura 2 señala ejemplos de geoformas y procesos periglaciales en los Andes Centrales y Desérticos. Un resumen de los trabajos consultados puede apreciarse en el Cuadro 1, incluyendo autor y fecha del trabajo, latitudes, longitudes y tipo de descripciones realizadas.

Posteriormente, las observaciones fueron clasificadas en: geformas, indicadores o procesos identificados, señalando también el rango altitudinal en el que fueron descriptos. Aquellos trabajos con descripciones generales o no acotadas a una región geográfica fueron descartados para este estudio.

Estimación de la extensión regional del permafrost

En el sector cordillerano de la provincia de San Juan se han aplicado diferentes métodos para detectar la presencia de permafrost. El enfoque seguido por varios autores (Gruber 2012, Schreiber 2015, Éspér Angillieri 2017, Tapia Baldis 2018) es la aplicación de métodos empírico-estadísticos o heurísticos (Arenson y Jakob 2010), para determinar la probabilidad de presencia de permafrost en una región determinada de acuerdo a variables predictivas. Para este trabajo, se seleccionaron dos modelos de permafrost disponibles a escala regional en el área de estudio (Gruber 2012, Tapia Baldis y Trombotto Liaudat 2019), cuyos datos publicados fueron factibles de ser reproducidos.

Posteriormente, se plotearon más de 50.000 puntos, equidistantes entre sí en toda el área de estudio, y se extrajeron los datos correspondientes a su altitud, temperatura media anual del aire (TMAA), temperatura media del aire en la estación fría (TMA EF), temperatura media del aire en la estación cálida (TMA EC) y clase probabilística de permafrost. Las categorías probabilísticas de los modelos de permafrost seleccionados y sus límites altitudinales se detallan en el Cuadro 2.

RESULTADOS

Modelo regional de temperatura

La figura 3 presenta ejemplos de los resultados obtenidos a partir del análisis de la serie NCEP-CSFR para el período de estudio 1979-2010, luego del proceso de *simple downscaling* aplicado al MDE-AR. Los resultados forman parte de una base de datos presentada en Tapia Baldis (2018), con datos en más de 50.000 puntos distribuidos equidistantemente en toda la región cordillerana de la provincia

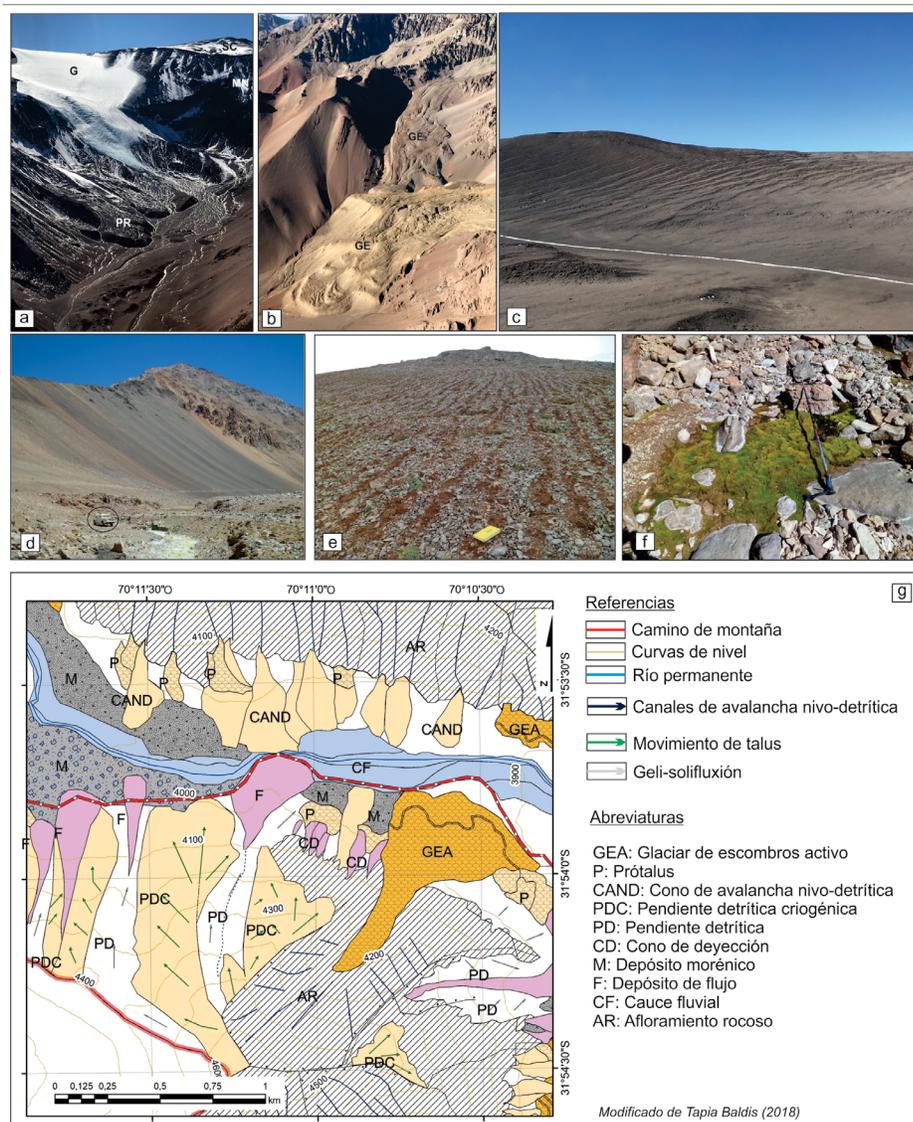


Figura 2. Ejemplos de geformas e indicadores periglaciales. a) Glaciar (G), manchón de nieve perenne (MN), superficie de crioplanación (SC) y prótalus rampart (PR) en la Cordillera de Olivares (Andes Desérticos: 30°26' S y 69°50' O a 4400 m s.n.m.; Foto: Trombotto 2018). b) Glaciares de escombros (GE) en Andes Centrales a 4250 m s.n.m. (31°51' S y 70°10' O; Foto: Trombotto 2018). c) Pendiente detritica criogenica con procesos de soli-geliflución a 4900 m s.n.m. (Andes Desérticos: 30°11' S y 69°49' O; Foto: Trombotto 2018). d) Pendiente detritica criogenica (Andes Centrales, valle del río Pachón: 31°43' S y 70°18' O; Foto: Tapia Baldis 2016). El círculo negro señala un vehículo de referencia. e) Suelos ordenados en bandas sobre pendiente (Andes Centrales, cuenca del río Santa Cruz: 31°55' S y 70°11' O a 3800 m s.n.m.; Foto: Tapia Baldis 2016). f) Pequeña vega en manantial a 4050 m s.n.m. (Andes Centrales: 31°55' S y 70°11' O; Foto: Tapia Baldis 2016). g) Ejemplo de mapeo de detalle y control de campo realizado en los Andes Centrales para el reconocimiento de geformas y procesos periglaciales (modificado y simplificado de Tapia Baldis 2018).

de San Juan. En la figura 3a se muestra un ejemplo de las series temporales de temperatura media anual del aire (TMAA), temperatura media del aire en la estación cálida (TMA EC) y temperatura media del aire en la estación fría (TMA EF) calculado para la coordenada 31°30' S y 70°30' O a 3400 m s.n.m. Asimismo, en el Cuadro 3 se ejemplifican los valores medios de TMAA, TMA EC y TMA EF para el período 1979-2010 en distintas coordenadas geo-

gráficas, distribuidos equidistantemente en el área de estudio.

La figura 3b señala la extensión espacial de los procesos de congelamiento durante las estaciones fría y cálida, además de la extensión espacial anual media de las condiciones de congelamiento, expresada cuando la TMAA < 0 °C. Asimismo, se obtuvieron resultados referidos a la altitud media de la isoterma de 0 °C, que define el límite de las regiones con con-

CUADRO 1. Resumen de los trabajos con indicadores periglaciales consultados para este trabajo, clasificados por región (Andes Desérticos, Centrales o ambos). No se incluyeron los aportes bibliográficos con observaciones generalizadas y no georeferenciadas. Las citas señaladas con ** indican las regiones que fueron verificadas con observaciones de campo en este trabajo; las citas señaladas con * incluyen verificaciones parciales de campo debido a la gran extensión espacial abarcada.

Región	Autor(es) y Fecha	Latitud (Sur)	Longitud (Oeste)	Tipo de descripciones
Andes Desérticos	Corte (1985)**	30°	69°30'	Geoformas y procesos periglaciales
	Schrott (1991, 1996)**	30°9' a 30°27'	69°29' a 69°53'	Geoformas, procesos glaciales y periglaciales
	Croce y Milana (2002)**	30°9' a 30°27'	69°29' a 69°53'	Geoformas y procesos periglaciales
	Scholl (2002)**	30°9' a 30°27'	69°29' a 69°53'	Geoformas y procesos periglaciales
	Perucca y Éesper Angillieri (2008)	28°15' a 29°41'	69°42' a 69°30'	Geoformas periglaciales, procesos periglaciales, fluviales y gravitacionales
	Claypool y Arenson (2009)**	29°18' a 29°20'	69°58' a 70°02'	Geoformas y procesos periglaciales. Descripción de calicatas.
	Éesper Angillieri (2011)	29°41' a 30°5'	69°23' a 69°39'	Mesoformas periglaciales
	Perucca <i>et al.</i> (2011)	30°	69°50'	Geoformas, procesos glaciales y periglaciales
	Schrott y Götz (2013)*	30°9' a 30°27'	69°29' a 69°53'	Geoformas y procesos periglaciales
	Pitte (2014)	29°10' a 29°30'	70°10' a 69°50'	Geoformas glaciales y periglaciales
Andes Centrales	Wolf (2015)**	30°9' a 30°27'	69°29' a 69°53'	Geoformas y procesos glaciales, periglaciales, gravitacionales, aluviales y fluviales
	Aguado (1983)*	31°50' a 32°40'	70°40' a 69°30'	Geoformas glaciales y periglaciales
	Simon (1984)**	31°30'	70°30'	Geoformas y procesos periglaciales
	Arenson <i>et al.</i> (2010)**	31°44' a 31°45'	70°25'	Geoformas y procesos periglaciales. Descripción de calicatas
	Villarroel (2013)**	31°45' a 32°05'	70°28' a 70°05'	Geoformas glaciales y periglaciales
	Schreiber (2015)**	31°05' a 31°29'	70°29' a 70°14'	Geoformas y procesos periglaciales. Descripción de calicatas
	Tapia Baldis y Trombotto Liaudat (2015)**	31°47' a 31°57'	70°14' a 70°	Geoformas y procesos glaciales, periglaciales, gravitacionales, aluviales y fluviales
	Forte <i>et al.</i> (2016, 2017)*	31°47' a 31°57' y 29°10' a 29°30'	70°14' a 70° y 70°10' a 69°50'	Geoformas glaciales y periglaciales, procesos periglaciales
	Taillant <i>et al.</i> (2017)*	Sistema hídrico del río San Juan		Geoformas periglaciales y descripción de calicatas
	García (2018)	31°14' a 31°17'	70°11' a 70°06'	Geoformas glaciales y periglaciales
Andes Desérticos y Centrales	Kiesling (1994)	28°30' a 32°30'	70°30' a 69°	Descripción colecciones florísticas
	Milana (2016)*	28°30' a 32°30'	70°30' a 69°	Geoformas y procesos periglaciales/ gravitacionales
	Éesper Angillieri (2017)*	28°30' a 32°30'	70°30' a 69°	Procesos periglaciales
	Informes del Inventario Nacional de Glaciares (ING 2017; 2018)*	Sistemas hídricos de los ríos San Juan y Jáchal		Geoformas glaciales y periglaciales

gelamiento/descongelamiento, para cada situación. La altitud media de la isoterma de 0° C anual (periodo 1979-2010), se ubica en 3900 + 70 m s.n.m., con valores extremos de 3785 m s.n.m. (mínimo) durante años extremadamente fríos y de

4070 m s.n.m. (máximo) durante años extremadamente cálidos. Durante la estación cálida, la isoterma de 0 °C asciende a 4300 m s.n.m. y desciende hasta aproximadamente a 3300 m s.n.m. durante la estación fría. Si tomamos en cuenta los

valores anteriores, podemos estimar que, durante un año extremadamente frío, la isoterma anual de 0 °C se ubicaría a aproximadamente 3300 m s.n.m. y a 4300 m s.n.m. durante el verano en un año extremadamente cálido.

Geformas, indicadores y procesos periglaciales

Un resumen de las formas, indicadores y procesos periglaciales recopilados de los antecedentes expuestos en el Cuadro 3 se presenta en las figuras 4, 5 y 6, respectivamente. Estos elementos fueron clasificados de acuerdo a la región geocriológica de pertenencia, señalando también el rango altitudinal brindado por el/los autor/es del aporte.

Las formas comúnmente identificadas y descritas incluyen, entre las formas glaciares, glaciares de montaña (Fig. 2a), de valle, campos de nieve y glaciarretes. Los glaciares suelen clasificarse de acuerdo con la presencia/ausencia de una cubierta de detritos. Entre las formas nivales se mencionan sólo manchones de nieve perennes (Fig. 2a), sin clasificar, no habiendo encontrado referencias para manchones de nieve estacional. Las formas periglaciales incluyen superficies de crioplanación (activas e inactivas) (Fig. 2a), criopedimentos, glaciares de escombros (activos, inactivos y fósiles) (Fig. 2b), prótalus (*ramparts* y lobulados, en conjunto) (Fig. 2a), pendientes planas o detriticas (sedimentarias) criogénicas (Fig. 2c y 2d), con diferentes descripciones de sus estructuras, y deslizamientos o movimientos complejos posiblemente vinculados a procesos de degradación de permafrost o fallas en capa activa.

Pocas son las contribuciones que detallan las microformas del ambiente periglacial, incluyendo también alguna referencia geográfica de las mismas. En los Andes de San Juan se han descrito microestructuras periglaciales tales como: suelos estructurados en redes, en polígonos y en bandas (Fig. 2e), estructuras de guinaldas, terrazas de soliflucción, volcanes de la tundra o estructuras de extrusión, domos de vegetación con hielo estacional, presencia de hielo intersticial o masivo en calicatas (en suelo, criopedimento o roca) y vegas o humedales (Fig. 2f) con flora perteneciente al piso Alto-Andino (Ambrosetti *et al.* 1986). Por otro lado, las estructuras sedimentarias alternantes o regolitos ordenados en pendientes (tipo *grézes litées*), ubicadas en las partes bajas de algunos valles, fueron asociadas a un origen nival-periglacial (depósitos de avalanchas nivo-detriticas), en base a

CUADRO 2. Clases probabilísticas de presencia de permafrost (P: Probabilidad) y límites inferiores correspondientes para la zona de estudio expresados en m s.n.m. Modelo 1: Gruber (2012), Modelo 2: Tapia Baldis y Trombotto Liaudat (2019).

Probabilidad de Permafrost	Modelo 1 (m s.n.m.)	Modelo 2 (m s.n.m.)
Alta o Posible (P>75%)	>4500	>4200
Media o Probable (75%>P>50%)	4000 a 4500	3400 a 4200
Baja o Poco Probable (50%>P>25%)	3700 a 4000	3000 a 3400
No Probable (P<25%)	3500 a 3700	<3000

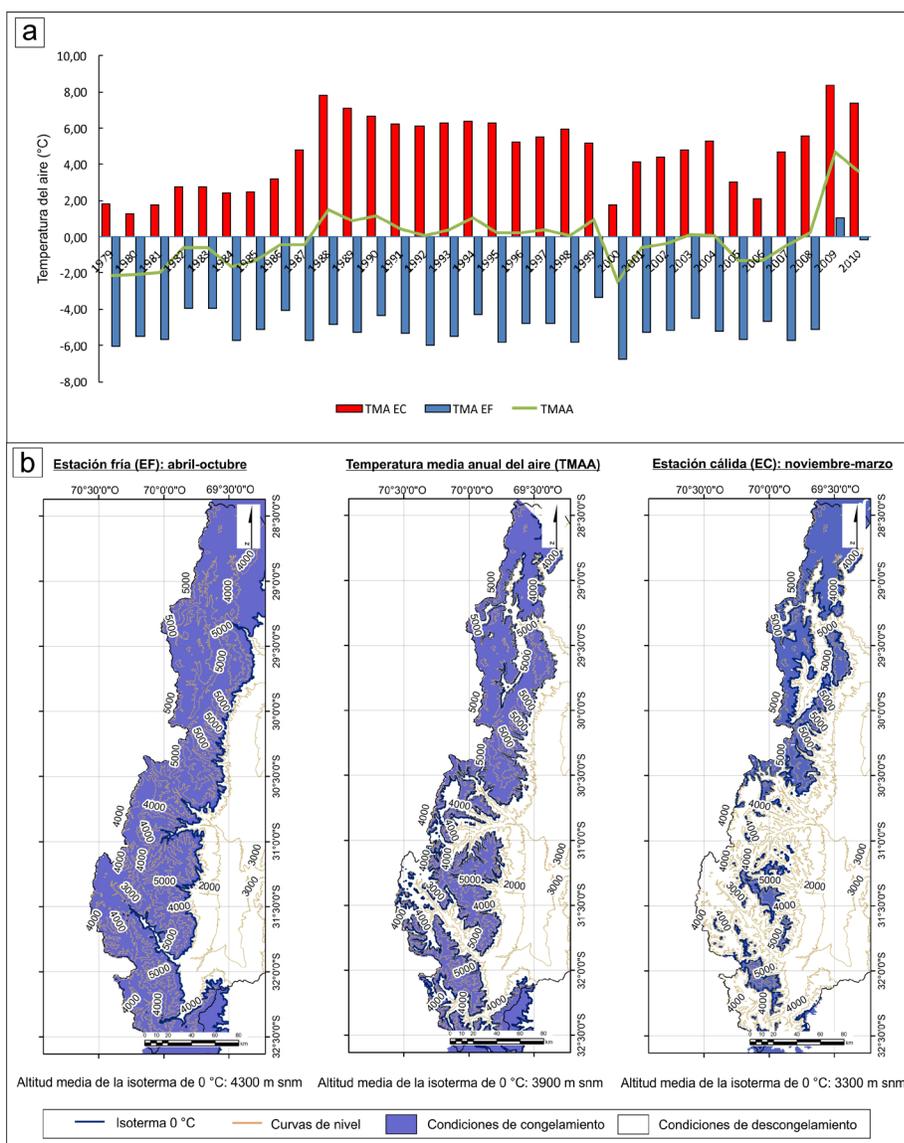


Figura 3. a) Ejemplo de serie temporal de larga duración (>30 años) de temperatura del aire, obtenida a partir de la grilla NCEP-CSFR (1979-2010), correspondiente a la coordenada 31°30'S y 70°30'O a 3400 m s.n.m. En línea verde se muestra la TMAA, las barras rojas y azules representan la TMA EC y TMA EF, respectivamente; b) Extensión espacial de los procesos de congelamiento, definidos cuando la temperatura del aire es inferior a 0 °C. Izquierda: condiciones de congelamiento durante la estación fría (abril a octubre) para TMA EF < 0 °C, promediadas para el periodo 1979-2010. Centro: condiciones de congelamiento anuales, definidas cuando la TMAA < 0 °C, promediadas para el periodo 1979-2010. Derecha: Condiciones de congelamiento durante la estación cálida (noviembre a marzo) para TMA EC < 0 °C, promediadas para el periodo 1979-2010. La posición y altitud media de la isoterma de 0 °C en los Andes Secos (Andes Centrales y Andes Desérticos) se muestra para cada escenario.

CUADRO 3. Valores medios de temperatura media anual del aire (TMAA), temperatura media del aire en la estación cálida (TMA EC) y temperatura media del aire en la estación fría (TMA EF) para el período 1979-2010 en distintas coordenadas geográficas y altitudes, distribuidos equidistantemente en el área de estudio.

Latitud	Longitud	Altitud (m snm)	TMAA (°C)	TMA EC (°C)	TMA EF (°C)
28°30'S	69°30'O	4359	-2,01	0,93	-4,95
29°00'S	69°30'O	4198	-0,85	3,46	-5,17
30°00'S	69°30'O	3530	4,24	8,74	-0,25
30°30'S	69°30'O	3202	5,88	10,43	1,33
30°30'S	70°00'O	4170	-1,55	3,46	-6,56
31°00'S	70°00'O	3711	-0,26	4,98	-5,49
31°30'S	70°30'O	3395	-0,05	4,67	-4,78
31°30'S	70°00'O	3415	0,98	6,44	-4,48
32°00'S	70°00'O	3357	0,55	5,33	-4,24
32°30'S	70°00'O	3696	-1,31	-3,29	-5,91

análisis geomorfológicos y microtexturales de granos de cuarzo con microscopio electrónico (Trombotto 1991).

Los procesos periglaciales característicos incluyen: geliflujión (con permafrost en subsuelo) (Fig. 2c), y/o soliflujión (sin certidumbre de permafrost en profundidad), crioplanación, nivación, reptación (de permafrost, capa activa o suelo), selección vertical y horizontal, crioturberización, criome teorización y criofragmentación.

Regiones Geocriológicas

El Cuadro 2 resume las características de las regiones geocriológicas determinadas para los Andes Secos (28°-33° S) de la provincia de San Juan, elaboradas de acuerdo con las duraciones y extensiones de los periodos de congelamiento estacionales y anuales (Fig. 3). Las principales regiones geocriológicas identificadas son las siguientes:

- Congelamiento Perenne (CP; TMAA <0 °C; TMA EC<0 °C y TMA EF<0 °C)
- Descongelamiento Estacional (DE; TMAA<0 °C; TMA EC>0 °C)
- Congelamiento Estacional (CE; TMAA>0 °C; TMA EF<0 °C)

Sin embargo, las regiones geocriológicas no muestran límites abruptos, sino que representan zonas de transición en las que es posible que tanto el congelamiento como el descongelamiento estacional esté subordinado al proceso, pudiendo encontrar formas y procesos diferentes a una misma altitud. Las zonas de transición se

detallan en el Cuadro 4 y figuras 4 a 9:

- Congelamiento perenne y descongelamiento estacional subordinado (CP/DE)
 - Descongelamiento estacional y congelamiento estacional subordinado (DE/CE) y Congelamiento estacional y descongelamiento estacional subordinado (CE/DE)
- La figura 7 representa la extensión espacial de las distintas regiones geocriológicas discriminadas en el área de estudio. La figura 7b muestra un perfil generalizado O-E para el sector cordillerano de la provincia de San Juan. En el mismo, se observa una tendencia creciente hacia el este de los límites de cada región, pero es mucho más marcada para el caso de la zona con congelamiento estacional. Latitudinalmente los límites de las regiones geocriológicas (Fig. 7c) son más estables y responden de manera más clara a la variación lati-altitudinal de las distintas isotermas de temperatura media anual del aire (TMAA). Sin embargo, un límite muy claro se observa a los 31°S, correspondiendo a la separación entre Andes Desérticos (al Norte de 31°S) y Andes Centrales (Cuadro 5).

DISCUSIÓN

Modelo regional de temperatura

La utilización de grillas con datos de reanálisis para la obtención de modelos regionales climáticos es una metodología útil, provee de variables climáticas con

continuidad espacial y temporal, especialmente sobre terrenos complejos e inaccesibles. Sin embargo, está sujeta a numerosas fuentes de error. En primer lugar, la baja resolución espacial del set de datos de reanálisis NCEP-CSFR (0,5°) impide la resolución o visualización de fenómenos climáticos locales, aún después de efectuar un *downscaling*. Por otro lado, el gradiente térmico vertical utilizado (-6,5 °C/1000 m) es un valor estándar que representa condiciones de atmósfera saturada (ca. 50 % humedad), que podría no responder correctamente a las condiciones de baja humedad de los Andes Secos. Son pocas las referencias que existen sobre valores locales para esta tasa: en la zona del proyecto Pascua Lama (29°20' LS y 70° O, a 4300 m s.n.m.), se estiman gradientes anuales de -8,4 °C/1000 m a -7,7 °C/1000 m (Claypool y Arenson 2009). Sin embargo, Schauwecker *et al.* (2011), encontraron que en la localidad Ojos de Agua (Chile, 32°48' S y 70°11' O) el valor del gradiente varía entre -6,0 °C a -7,0 °C/1000 m de manera diaria, pero que una media de -6,5 °C/1000 m puede ser asumida para estudios de escala anual o mayor.

Es notoria la falta de instrumental y registros meteorológicos en esta extensa porción de los Andes. Los resultados del modelo climático regional sólo pudieron ser contrastados con dos registros históricos en los Andes Desérticos y tres estaciones en los Andes Centrales. Estos resultados fueron publicados previamente en Tapia y Trombotto (2017). De acuerdo con el citado trabajo, en las estaciones de los Andes Desérticos se registraron altas correlaciones entre los datos registrados por las estaciones meteorológicas y los datos brindados por la grilla NCEP-CSFR. En el caso de los valores de temperatura del aire mensuales, la correlación lineal (R^2) oscila entre 0,82 a 0,93, con errores porcentuales acumulados medios (EPAM) de 4,4 y 6 %, con desvíos estándar (σ) de 2,13 °C. Las estaciones de los Andes Centrales mostraron también altas correlaciones de valores de temperatura del aire ($R^2=0,82$ a 0,84), con EPAMs entre 2 y 5% y σ entre -2,3° a 5 °C. Si se opta por aplicar el desvío estándar obtenido para los Andes Desérticos, en el modelo regional de temperatura del aire, los límites de

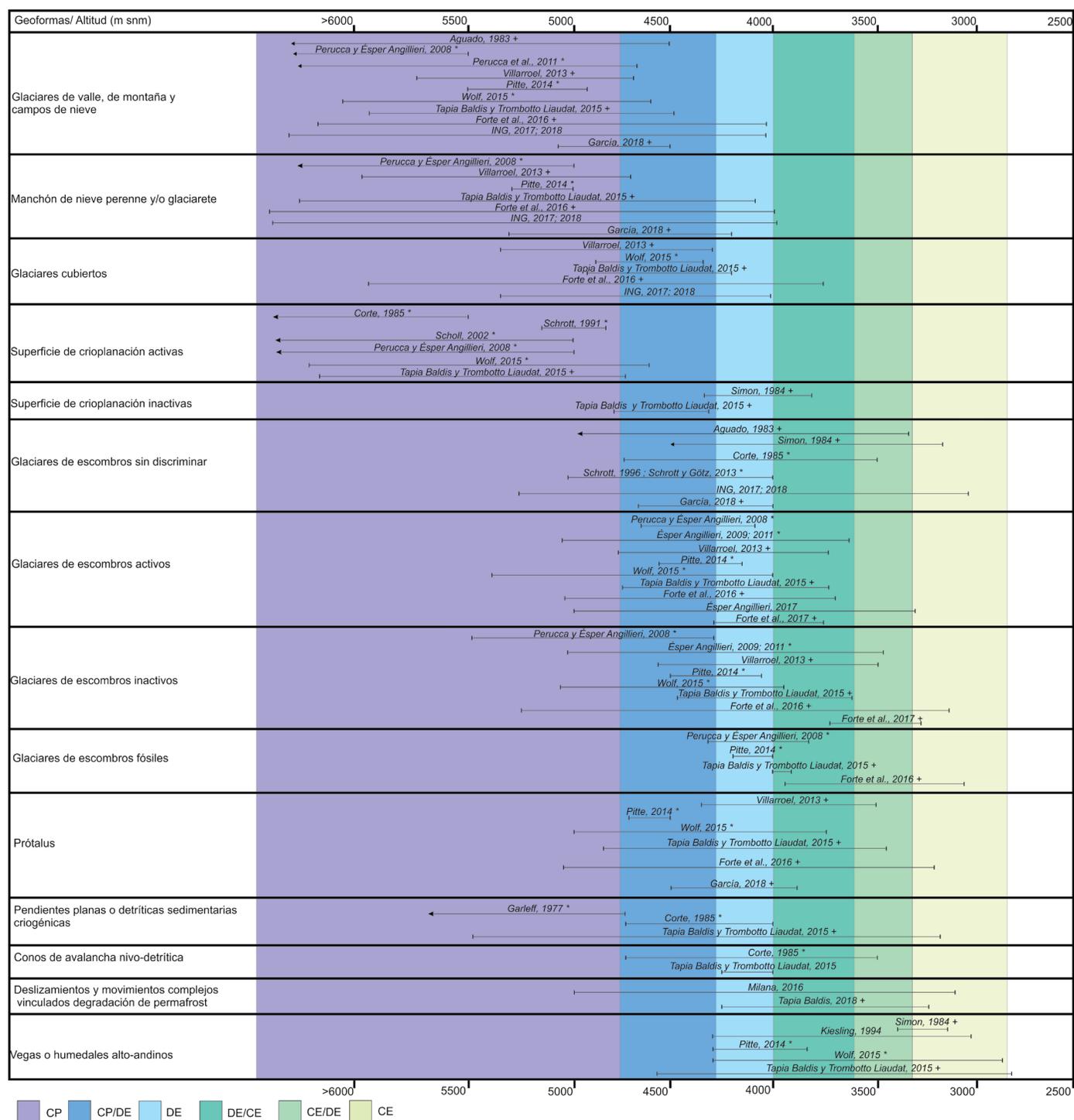


Figura 4. Geoformas glaciales, nivales y periglaciales recopiladas a partir de los antecedentes bibliográficos en el área de estudio (véase Cuadro 1). Los trabajos fueron ordenados cronológicamente y clasificados de acuerdo con las regiones geocriológicas establecidas en este estudio. Las barras horizontales representan el rango altitudinal (máximo y mínimo), expresado en m s.n.m., reportado en cada publicación por geoforma. CP: congelamiento perenne; CP/DE: congelamiento perenne (descongelamiento estacional subordinado); DE: descongelamiento estacional; DE/CE: descongelamiento estacional (congelamiento estacional subordinado); CE/DE: congelamiento estacional (descongelamiento estacional subordinado); CE: congelamiento estacional. + Geoformas encontradas en Andes Centrales. *Indicadores para los Andes Desérticos. Sin símbolo: geoformas para los Andes Centrales y Desérticos en conjunto.

las regiones geocriológicas concuerdan con las referencias recogidas en Scholl (2002) y Garleff y Stingl (1986). Esto significa que el modelo regional de tempera-

tura del aire estaría representando, en el sector de los Andes Desérticos, valores de TMAA 2,13 °C más bajos que lo registrado *in situ* por las estaciones meteorológicas

consultadas en Tapia y Trombotto (2017). La mayor disponibilidad de instrumental en alta montaña permitiría, sin duda, un mejor ajuste del modelo regional de tem-

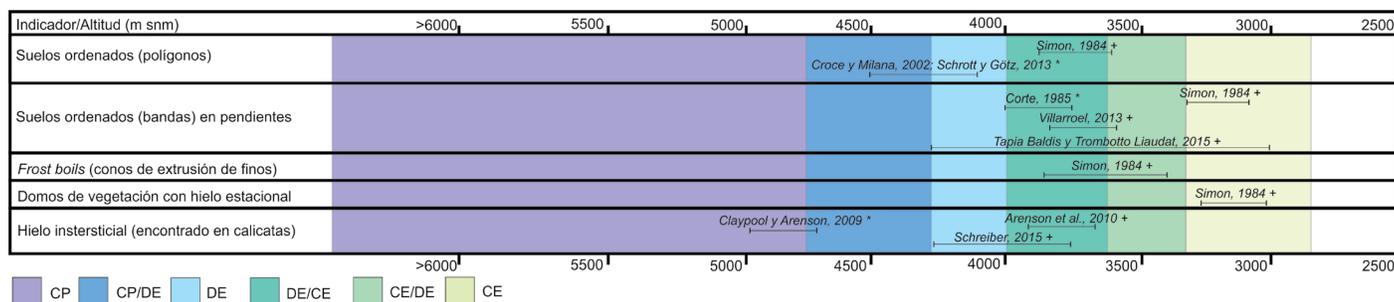


Figura 5. Indicadores periglaciales recopilados a partir de los antecedentes bibliográficos en el área de estudio. Referencias: ver figura 4.

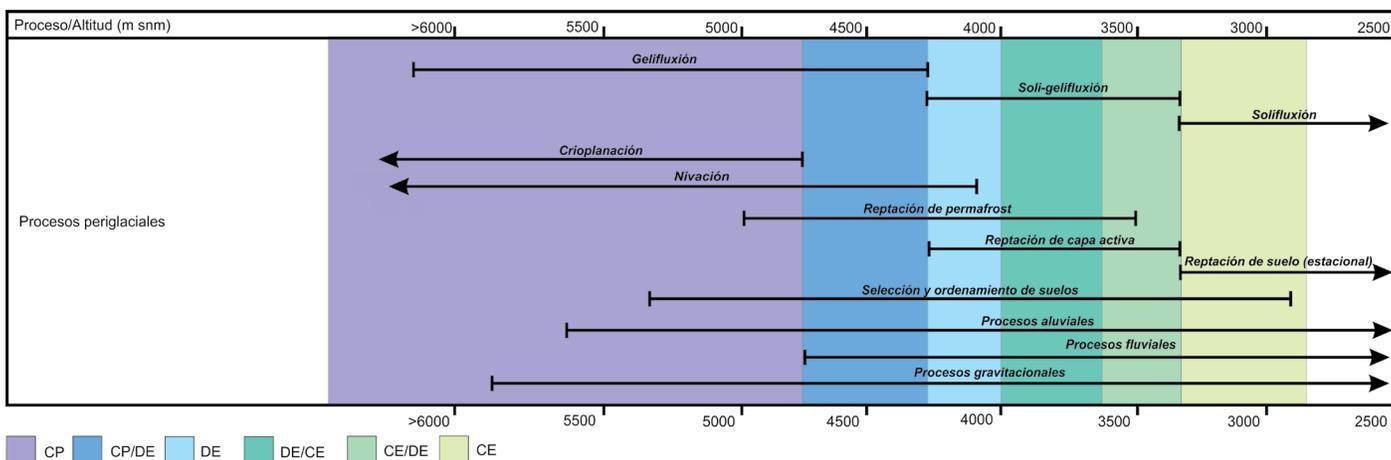


Figura 6. Procesos periglaciales recopilados a partir de los antecedentes bibliográficos en el área de estudio. Referencias: ver figura 4.

peratura del aire utilizado en este trabajo a las características climáticas locales.

Límite inferior del ambiente periglacial y extensión del permafrost

Estudios previos (Trombotto *et al.* 1999) consideran que la altitud de la isoterma de 0 °C puede expresar el límite del permafrost de montaña y del ambiente periglacial en los Andes Centrales y Desérticos. Este valor, representa el límite inferior de la región de Descongelamiento Estacional (DE), bajo la cual condiciones climáticas críóticas persisten la mayor parte del año, a excepción de la estación cálida donde el balance térmico es positivo. La altura media de la isoterma de 0 °C, empleando el nivel de referencia a 2 m sobre el terreno, interpolada para el sector de los Andes Centrales (28° a 31° S) es de 3700 ± 215 m s.n.m., mientras que en los Andes Desérticos (31° a 33° S) es de 3960 ± 160 m s.n.m. La altitud media de la isoterma de 0 °C en los Andes Secos (28° a 33° S) es de 3900 ± 70 m s.n.m. (Fig. 3). De acuerdo con la clasificación y carac-

terización de las regiones geocriológicas, los procesos y geoformas propias del ambiente periglacial se extienden hasta los 3700 m s.n.m. en los Andes Desérticos y hasta los 3400 m s.n.m. en los Andes Centrales, correspondiendo a isotermas de 0 a 2 °C, respectivamente. Estas alturas representan los límites de la región de Descongelamiento Estacional (DE) en los Andes Desérticos, con predominio de escenarios más fríos la mayor parte del año, con condiciones de Congelamiento Estacional (CE) subordinadas a años extremadamente cálidos o en microclimas locales. En los Andes Centrales, el ambiente periglacial desciende altitudinalmente 300 m en relación con su contraparte septentrional, mostrando aún características propias de la región geocriológica DE, pero subordinadas a CE.

La región denominada CE/DE respondería a condiciones de transición entre el ambiente periglacial y el no periglacial. Es posible que bajo condiciones climáticas más cálidas se transforme en una zona con CE dominante y, bajo escenarios fríos, los procesos de DE prevalezcan.

Geoformas y procesos periglaciales

Se considera que las crioformas con permafrost reptante como los glaciares de escombros, pueden descender localmente el límite del permafrost, donde es posible que persistan aún bajo tendencias de temperatura media anual del aire (TMAA) levemente positivas, situación destacada hace tiempo por Trombotto *et al.* (1997, 1999); Azócar y Brenning (2010) y Martini *et al.* (2013). Para comprobar este punto, se buscó conocer el límite inferior del permafrost reptante en la zona de estudio. Hasta el momento, la base de datos más completa, publicada y de consulta libre, de glaciares de escombros activos e inactivos en el sector de estudio es la del Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial (ING). Para la provincia de San Juan el ING elaboró 7 mapas distribuidos en las subcuencas de los sistemas hídricos de los ríos San Juan y Jáchal (ING, 2017; 2018). Entre las mesoformas periglaciales se incluyeron sólo glaciares de escombros (activos e inactivos) cuya superficie fuese mayor a 1 ha. Se analizaron los glaciares

CUADRO 4. Características de las regiones geocriológicas definidas para los Andes Secos de San Juan.

Región Geocriológica	Características	Procesos	Geoformas	Región Equivalente
Congelamiento Perenne	TMAA <0 °C TMA EC<0 °C TMA EF<0 °C Ciclos C/D multi-decadales a centenales. Menos de 12 horas diarias con temperaturas >0 °C. Transferencia de calor por procesos convectivos limitada. Transferencia de calor por cambio de fase poco importante. Alta probabilidad de permafrost	- Geliflujión - Crioplanación y nivación - Gelifracción y criometeorización - Selección y ordenamiento de criosedimentos - Crecimiento de hielo intersticial y masivo - Permafrost <i>in situ</i> - Reptación de permafrost en casos aislados - Desarrollo limitado de activa sobre terrenos con permafrost, de escasos cm de espesor. - Procesos glaciales > periglaciales - Procesos aluviales y gravitacionales - Sin vegetación	- Glaciares de valle y de montaña +++ - Glaciares cubiertos ++ - Glaciaretos +++ - Manchones de nieve perennes +++ - Superficies de crioplanación activas +++ - Glaciares de escombros activos - - - Glaciares de escombros inactivos - - Prótalus lobulados - - Pendientes detríticas criogénicas sedimentarias + - Superficies de ruptura de deslizamientos y movimientos complejos vinculados a degradación de permafrost - - Morenas con núcleo de hielo	Piso Nival (Garleff 1977) Región Glacial (Corte 1983) Región de permafrost continuo (Saito <i>et al.</i> 2016)
Congelamiento Perenne (Descongelamiento Estacional Subordinado)	Alta probabilidad de permafrost	- Geliflujión - Nivación - Gelifracción y criometeorización - Selección y ordenamiento de criosedimentos - Crecimiento de hielo intersticial y masivo - Permafrost <i>in situ</i> - Reptación de permafrost (creeping permafrost) - Capa activa de decenas de cm de espesor - Procesos glaciales > periglaciales - Procesos aluviales, fluviales y gravitacionales.	- Glaciares de valle y de montaña + - Glaciares con cubierta de detritos +++ - Manchones de nieve perennes ++ - Superficies de crioplanación inactivas + - Glaciares de escombros activos + - Glaciares de escombros inactivos - - Prótalus lobulados ++ - Prótalus rampart + - Pendientes detríticas criogénicas sedimentarias ++ - Conos de avalancha nivo-detrítica + - Suelos ordenados (polígonos) ++ - Depósitos de remoción en masa con criogénesis secundaria + - Superficies de ruptura de deslizamientos y movimientos complejos vinculados a degradación de permafrost + - Vegas y humedales alto-andinos -	Región Paraglacial (Corte 1983) Región de permafrost continuo (Saito <i>et al.</i> 2016)
Descongelamiento Estacional	TMAA <0 °C TMA EC>0 °C Ciclos C/D estacionales. Predominio de condiciones frías la mayor parte del año, descongelamiento sólo en la estación cálida. Derretimiento de cuerpos de nieve no perenne en la estación cálida. Transferencia de calor por convección en superficies blocosas de fábrica abierta.	- Soli-geliflujión - Nivación - Gelifracción y criometeorización - Selección y ordenamiento de criosedimentos - Reptación de permafrost (creeping permafrost) - Capa activa de 1 a 3 m de espesor (1) - Reptación de capa activa - Crecimiento de hielo intersticial y masivo - Procesos periglaciales > glaciales > aluviales, fluviales y gravitacionales.	- Glaciares de valle de y de montaña - - - Manchones de nieve perenne - - - Glaciaretos - - - Glaciares cubiertos - - Superficies de crioplanación inactivas + - Glaciares de escombros activos +++ - Glaciares de escombros inactivos +++ - Glaciares de escombros fósiles + - Prótalus lobulados ++ - Prótalus rampart +++ - Pendientes detríticas criogénicas ++ - Conos de avalanchas nivo-detríticas +++ - Suelos ordenados (polígonos) + - Suelos ordenados (bandas) en pendientes +++ - Depósitos de remoción en masa con criogénesis secundaria + - Superficies de ruptura de deslizamientos y movimientos complejos vinculados a degradación de permafrost ++ (2) - Vegas y humedales alto-andinos +	Región geocriológica (Corte 1983)
Descongelamiento Estacional (Congelamiento Estacional Subordinado)	Percolación de agua de fusión nival. Probabilidad media de permafrost.	- Soli-geliflujión - Gelifracción y criometeorización - Selección y ordenamiento de criosedimentos - Crecimiento de hielo intersticial y masivo - Reptación de permafrost (creeping permafrost) - Capa activa >3 m de espesor (1) - Reptación de capa activa - Procesos periglaciales > glaciales > aluviales, fluviales y gravitacionales	- Glaciares cubiertos - - - - Superficies de crioplanación inactivas - - Glaciares de escombros activos +++ - Glaciares de escombros inactivos +++ - Glaciares de escombros fósiles + - Prótalus lobulados + - Prótalus rampart +++ - Pendientes detríticas criogénicas sedimentarias ++ - Conos de avalanchas nivo-detríticas + - Suelos ordenados (polígonos) + - Suelos ordenados (bandas) en pendientes +++ - Frost boils (conos de extrusión de finos) + - Superficies de ruptura de deslizamientos y movimientos complejos vinculados a degradación de permafrost ++ - Depósitos de remoción en masa con criogénesis secundaria + - Depósitos aluviales + - Depósitos fluviales + - Vegas y humedales alto-andinos +++	Región de permafrost discontinuo (Saito <i>et al.</i> 2016)

CUADRO 4 (cont.). Características de las regiones geocriológicas definidas para los Andes Secos de San Juan.

Región Geocriológica	Características	Procesos	Geoformas	Región Equivalente
Congelamiento Estacional (Descongelamiento Estacional Subordinado)	TMAA >0 °C; TMA EF<0 °C Ciclos de C/D estacionales Predominio de condiciones cálidas la mayor parte del año, congelamiento sólo en la estación fría. La nieve se licúa totalmente en primavera y verano.	- Soli-geliflujión - Gelifracción y criometeorización - Selección y ordenamiento de criosedimentos - Capa activa de >6 m de espesor - Reptación de capa activa - Procesos aluviales, gravitacionales y fluviales > periglaciales	- Sin cuerpos de nieve perenne (3) - Glaciares de escombros inactivos ++ - Glaciares de escombros fósiles + - Glaciares de escombros activos - - Prótalus rampart + - Pendientes detríticas criogénicas sedimentarias + - Conos de avalanchas nivo-detríticas + - Depósitos de remoción en masa ++ - Depósitos aluviales + - Depósitos fluviales + - Vegas y humedales alto-andinos +++	Región Para-geocriológica o Para-periglacial (Corte 1983)
Congelamiento Estacional	Descongelamiento activo luego de cada nevada, aún en invierno. Permafrost muy poco probable	- Soliflujión - Selección y ordenamiento de suelos - Reptación de suelo (estacional), asociado a formas de soliflujión. - Procesos aluviales, fluviales y gravitacionales dominantes	- Glaciares de escombros fósiles - - Glaciares de escombros inactivos - - - Prótalus ramparts (inactivos) - - - - Pendientes detríticas criogénicas - - Suelos ordenados (bandas) en pendientes + - Suelo congelado durante los meses invernales - Domos de vegetación con hielo estacional ++ - Vegas y humedales alto-andinos + - Depósitos de remoción en masa +++ - Depósitos aluviales +++ - Depósitos fluviales ++ - Vegas y humedales alto-andinos ++	

Los símbolos “+” y “-” indican la abundancia de la geoforma en la región: +++ (Muy frecuente, dominante), ++ (Muy frecuente), + (frecuente), - (Poco frecuente), - - (Raro), - - - (casos aislados o anómalos). 1) De acuerdo a estudios geofísicos de Croce y Milana (2002); Arenson *et al.* (2010); Villarroel *et al.* (2016); Halla *et al.* (2018). (2) Corresponde a la altitud promedio de las superficies de ruptura de movimientos en masa vinculados a una posible degradación de permafrost o procesos por falla de capa activa, según D’Orico *et al.* (2009); Perucca y Éesper Angillieri (2009); Milana (2016); Tapia Baldis y Trombotto Liaudat (2016). (3) Sólo se producen acumulaciones de nieve invernales con desarrollo de nichos de deflación (Garleff 1977).

de escombros mapeados por el ING (3318 polígonos), de los cuales 2494 polígonos corresponden a glaciares activos y 825 polígonos, a glaciares inactivos. No se incluyeron las formas de génesis no determinada (categoría de mapeo “Glaciar cubierto con glaciar de escombros”). La figura 8 muestra una comparación de la ubicación de los frentes de los glaciares de escombros activos e inactivos respecto a la variación lati-altitudinal y longi-altitudinal de las regiones geocriológicas. La región en la que se desarrollan los glaciares de escombros puede limitarse a una franja comprendida entre 3400 y 5300 m s.n.m., mostrando una mayor concentración de cuerpos en los Andes Centrales. No se encontraron diferencias significativas para la altitud mínima entre glaciares de escombros activos e inactivos. En los Andes Desérticos, la altitud mínima promedio de los frentes, tanto de glaciares de escombros activos como inactivos, es de 4000 m s.n.m., con valores extremos de 3350 m s.n.m. En los Andes Centrales, la altitud mínima promedio de glaciares de escombros activos e inactivos es de 3700 m s.n.m., con valores extremos entre 3300 y 3050 m s.n.m. De los 3318 glaciares de escombros, el 28,75 % se desarrolla la

región de Congelamiento Perenne (CP), un 66,73 % en la región de Descongelamiento Estacional (DE) y un 4,52 % de las observaciones (150 cuerpos) existe en la región de Congelamiento Estacional (CE), donde el balance de temperatura es positivo la mayor parte del año. De acuerdo a lo resumido en el Cuadro 4, las regiones con Congelamiento Perenne (CP o CP/DE), presentan una alta probabilidad de permafrost y capas activas muy delgadas, de sólo decenas de cm de espesor. Si hay descongelamiento estacional

subordinado (CP/DE), el permafrost puede reptar (Fig. 6), lo que explica la aparición de geoformas como los glaciares de escombros a partir de este límite (28,75 % de casos en CP). En las regiones DE, la capa activa alcanza un mayor espesor (Cuadro 4). Los movimientos de reptación involucran tanto a la capa activa como al permafrost y, son las regiones DE las que exhiben el mejor desarrollo de geoformas con permafrost reptante, como los glaciares de escombros (66,73 % de los casos). En las regiones CE hay aún bajas posibi-

CUADRO 5. Pisos inferiores para las regiones geocriológicas en los Andes y Precordillera sanjuanina, de acuerdo con los valores modales de altitud y la temperatura media anual del aire (TMAA, °C).

Región Geocriológica	TMAA (°C)		
	Límite inferior (m s.n.m.)	Andes Desérticos (28° a 31° S)	Andes Centrales (31° a 33° S)
Congelamiento Perenne	>4800	< -4	<-6
Congelamiento Perenne (<i>Descongelamiento Estacional Subordinado</i>)	4800 a 4300	-4 a -2	-6 a -4
Descongelamiento Estacional	4300 a 4000	-2 a 0	-4 a -2
Descongelamiento Estacional (<i>Congelamiento Estacional Subordinado</i>)	4000 a 3700	0 a 2	-2 a 0
Congelamiento Estacional (<i>Descongelamiento Estacional Subordinado</i>)	3700 a 3400	No periglacial	0 a 2
Congelamiento Estacional	3400 a 2800	No periglacial	No periglacial

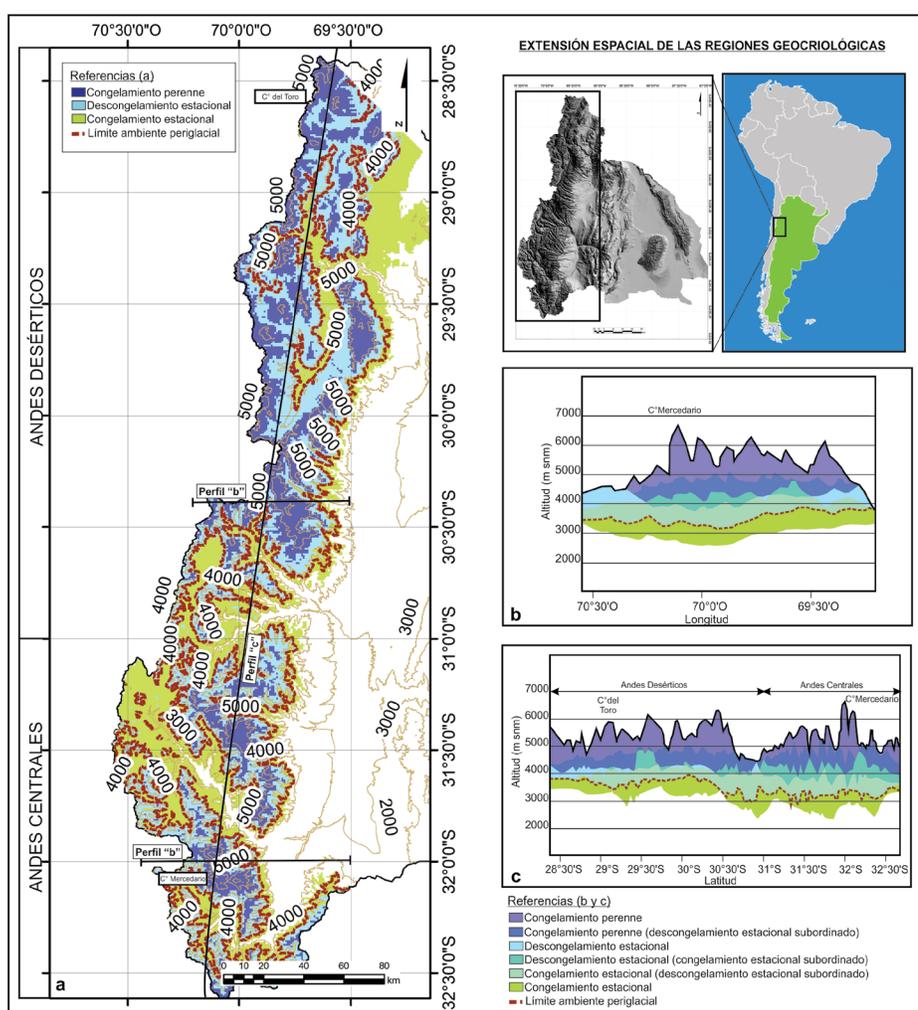


Figura 7. a) Extensión espacial de las regiones geocriológicas, de 28° a 33° de latitud Sur y 70°30' a 69° de longitud Oeste. b) Perfil longitudinal generalizado entre 70°30' y 69° O, incluyendo sólo la región cordillerana. c) Perfil latitudinal generalizado de los Andes sanjuaninos entre 28° y 33° S, señalando el límite entre Andes Desérticos y Centrales (ca. 31° S). En ambos casos la línea punteada rojiza señala el límite entre el ambiente periglacial y no-periglacial (3400-3700 m s.n.m.), de acuerdo a las condiciones climáticas actuales (véase Discusión).

lidades de encontrar permafrost a mayor profundidad, puesto que la capa activa suele alcanzar más de 6 m de espesor (Cuadro 4). Los glaciares de escombros son poco comunes (4,52 % de los casos) pero pueden estar ubicados en topografías que favorezcan los microclimas fríos. Además, se encontró que el valor límite de la TMAA en el frente de glaciares de escombros tanto activos como inactivos es de 1,3 °C en los Andes Secos de San Juan (Tapia Baldis 2018). Sin embargo, un bajo número de glaciares de escombros (n=28) presentan su frente a más de 1,3 °C y están ubicados en regiones térmicamente desfavorables (CE/DE en los Andes Centrales). Es posible que estos casos, identificados como formas activas e inactivas, representen glaciares de es-

combros fósiles (sin permafrost), cuerpos con permafrost muy degradado o cuerpos posiblemente identificados erróneamente como glaciares de escombros (e.g. morenas, geofomas producto de procesos de remoción en masa o formas incipientes). Las superficies de crioplanación son también un excelente indicador de permafrost *in situ* (no reptante), generadas por procesos criogénicos de meteorización, acompañados por procesos de erosión nival en manchones de nieve perennes y nichos de nivación, que dan como resultado la formación de superficies casi horizontales (Corte 1987). Según Scholl (2002), las superficies de crioplanación se ubican sobre 5000 m s.n.m. en los Andes Desérticos de San Juan, sin embargo, los antecedentes recopilados en este

trabajo señalan que las formas activas pueden descender hasta 4800 m s.n.m. y las inactivas hasta 4500 m s.n.m. Estos valores representan siempre condiciones de congelamiento perenne (CP) e incluso CP con descongelamiento estacional subordinado (CP/DE) (Fig. 6). Otra geofoma utilizada como indicadora de permafrost *in situ* son las morenas con núcleo de hielo. Aguado (1983) y Wolf (2015) mencionan que es posible encontrar este tipo de cuerpos tanto en los Andes Centrales como en los Desérticos, sin embargo, se requieren más estudios para ubicar y caracterizar estos elementos en detalle.

Extensión del permafrost

Al comparar los resultados obtenidos a través de indicadores geocriogénicos con modelos probabilísticos de permafrost se presentan dos situaciones. En primer lugar, el modelo de Gruber (2012), quizás el más empleado en estudios regionales, estima una alta probabilidad de permafrost por encima de 4500 m s.n.m. y probabilidades medias por encima de 4000 m s.n.m. (Cuadro 2). Esto deja de lado, en las regiones de permafrost poco probable (hasta 3700 m s.n.m.), a una gran mayoría de geofomas indicadoras de permafrost en la actualidad. La explicación para este comportamiento debe buscarse en los valores de calibración para las categorías de permafrost. Este modelo se elaboró teniendo en cuenta las clases definidas de acuerdo a los estándares del mapa internacional de la *International Permafrost Association* (IPA) para el hemisferio norte (Brown *et al.* 1997), teniendo entonces: permafrost posible con TMAAs menores a -7 o -8 °C y permafrost discontinuo esporádico con TMAAs inferiores a -1 o -2 °C. Al trasladar estos valores a la región de los Andes Secos, la extensión de permafrost resulta subestimada. Discrepancias similares fueron encontradas también por García *et al.* (2017) en la región de Atacama (Chile) y por Azócar *et al.* (2017) en los Andes semi-áridos de Chile. Por tal motivo, hemos comparado nuestros hallazgos con un modelo probabilístico, calibrado y ajustado para nuestra zona de estudio (Tapia Baldis y Trombotto Liaudat 2019). La figura 9 exhibe la extensión de las

clases probabilísticas de permafrost junto con las regiones geocriológicas, de acuerdo con los pisos altitudinales del Cuadro 2 (Modelo 2). En este caso, una alta probabilidad de permafrost es esperable por encima de 4200 m s.n.m. y probabilidades medias por encima de 3400 m s.n.m. El permafrost probable, de acuerdo al Modelo 2, se extiende hasta el límite de los procesos de descongelamiento estacional, dentro de las zonas transicionales DE/CE (Andes Desérticos) y CE/DE (Andes Centrales), mostrando concordancia con los datos expuestos previamente. En las regiones CE/DE y CE la probabilidad de permafrost, bajo condiciones climáticas actuales, es muy baja o nula. Sin embargo, no se descarta la presencia de paleopermafrost. Por ejemplo, Saito *et al.* (2016), proponen en un escenario de extensión de permafrost hace 21 ka; en el mismo, el permafrost discontinuo habría alcanzado aproximadamente los 3000 m s.n.m. a 33° S. De acuerdo a lo expuesto en el trabajo de Tapia Baldis (2018), el permafrost probable para la misma época se habría extendido hasta los 2800 m s.n.m. a los 31° S. Estos valores pueden ser contrastados con las altitudes mínimas alcanzadas por los glaciares de escombros fósiles. Los glaciares de escombros fósiles son geformas sin permafrost y, por ende, sin hielo subterráneo. De acuerdo con los antecedentes recogidos en este trabajo (Perucca y Éspér Angillieri 2008, Pitte 2014, Tapia Baldis y Trombotto Liaudat 2015, Forte *et al.* 2016), los frentes de los glaciares de escombros fósiles habrían alcanzado 3000 m s.n.m. Es necesario recalcar que los estudios referidos a estas geformas son mucho más escasos y de menor detalle que sus contrapartes activas e inactivas.

CONCLUSIONES

El presente trabajo presenta una propuesta para la delimitación del ambiente periglacial en los Andes Secos (28°-33° S) de la provincia de San Juan, tomando en cuenta sus tres componentes fundamentales: a) dominio de procesos de congelamiento, b) geformas y procesos periglaciales característicos y c) posible presencia de permafrost. Cada uno de

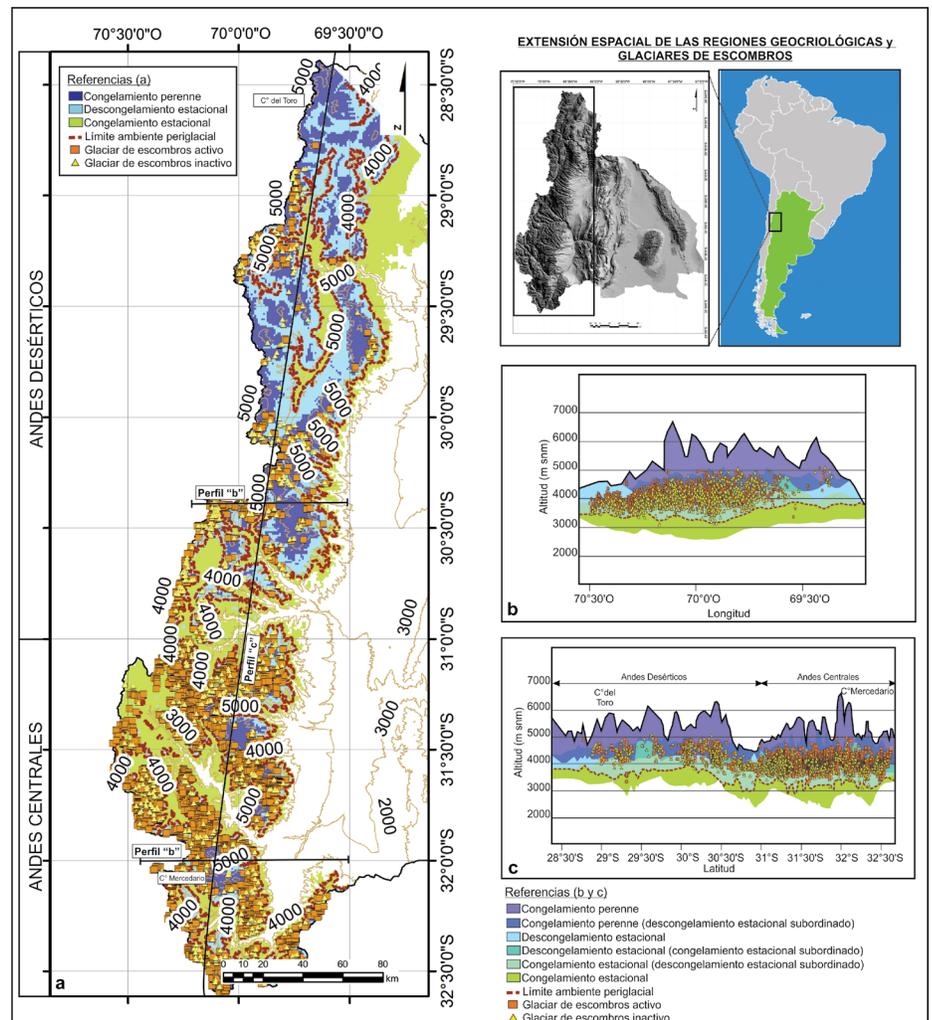


Figura 8. a) Distribución regional de los glaciares de escombros activos e inactivos identificados en la provincia de San Juan por el ING (2017; 2018). Los cuadros naranjas representan la altitud del frente de los glaciares de escombros activos. Los triángulos amarillos representan la altitud del frente de los glaciares de escombros inactivos; b) Perfil longitudinal generalizado entre 70°30' y 69° O, incluyendo sólo la región cordillerana, mostrando la predominancia de glaciares de escombros (activos e inactivos) en las regiones CP/DE, DE, DE/CE y, en forma subordinada, CE/DE. c) Perfil latitudinal generalizado de los Andes sanjuaninos entre 28° y 33° S, señalando el límite entre Andes Desérticos y Centrales (ca. 31° S). Los glaciares de escombros (activos e inactivos) predominan en las regiones CP/DE, DE, DE/CE y, en forma subordinada, CE/DE. En ambos casos la línea punteada rojiza señala el límite entre el ambiente periglacial y no-periglacial (3400-3700 m s.n.m.), de acuerdo a las condiciones climáticas actuales (véase Discusión).

estos parámetros fue determinado de manera independiente en base a la elaboración de un modelo regional de temperatura; en base al análisis y discriminación de geformas y procesos periglaciales recopilados de distintas contribuciones históricas (incluyendo contribuciones propias), efectuados a distintas escalas de trabajo y, en base a la comparación con modelos regionales probabilísticos de distribución de permafrost. Estas contribuciones fueron clasificadas en un modelo de regiones geocriológicas que explica los procesos periglaciales y geformas resultantes en cada región, de acuerdo con la

extensión espacial y temporal del congelamiento. Asimismo, se observó una alta concordancia de los datos recopilados en este estudio con el modelo probabilístico de presencia de permafrost calibrado con datos regionales y, una menor correlación con los modelos de probabilidad de permafrost de escala global.

El ambiente periglacial en los Andes Secos de la provincia de San Juan está conformado por las siguientes regiones geocriológicas:

- Congelamiento perenne (CP; TMAA <0 °C; TMA EC <0 °C y TMA EF <0 °C)
- Congelamiento perenne y descongela-

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado a través del Proyecto PIP 1222015-01000913-CO, otorgado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Inestimable fue la colaboración de Martín Mendoza, Ivanna Pecker, José Hernández, Pablo Gutiérrez y Federico Otero. Los autores agradecen al Dr. Mateo Martini, a un revisor anónimo y a la editora Dra. Alfonsina Tripaldi, cuyos comentarios y sugerencias permitieron enriquecer esta contribución.

REFERENCIAS

Aguado, C.J. 1983. Comparación de glaciares de la cuenca del río de Los Patos con otros inventarios de los Andes Centrales de Argentina, con énfasis en glaciares de escombros. *Actas de la Primera reunión del grupo periglacial argentino: 3-87*, Mendoza.

Ambrosetti, J., Del Vito, F. y Roig, F. 1986. La vegetación el paso de Uspallata, Provincia de Mendoza, Argentina. *Geobotanisches Institut ETH, Stiftung Rübel 91: 141-180*.

Arenson, L.U. y Jakob, M. 2010. A new GIS based Mountain Permafrost Distribution Model. *Proceedings 6th Canadian Permafrost Conference, Calgary*.

Arenson, L.U., Johansen, M.M. y Springman, S.M. 2004. Effects of volumetric ice content and strain rate on shear strength under triaxial conditions for frozen soil samples. *Permafrost and Periglacial Processes 15: 261-271*.

Arenson, L.U., Pastore, S., Trombotto, D., Bölling, S., Quiroz, M.A. y Ochoa, X.L. 2010. Characteristics of two Rock Glaciers in the Dry Argentinean Andes based on Initial Surface Investigations. *Proceedings 6th Canadian Permafrost Conference, Calgary*.

Azócar, G.F. y Brenning, A. 2010. Hydrological and Geomorphological Significance of Rock Glaciers in the Dry Andes, Chile (27°-33°S). *Permafrost and Periglacial Processes 21: 42-53*.

Azócar, G.F., Brenning, A. y Bodin, X. 2017. Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes. *The Cryosphere 11: 877-890*.

Barsch, D. 1983 Problems of the delimitation of geomorphic belts on the east slope of the Cordillera Frontal. *Acta Simposio Geociología de las Américas: 18-22*, Mendoza.

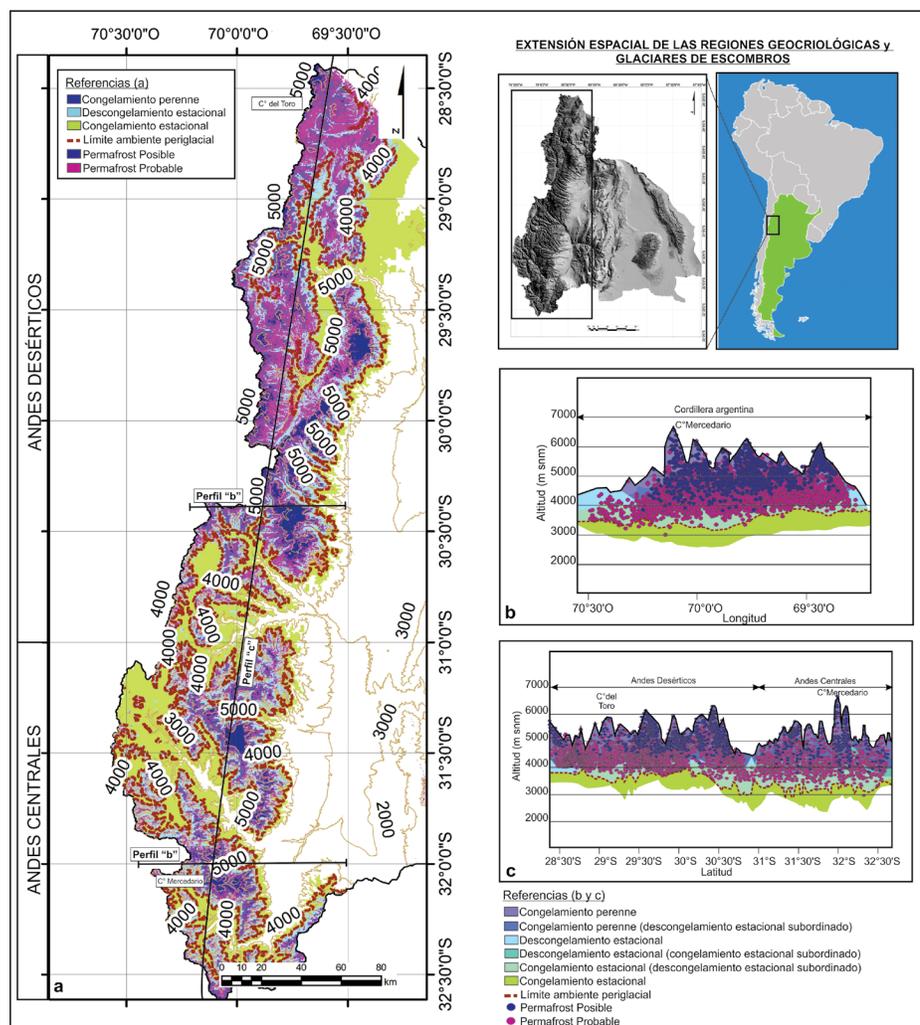


Figura 9. a) Distribución regional del permafrost de acuerdo al modelo probabilístico 2 (Tapia Baldi y Trombotto Liaudat 2019) (véase Cuadro 3) y extensión espacial de las regiones geocriológicas determinadas para este estudio; b) Perfil longitudinal generalizado entre 70°30' y 69° O, incluyendo sólo la región cordillerana, mostrando la distribución probabilística de permafrost de acuerdo con el modelo 2; c) Perfil latitudinal generalizado de los Andes sanjuaninos entre 28° y 33° S, mostrando la distribución probabilística de permafrost de acuerdo al modelo 2. En ambos casos los puntos azules indican alta probabilidad de permafrost (posible) y los puntos violetas, probabilidad media de permafrost (probable). La línea punteada rojiza señala el límite entre el ambiente periglacial y no-periglacial (3400-3700 m s.n.m.), de acuerdo con las condiciones climáticas actuales (véase Discusión).

miento estacional subordinado (CP/CE)
 - Descongelamiento estacional (DE; TMAA < 0 °C; TMA EC > 0 °C)
 - Descongelamiento estacional y congelamiento estacional subordinado (DE/CE) y Congelamiento estacional y descongelamiento estacional subordinado (CE/DE)
 - Congelamiento estacional (CE; TMAA > 0 °C; TMA EF < 0 °C)
 El límite entre el ambiente glaciario y periglacial está representado por una zona de transición entre las regiones de congelamiento perenne y descongelamiento estacional (CP/DE), ubicado aproximadamente entre 4300 a 4800 m s.n.m., que corresponde a TMAAs entre -4 a -2 °C en

los Andes Desérticos y, a TMAAs entre -6 a -4 °C en los Andes Centrales. El límite entre el ambiente periglacial y no periglacial estaría marcado por la expresión de la región geocriológica de transición entre el congelamiento estacional y el descongelamiento estacional (CE/DE) y TMAAs de 0 a 2 °C, entre 4000 a 3700 m s.n.m. en los Andes Desérticos y, entre 3700 a 3400 m s.n.m. en los Andes Centrales. La metodología propuesta en este trabajo es factible de ser replicada y mejorada en futuras contribuciones, no sólo para la delimitación del ambiente periglacial sino para su caracterización y comprensión holística.

- Barsch, D. 1993. Periglacial Geomorphology in the 21st century. Binghamton Symposium on Geomorphology, 7: 141-163, New York.
- Brown, J., Christiansen, Ferrians, O.J., Hegnbottom, J.A. y Melnikov, E.S. 1997. Circum-artic map of permafrost and ground ice conditions. U.S. Geological Survey Circum-Pacific Map Series, CP-45: <http://nsidc.org/data/index.html>.
- Brozović, N., Burbank, D.W. y Meigs, A. 1997. Climatic Limits on Landscape Development in the Northwestern Himalaya. *Science* 276: 571-574.
- Bruniard, E. 1982. La diagonal árida argentina: un límite climático real. *Revista Geográfica* 95: 5-20.
- Cao, B., Gruber, S. y Zhang, T. 2017. REDCAPP (v1.0): Parameterizing valley inversions in air temperature data downscaled from re-analyses. *Geoscientific Model Development* 10: 2905-2923.
- Claypool, G. y Arenson, L. 2009. Estudio de caracterización del permafrost en la zona del Proyecto Pascua-Lama. Informe final. BGC Engineering Inc., 111 p., San Juan.
- Corte, A.E. 1983. Los conceptos: geocriogénico - parageocriogénico y glacial- paraglacial en los Andes Centrales de Argentina, latitud 30°. *Actas Primera Reunión del Grupo Periglacial argentino*: 48-66, Mendoza.
- Corte, A.E. 1985 Comparative study of geocriogenic (periglacial) conditions, features and processes in the Andes and Himalayas. The Andes. *Actas de la Primera Reunión Latinoamericana sobre la importancia de los procesos periglaciales y Tercera Reunión del Grupo Periglacial argentino*, 35-48, Mendoza.
- Corte, A.E. 1987. Central Andes rock glaciers: applied aspects. En: Giardino, J.R., Shroder, J.F. y Vitek, J.D. (eds.), *Rock glaciers*. Allen and Unwin, 303 p. Londres.
- Corte, A.E. 1997. Geocriología. *El Frío en la Tierra*. Ediciones Culturales de Mendoza, Fundar Editorial Gráfica, 398 pp. Mendoza.
- Corte, A.E. y Minetti, J.L. 1984. Zonificación latitudinal del clima en la zona andina y su relación con el límite inferior del hielo perenne (LHP) y del límite inferior geocriogénico. *Actas Segunda Reunión del Grupo periglacial argentino*: 129-144. San Juan.
- Croce, F. y Milana, J.P. 2002. Internal structure and behavior of a Rock Glacier in the Arid Andes of Argentina. *Permafrost and Periglacial Processes* 13: 289-299.
- De Martone, E. 1957. *Traité de Géographie Physique*, Colin, 920 p., París.
- D'Odorico, P.E., Pérez, D.J., Sequeira, N. y Fauqué, L. 2009. El represamiento y aluvión del río Santa Cruz, Andes Principales (31°40' S), provincia de San Juan. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 65: 713-724.
- Ésper Angillieri, Y. 2009. A preliminary inventory of rock glaciers at 30° S latitude, Cordillera Frontal of San Juan, Argentina. *Quaternary International* 195: 151-157.
- Ésper Angillieri, Y. 2011. Application of frequency ratio and logistic regression to active rock glacier occurrence in the Andes of San Juan, Argentina. *Geomorphology* 114: 396-405.
- Ésper Angillieri, M.Y. 2017. Permafrost distribution map of San Juan Dry Andes (Argentina) based on rock glacier sites. *Journal of South American Earth Sciences* 73: 42-49.
- Falvey, M. y Garreaud, R. 2007. Wintertime precipitation episodes in central Chile: Associated meteorological conditions and orographic influences. *Journal of Hydrometeorology* 8: 171-193.
- Fiddes, J. y Gruber, S. 2014. TopoSCALE v.1.0: downscaling gridded climate data in complex terrain. *Geoscience Model Development* 7: 387-405.
- Forte, A.P., Pitte, P. y Villarroel, C.D. 2016. Preliminary modelling of mountain permafrost on La Ramada range. Central Andes, San Juan, Argentina. *Book of Abstracts 11° International Conference on Permafrost*, 1030-1031, Postdam.
- Forte, A.P., Villarroel, C.D. y Tamburini Beliveau, G. 2017. Ambiente glacial y periglacial en el Cordón de la Ramada, Andes Centrales, Argentina. *Actas del 20° Congreso Geológico Argentino, Sesión Técnica* 18: 28-31. Tucumán.
- French, H.M. 2007. *The Periglacial Environment*. Third edition, John Wiley & Sons Ltd., 458 p., Chichester.
- García, J. 2018. Análisis de fluctuaciones en el glaciar cubierto-glaciar de escombros Calingasta y caracterización parcial del estado actual. Provincia de San Juan, Argentina. Trabajo final de licenciatura. Universidad Nacional de San Juan (Inédito), 128 p., San Juan.
- García, A., Milana, J.P. y Ulloa, C. 2017. Validación de un modelo teórico de distribución del permafrost en zonas áridas, utilizando el inventario de geoformas periglaciales (región de Atacama, Chile). *20° Congreso Geológico Argentino, Actas S18*: 37-43, San Miguel de Tucumán.
- Garleff, K. 1977. Höhenstufen der argentinischen Anden in Cuyo, Patagonien und Feuerland. *Göttinger Geographische Abhandlungen* (68), 150 p., Göttingen.
- Garleff, H. y Stingl, H. 1986. Geomorphologische Aspekte aktuellen und vorzeitlichen Permafrostes in Argentinien. *Zentralblattes für Geologie und Paläontologie* 1: 1367-1374.
- Gorbunov, A.P. 1978. Permafrost investigation in high-mountain regions. *Arctic and Alpine Research* 10: 283-294.
- Gruber, S. 2012. Derivation and analysis of a high-resolution estimate of global permafrost zonation. *The Cryosphere* 6: 221-223.
- Halla, C., Blöthe, J.H., Tapia Baldis, C., Hauck, C. y Schrott, L. 2018. Volumetric ice content in active rock glaciers derived from geophysical modeling (Central Andes of Argentina). *Book of Abstracts, European Conference on Permafrost*, 886-887, Chamonix.
- Inventario Nacional de Glaciares (ING). 2017. Informes de las subcuencas: cordillera Ansilta y Calingasta. Provincia de San Juan. IANIGLA – Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Inventario Nacional de Glaciares (ING). 2018. Informes de las subcuencas: Blanco inferior, Blanco, Castaño, La Palca y Los Patos. Provincia de San Juan. IANIGLA – Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Isacks, B., Jordan, T.E., Allmendiger, R.W. y Ramos, V.A. 1982. La segmentación tectónica de los Andes Centrales y su relación con la Placa de Nazca subductada. *5° Congreso Latinoamericano de Geología, Actas* 3, 587-606, Buenos Aires.
- Jahn, A. 1975. *Problems of the periglacial zone*, Warsaw, Poland, Panstwowe Wydawnictwo Naukowe, 223 p., Poland.
- Jordan, T.E., Isacks, B.L., Allmendiger, R.W., Brewer, J.A., Ramos, V.A. y Ando, C.J. 1983. Andean tectonics related to geometry of subducted Nazca Plate. *Geological Society of America, Bulletin* 94: 341-361.
- Kiesling, R. 1994. *Flora de San Juan*. Volumen 1. Vázquez Mazzini Editores, 348 pp., Buenos Aires.
- Köppen, W., 1936. Das geographische System der Klimate. En: Köppen, W. y Geiger, G. (eds.), *Handbuch der Climatologie* 1. Inc. Borntraeger Science Publishers, 44 p., Berlín.
- Liboutry, L. 1998. *Glaciers of Wet Andes*. En: Ferrigno, W.M.J. (ed.), *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*, US Government

- Printing Office, 109-206, Washington DC.
- Martini, M.A, Strelin, J.A. y Astini, R.A. 2013. Inventario y caracterización morfoclimática de los glaciares de roca en la Cordillera Oriental argentina (entre 22° y 25° S). *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 30: 569-581.
- Milana, J.P. 2016. Molards and their relation to landslides involving permafrost failure. *Permafrost and Periglacial Processes*, 20: 1-14.
- Montgomery, D.R., Balco, G. y Willet, S. 2001. Climate, tectonics, and the morphology of the Andes. *Geology* 29: 579-582.
- Perucca, L.P. y Éesper Angillieri, M.Y. 2008. A preliminary inventory of periglacial landforms in the Andes of La Rioja and San Juan, Argentina, at about 28° S. *Quaternary International* 190: 171-179.
- Perucca, L.P. y Éesper Angillieri, M.Y., 2009. Evolution of a debris-rock slide causing a natural dam: the flash flood of Río Santa Cruz, Province of San Juan—November 12, 2005. *Natural Hazards* 50: 305-320.
- Perucca, L.P., Esper Angillieri, M.Y. y Martos, L. 2011. Inventario de glaciares de escombros en el área del Proyecto del Carmen, Andes Áridos de San Juan. 18° Congreso Geológico Argentino, Actas S18, Neuquén,
- Pitte, P. 2014. Fluctuaciones de los glaciares, en los últimos 50 años, en las cuencas Amarillo, Turbio, Canito y Potrerillos, San Juan, Argentina. Tesis doctoral, Universidad Nacional de Córdoba (Inédita), 254 p., Córdoba.
- Ramos, V.A., Cegarra, M., Lo Forte, G. y Comínguez, A. 1997. El frente orogénico en la Sierra de Pederal (San Juan, Argentina): su migración a través de los depósitos orogénicos. 8° Congreso Geológico Chileno, Actas 3: 1709-1713, Antofagasta.
- Riseborough, D., Shiklomanov, N., Etzelmüller, B., Gruber, S. y Marchenko, S. 2008. Recent advances in permafrost modelling. *Permafrost and Periglacial Processes* 19: 137-156.
- Saha, S., Moorthi, H., Pan, X., Wu, J., Wang, S., Nadiga, P., Tripp, R., Kistler, J., Woolen, D., Behringer, H., Liu, D., Stokes, R., Grumbine, G., Gayno, J., Wang, Y., Hou, H., Chuang, H.H., Juang, J., Sela, M., Treadon, K.R.D., Van Delst, P., Keyser, D., Derber, Ek, M., Meng, J., Wei, H., Yang, S., Lord, H., van den Dool, A., Kumar, W., Wang, C., Long, M., Chelliah, Y., Xue, B., Huang, J., Schemm, W., Ebisuzaki, R., Lin, P., Xie, M., Chen, S., Zhou, W., Higgins, C., Zou, Q., Liu, Y., Chen, Y., Han, L., Cucurull, R. W. Reynolds, Rutledge, G. y Goldberg, M. 2010. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) 6-hourly Products, January 1979 to December 2010. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. (Accessed 02 november 2015).
- Saito, K., Trombotto Liaudat, D., Yoshikawa, K., Mori, J., Sone, T., Marchenko, S., Romanovsky, V., Walsh, J., Hendricks, A. y Bottegale, E. 2016. Late Quaternary permafrost distributions downscaled for South America: Examinations of GCM-based maps with observations. *Permafrost and Periglacial Processes* 27: 43-55.
- Simon, W. 1984. Observaciones sobre procesos geocriogénicos en la Cordillera del Límite al SO de la provincia de San Juan – Argentina. Actas de la Segunda Reunión del Grupo Periglacial argentino, 197-203, San Juan.
- Schauwecker, S., Pellicciotti, F. y McPhee, J. 2011. Near-surface temperature lapse rates in a mountainous catchment in the Chilean Andes. *Proceedings from AGU Fall Meeting*, San Francisco, California.
- Scholl, K.H. 2002. Geomorphological mapping of the periglacial level in the Semiarid Andes. En: Trombotto, D. y Villalba, R. (eds.) IANIGLA, 30 años de investigación básica y aplicada en ciencias ambientales. IANIGLA-CONICET, 269 p., Mendoza.
- Schreiber, E. 2015. Modelling the distribution of Mountain Permafrost in Central Andes, San Juan, Argentina. Tesis de Maestría, University of Delaware (Inédita), 100 p., Delaware.
- Schrott, L. 1991. Global Solar Radiation, Soil Temperature and Permafrost in the Central Andes, Argentina: a Progress Report. *Permafrost and Periglacial Processes* 2: 59-66.
- Schrott, L. 1996. Some geomorphological – hydrological aspects of rock glaciers in the Andes (San Juan, Argentina). *Zeitung für Geomorphologie* 104: 161-173.
- Schrott, L. y Götz, J. 2013. The periglacial environment in the semi-arid and arid Andes of Argentina – hydrological significance and research frontiers. En: Borsdorf, A. (ed.) *Forschen im Gebirge*, IGF Forschungsberichte, Band 5, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 53-63, Zürich.
- Taillant, D., Pastore, S., Álvarez, G., García, J., Alacayaga, G. y Morales, F. 2017. Crioformas en la cuenca de río Blanco del sistema hídrico del río San Juan. Aspectos generales observados en el terreno. 20° Congreso Geológico Argentino, Actas S18: 97-104, San Miguel de Tucumán.
- Tapia Baldis, C. 2018. Distribución y Características del Ambiente Periglacial en el extremo oeste del departamento Calingasta, Provincia de San Juan, Argentina. Tesis Doctoral, Universidad Nacional de San Juan (Inédita), 390 p., San Juan.
- Tapia Baldis, C.C. y Trombotto Liaudat, D. 2015. Cinturones criogénicos en la cuenca del río Bramadero, San Juan, Argentina. *Acta Geológica Lillona* 27: 146-158.
- Tapia Baldis, C.C. y Trombotto Liaudat, D. 2016. Inventory of landslides at the Santa Cruz river basin (San Juan, Argentina) and its relationship with the Andean cryogenic environment. *Book of Abstracts 11° International Conference on Permafrost*, 1041, Postdam.
- Tapia, C. y Trombotto, D. 2017. Regiones geocriológicas en los Andes. *Tendencias regionales*. 20° Congreso Geológico Argentino, Actas S18: 105-107, San Miguel de Tucumán.
- Tapia Baldis, C. y Trombotto Liaudat, T. 2019. Permafrost debris-model in Central Andes of Argentina (28°-33° S). *Geographical Research Letter* (en prensa).
- Tricart, J. y Cailleux, A. 1965. Introduction à la géomorphologie climatique. *Traité de géomorphologie*, tome I, SEDES, 306 p., París.
- Trombotto, D. 1991. Untersuchungen zum periglazialesn Formenschatz und zu periglazialen Sedimenten in der "lagunita del Plata", Mendoza, Argentinien. – *Heidelberger Geographische Arbeiten*. 90: 171 S.
- Trombotto, D. 2000. Survey of cryogenic processes, periglacial forms and permafrost conditions in South America. *Revista do Instituto Geológico Sao Paulo* 21: 33-55.
- Trombotto, D., Buk, E. y Hernández J. 1997. Monitoring of Mountain Permafrost in the Central Andes, Cordón del Plata, Mendoza, Argentina. *Permafrost and Periglacial Processes* 8: 123-129.
- Trombotto, D., Buk, E. y Hernández, J. 1999. Rock glaciers in the southern Central Andes (approx. 33° - 34° S), Cordillera Frontal, Mendoza, Argentina. *Bamberger Geographische Schriften* 19: 145-173.
- Trombotto Liaudat, D., Wainstein, P. y Arenson, L.U. 2014. *Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana*, Vazquez Mazzini Editores, 127 p., Mendoza.

- van Everdingen, R. 1998. Multi-language Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms, National Snow and Ice Data Center/World Data Center for Glaciology, 159p., Boulder.
- Washburn, A. L. 1979. *Geocryology. A Survey of Periglacial Processes and Environments*, Edward Arnold, 406 p., London.
- Viale, M. y Norte, F. A. 2009. Strong Cross-Barrier Flow under Stable Conditions producing Intense Winter Orographic Precipitation: A Case Study over the Subtropical Central Andes, *Weather Forecast*: 1009-1031.
- Villarroel, C.D. 2013. Inventario de glaciares y geoformas del ambiente periglacial en el tramo superior de la subcuenca del río Santa Cruz y subcuenca del río Mercedario, Cordillera Principal, provincia de San Juan, Argentina. Trabajo final de licenciatura (Inédito). Universidad Nacional de San Juan, 121 p., San Juan.
- Villarroel, C.D., Forte, A.P. y Tapia Baldis, C. 2016. Permafrost detection through the use of geophysical methods in the Blanco River Basin. San Juan, Argentina. 11° International Conference on Permafrost, Abstracts; 1046-1047, Potsdam.
- Vuille, M. y Ammann, C. 1997. Regional snowfall patterns in the high arid Andes. *Climatic Change* 36: 413-423.
- Washburn, A.L. 1979. *Geocryology. A Survey of Periglacial Processes and Environments*, Edward Arnold, 406 p. London.
- Wolf, J. 2015. Geomorphological evidence of former glaciations and recent permafrost distribution at the Paso de Agua Negra, Argentina. Master Thesis, University of Natural Resources and Life Sciences (Inédita), 91 p., Vienna.

Recibido: 2 de agosto, 2018

Aceptado: 3 de marzo, 2019