

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CUYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES



TESIS DE GRADO

CRONOLOGÍAS Y EXTENSIÓN DEL ÚLTIMO MÁXIMO
GLACIAL EN LOS ANDES CENTRALES (31°S-35°S) DE
ARGENTINA Y CHILE.

TESISTA: MELILLO, JULIETA RAQUEL

DIRECTORA: DRA. MOREIRAS, STELLA

CO DIRECTOR: DR. MALDONADO, ANTONIO

2021

RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una reconstrucción del Último Máximo Glacial (UMG) abordando la discusión sobre los factores topográficos que controlaron las glaciaciones pleistocenas tardías en los Andes Centrales Áridos o Subtropicales de Argentina y Chile (31°S-35°S).

A partir del análisis geomorfológico y geocronológico se determinó la posición y temporalidad de los estadios glaciales durante el Pleistoceno tardío. Finalmente se comparó la extensión alcanzada por las masas de hielo durante el UMG en ambas vertientes de la Cordillera de los Andes. Este trabajo se realizó mediante el reconocimiento de depósitos morenicos a partir de imágenes satelitales y fotografías aéreas.

Los resultados indican que los sistemas glaciares durante el UMG recorrieron una longitud máxima de 34,36 km en el valle del río Cachapoal (vertiente pacífica), levemente mayor al máximo avance registrado en la vertiente atlántica (Argentina) que se extendió 32,15 km en el valle del río Mendoza. En general para toda el área de estudio se postula que los glaciares del UMG recorrieron en promedio las mismas distancias en la vertiente argentina como en la vertiente chilena de los Andes Centrales.

Los factores topográficos analizados señalan que el rango altitudinal en el que se desarrollaron las masas de hielo durante su máxima extensión osciló desde 1.124 m s.n.m hasta los 4.239 m s.n.m en toda el área de estudio alcanzado las menores cotas en valles más australes y sobre la vertiente pacífica. La mayoría de los depósitos glaciares se concentran en laderas con orientación SO, S y SE, que actualmente son las laderas más frías de hemisferio sur.

Los resultados de la presente tesis contribuyen a mejorar el nivel de conocimiento de la historia glacial en los Andes Centrales, poniendo foco en el momento que los glaciares alcanzaron su máxima extensión, aspecto clave para estimar su tendencia a futuro teniendo en cuenta que la topografía (alturas y exposiciones) también podrían condicionar el desarrollo de masas glaciares y por lo tanto la disponibilidad del recurso hídrico en el presente.

Palabras clave: Glaciación, cuaternario, Pleistoceno tardío, depósitos morénicos, datación, topografía, cartografía.

ABSTRACT

In the present work, a reconstruction of the Last Glacial Maximum (LGM) was carried out to discuss the topographic factors that controlled the Pleistocene glaciations in the Arid Central Andes of Argentina and Chile (31°S-35°S).

From the geomorphological and geochronological analysis, the position and temporality of the glacial stages during the Late Pleistocene were determined. Finally, the extension reached by the ice masses during the LGM on both slopes of the Andes Mountains was compared. This work has been carried out by means of the recognition of morainic deposits from satellite images and aerial photographs.

The results indicate that the glacier systems during the UMG covered a maximum length of 34, 36 km in the Cachapoal river valley, slightly greater than the maximum advance recorded on the eastern slope (Argentina), which extended 32,15 km in the Mendoza river valley. In general for the entire study area, it is postulated that the UMG glaciers traveled on average the same distances on the Argentine slope as on the Chilean slope of the Central Andes.

The topographic factors analyzed indicate that the altitudinal range in which the ice masses developed during their maximum extension ranges from 1.124 m.a.s.l. to 4.239 m.a.s.l. throughout the study area, reaching the lowest elevations in the southernmost valleys. Most of the deposits are concentrated on SW, S and SE facing slopes, which are currently the coldest slopes in the Southern Hemisphere.

The results of the present thesis contribute to improve the level of knowledge of glacial history in the Central Andes, focusing on the time when glaciers reached their maximum extent, a key aspect to estimate their future trend, taking into account that topography (heights and exposures) could also condition the development of glacial masses and therefore the availability of water resources in the present.

Key words: Glaciations, Quaternary, Late Pleistocene, moraines, dating, topography, cartography

AGRADECIMIENTOS

A mi familia por el apoyo incondicional de siempre, por su paciencia y comprensión, y sobre todo por el amor que me han dado a lo largo de toda mi vida.

A mis amigos, compañeros de facultad y futuros colegas por su compañía a lo largo de todos estos años, su confianza y los infinitos momentos compartidos.

A mis profesores por trasmitirme no solo conocimientos sino también pasión por la profesión.

A mi directora Stella, por haber aceptado guiarme en esta importante etapa de mi carrera. Haber sido dirigido por alguien con tanta capacidad profesional y humana ha sido una de las mejores experiencias en este período de formación.

A mi codirector Antonio, por haber aceptado formar parte del desarrollo de mi tesina y transmitir sus conocimientos.

A mis compañeros de oficina en IANIGLA, Pilar, Mariana y Tomás por su compañía durante los seis meses de pasantía en CONICET, que dieron origen al desarrollo del presente trabajo final.

Por último, a la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Universidad Nacional de Cuyo, por haberme dado la posibilidad de formarme y capacitarme como profesional en una casa de estudios tan prestigiosa, por las herramientas y valores que me brindaron y sus infinitas enseñanzas. Me siento profundamente orgullosa de ser parte de esta institución que vela por la educación como bien público, gratuito y como derecho humano.

A todos ellos, mi mayor agradecimiento.

Contenido

INTRODUCCION	6
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	7
HIPÓTESIS	9
OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICOS.....	9
MARCO CONCEPTUAL	10
Concepto de Glaciación y morena	10
Marco cronológico glaciar de los Andes Centrales (31 - 34°S)	11
CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO	14
Características geológicas.....	15
Entorno glaciológico y climático	16
MATERIALES Y MÉTODOS	18
RESULTADOS.....	22
EVOLUCIÓN DE GLACIARES DEL PLEISTOCENO TARDÍO	22
INVENTARIO DE MORENAS DEL UMG	28
Correlación de edades.....	36
ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCION DE LAS DISTANCIAS	46
ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCION ALTITUDINAL.....	52
ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCION DE ORIENTACIONES.....	54
DISCUSIÓN.....	57
CONCLUSIONES.....	59
BIBLIOGRAFIA	61

INTRODUCCION

El momento del Último Máximo Glacial (UMG) ha sido un tema controvertido y limitado en los Andes Centrales de Argentina y Chile. Las principales cronologías provienen de material datable relacionado con depósitos glaciales (por ejemplo, tefrocronología, radiocarbono). Sin embargo, a partir de estas cronologías limitadas, se desarrollaron afirmaciones climáticas con respecto al comportamiento de los glaciares en el pasado (Polanski, 1963; Espizúa, 1999). La reinterpretación de algunos de estos depósitos glaciales, como grandes colapsos asociados con la tectónica activa de esta región, y las cronologías recientes derivadas de los nucleidos cosmogénicos terrestres, que datan en las rocas superficiales de las morenas, proporcionan nuevas ideas sobre este período crítico (Moreiras et al., 2021).

Las cronologías de las morenas muestran que los avances glaciales máximos han sido asincrónicos a lo largo de los Andes. La extensión máxima de los cuerpos de hielo en los Andes áridos ocurrió entre ~ 51 y ~ 32 miles de años antes del presente (Ka BP) (Martini et al., 2017); mientras que los glaciares en la Patagonia alcanzaron su máxima extensión en momentos de bajas temperaturas en fase con el UMG global (~ 24-18 ka años) (Douglass et al., 2006; Kaplan et al., 2008). Sin embargo, el cierto momento de avance glacial máximo en los Andes centrales todavía necesita una buena calibración. Eso es imprescindible ya que los entornos geográficos de los Andes Centrales (31°-35°S), ubicados en la zona de transición entre la circulación atmosférica tropical y la latitud media, juegan un papel clave en las reconstrucciones paleoambientales y climáticas del Cuaternario (Moreiras, et al., 2021).

Hasta ahora, la cronología de las morenas preservadas en los principales valles andinos permanece incierta. Las cronologías establecidas en las principales cuencas ubicadas en los diferentes segmentos latitudinales de los Andes Centrales (31°S: Limarí - San Juan) (32°S: Aconcagua-Mendoza) (33°S: Maipo-Blanco) y (34°S Cachapoal-Atuel / Salado) se concentra en sectores de fácil acceso que se distribuyen de manera no uniforme a lo largo de los Andes Centrales. Eso hace difícil llegar a una conclusión final sobre el momento de ciertas glaciaciones (Moreiras et al., 2021).

A pesar de la implementación del método de datación nucleidos cosmogénicos durante la última década, que indudablemente impulsó un progreso radical en las cronologías glaciales en los Andes Centrales, la cronología glacial sigue siendo débil principalmente por la falta de material orgánico para la datación por radiocarbono (Moreiras et al., 2021).

El UMG declarado como el máximo avance glacial relacionado con la mayor extensión de los cuerpos de glaciares de hielo en los valles de las montañas presenta ciertas ambigüedades en los Andes Centrales. Se ha postulado que las extensiones máximas de los glaciares en esta región árida / semiárida no están sincronizadas con el UMG global (~ 24-18 Ka años), lo que sugiere la existencia de un avance previo superador llamado UMG local o pre-UMG (~ 30-40 Ka) (Zech et al., 2008, 2011, 2017). Por este motivo se evaluará si la edad de la Máxima Extensión Glacial (MEG) de los Andes Centrales queda incluida en el intervalo cronológico asignado al Último Máximo Glacial.

El estudio de los factores condicionantes de la distribución espacial de los paleoglaciares está orientado por un lado a cuantificar algunas variables glaciológicas del pasado como la orientación, topografía, microclima y radiación, es decir los topoclimas en su conjunto, con el fin de entender los procesos que afectaron y afectan la respuesta glaciaria y por otro lado como esta respuesta afecta a su entorno (Bravo, 2008).

En la presente tesis se desarrolla una línea de trabajo a partir de la cual se obtienen datos de parámetros espaciales de los paleoglaciares de los Andes Centrales, así como correlaciones de las cronologías de sus avances y retrocesos, cuya integración e interpretación permite plantear una hipótesis coherente de su evolución.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las grandes glaciaciones cuaternarias han dejado registro alrededor del planeta en diferentes contextos geográficos y los Andes Centrales de Argentina y Chile (31°-34° S) no ha sido una excepción, donde enormes valles labrados por la erosión glacial y depósitos morénicos evidencian los avances glaciares (Caviedes 1972; Espizúa, 1999). Sin embargo, la reconstrucción glaciaria y climática de esta región es extremadamente limitada (Zech et al. 2007, 2008; Herrera, 2016).

La geomorfología glacial de los Andes Centrales o Subtropicales se encuentra en general muy poco estudiada, siendo ésta un área de gran interés tanto desde la perspectiva del conocimiento científico de base, en relación a la fluctuación glaciares y su vínculo con la evolución del clima a distintas escalas temporales, como también en relación al impacto hidrológico de estos procesos (Herrera, 2016).

A lo largo de los Andes, la historia de los glaciares revela que estos tuvieron una extensión máxima durante el Último Máximo Glacial (UMG) y el Glaciar Tardío, con edades bastante consistentes cal AP (años calendarizados antes del presente) de 31-18 Ka y 18-12 Ka desde Alaska hasta el sur de Chile (Clapperton, 2000). Sin embargo, los intervalos diacrónicos de los avances de los glaciares se han determinado para los Andes tropicales húmedos, los Andes centrales de Argentina y Chile, y los Andes patagónicos (Zech et al., 2008). En este sentido, se sugiere un patrón de glaciación asincrónico del Pleistoceno tardío al norte y al sur de la Diagonal árida, argumentando que los cambios en los parámetros ambientales como la temperatura y la precipitación en diferentes latitudes de los Andes deberían haber forzado el comportamiento de los glaciares durante el Pleistoceno tardío (Amman et al., 2001). Sobre esta base, la temperatura habría sido la fuerza principal para los avances glaciares en los Andes tropicales húmedos, mientras que al sur de los 30 ° S de latitud, los avances glaciares se ajustan mejor con un mayor período de precipitación. Por lo tanto, los avances glaciares se debieron principalmente al aumento de la precipitación en los Andes centrales secos, que podrían modelarse cuantitativamente, mostrando, en algunas partes, un aumento de hasta 5 veces en la

precipitación, en comparación con las condiciones climáticas modernas (por ejemplo, Kull et al., 2002, 2003, 2008, Imhof et al., 2006; Wäger, 2009).

Al mismo tiempo las precipitaciones no son homogéneas a lo largo de los Andes Centrales. La elevación de la cordillera disminuye hacia el sur, favoreciendo los vientos del oeste (Westerlies) que llegan a la vertiente oriental de los Andes (Argentina). Las precipitaciones aumentan hacia el sur debido al mayor flujo de humedad desde el Océano Pacífico y el debilitamiento del Anticiclón Subtropical. Entre los 30°- 32°S y los 71°- 68°O, la precipitación media alcanza los 100-400 mm anuales y hacia el sur en el segmento de 32°-34°S alcanza los 200 - 900 mm anuales en la vertiente Oriental y los 200-600 mm anuales en la vertiente occidental (Viale et al., 2019).

Actualmente, los glaciares del centro de Chile y Argentina constituyen importantes recursos hídricos para las poblaciones río abajo (Mernild et al., 2015). El agua de deshielo de los glaciares es, un importante recurso de agua dulce para las zonas urbanas y agrícolas en la vertiente pacífica y el más importante en la vertiente atlántica (Malmros, et al., 2016).

Los inventarios de glaciares y estudios de cambios de glaciares disponibles para los Andes Centrales de Chile y Argentina, aunque indican el retroceso de los glaciares, cubren solo diferentes intervalos de tiempo a lo largo de los siglos XX y XXI, lo que dificulta comparaciones directas de glaciares. Debido a estas limitaciones, aún faltan en gran medida evaluaciones detalladas de los cambios glaciares a largo plazo en los Andes centrales de Chile y Argentina (Pellicciotti et al., 2014); una circunstancia que está limitando nuestra comprensión de las interacciones entre los glaciares y el clima en esta región (Malmros, et al., 2016).

Los factores topográficos y climáticos que permiten la acumulación de nieve para formar glaciares, se dan en regiones polares y en zonas montañosas con importante topografía, donde imperan las bajas temperaturas y existen nevadas suficientes como para no perderse completamente durante el verano. Sin embargo, el desarrollo de un glaciar dependerá de variables locales, como la orientación de las laderas y el relieve, ya que en sectores fríos y sombríos, protegidos de la radiación solar, o bien sitios donde el viento o las pendientes acumulan mayor cantidad de nieve luego de las tormentas pueden propiciar la formación de glaciares (Atlas de Glaciares de la Argentina, 2019). Estas mismas variables controlan la extensión de los grandes glaciares en el presente en nuestra región. A partir de 2013/14, los glaciares en el área de estudio se encuentran en elevaciones entre ~ 2.900 y ~ 6.100 m s.n.m. La distribución de elevaciones medias es entre ~ 3.300 y ~ 5.500 m s.n.m., con la mayor parte del área glaciar ubicada entre ~ 4.200 y ~ 4.500 m s.n.m (Malmros, et al., 2016). Comparativamente los cuerpos de hielo descienden hasta los ~3.000 - 3.600 m s.n.m. en la vertiente chilena y hasta los ~3.200 -3.800 m s.n.m. en la vertiente argentina (Lliboutry, 1998).

Estudios recientes de la distribución espacial actual de los glaciares que tomaron como periodo los años 1955 hasta 2013 / 14, indican que la mayoría de los

glaciares y áreas de hielo se concentraron en las laderas orientadas al sur y sureste, donde también han ocurrido las mayores pérdidas de área durante el período ese periodo (Malmros, et al., 2016). Mientras que glaciares orientados al oeste y noroeste aumentaron en área (1955–2013 / 14). El aumento en el área de los glaciares orientados al oeste el autor los atribuye a un aumento de las nevadas en las laderas occidentales y que estos glaciares relativamente pequeños se encuentran en zonas muy elevadas (glaciares fríos). Esto se debe principalmente al hecho de que la ablación de los glaciares en condiciones normales es dominante en las partes de menor elevación de un glaciar, por debajo de la línea de equilibrio y especialmente cerca del frente (Malmros, et al., 2016).

El trabajo de Espizúa (2002), a lo largo de los 32°S en los valles del río Mendoza y Aconcagua, estimó la magnitud de la depresión de la línea de nieve en la vertiente argentina y chilena de los Andes, comparando la altitud de la línea de nieve actual con la reconstrucción de la línea de nieve de glaciares del Pleistoceno. En esa latitud, los glaciares del Pleistoceno sobre la vertiente oriental fueron de mayor extensión, menores pendientes, y terminaron a mayores altitudes que en el lado chileno, constituyéndose, en las dos pendientes, sistemas glaciales asimétricos. La asimetría estaba relacionada, en parte con una pendiente regional hacia el oeste de la línea de nieve reflejada por la predominancia de vientos húmedos del oeste, y en parte por la topografía asimétrica de la cordillera (Espizúa, 2002).

En este contexto se pretende analizar si el comportamiento de los glaciares en el pasado difirió en su distribución a ambos lados de la cordillera de los Andes en los Andes Centrales. Y si la topografía (elevación y orientación) jugaron un rol importante en el desarrollo de las masas de hielo durante el UMG ya que indirectamente estas mismas variables podrían condicionar también la disponibilidad del recurso hídrico vinculado a los cuerpos de hielo. En el área de estudio los valles correspondientes a las cuencas hidrográficas del río Jachal, San Juan, Mendoza, Las Tunas, Tunuyán, Diamante, Atuel y subcuenca Tordillos en Argentina y los Valles asociados a las cuencas del río Elqui, Limarí, Aconcagua, Maipo, la subcuenca del río Cachapoal y Mataquito en la República de Chile serán objeto de estudio del presente trabajo para establecer la extensión del UMG.

HIPÓTESIS

En este estudio de tesis final se plantea la hipótesis de que **la distribución de los glaciares durante el Último Máximo Glacial fue condicionada por la topografía de los valles, de tal manera que este avance quedó más restringido en la vertiente pacífica (chilena) que en la vertiente atlántica (argentina).**

OBJETIVO GENERAL Y ESPECIFICOS

OBJETIVO GENERAL

- Determinar la extensión del Ultimo Máximo Glaciar en los Andes Centrales (31°S-35°S) de Argentina y Chile analizando cronología, la localización de sus depósitos y disposición en los valles andinos.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Establecer la cronología del Ultimo Máximo Glacial (UMG) en los Andes Centrales Áridos entre los 31° y 35°S.
- Determinar la extensión del avance / avances del UMG a estas latitudes.
- Identificar las alturas de los depósitos morénicos asociados al UMG en los diferentes valles de los Andes Centrales.
- Analizar las orientaciones de las laderas como factor condicionante del desarrollo y extensión de los avances.
- Relacionar la dinámica glaciar durante el UMG con la dinámica glaciar del presente y de qué forma los factores topográficos (altitud y orientación) podrían impactar en la disponibilidad hídrica actual en las diferentes latitudes.

MARCO CONCEPTUAL

Concepto de Glaciación y morena

Una glaciación es un período en el cual hay una reducción de la temperatura media global (Gutierrez Elorza, 2000). Esto da como resultado la expansión de la cubierta glaciar planetaria. Producto de la erosión glaciar, diferentes materiales se incorporan al hielo y son transportados grandes distancias. En la zona de ablación, cuando el hielo se funde, es donde los glaciares depositan la mayor parte de su carga. Estos materiales, en general con formas angulosas, tamaños variados y sin clasificar, se denominan till. En ocasiones el till se presenta dando formas de relieve características que se conocen con el nombre de morena (Figura 1). Dependiendo de la posición que ocupen, se distinguen morenas laterales, centrales, de fondo y frontales (Gutierrez Elorza, 2000). Las morenas terminales y laterales indican **posiciones de avance o retirada del glaciar** y las morenas centrales se originan en la unión de dos glaciares de valle que fluyen en la misma dirección (Figura 2) (Moreiras, 2018).

Por lo tanto los depósitos morénicos proceden de la ablación glaciar, es decir cuando cede la acción transportadora del glaciar se acumulan en morenas de retroceso, que marcan diferentes estadios en el retroceso del hielo glaciar (Moreiras, 2018). Así las investigaciones relacionadas a la reconstrucción de la extensión de los glaciares se han concentrado en el análisis y datación de morenas. (Andersen et al., 1999; Glasser et al., 2005).

A escala del Cenozoico, en los últimos 65 millones de años, la presencia de casquetes de hielo en el planeta Tierra no ha sido continua, e incluso el desarrollo de mantos de hielo (ice sheets) asociados a sucesiones de períodos glaciales ha estado restringido a unos pocos millones de años y particularmente a partir del Pleistoceno Medio. Las evidencias de glaciaciones son ampliamente estudiadas no sólo por su

implicancia paleoclimática global, sino también en relación a temas contingentes como disponibilidad de agua dulce o aumento en el nivel del mar (Herrera, 2016).

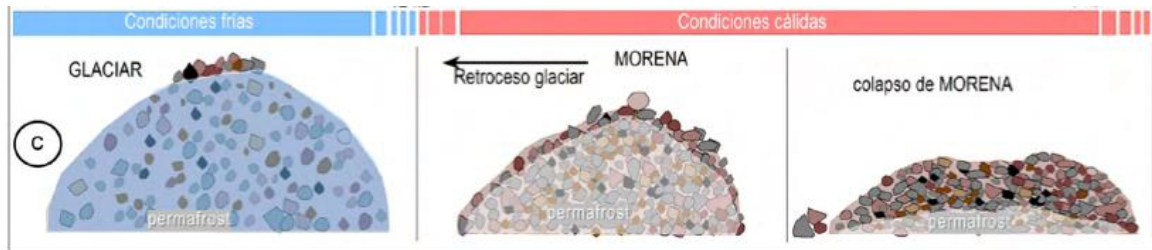


Figura 1: Modelo conceptual de la formación y colapso de una morena. Fuente: Moreiras et al., 2019

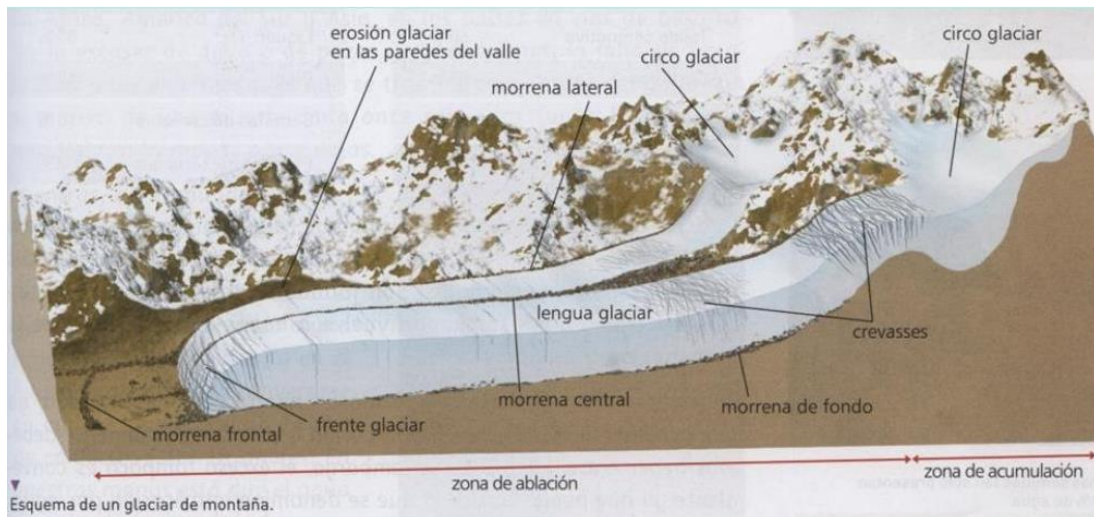


Figura 2: Geofomas erosivas o destructivas y constructivas (depósitos) de glaciares de valle. (Fuente: Gutierrez Elorza, 2000)

Marco cronológico glaciar de los Andes Centrales (31 - 34ºS)

Durante la glaciación cuaternaria la erosión glaciar generó grandes valles en la alta cordillera con geofomas asociadas (Espizua, 1993; Moreiras et al., 2017; Forte & Villarroel, 2019). En el área de estudio los valles correspondientes a las cuencas hidrográficas del río Jachal, San Juan, Mendoza, Las Tunas, Tunuyán, Diamante, Atuel y subcuenca Tordillos en Argentina y los Valles asociados a las cuencas del río Elqui, Limarí, Aconcagua, Maipo, la subcuenca del río Cachapoal y Mataquito en la República de Chile serán objeto de estudio del presente trabajo para establecer la extensión del UMG.

Dentro de las cuencas mencionadas se han reconocido avances correspondientes al UMG (Espizúa, 1999, 2002; Gosse, 1994; Terrizano et al, 2017; Zech et al., 2007, 2008; Iturrizaga et al., 2018; Herrera, 2016; Riquelme et al., 2011) en los cuales la mayoría de las dataciones paleoclimáticas se han basado en la técnica ¹⁰Be SED (Surface exposure dating o fecha de exposición de la superficie). Dicha técnica es muy valiosa, ya que permite determinar directamente la edad de deposición

de los depósitos de donde se extrae el bloque; más aún en las regiones semiáridas de alta montaña debido a la falta de material adecuado para la datación por radiocarbono (Zech, 2010). Las dataciones cosmogénicas radican en “medir” o cuantificar la cantidad de rayos cosmogénicos acumulados en la superficie de un bloque del depósito a datar. Mientras mayor es la cantidad de nucleidos, mayor será la edad o cronología del depósito. Básicamente, la composición de la roca (mineralogía), determinará el nucleido cosmogénico que se acumulará. Por ejemplo, las rocas graníticas con presencia de cuarzo acumularán Berilio. Es por ello que el ^{10}Be es generalmente utilizado, además es el más fácil de procesar en los laboratorios (Gosse & Phillips, 2001).

Hacia el norte del área de estudio, se interpretaron dos avances glaciales en la Laguna en el río Turbio (Valle de Elqui, $30^{\circ} 30' \text{ S}$). Por un lado, dos arcos de morena lateral escalonados (ML1 y ML2), que alcanzan 250 y 80 m por sobre el actual curso del río, respectivamente, para los que se infirió a partir de los trabajos realizados en el Cordón Doña Rosa una edad de $\sim 37\text{-}27 \text{ Ka}$, formados durante la glaciación más antigua y extensa. Y por otro lado la morena frontal (ML3) que resultó en un deslizamiento de tierra y para la que se propuso una edad de $17\text{-}12 \text{ Ka}$ de edad. (Riquelme, 2011, 2019; Moreiras et al., 2021).

En una cuenca menor del río Limarí ($\sim 31^{\circ} \text{ S}$), las edades de exposición tomadas en el Cordón Doña Rosa evidencian varios avances glaciares del Pleistoceno tardío entre $11,6 \pm 1,2$ y $14,7 \pm 1,5$, mientras que el avance máximo se estableció en $\sim 37 \pm 3 \text{ Ka}$ (Zech et al., 2007, 2008; Moreiras, 2021).

En estudios más recientes sobre la Cordillera de Ansilta ($31^{\circ} 40' \text{ S}$), en un complejo de morenas en Arroyo Largo se encontraron dos avances correspondientes al UMG. Las morenas M1 y M2 documentan los avances glaciales durante la Etapa de isótopos marinos (MIS) 2, es decir, avanza sincrónicamente con el Último Máximo Glacial Global (UMGG) y durante la posterior deglaciación. Con edades de exposición ^{10}Be de 18 ± 1 y 27 ± 1 respectivamente (Terrizano et al., 2017). Estas edades están en el rango del avance glacial reciente registrado en el valle del río Blanco ($31^{\circ} 50' \text{ S}$, San Juan) donde la morena MI02 fue fechada en $27,8 \pm 2,2 \text{ Ka}$ y un máximo avance para MI03 datado en $37,54 \pm 2,6 \text{ Ka}$ y $13,26 \pm 0,89 \text{ Ka}$ por ^{10}Be (Jeanneret, 2020).

Hacia el sur, en la franja de latitud de los 32° S , los depósitos glaciares de los valles Aconcagua y Mendoza han sido los más estudiados en la región, ya que las geoformas glaciares se conservan a lo largo de la carretera internacional que conecta Santiago, Chile con Mendoza, Argentina. En el trabajo original de Caviedes y Paskoff (1975) se distinguieron cuatro avances glaciales a lo largo del río Aconcagua (32° S) basados en técnicas de datación relativas y elevación de morenas relictas. Estas glaciaciones se llamaron Salto del Soldado, Guardia Vieja, Ojos de Agua y Portillo. Según estos autores, el primero debe corresponder a la Glaciación Pre-Última y Portillo representa la Última Glaciación. Sin embargo, ambos depósitos han sido reinterpretados como avalanchas de rocas (Fauqué et al., 2009; Moreiras et al., 2021).

En el Valle del río Mendoza ($\sim 32^{\circ} \text{ S}$), se reconocen una serie de depósitos de diferentes avances glaciales pleistocenos que evidencian una posición de mayor

altitud de los glaciares en el presente. El avance más extenso, la Glaciación Penitentes llegó a cotas de 2.500 m s.n.m. Se obtuvieron edades de $31 \pm 3,1$ Ka mediante datación por termoluminiscencia para este avance. La Glaciación Almacenes, el más joven y reducido, llegó hasta cotas mayores a 3.000 m s.n.m, revelando edades entre 14 y 11 Ka (Espizúa, 1999). La Glaciación de Punta de Vacas, aguas abajo del pueblo de Uspallata, está erosionando una avalancha de rocas fechada en ~ 46 Ka por nucleidos cosmogénicos (Moreiras et al., 2015). Con base en este hallazgo, la glaciación de Punta de Vacas debe ser menor a 46 Ka ocurriendo durante la probable UMG local (Pre-UMG) y el avance de Penitentes podría asignarse a la UMG (Moreiras et al., 2021).

A lo largo del valle del río Blanco (33°), emplazado en la provincia geológica de la Cordillera Frontal, asociada a un relieve abrupto cuyas mayores elevaciones son los cerros El Plata (6.100 m s.n.m.) y Blanco (5.490 m s.n.m.), se han distinguido cinco avances utilizando técnicas de datación relativas (Moreiras et al., 2017). Se propuso una edad especulativa de $\sim 17\text{--}22$ Ka BP para la glaciación Vallecitos I evidenciada por la morena preservada a 3.400 m s.n.m, mientras que, Vallecitos II, ubicado por encima de 2.600 m s.n.m, fueron asignados al Pleistoceno tardío ($\sim 12\text{--}16$ Ka BP) (Wayne, 1985).

Recientemente, se han identificado dos avances glaciales en la misma cuenca, a lo largo del sur de los ríos Angostura y Las Mulas, ambos afluentes de dicho río Blanco (33°S) (Moreiras et al., 2017). La morena relacionada con el avance más antiguo (inferior) en el valle de Angostura (ANG I) se conserva a la misma altitud de la morena más antigua (inferior) relictas en el valle de Las Mulas (LM I) a 2.400 m s.n.m, sin embargo su cronología no ha sido esclarecida. El segundo avance representado por ANG II (~ 3.300 m snm) y morenas LM II (2.960 m s.n.m) han resultado en $8 \pm 0,7$ Ka y $25 \pm 2,3$ Ka en edad para el primer depósito, mientras que la edad de ~ 40 Ka proviene de la morena LM II. Estas edades máximas ajustadas alrededor de $\sim 8\text{--}25$ Ka para el segundo avance glacial podrían interpretarse como un período UMG y UMG Local, respectivamente para esta región (Moreiras et al., 2017).

Hacia el sur ($33^\circ 50' \text{S}$), se obtuvieron de la morena del complejo de la Engorda en el valle del Volcán (valle del Maipo, Chile), localizado en el orden de altitud de 2.550 m s.n.m, edades entre $\sim 24\text{--}18$ Ka y ~ 10 Ka (Herrera, 2016). El autor propuso dos pulsos glaciales del Pleistoceno tardío, siendo el más antiguo correlacionado con el UMG (Moreiras et al., 2021). Aguas abajo, en el vecino valle de Yeso ($33^\circ 45' \text{S}$), los depósitos fluvio-glaciales relacionados con la morena San Gabriel, conservados a una altitud ~ 1.200 m s.n.m, fueron datados con OSL en ~ 45 y 36 Ka (Herrera et al., 2009; Herrera, 2016), interpretado como evidencia del UMG Local a pesar de que la morena no se ha conservado en esta posición de la cuenca hidrográfica del Maipo (Moreiras et al., 2021).

Considerando este hecho, el desarrollo máximo de glaciares en el pasado inferido por los extensos complejos de morenas con edades de ~ 24.000 años se ha interpretado generalmente como el UMG en este segmento de los Andes Centrales ($30^\circ - 33^\circ \text{S}$); mientras que las morenas más discretas en las posiciones del valle

inferior que muestran edades de ~ 34.000 años se han asociado con un UMG local (pre-UMG) (Moreiras et al., 2021).

En el último segmento de latitud del área de estudio el UMG fue reconocido en el río Cachapoal (34° 20'S), donde una morena lateral preservada en la localidad de Los Cerrillos tenía una exposición de 10.3% con fecha de $20,3 \pm 2,9$ y $21,9 \pm 5,3$ Ka (Charrier et al., 2019). Además se obtuvieron edades de exposición más jóvenes de los cantos rodados de las morenas más cercanas al glaciar Cachapoal, evidenciando el Younger Dryas y la Edad de Meghalayan ($3,8 \pm 0,8$ Ka) (Charrier et al., 2019; Moreiras et al., 2021).

En la misma latitud (34° 40'S), hacia el este de la cordillera a lo largo del río Atuel, Gosse (1994) obtuvo una edad de ~ 11Ka la morena del Arroyo Malo, fuera del rango de edad UMG y pre-UMG. A estas altitudes, también ha sido reconocido un avance glacial significativo entre 4.500 y 6.000 años AP correspondiente al enfriamiento de Younger Dryas (~ 6 -3 Ka) reportado por Stingl y Garleff (1985).

En el río Salado, el siguiente valle austral (34° 50'S), la extensa morena ubicada en la estación de esquí Las Leñas ha sido datada en ~ 42,3 Ka (10Be), coincidente con UMG Local. Esta edad se recalcula a 50 ± 5 Ka en el trabajo reciente de Zech et al. (2017). Sin embargo, la mayoría de las edades cosmogénicas caen en $21,9 \pm 1,8$ Ka coincidentes en el tiempo con el UMG.

El momento del UMG en los Andes Centrales desde 31°S hasta 35° S muestra que hasta ahora sólo hay pocas cronologías absolutas disponibles. Esto se debe principalmente a la extrema aridez y la consiguiente falta de material orgánico para la datación por radiocarbono, que es el método más sencillo y menos costoso de datar depósitos cuaternarios. El desarrollo de SED durante los últimos años y las primeras aplicaciones en los Andes Centrales revelan un enorme potencial para la reconstrucción glacial y climática. Las nuevas ideas sobre el momento de la glaciación a lo largo de un transecta N – S son especialmente prometedoras con respecto a la reconstrucción de los cambios tardíos del Cuaternario en la circulación atmosférica, particularmente la influencia variable de la circulación tropical y extratropical, respectivamente (Zech, 2008).

CARACTERIZACION DEL AREA DE ESTUDIO

La región de estudio se extiende desde la cuenca del río Aguas Negras en la provincia de San Juan, Argentina y la cuenca del Elqui (30 ° 30 'S) en la región de Coquimbo, Chile hasta el valle del río Salado y su cuenca equivalente al Oeste de la cordillera, en el río Mataquito (34° 50'S) (Figura 3). Esta región alberga la porción más elevada de la cordillera de los Andes con elevaciones de más de 6.000 metros de altura entre los que se destaca el cerro Aconcagua con 6.961 m s.n.m y Mercedario (6.760 m s.n.m). Esta impresionante topografía ha facilitado la formación de glaciares en los sectores más altos de las cuencas andinas (Moreiras et al., 2021).

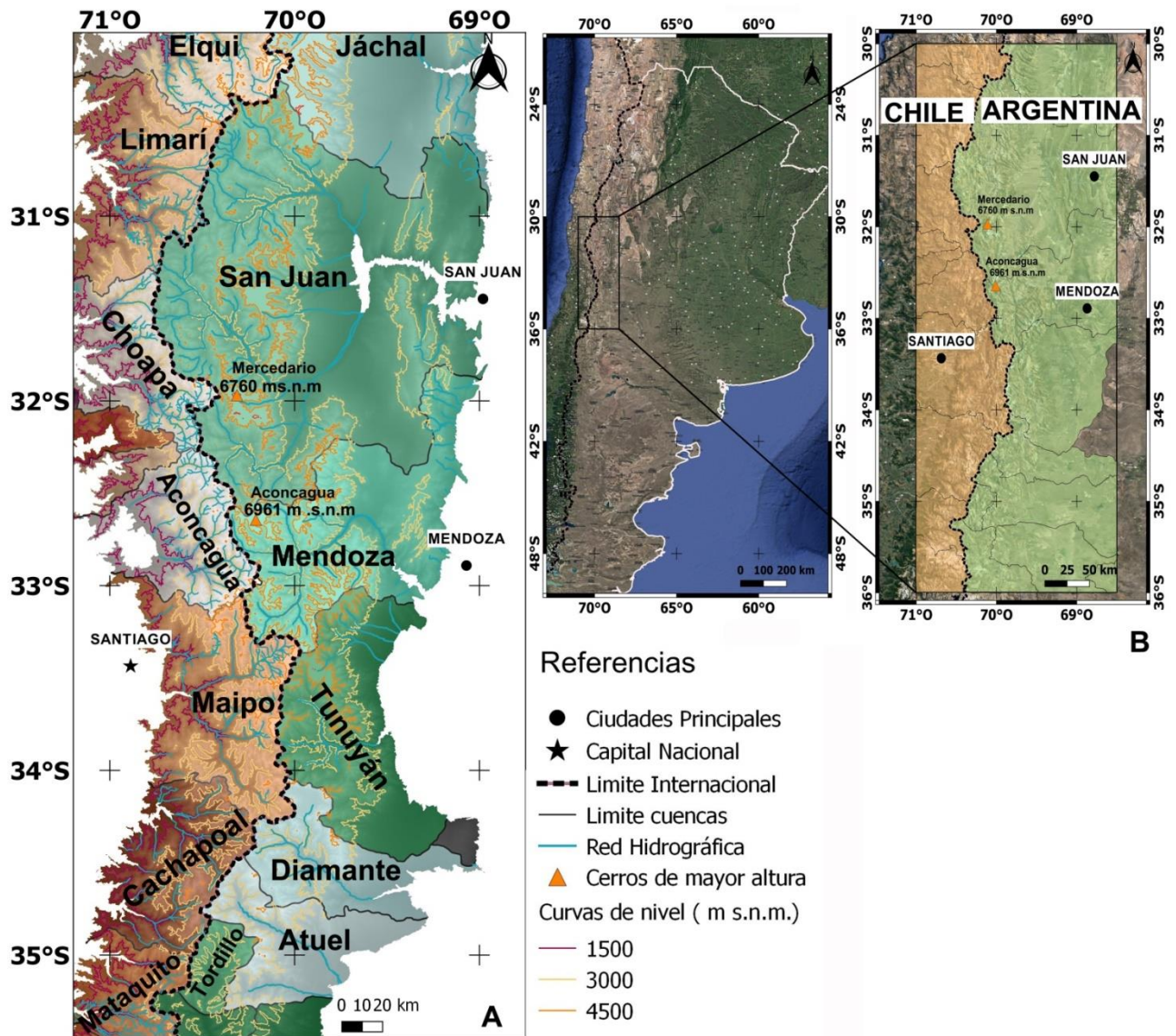


Figura 3: Mapa de la región de los Andes Centrales (31°S-35°S) que indica las cuencas hidrográficas bajo estudio en vertiente pacífica (Chile) (gama colores verdes) y en la vertiente atlántica (Argentina) (gama de colores naranjas) (A). Ubicación relativa del área de estudio ampliada a la región de los Andes Centrales de Argentina (color verde) y Chile (color naranja).

Características geológicas

En los Andes Centrales, el período de levantamiento tectónico más importante tuvo lugar a fines del Plioceno, época en que el orógeno alcanzó la altitud suficiente para ser afectado por las glaciaciones (Hastenrath, 1967). A partir de ese momento, los glaciares se expandieron y cubrieron importantes superficies por encima de la cota de los 3.000 m s.n.m, de ahí que se puedan encontrar distintas formas características de la morfología glaciar a esta altitud (circos, horns, aristas, valles en U y gran variedad de depósitos morénicos (Hastenrath, 1985; Clapperton, 1993).

La región se encuentra sobre una frontera de convergencia activa asociada con la zona de Wadati-Benioff, donde la placa de Nazca subduce la placa Sudamericana. Asimismo, en esta latitud, la subducción de la dorsal de Juan Fernández (JFR) coincide con el segmento de subducción plana (28-33°S) vinculado a una actividad sísmica intensiva (Moreiras y Páez, 2015). Geológicamente, esta amplia región es muy diversa y comprende diferentes provincias geológicas de oeste a este: Cordillera de Costa, Cordillera Principal, Cordillera Frontal y Precordillera.

Entorno glaciológico y climático

Desde una perspectiva glaciológica la cordillera de los Andes se encuentra dividida en Andes Húmedos y Áridos, a su vez este último comprende Los Andes Desérticos al norte de los 31° de latitud sur y los Andes Centrales entre los 31°- 35° (Figura 4) (Lliboutry, 1998). El área de estudio forma parte de los Andes Centrales también conocidos como Andes subtropicales, caracterizados por Lliboutry (1998) por estar vinculados con glaciares cubiertos o morenas con hielo, con mayores dimensiones que los Andes Desérticos y a menores cotas. Esto en parte se debe a la mayor precipitación registrada, en las abruptas topografías del terreno, y a los efectos latitudinales, ya que los Andes Centrales se encuentran en la porción sur de los Andes Áridos, por lo tanto la radiación solar que reciben es menor (Lliboutry, 1998)..

En los Andes Centrales la distribución de las precipitaciones está condicionada principalmente por un patrón climático subtropical, caracterizado por la prevalencia de la circulación atmosférica de los anticiclones del Pacífico y Atlántico y la influencia desde el sur de los vientos del oeste. Este patrón climático está fuertemente controlado por la barrera orográfica que constituye la Cordillera de Los Andes la cual impone un bloqueo principalmente de la circulación Pacífica hacia el centro oeste del territorio (Garreaud, 2009).

El área de estudio abarca las provincias fitogeográficas del Monte, Puneña, Altoandina, del Desierto y Chilena según la clasificación de Cabrera y Willink (1973). La región fitogeográfica del Monte queda bajo la influencia de la humedad que aporta la circulación atmosférica desde del Atlántico, mientras que las de Altoandina queda bajo la influencia de la humedad que proviene del Pacífico. El límite entre estas dos áreas de influencia de humedad ha sido caracterizada y definida climáticamente como la "Diagonal Árida Sudamericana" (DAS) (Garreaud, 2009).

Según la clasificación y división de tipos climáticos de Köppen la zona de estudio corresponde principalmente a un clima de Tundra y Polar de altura, produciéndose un largo período de congelamiento continuo del suelo. Las precipitaciones oscilan entre 200 mm/año en el sector norte y 700–800 mm/año en el sur, concentradas principalmente en invierno y bajo la forma de nieve. Las mismas aumentan durante los periodos de El Niño y disminuyen durante la Niña, bajo el fenómeno climático conocido como ENOS (El Niño-Oscilación del Sur) (Azócar, 2010).

La vertiente atlántica del área de estudio abarca, hacia el este de los climas de Tundra (ET) y Polar de altura (H), los climas Continental Mediterráneo Subtropical (Dsc), Mediterráneo Oceánico (Csb), Semiárido Frío (Bsk) en Mendoza y Árido Frio

(Bsk) respectivamente. Mientras que la vertiente pacífica, al alejarse de los climas polares se alcanzan los climas Mediterráneo subalpino con verano seco (Csc), Mediterráneo Oceánico (Csb) y Semiárido Frio (Bsk) en el rango de los 33°S-35°S y Árido Frio (Bwk) en la porción norte (31°S-32°S) (Beck et al., 2018). Registros climáticos recientes muestran una tendencia al aumento de las temperaturas en los Andes Centrales. Entre 1979 y 2006, la temperatura promedio del aire aumentó entre 0,2 ° C y 0,4 ° C por década (Falvey, 2009). Poblete y Minetti (2017) indican que este calentamiento está relacionado con la disminución de las precipitaciones níveas que abastecen las cuencas de los Andes Centrales. Esta situación es más evidente con el retroceso y la pérdida de masa de los glaciares en las cuencas de Chile y Argentina desde principios del siglo XX (Leiva, 2007; Pellicciotti, 2014).



Figura 4: Mapa de los diferentes ambientes de formación de glaciares a lo largo de la cordillera de los Andes basados en el clima y la topografía. Fuente: Liboutry, 2010.

MATERIALES Y MÉTODOS

A continuación se detalla la metodología aplicada en la presente tesis y los materiales que se han utilizado y/o consultado para la reconstrucción de los glaciares del Pleistoceno tardío en los Andes Centrales.

1) Establecer las cronologías existentes del UMG

Para la delimitación geocronológica de los máximos avances glaciares del Pleistoceno tardío, se llevó a cabo una recopilación bibliográfica, seleccionando las publicaciones que evidenciaban las edades de exposición correspondientes a estas glaciaciones cuaternarias a lo largo de los diferentes valles en el área de estudio.

La reinterpretación de algunos de estos depósitos glaciares como grandes colapsos asociados con la tectónica activa de esta región y las cronologías recientes derivadas de los nucleidos cosmogénicos terrestres, que datan en las rocas superficiales de las morenas, fueron parte de la elección selectiva de los avances datados y apartados para la incorporación al inventario de depósitos morénicos.

2) Determinar la extensión del avance/es del UMG en los Andes Centrales.

2.1) Identificación de depósitos morénicos a partir de imágenes satelitales.

Los depósitos morénicos en la zona de estudio fueron identificados mediante imágenes satelitales provenientes del satélite Landsat 8 de 30 m de resolución espacial (Tabla 1); las mismas se extrajeron de la plataforma Google Earth Engine (<https://code.earthengine.google.com/>) y se utilizó una combinación RGB formada por las bandas que integran el espectro visible (4,3 y 2) generando un mosaico en color "real". Además se utilizaron soportes visuales como Google Earth Pro, la base de capas abiertas de QGIS (XYZ Tile Layers plugging) con mapas de fechas variables y fotografías aéreas del año 1977 tomadas durante el Plan Cordillerano para identificar procesos glaciares, periglaciares y paraglaciares de la región.

Tabla 1: Información imagen satelital

<u>Imagen Satelital</u>	<u>Fecha de Adquisición</u>	<u>Resolución</u>	<u>Bandas</u>	<u>Sensor</u>
Landsat 8	30/09/2019	30 m	4, 3 y 2	OLI (Operational Land Imager)

Para el reconocimiento de los depósitos morénicos se consideró como criterio las características geomorfológicas descritas por Crozier (1984) (Tabla 2) y se utilizó como guía los avances ya cartografiados en los trabajos seleccionados en la primera etapa donde se ha comprobado a campo la presencia y cronología de estos depósitos glaciares a través de estudios litológicos y sedimentológicos.

Tabla 2: Diferencias morfológicas (posición y forma) y sedimentológicas (composición interna) de los depósitos glaciares (morenas) y gravitacionales (procesos de remoción en masa). Elaboración propia (basada en Crozier, 1984)

POSICIÓN Y FORMA EXTERNA	
PRM	GLACIARES
<ul style="list-style-type: none"> • Lóbulos transversales masivos en las cabeceras (bloques rotados) • Posibles lóbulos o albardones longitudinales • Lóbulos transversales concéntricos confinados en el pie del depósito que rara vez se continúan con lóbulos laterales • Fracturas radiales o transversales en el pie del depósito • Carece de terrazas de outwash al frente del pie, un valle de deslizamientos rara vez es bloqueado por un nuevo deslizamiento 	<ul style="list-style-type: none"> • Lóbulos transversales sinuosos en las cabeceras (morrena terminal). • Carece de lóbulos longitudinales excepto morrena lateral. • Lóbulos transversales concéntricos que se continúan con lóbulos laterales (morenas) No restringidos al frente • No existen fracturas • Generalmente asociados a depósitos outwash • Los valles glaciares tienen en general forma de U.
COMPOSICIÓN INTERNA	
<ul style="list-style-type: none"> • Depósito con una sola litología • Grandes masas de roca de caja débil y bloques facetados de rocas más fuertes • Ausencia de caliche y loess excepto como remanentes de la superficie previa al deslizamiento. Algo de caliche se puede presentar si el material parental es calcáreo. 	<ul style="list-style-type: none"> • Depósito heterolítico • Fragmentos mezclados con superficies con estrías y pulimentadas. • El material puede estar cubierto por loess. Los fragmentos tienen anillos de caliche. Suelos con horizontes de caliches pueden cubrir depósitos.

2.2. Inventario y clasificación de los depósitos morénicos

Las geoformas identificadas e importadas de trabajos ya referenciados (morenas laterales, de fondo, terminales y frontales) se digitalizaron y cartografiaron en QGIS con la integración de capas provenientes del Instituto Geográfico Nacional (IGN: <http://www.ign.gob.ar/>), y de la Infraestructura de datos Geoespaciales de Chile (IDEChile: <http://www.ide.cl/>).

Se consideraron las morenas correspondientes al UMG (~25 Ka), el UMG local (~40 Ka) y el Tardiglacial (~15 Ka).

2.3. Correlación de edades

Con el objetivo de extender el estudio a los valles que no poseen dataciones absolutas hasta el día de la fecha (por tefrocronología, radiocarbono, nucleidos cosmogénicos terrestres o técnicas de luminiscencia estimulada ópticamente) se infirieron edades en base a la altura topográfica en la que se encuentran los avances datados de los valles cercanos o vecinos postulando posibles edades a estos depósitos morénicos. La correlación tentativa de edad basada en la altitud de los depósitos glaciares ha sido una técnica utilizada por diferentes autores (Wayne, 1990,1985; Zbyněk et al., 2011; Espizúa 2002; Moreiras 2004) ante la ausencia de cronologías absolutas.

2.3.1 Análisis estadístico

Con el fin de comprobar si existen diferencias significativas entre las morenas datadas y correlacionadas temporalmente por altitud se propuso realizar un Análisis de la Varianza (ADEVA). Para ello se comprobó que se cumplieran los supuestos de Normalidad, Homogeneidad y Homocedasticidad con la herramienta informática InfoStat/P (<https://www.infostat.com.ar/>).

La variable a evaluar fue la distancia existente entre el frente de las morenas y la cabecera de cuenca, mientras que el criterio de clasificación fueron los avances datados y correlacionados partiendo el análisis por Glaciación.

2.4. Determinación de la extensión

Para los análisis y procesos realizados se utilizaron los softwares de sistemas de información geográfica **QGIS (3.0.1)** (<https://qgis.org/es/site/>), **SAGA GIS (2.3.3)** (<http://saga-gis.org/en/index.html>) y soportes visuales como **Google Earth Pro 7.3** (<https://www.google.com/earth/download/gep/agree.html>).

Para la reconstrucción geomorfológica de la **máxima extensión** ocupada por glaciares durante el Pleistoceno tardío se calcularon las máximas longitudes existentes entre los avances glaciares y la cabecera de la cuenca utilizando la fórmula Harvesine para la aproximación esférica de la distancia (d) entre dos puntos de la superficie terrestre. Donde ϕ_1 , ϕ_2 y λ_1 , λ_2 se refieren a la latitud y a la longitud, expresadas ambas en radianes, de los puntos 1 y 2 respectivamente y r corresponde al radio terrestre (Ecuatorial 6.378,1 km, Polar 6.356,8 km, Medio 6.371,0 km).

$$d = 2r \arcsin \left(\sqrt{\sin^2 \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cos(\phi_2) \sin^2 \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right)$$

Figura 5: Formula Harvesine

2.4.1 Escenarios propuestos para el análisis de la extensión

Se plantearon tres escenarios para el estudio de las longitudes recorridas por los glaciares durante el Pleistoceno tardío que se describen a continuación:

Escenario I: Morenas datadas. Incluye todos los depósitos morénicos datados para el UMG, UMG Local y Tardiglacial.

Escenario II: Morenas correlacionadas por altitud. Incluye todos los depósitos morénicos que se correlacionaron al UMG, UMG Local y Tardiglacial en base a la altura topográfica de las morenas datadas en los valles cercanos.

Escenario III: Morenas datadas y correlacionadas. Incluye las morenas datadas y correlacionadas al UMG, UMG Local y Glacial Tardío.

2.5. Análisis de la extensión por vertiente

Con el objetivo de determinar si los avances glaciarios quedaron más restringidos en la vertiente pacífica que en la atlántica se propuso realizar un Análisis de la Varianza (ADEVA), para demostrar si existen diferencias significativas entre las distancias medias recorridas por los glaciares durante el UMG.

3) Identificar las alturas de los depósitos morénicos asociados al UMG en los diferentes valles de los Andes Centrales Áridos.

Para el análisis de la topografía del terreno se utilizó un Modelo Digital de Elevación (MDE) SRTM_GL1 de 30 m de resolución espacial proporcionado por OpenTopography Facility (<https://opentopography.org/>). A partir del archivo ráster se realizó un análisis de terreno (Relleno de sumideros y obtención de curvas de nivel) utilizando el sistema de información geográfico SAGA GIS.

Posteriormente se calcularon los parámetros de altitud máxima, media y mínima de cada morena digitalizada. En este caso se utilizó el complemento de QGIS Estadísticas de zona que permite calcular valores de los píxeles de una capa ráster con la ayuda de una capa vectorial poligonal, generando las columnas de salida de los valores de máxima, mínima y media de los píxeles.

A cada tabla con sus correspondientes altitudes, se le adicionó el parámetro de latitud y longitud para el análisis de la posición de los avances glaciarios. Para obtener las coordenadas, en QGIS se generó una capa de puntos a partir de los polígonos digitalizados (morenas) con la herramienta Point on surface - Geometría vectorial, más adecuada que la función centroide porque garantiza que el punto se encuentra en la superficie de la entidad. Y a través de la calculadora de campos se extrajeron las coordenadas de cada morena.

3.1 Obtención de perfiles topográficos

Para una mayor interpretación visual, sobre la base del MDE y con la ayuda del complemento de QGIS, Terrain Profile, se obtuvieron los perfiles topográficos de los ríos analizados. Los mismos se generaron a partir de una polilínea trazada sobre el curso principal del río, atravesando los depósitos morénicos que se encontraron en ese trayecto. Por último el perfil topográfico se exportó como PNG para su procesamiento y análisis.

4) Analizar las orientaciones de las laderas como factor condicionante del desarrollo y extensión de los avances.

Las morenas identificadas en cada cuenca se vincularon a un Modelo Digital de Orientaciones (MDO) para la obtención del parámetro morfométrico de orientación. Al igual que para la obtención de alturas, se utilizó el complemento Estadísticas de Zona, que en este caso, se empleó para extraer el valor de orientación media de cada depósito glaciar. Para ello se generó, a partir del MDE, un Modelo Digital de Orientaciones (MDO) (Análisis del terreno- Orientación) en el que cada pixel arroja el valor angular respecto al norte geográfico. Dado que la orientación media en grados puede generar errores, se utilizó la metodología descrita en el Manual para la

realización del Inventario Nacional de Glaciares y Ambiente Periglacial (2014) realizando los cálculos correspondientes en radianes y posterior conversión a grados. Las orientaciones vendrán dadas por clases correspondientes a los 8 puntos cardinales, que se distribuyen de la forma descripta en la Tabla 3.

Tabla 3: Puntos Cardinales y sus correspondientes ángulos de orientación.

ORIENTACIÓN	VALOR °
N	0-22,5
NE	22,5-67,5
E	67,5-112,5
SE	112,5-157,5
S	157,5-202,5
SO	202,5-247,5
O	247,5-292,5
NO	292,5-337,5
N	337,5-360

RESULTADOS

EVOLUCIÓN DE GLACIARES DEL PLEISTOCENO TARDÍO

En el área de estudio, se cartografiaron todas las morenas encontradas a lo largo de los valles focalizando la atención en aquellas que por su contexto geomorfológico fueron consideradas que se correspondían con el UMG.

Si bien, para la reconstrucción del Último Máximo Glacial se utilizaron las morenas correspondientes a este máximo avance, también se consideró de interés la inclusión en la cartografía de las morenas relacionadas a glaciaciones anteriores (UMG Local) y posteriores (Tardiglacial) ya que su representación cartográfica contribuye al reconocimiento con mayor precisión de las morenas del máximo avance.

Se identificaron un total de 1.202 depósitos morénicos que se desarrollaron durante las diferentes glaciaciones a lo largo de los valles estudiados de los Andes Centrales (Figura 6). Debido a la extensión del área de estudio la misma se dividió en 5 sectores siguiendo un criterio latitudinal y por las cuencas comprendidas en el análisis. De las dataciones disponibles se recopiló un total de 38 morenas fechadas para el Pleistoceno tardío que nos permiten delimitar las glaciaciones ocurridas (Figuras 7, 8, 9, 10 y 11) durante este periodo e inferir edades de avances para las cuencas que no cuentan con dataciones hasta el día de la fecha.

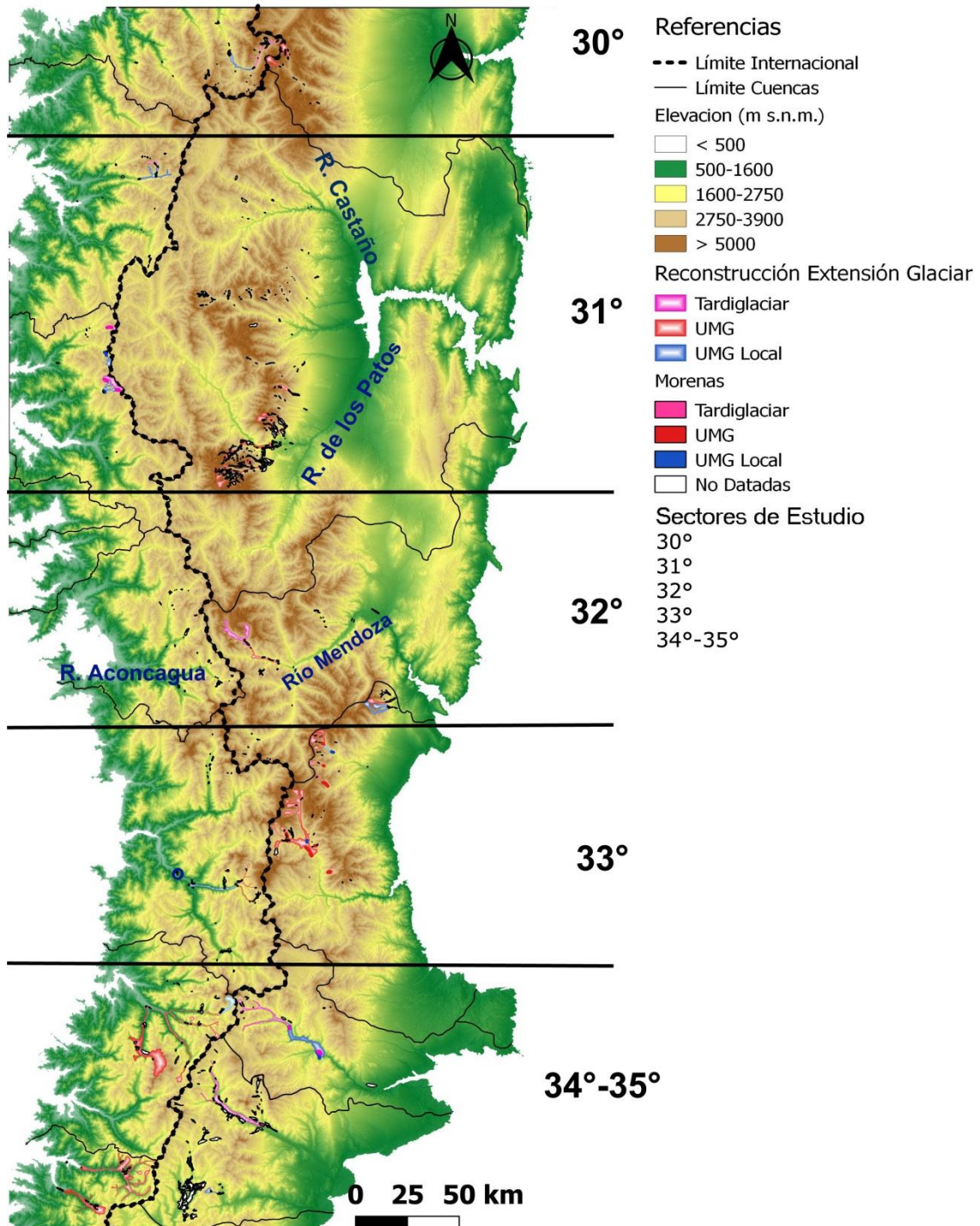


Figura 6: Región de los Andes Centrales acotada bajo un criterio altitudinal (900 m s.n.m. en la vertiente occidental) y (1500 m s.n.m. en la vertiente oriental) indicando los sectores de estudio.

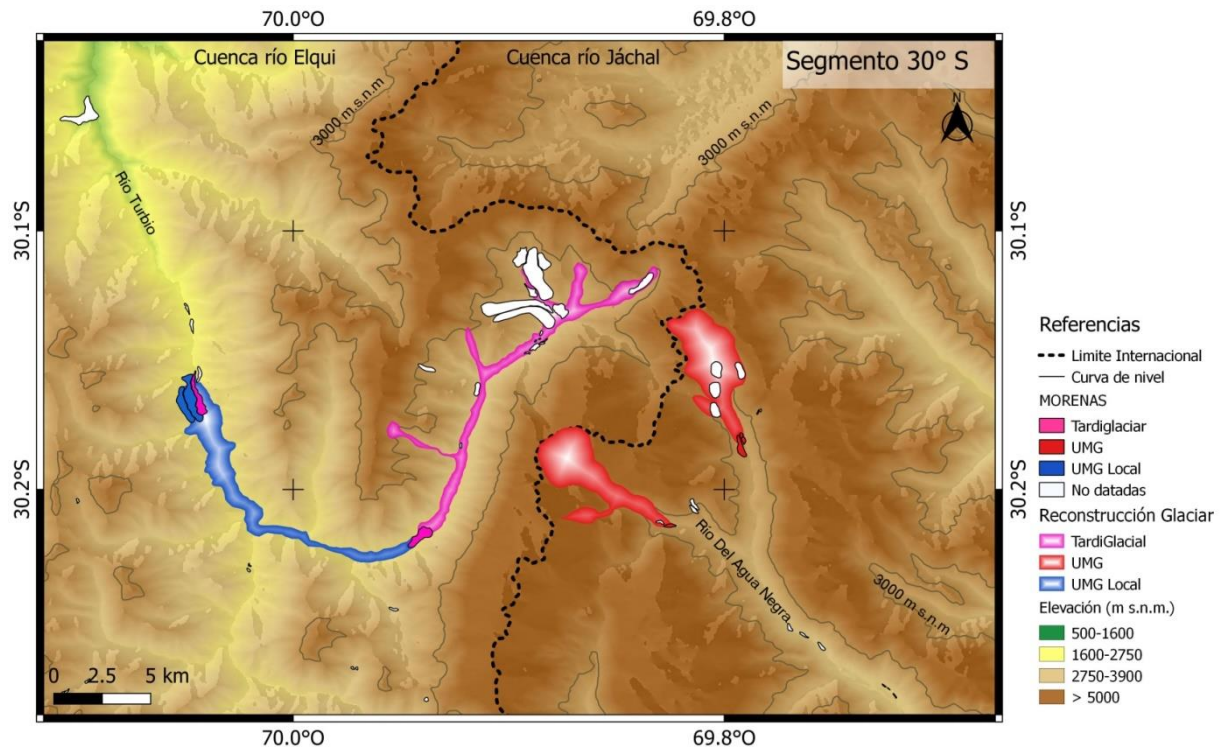


Figura 7: Delimitación de las Glaciaciones en los 30° de latitud sur en base a la altitud y el tamaño de las morenas preservadas del UMG Local (color azul), UMG (color rojo) y TardiGlaciar (color rosa) .

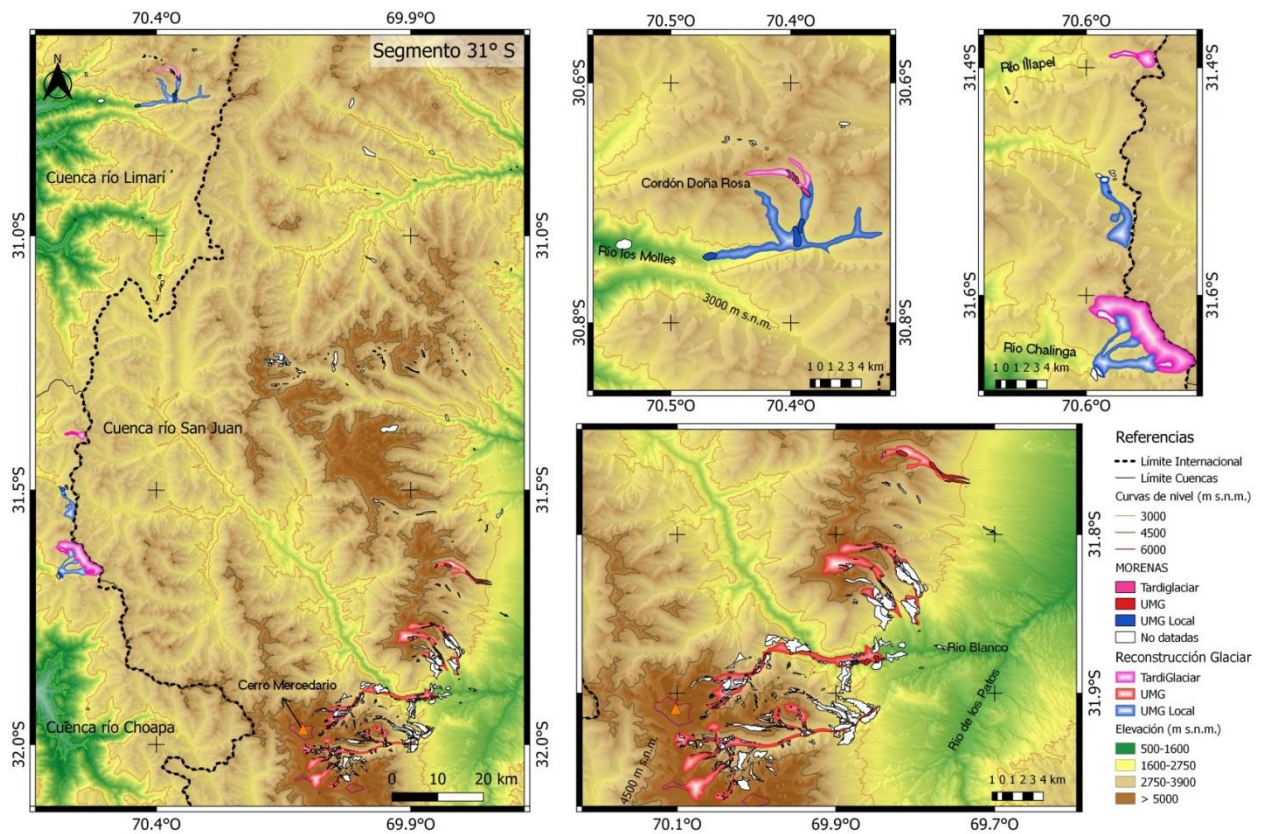


Figura 8: Delimitación de las Glaciaciones en los 31° de latitud sur en base a la altitud y el tamaño de las morenas preservadas del UMG Local (color azul), UMG (color rojo) y Tardiglacial (color rosa). (1) Reconstrucción de la extensión glaciar en la cuenca del río Limarí. (2) en la cuenca del río Choapa. (3) y en la cuenca del río San Juan

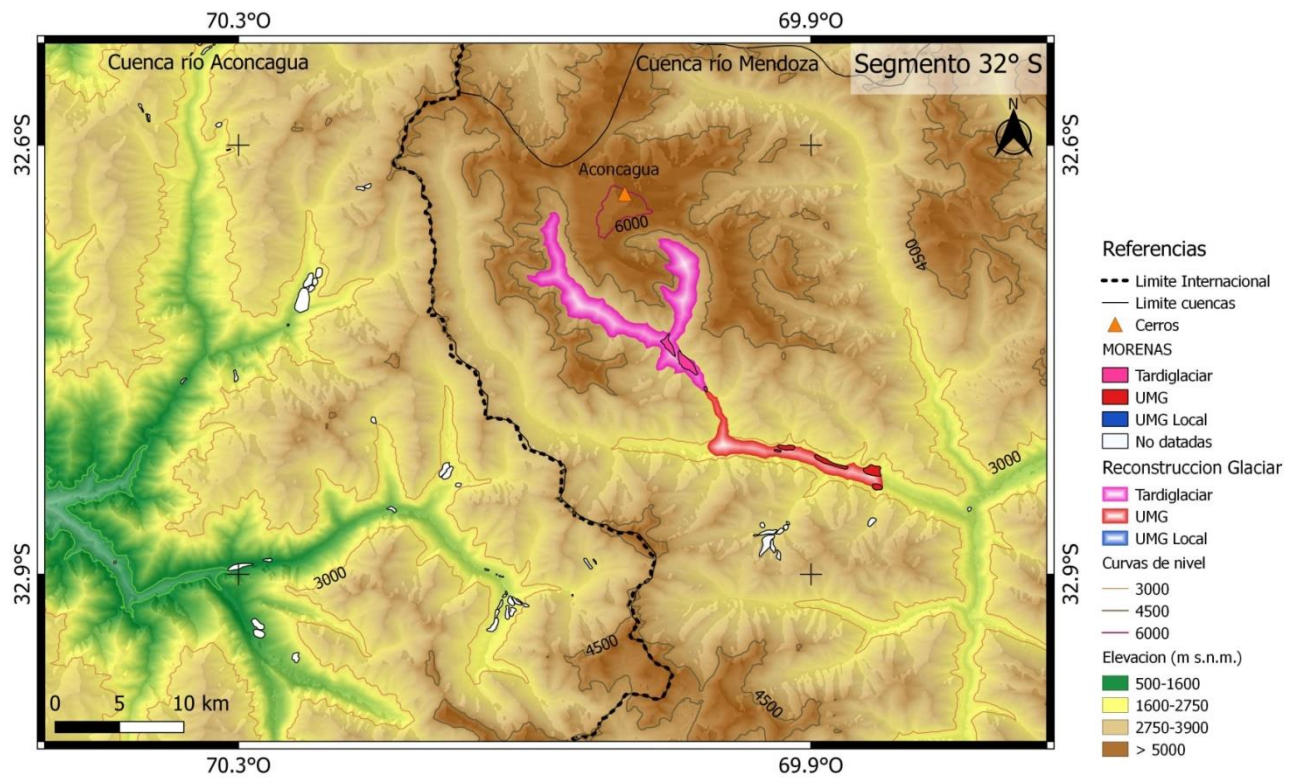


Figura 9: Delimitación de las Glaciaciones en los 32°de latitud sur en base a la altitud y el tamaño de las morenas preservadas del UMG Local (color azul), UMG (color rojo) y Tardiglaciár (color rosa) .

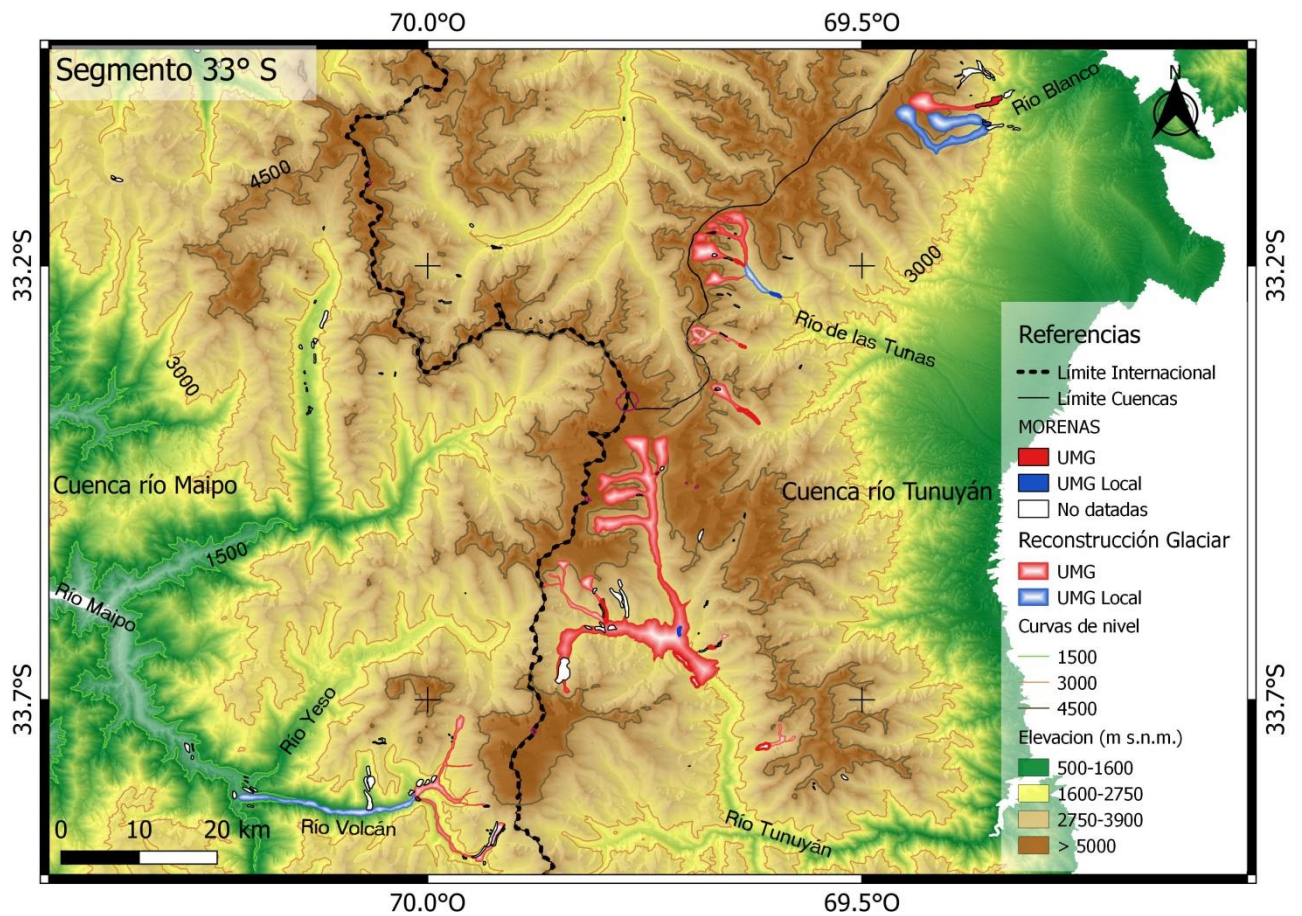


Figura 10: Delimitación de las Glaciaciones en los 33° de latitud sur en base a la altitud y el tamaño de las morenas preservadas del UMG Local (color azul), UMG (color rojo) y Tardiglacial (color rosa) .

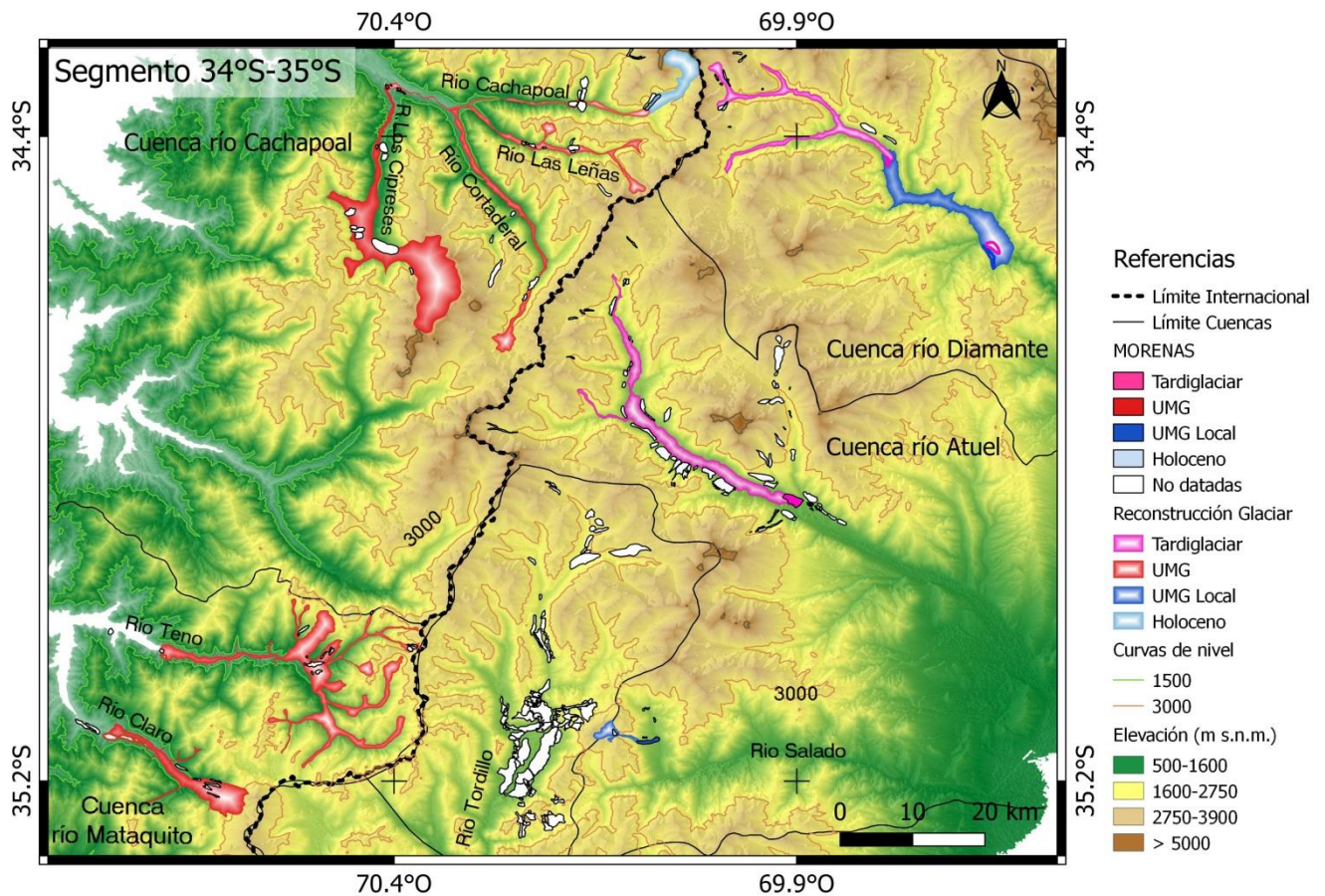


Figura 11: Delimitación de las Glaciaciones en los 34- 35°S de latitud sur en base a la altitud y el tamaño de las morenas preservadas del UMG Local (color azul), UMG (color rojo) y Tardiglaciario (color rosa).

INVENTARIO DE MORENAS DEL UMG

Antecedentes en la zona norte del área de estudio (30°): Valle de Jachal (Argentina) / Valle del Elqui (Chile).

Hacia el norte del área de estudio en el valle del Elqui existen registros paleoglaciares para el UMG Local y el Tardiglaciario (Figura 12). La glaciación más extensa ocurrió hace ~ 37 Ka (UMG Local o Pre -UMG) evidenciada por dos arcos de morena lateral escalonados que se desarrollaron 22,57 km (ML1) y 22,15 km (ML2) aguas abajo de la cabecera de cuenca en el rango de elevaciones de 3.184 y 3.351 m s.n.m y en una ladera con orientación noreste. Mientras, que 17,8 km aguas abajo de la cabecera de cuenca se formó una morena frontal (MF) hace ~17-12 Ka (Tardiglaciario) alcanzando una altitud de 3.525 m s.n.m con una orientación promedio hacia el oeste (Figura 12 a).

Adicionalmente, un depósito de diamictitas (ML3) cuyo origen glacial es incierto, se ubica entre los dos frentes glaciares anteriormente descritos (Riquelme et

al., 2011), a 21,8 km de la cabecera de cuenca y arroja edades ^{10}Be de 16,5 Ka, sincrónico al Tardiglaciario.

Hacia el este, en la cuenca del Agua Negra, afluente del río Jáchal, no existen registros de dataciones disponibles para los avances glaciares encontrados a lo largo del valle. Los mismos se encuentran en un rango de altitud de ~ 3.770 a 4.800 m s.n.m concentrándose principalmente en laderas con exposición suroeste (Figura 12 b).

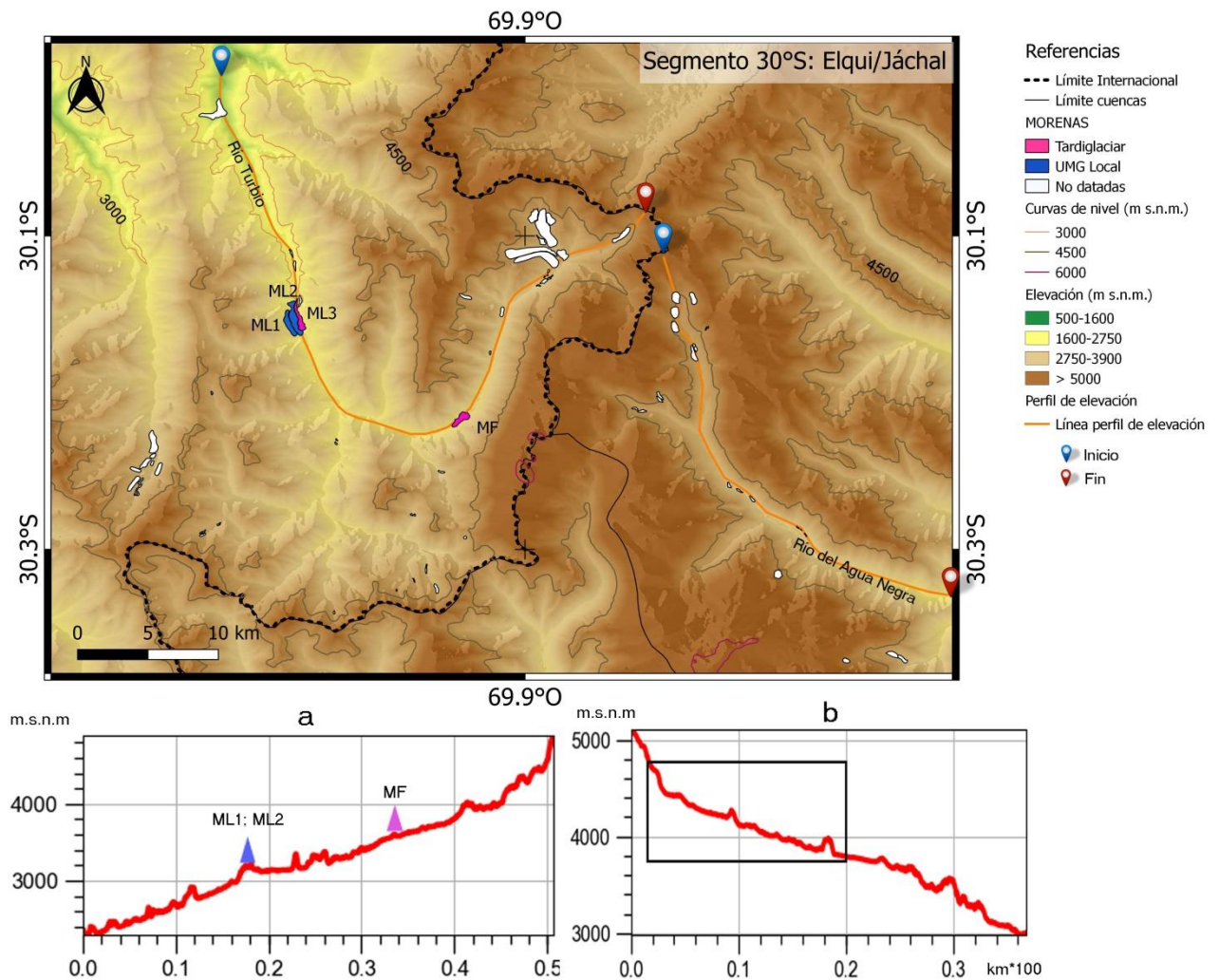


Figura 12: Mapa de las morrenas identificadas en las cuencas del Elqui (Chile) y Jáchal (Argentina). Se señalan los avances datados en el rango del Tardiglaciario (color rosa) y el Último Máximo Glaciario Local (color azul). (a) Perfil topográfico del valle del Elqui indicando la altura de los avances glaciares datados. (b) Perfil topográfico del Valle Jáchal y las altitudes a las que se encuentran las morrenas (recuadro negro) (Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo).

Segmento 31° de latitud: Cuenca del río San Juan / Cuenca del río Limarí

Las edades de exposición en la cuenca del río Limarí (31°) evidencian avances glaciares durante en Tardiglaciario y para el UMG Local. El máximo avance se estableció en $\sim 37 \pm 3$ Ka (UMG Local), para la morrena que se preserva 8 km aguas

abajo de la cabecera de cuenca a una altitud de 2.483,96 m s.n.m. y orientada hacia el sur. Entre $14,7 \pm 1,5$ y $11,6 \pm 1,2$ Ka se produjeron varios avances glaciales que probablemente documentaron los rápidos cambios de temperatura del avance Tardío, así como condiciones muy húmedas en ese momento (Zech et al., 2017). Las cuatro morenas que evidencian estos avances se conservan a una distancia de ~ 5 km en un rango de altitud de 3.564 a 3.756 m s.n.m., siendo la más joven la que se encuentra a mayor altura con orientaciones promedio hacia el este, sur y sureste (Figura 13.1).

En la vertiente occidental (Argentina), para los 31° S de latitud, existen dos registros de avances para el UMG en el valle de Ansilta (Figura 13.2), el más joven fechado en una edad media ponderada de $18,2 \pm 0,8$ Ka, a sólo 4,9 km de la cabecera de cuenca alcanzando una altitud de ~ 4.200 m s.n.m dispuesto sobre una ladera con orientación norte, mientras que el avance más antiguo está representado por crestas morénicas datadas en $26,6 \pm 1,1$ Ka que se elevan desde los 3.100 – 3.600 m s.n.m dispuestas en diversas orientaciones (E,SO,SE), siendo la última capa de hielo más extensa que avanzó hacia el este hasta el piedemonte en el valle con una longitud máxima de 12,38 km.

En el valle del río Blanco ($31^\circ 50'S$, San Juan) se han encontrado 5 depósitos morénicos que se encuentran en el rango de avance glaciar del UMG fechados en $16,08 \pm 2,2$ Ka el más joven y $26,8 \pm 1,6$ Ka el más antiguo en laderas con orientación sur y este respectivamente. En el valle principal, las masas de hielo durante el UMG recorrieron 27 km a lo largo de la cuenca llegando a una cota mínima de ~2.300 m s.n.m. También existen evidencias del UMG en los valles tributarios a 3.183 m s.n.m, 3.540 m s.n.m y 3.623 m s.n.m con orientaciones hacia el O, SE y E respectivamente (Figura 13.3). Cercana a los depósitos glaciares datados en el valle principal, a 14 km de la cabecera de cuenca, se identificó una morena sincrónica al UMG Local fechada en $37,54 \pm 2,6$ Ka a la misma altitud la morena más antigua relacionada con el UMG (~2.300 m s.n.m) orientada hacia el sur.

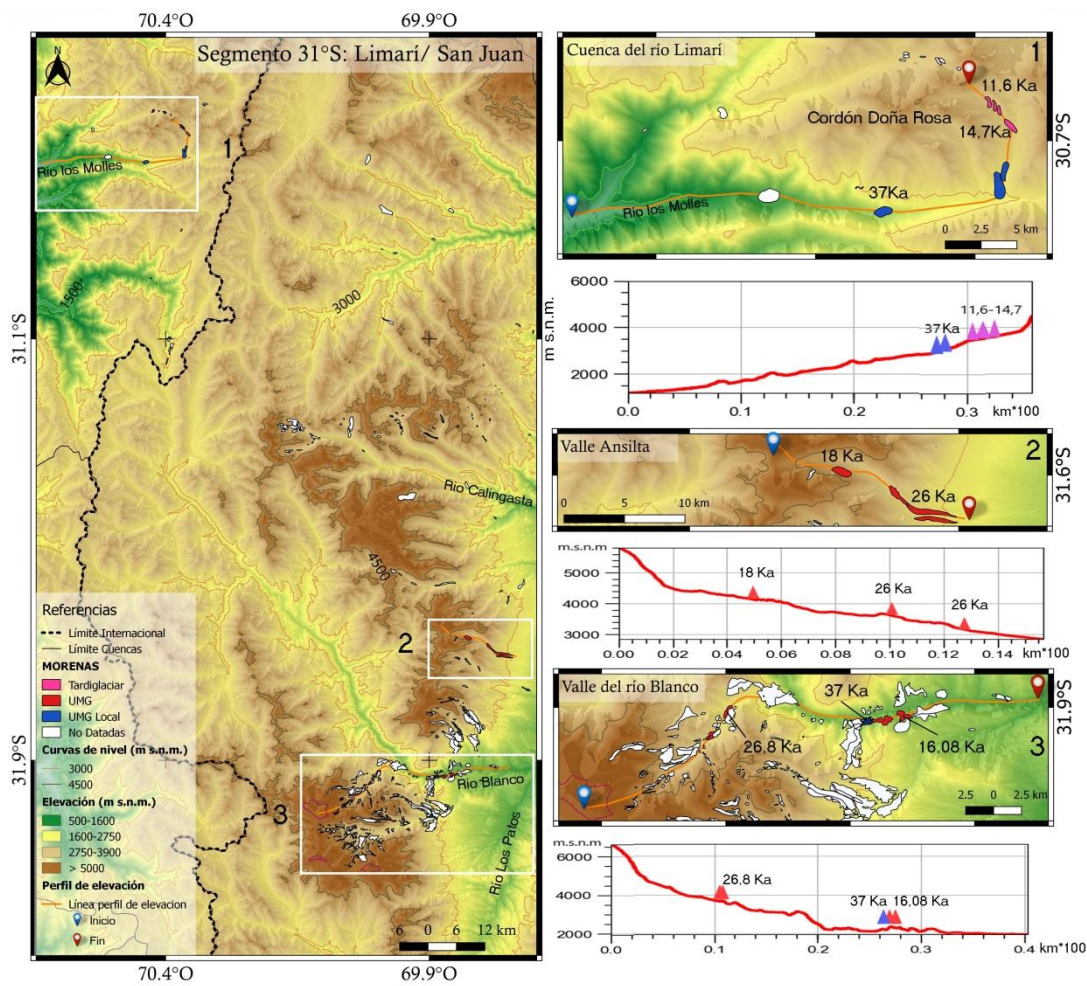


Figura 13: Morenas identificadas a los 31° S de latitud en los Andes Centrales. (1) Primer plano de los avances glaciares datados en la cuenca del río Limarí y su correspondiente perfil topográfico generado a partir del MDE. (2) Primera vista de las morenas datadas para el UMG por Terrizano (2017) en el Valle Ansilta. (3) Morenas en el valle del río Blanco del UMG (color rojo) y el UMG Local y su perfil topográfico a lo largo de cuenca indicando la ubicación de los depósitos morénicos datados (Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo).

Segmento 32°: Valle del río Mendoza y río Aconcagua

A lo largo del valle del río Mendoza, se reconocen dos avances para el Pleistoceno tardío, la glaciación de Penitentes evidenciada por una morena lateral datada en $31 \pm 3,1$ Ka sincrónica con el UMG y el avance más joven 'Almacenes till' ocurrido ~ 14 Ka o entre 10 - 11 Ka sincrónico al Tardiglacial. Durante el avance de Penitentes, el sistema glaciar descendió por el río de Las Cuevas y el valle de Los Horcones hasta una altitud de ~ 2.500 m s.n.m. extendiéndose 32,15 km desde la cabeza del circo del Cerro Aconcagua y se desarrolló principalmente sobre la ladera sur del valle. Mientras que el avance subsiguiente de Almacenes se extendió 19 km alcanzando una altitud de ~ 3.250 m s.n.m. con una orientación promedio hacia el sur (Figura 14).

Los depósitos glaciares del valle Aconcagua del sector chileno se han distinguido basados en técnicas de datación relativas. Estas glaciaciones se llamaron Salto del Soldado (1.300 m s.n.m), Guardia Vieja (1.600 m s.n.m), Ojos de Agua (2.100 m s.n.m) y Portillo (2.800 m s.n.m) (Caviedes y Paskoff, 1975). Según estos autores, el primero debe corresponder a la Glaciación Pre-Última y Portillo representa la Última Glaciación. Sin embargo, ambos depósitos han sido reinterpretados como avalanchas de rocas (Abele, 1984; Antinao y Gosse, 2009; Welkner et al, 2015). Por lo tanto no existen cronologías absolutas disponibles para la cuenca del río Aconcagua (depósitos blancos Figura 14a).

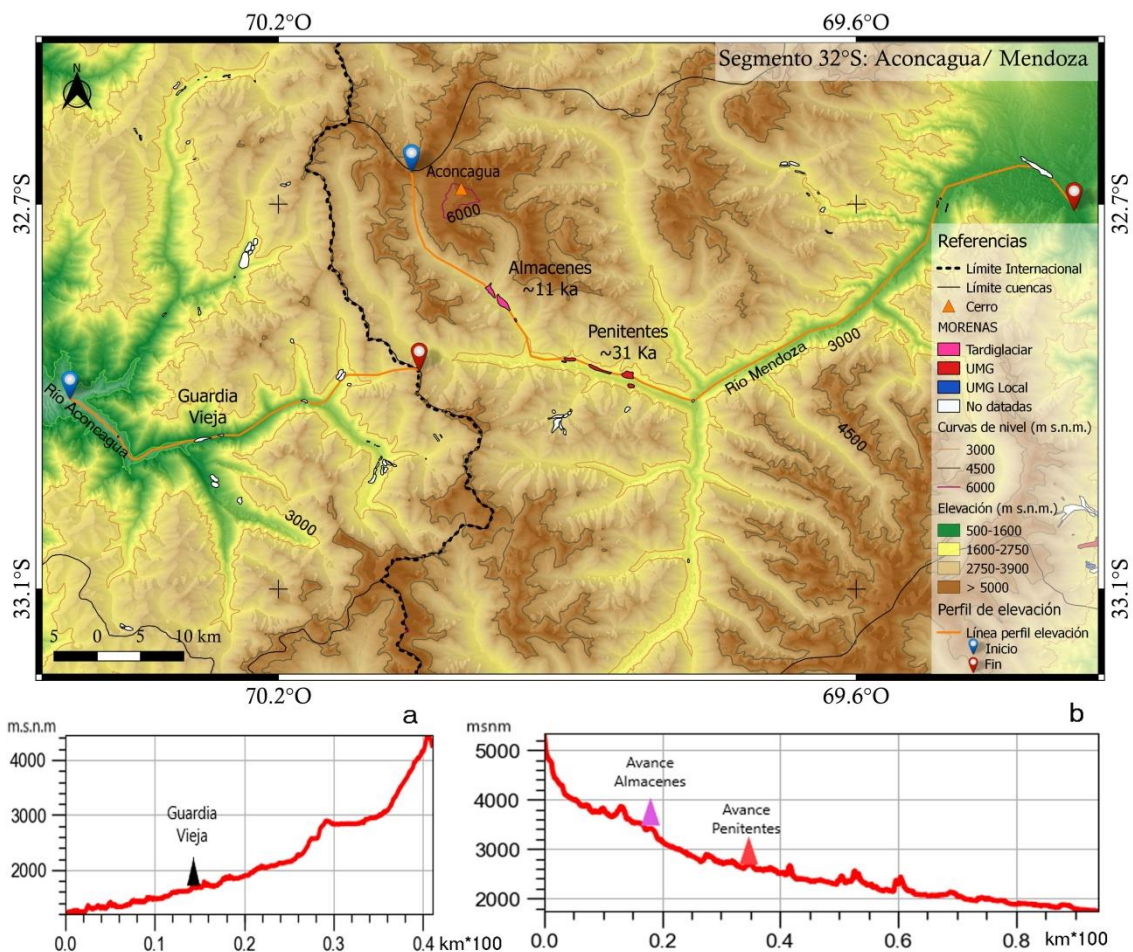


Figura 14: Morenas identificadas en el transecto de los 32° de latitud sur a lo largo de las cuencas del río Aconcagua y Mendoza. (a) Perfil topográfico de la cuenca del río Aconcagua señalando las morenas identificadas en el perfil. (b) Perfil topográfico de la cuenca del río Mendoza que muestra las morenas datadas para el UMG (color rojo) y Tardiglacial (color rosado) (Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo).

Segmento 33°: Valle del río Blanco (Mendoza, Arg.) / Valle del Maipo (Chile).

En la cuenca del río Blanco (33° S) se han identificado dos avances glaciares a lo largo de los ríos Angostura y Las Mulás (Figura 15), ambos afluentes de dicho río, que se encuentran en el rango de avance glacial del UMG y UMG Local (Moreiras et al., 2017). Una morena en la ladera sur del valle las Mulás arrojó una edad de ~40 Ka

(Figura 15 b) (Moreiras et al., 2017), la misma se preserva a una altitud de 2.928 m s.n.m y a una distancia de 8,62 km de la cabecera de cuenca. Mientras, que sobre el valle Angostura la morena más joven, fechada entre 8-25 Ka se preserva a una altitud 3.279 m s.n.m y a aproximadamente 9 km de la cabecera de cuenca. Este depósito expuesto hacia el sur evidencia el período del Último Máximo Glacial para esta región (Figura 15.a).

Hacia el oeste ($33^{\circ}50'S$), en el valle del Maipo (Figura 15.2) existen registros de avances para UMG y UMG Local. La morena lateral del complejo la Engorda en el valle del Volcán fechada entre $\sim 24-18$ Ka y ~ 10 Ka representa dos pulsos del Pleistoceno tardío, siendo el más antiguo correlacionado con el UMG. La misma se conserva a una altitud de 2.235 m s.n.m sobre una ladera con orientación suroeste y a una distancia de 10,24 km del volcán San José (5.856 m s.n.m) en la frontera con Argentina. A 28 km aguas abajo de la cabecera de cuenca, en el vecino valle de Yeso ($33^{\circ} 45'$), los depósitos fluvio-glaciales relacionados con la morena San Gabriel tienen una fecha por luminiscencia ópticamente estimulada (OSL) de ~ 45 y 36 Ka interpretados como evidencia del UMG local. Ambas morenas se desarrollaron en un rango de altitud de 1.300-1.400 m s.n.m concentrándose en las laderas de exposición suroeste y noreste.

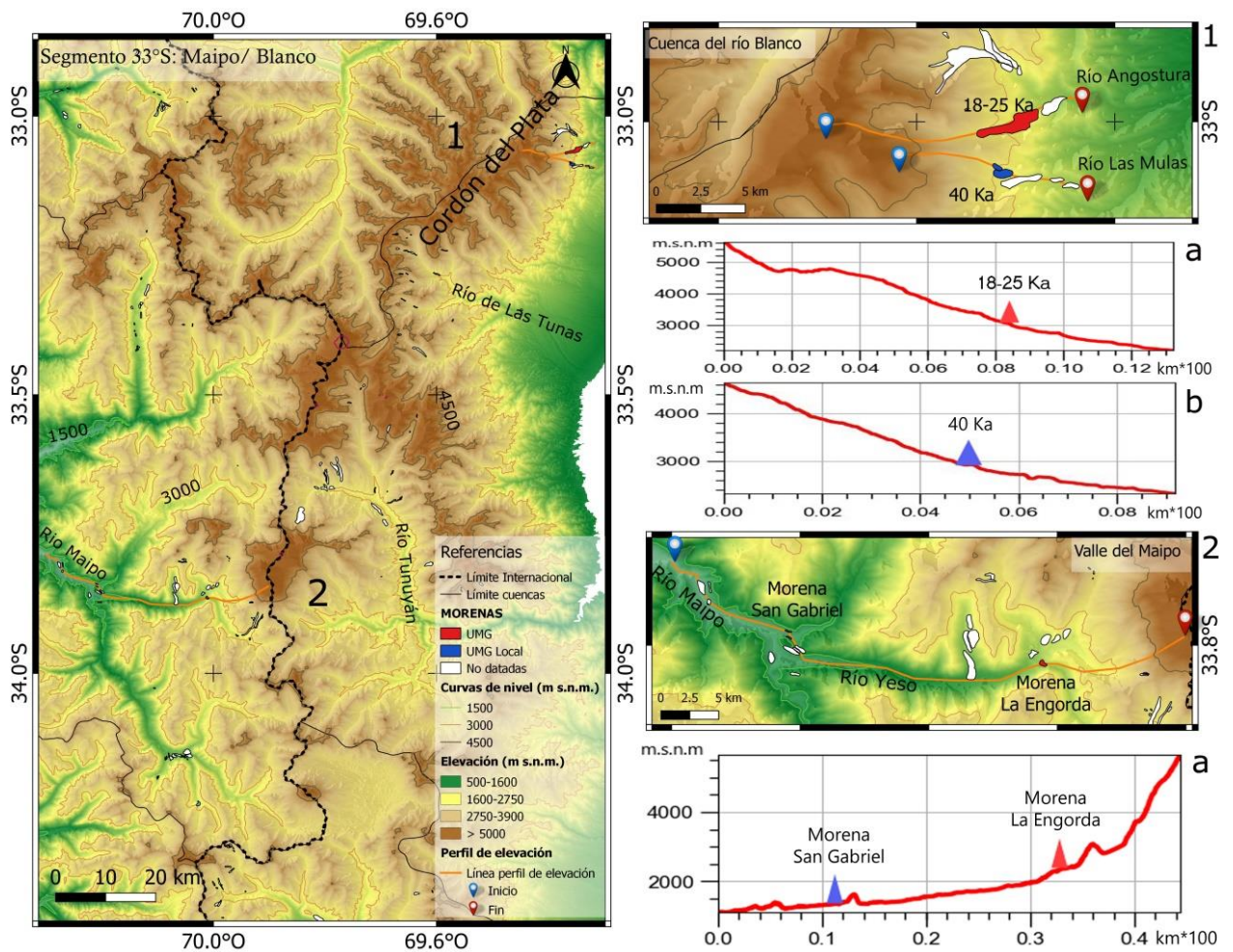


Figura 15: Mapa de las morenas identificadas en el transecto de los 33°S en la cuenca del río Blanco y el Valle del Maipo. (1) Imagen ampliada de la de las morenas encontradas en la cuenca del río Blanco datadas para UMG (color rojo) y el UMG Local (color azul). (a) Perfil topográfico del río Angostura. (b) Perfil topográfico del río Las Mulas. (2) Imagen ampliada del Valle del Maipo y su perfil topográfico indicando las altitudes que alcanzaron los avances (Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo).

Segmento 34°-35°S: Valle del río Atuel (Argentina) / valle del río Cachapoal (Chile).

A lo largo del sistema glacial del valle del Atuel (34° 40'S), la morena del Arroyo Malo datada en ~ 11Ka, fuera del rango del UMG y Pre-UMG se conserva a una distancia de 37 km de la cabecera de cuenca en una altura aproximada de 2.234 m s.n.m y dispuesta sobre la ladera sur del valle principal (Figura 16.2).

La extensa morena ubicada en la estación de esquí Las Leñas (42,3 Ka) en el río Salado (34° 50'S), coincidente en el tiempo con el UMG Local se preserva a 26 km de la cabecera de la cuenca, alcanzando una altitud de ~2.300 m s.n.m.. La misma cruza lateralmente el valle y de esta forma presenta una exposición hacia el este (Figura 16.3).

Recientemente, el UMG ha sido reconocido en la cuenca del río Cachapoal (34° 20' S), donde una morena lateral preservada en la localidad de Los Cerrillos, a ~34 km de la cabecera de cuenca. Este evento datado en $20,3 \pm 2,9$ y $21,9 \pm 5,3$ Ka (Charrier et al., 2019) se conserva a ~1.200 m s.n.m (Figura 16.1). Aguas arriba las morenas holocenas cercanas al glaciar Cachapoal (~ 6 km) evidencian el inicio de la Edad Meghalayana, al final del Holoceno con una edad $3,8 \pm 0,8$ Ka preservadas a 2.739 m s.n.m, hacia el sur.

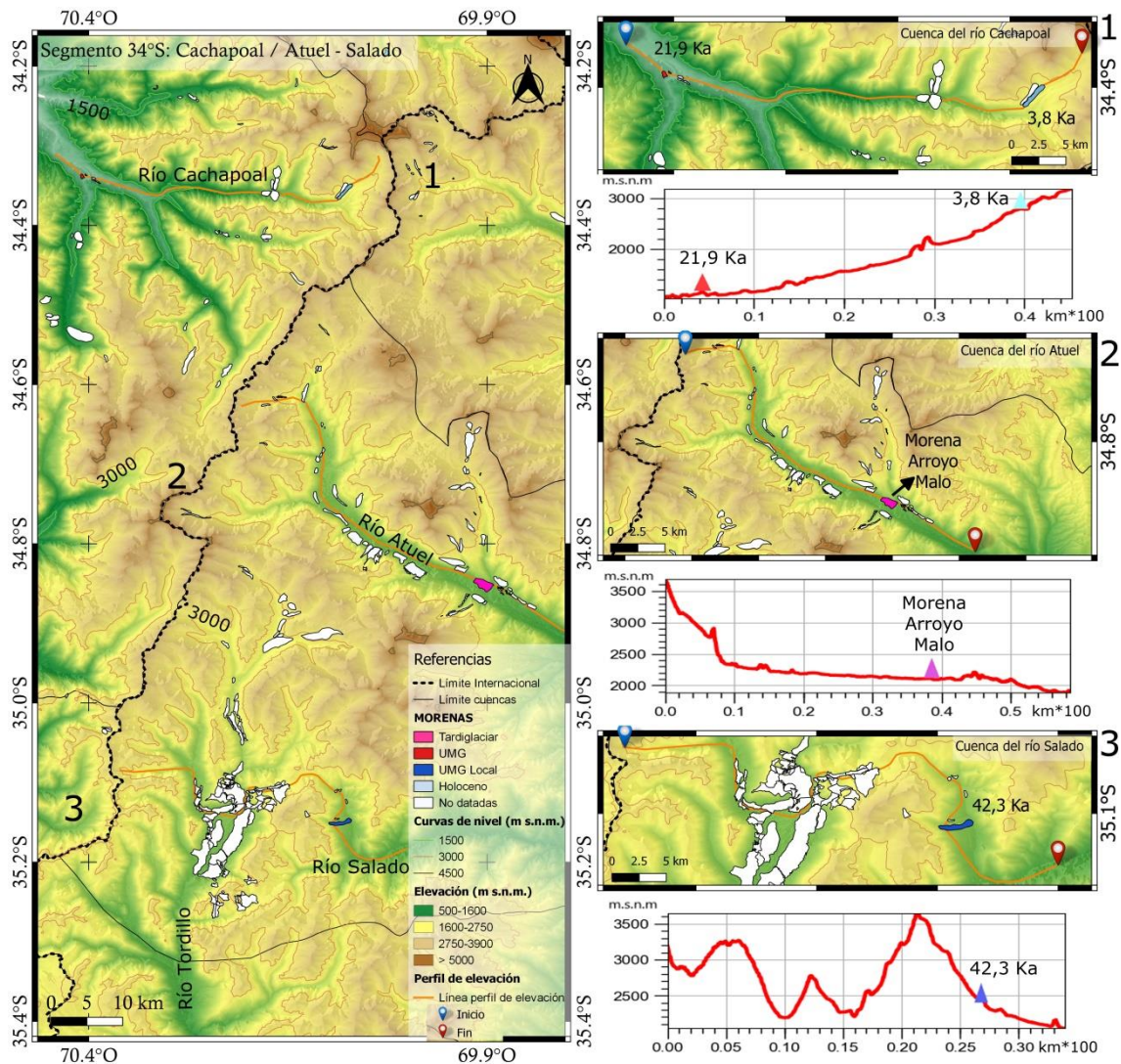


Figura 16: Mapa de las morenas identificadas en el transecto de los 34°-35°S. (1) Imagen ampliada de las morenas de río Cachapoal sincrónicas al UMG (roja) y un reciente avance holoceno. Debajo se observa el perfil topográfico del valle del Cahapoal. (2) Imagen ampliada de la cuenca del Atuel y el perfil longitudinal. (3) Imagen ampliada del avance Las leñas en la cuenca del río Salado y su correspondiente perfil topográfico (Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo).

Correlación de edades

Con el objeto de extender el estudio a las cuencas que no poseen dataciones y obtener una interpretación general de la evolución glaciaria del pasado en la zona, se correlacionaron avances mapeados con los eventos datados en valles vecinos o cercanos basado en la altitud a las que se desarrollaron los depósitos glaciares. En las figuras 17, 18, 19, 20, 21 y 22 se representaron los rangos altitudinales en los que se disponen los depósitos a lo largo de las cuencas y su correlación con las diferentes glaciaciones reconocidas en los valles contiguos.

En la zona norte de los Andes Centrales, en base a la cronología disponible en el Valle del Elqui ($30^{\circ} 30' S$) y el Cordón Doña Rosa (río Limarí) el rango altitudinal sobre el que se preservan las morenas del Tardiglaciario para estas latitudes en la ladera oeste oscila entre los ~ 3.500 m s.n.m. a 3.800 m s.n.m. Los avances del UMG Local en tanto se preservan a elevaciones de ~ 3.200 m s.n.m. De esta manera en el valle del río Choapa ($31^{\circ}10' S$) (Figura 17), las dos morenas del afluente Chalinga que se conservan a 3774 y 3676 m, temporalmente se corresponderían con el periodo de Tardiglaciario como así la extensa morena que se preserva en la cuenca de Illapel a 3.557 m s.n.m.. En menores altitudes, 5 km aguas abajo de los depósitos correlacionados al Tardiglaciario en la subcuenca del río Chalinga, se halla una morena a 3.244 m s.n.m, y sobre el afluente del río Illapel, también se conserva un depósito morénico a 3.247 m s.n.m. (~ 3.200 m s.n.m.) pudiendo ser sincrónicos al UMG Local.

Hacia el lado argentino, en la cuenca del río San Juan, las dataciones se limitan a la parte sur de la cuenca, en el valle de Ansilta ($31^{\circ} 40' S$) y en el valle del río Blanco ($31^{\circ} 50' S$, San Juan). Los depósitos morénicos datados para el UMG representan dos pulsos de avance glaciario, el primero datado en 18 Ka se preserva a una altitud de ~ 4.200 m s.n.m, mientras que los avances fechados en 27 Ka vinculados al segundo pulso del avance en el valle se encuentran en un rango altitudinal de 3.100 a 3.600 m s.n.m. En el valle de Aguas Negras ($30^{\circ} 30' S$), se registran dos avances que pueden correlacionarse al primer pulso del UMG del Valle Ansilta dado que se conservan sobre 4.200 m s.n.m (Figura 18).

La única morena que se preserva en el valle del río Aconcagua a 1.600 m s.n.m se encuentra fuera del rango altitudinal en el que se desarrollaron los depósitos glaciares durante el Pleistoceno Tardío en los valles cercanos (Valle del Maipo al sur y la cuenca del río Limarí en la sección norte). Se descarta la posibilidad de asociar este avance con las Glaciaciones analizadas en la presente Tesina.

A lo largo de los $33^{\circ} S$, en la vertiente atlántica, las altitudes alcanzadas en el valle superior en la cuenca del río Blanco (Subcuencas de Vallecitos, Angostura y Las Mulás) y las del río Mendoza, indican que existe un posible rango de altitudes tentativas para el UMG entre los 3.300 y 3.500 m s.n.m. De esta forma podríamos asumir una correlación temporal en la cuenca del río de las Tunas en la que se observa un "frente de avance" a ~ 3.500 m s.n.m. conformado por 3 morenas que se preservan en los diferentes afluentes de la cuenca a esta altitud y por lo tanto serían sincrónicas al UMG (Figura 19). Las edades máximas para las glaciaciones del Blanco están limitadas a una edad de ~ 39 Ka (OSL), provenientes de la Angostura fechada

en esa edad y que se preserva a una altitud de 2.960 m s.n.m (Moreiras et al. 2017). En consecuencia, se infiere que la morena que se encuentra en el valle superior de la cuenca a 3.000 m s.n.m se debe haber formado contemporáneamente a la morena Angostura.

Hacia el sur, (-33°60'S) en el valle principal del río Tunuyán (Figura 20), se conserva una morena a 3.300 m s.n.m, lo que permitiría inferir una edad especulativa de 18-25 Ka al correlacionarla con el avance representado por ANG II (~ 3.300 m s.n.m), en la cuenca del río Angostura (-33°0'S). Además en tres valles tributarios, perpendiculares al valle principal se observan depósitos morénicos en el rango de altitudes de 3.300 a 3.400 m s.n.m (3.350; 3.440 y 3.485 m s.n.m) y que descendieron 7 km desde los picos de cada valle, distancia a la que se encuentra el avance ANG II de la cabecera de cuenca. Asimismo sobre el trayecto del valle se preserva una morena a 2.950 m s.n.m. posiblemente sincrónica al UMG Local.

En base a la cronología disponible en la cuenca del Atuel (34° 40'S) y más al sur en el valle del río Salado (34° 50'S), podrían correlacionarse en el valle de río Diamante las morenas que se preservan a ~ 2.200 m s.n.m. con el evento Tardiglacial (11-16 Ka) mientras que los avances que se posicionan a más de 2300 m s.n.m. estarían vinculados con evento del UMG Local. Así en la cuenca del río Diamante (34°), 26 km aguas debajo de la cabecera de cuenca dos morenas preservadas en la margen izquierda del río a 2.175 m s.n.m serían coincidentes al Tardiglacial. Existe otro registro de avance a 2.179 m s.n.m. en el valle principal pero al estar muy distante a la cabecera de cuenca (42 km), se descarta la posibilidad de asociarlo al Tardiglacial. La extensa morena de las Leñas relacionada al último Máximo Glacial Local (UMGLocal/ 30-45 Ka) posicionada a 2.300 m s.n.m permite estimar una edad similar sobre la cuenca del río Diamante para una morena que se conserva a 2.384 m s n.m. (Figura 21).

Al sur del área de estudio (Figura 22), en el valle del río Claro, se observa un complejo de morenas 20 km aguas abajo de la cabecera de cuenca que se desarrollaron a 1.200 m s.n.m, altitud a la que se preserva la morena lateral del río Cachapoal (34° 20'S) fechada en 21 Ka. Asimismo en el valle del río Teno, afluente del río Mataquito se conserva una morena en el mismo rango de altitud a 1.274 m s n.m., lo que nos permitiría inferir que estos depósitos posiblemente se correspondan con el periodo del Último Máximo Glacial.

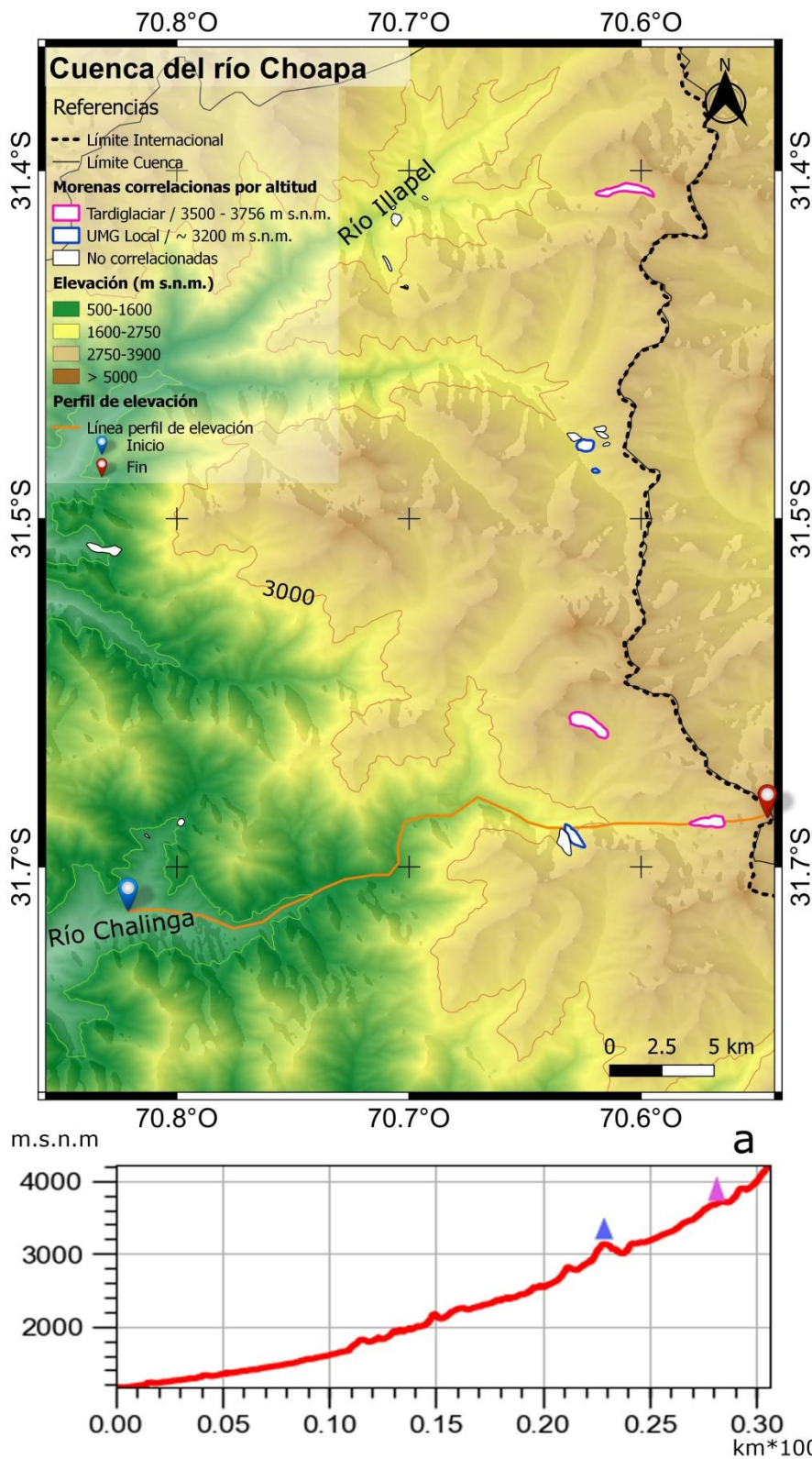


Figura 17: Morenas correlacionadas por altitud al Tardiglaciario (morenas borde rosa) y al UMG Local (morenas borde azul) en la cuenca del río Chopa. (a) Perfil de elevación del río Chalinga que indica la altura (m s.n.m.) de las morenas correlacionadas. Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo.

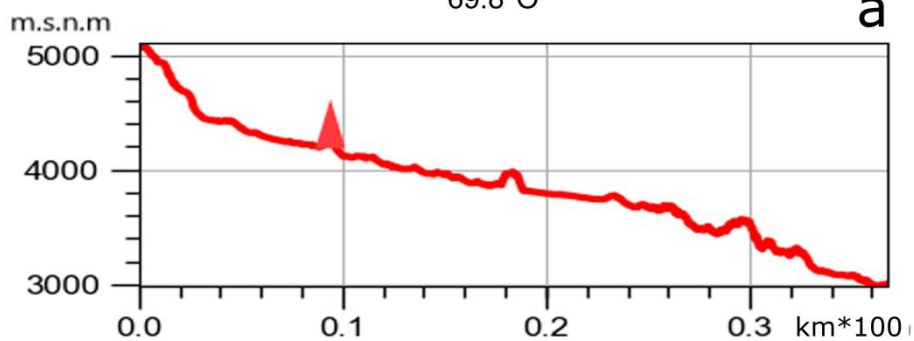
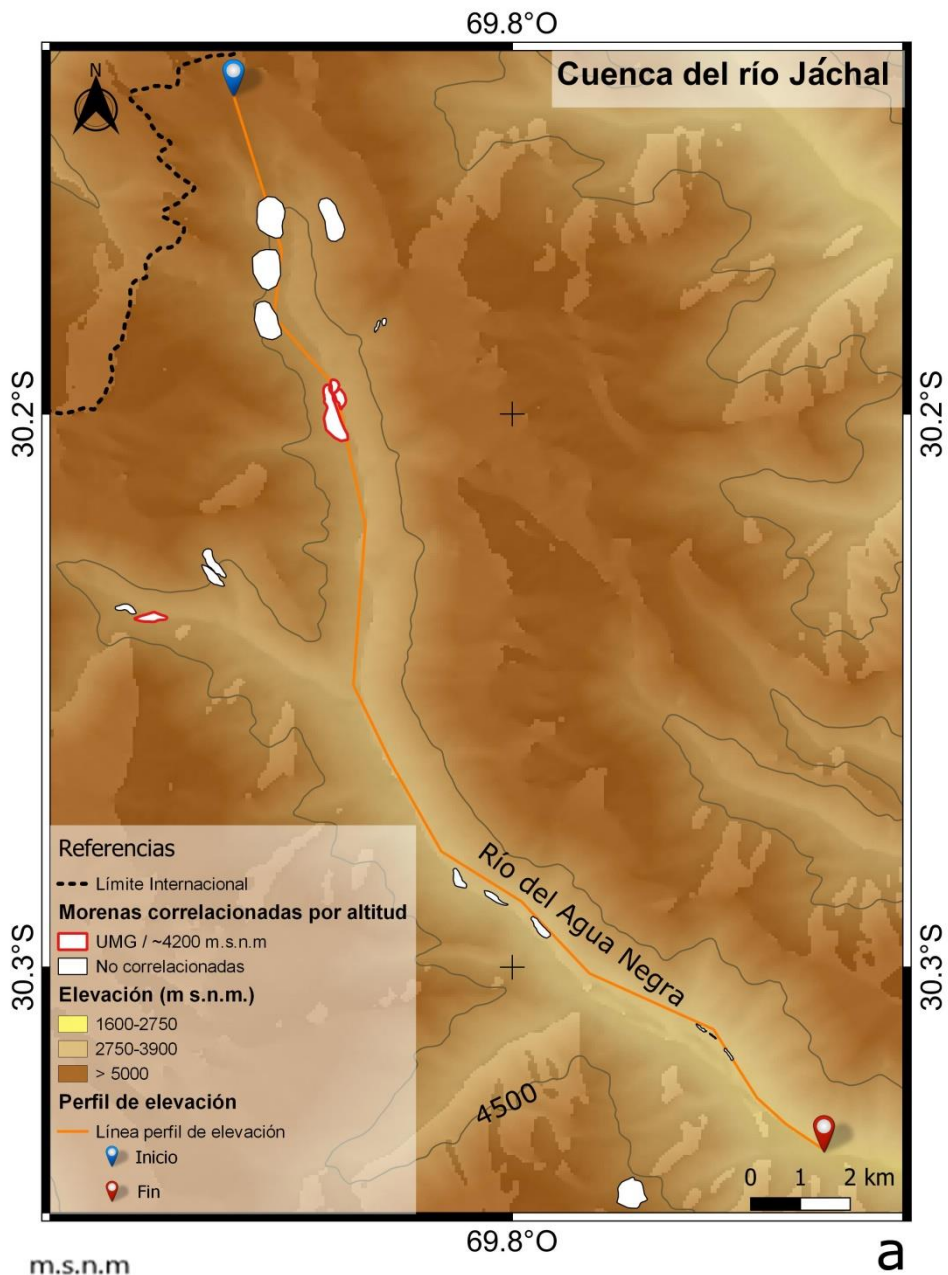


Figura18: Morenas correlacionadas por altitud al UMG (morenas borde rojo) de la cuenca del río Jáchal. (a) Perfil de elevación del río del Agua Negra que indica la altura (m s.n.m.) de las morenas correlacionadas. Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo.

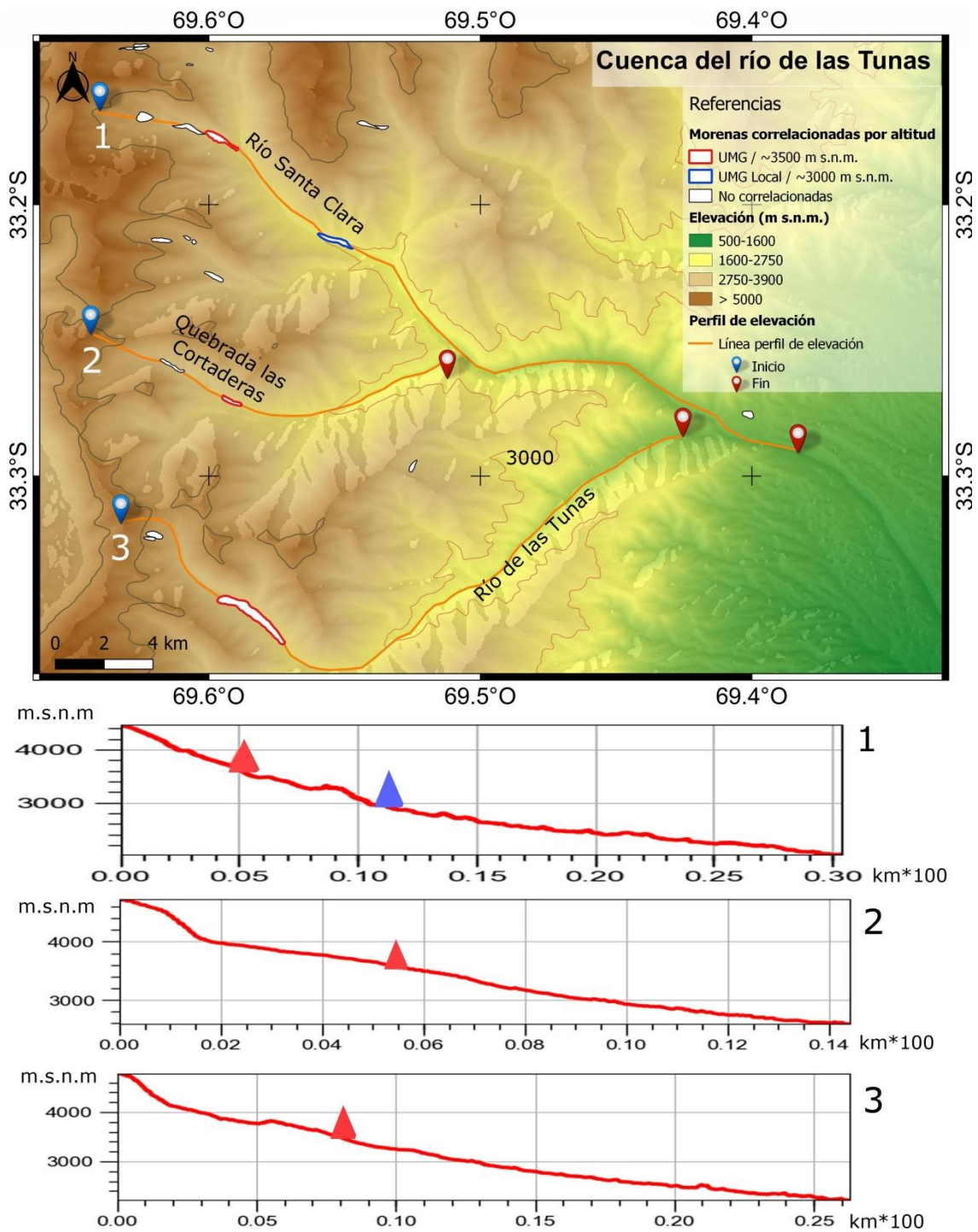


Figura 19: Morenas correlacionadas por altitud al UMG (morenas borde rojo) y al UMG Local (morenas borde azul) en la cuenca de río de las Tunas. (1) Perfil de elevación del río Santa Clara que indica la altura (m s.n.m.) de las morenas correlacionadas. (2) Perfil de elevación de la Quebrada las Cortaderas. (3) Perfil de elevación del río de las Tunas Sentido de lectura: del puntero celeste hacia puntero rojo.

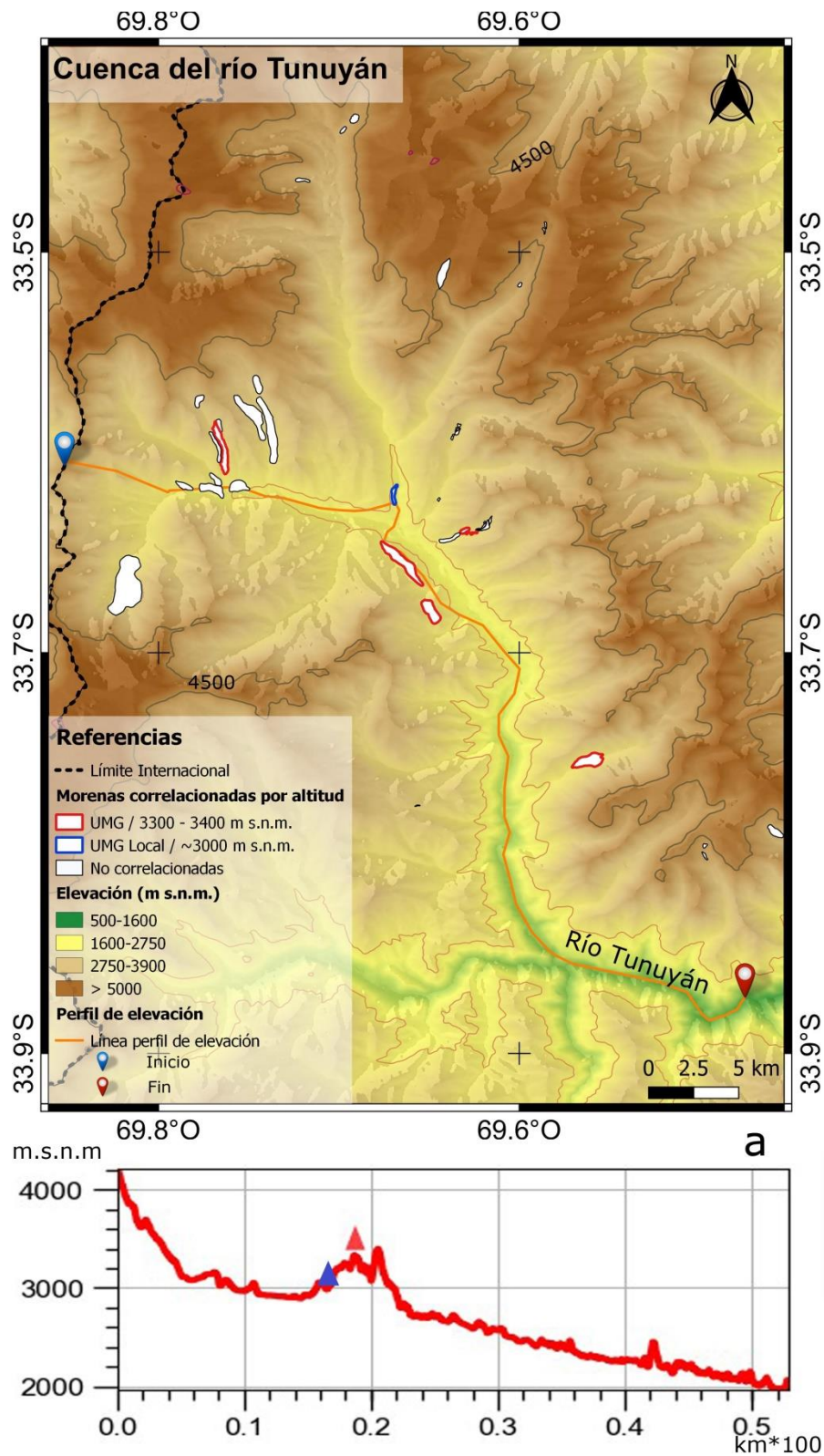


Figura 20: Morenas correlacionadas por altitud al UMG (morenas borde rojo) y UMG Local (morenas borde azul) en la cuenca de río Tunuyán. (a) Perfil de elevación del río Tunuyán que indica que la altura (m s.n.m.) de las morenas correlacionadas. Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo.

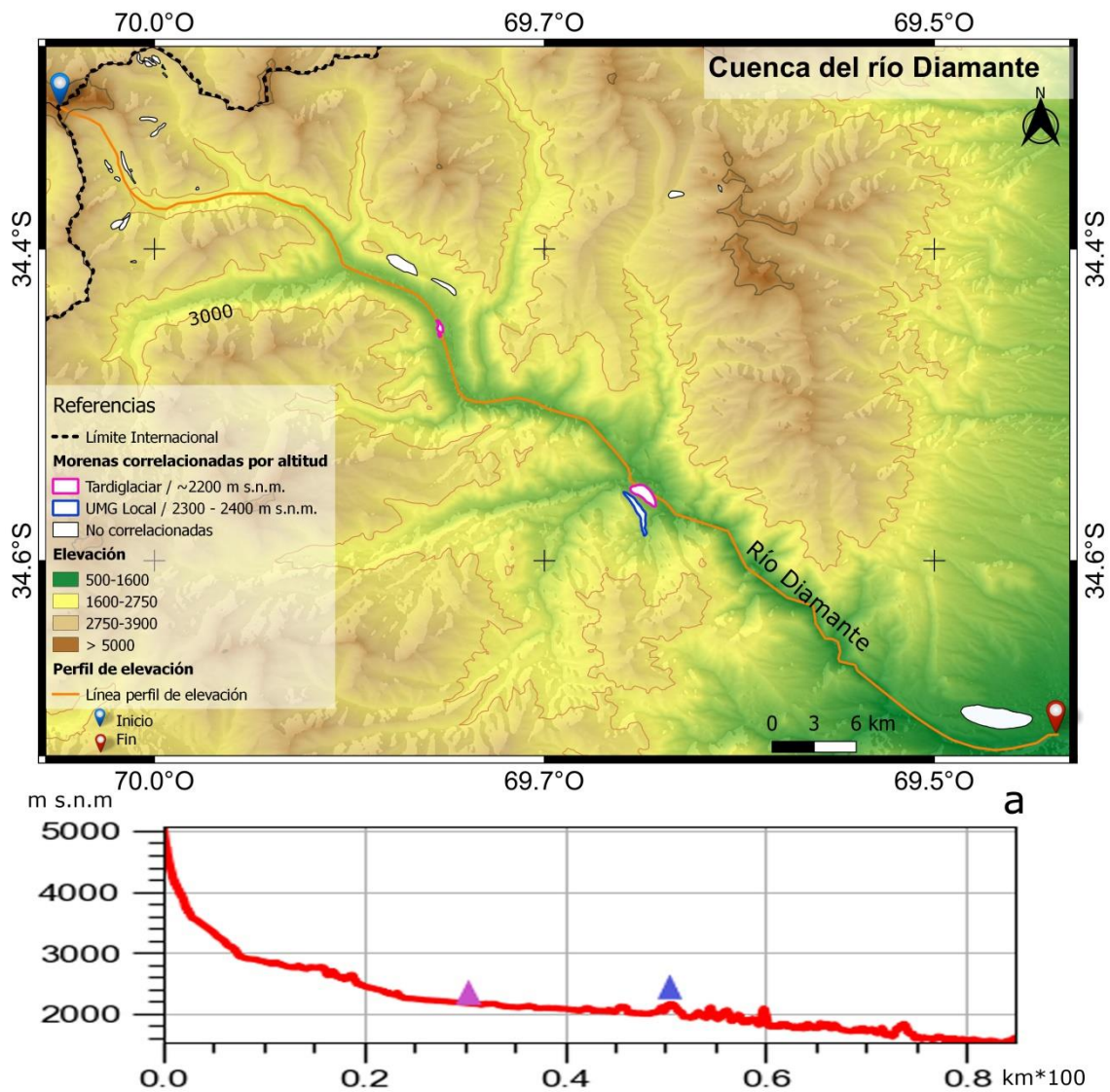


Figura 21: Morenas correlacionadas por altitud al Tardiglacial (morenas borde rosa) y UMG Local (morenas borde azul) de la cuenca del río Diamante.(a) Perfil de elevación del río Diamante que indica la altura (m s.n.m.) de las morenas correlacionadas. Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo.

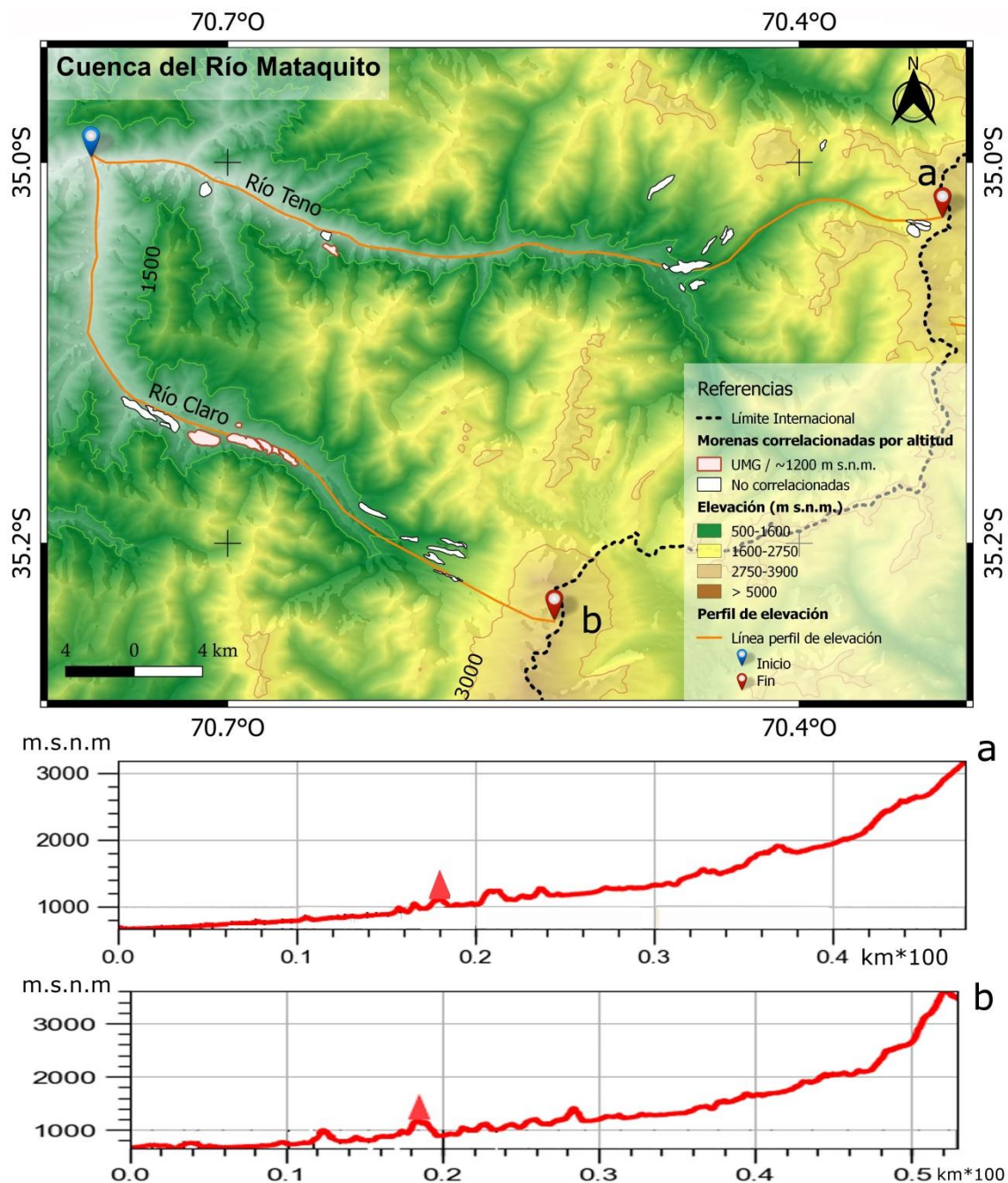


Figura 22: Morenas correlacionadas por altitud al UMG (morenas borde rojo) de la cuenca del río Mataquito. (a) Perfil de elevación del río Teno que indica la altura (m s.n.m.) de las morenas correlacionadas. (b) Perfil de elevación del río Claro. Sentido de lectura: del puntero celeste hacia el puntero rojo.

Para una mejor interpretación en resumen se presenta en la Tablas 4 y 5 la correlación altitudinal de los avances glaciares para las diferentes glaciaciones del Pleistoceno tardío en los Andes Centrales.

Tabla 4: Morenas correlacionadas (**negrita**) al UMG Local, UMG y Tardiglaciario en los ríos de la vertiente pacífica en base a la altitud de las morenas datadas en los valles cercanos (morenas asociadas presentan mismo color dentro de la fila).

	Glaciación	Elqui	Limarí	Choapa	Cachapoal	Mataquito
P L E I S T O C E N O T A R D I O	U M G L O C A L	ML1 y ML2 37 Ka ~ 3.200- 3.350 m s.n.m.	32 Ka ~3.200m s.n.m.	32-37 Ka ~3.200 m s.n.m.		
	U M G				Los cerrillos 21Ka ~1.200 m s.n.m.	Río Claro 21 Ka ~1.200 m s.n.m.
	T G	MF 12-17Ka 3.525m s.n.m.	11,6-14,7 Ka 3.564-3.756 m s.n.m.	Chalinga 11,6-17 Ka ~3.700 m s.n.m.		
						Illapel 12-17 Ka ~3.500 m s.n.m.

Tabla 5: Morenas correlacionadas (**negrita**) al UMG Local, UMG y Tardiglaciario en los ríos de la vertiente atlántica en base a la altitud de las morenas datadas en los valles cercanos (morenas asociadas presentan mismo color dentro de la fila).

	Glaciación	Jáchal	San Juan Ansilta	Blanco	Tunas	Tunuyán	Atuel	Diamante	Salado
P L E I S T O C E N O T A R D I O	U M G L O C A L			LMulas 40 Ka 2.928 m s.n.m.	40 Ka 3.000 m s.n.m.	40 Ka 2.950 m s.n.m.		43Ka 2.300 m s.n.m.	Las Leñas 43Ka 2.300 m s.n.m.
	U M G	18 Ka ~4.200 m s.n.m.	18 Ka ~4.200 m s.n.m.	ANG II 18-25Ka ~3.300 m s.n.m.	18-25 Ka ~3.500 m s.n.m.	18-25 Ka 3.300 m s.n.m.			
	T G		27 Ka 3.100- 3.600 m s.n.m.	Vallecito s I 3.450 m s.n.m.				Arroyo malo 11 Ka 2.200 m s.n.m.	11 Ka 2.200 m s.n.m.

ANALISIS DE LA DISTRIBUCION DE LAS DISTANCIAS

A partir de la aplicación de la fórmula de Harvesine se obtuvieron las máximas longitudes existentes entre el frente de las morenas y el punto más elevado de la cabecera de cuenca correspondiente, lo que permitió estimar la máxima extensión ocupada por las masas de hielo en el pasado de manera aproximada.

Escenario I: Morenas datadas

Comparativamente, durante el UMG los glaciares alcanzaron las máximas longitudes, con un avance máximo de 32,15 km y 34,36 km en la vertiente atlántica y pacífica, respectivamente. Durante el avance previo denominado UMG Local o Pre-UMG (cajas azules), la longitud de los glaciares fueron menores que durante el UMG, con un máximo sobre la vertiente pacífica de 28,32 km, levemente superior a la distancia máxima medida sobre la vertiente atlántica de 26,13 km. Por último los sistemas glaciares asociados al Tardiglacial (cajas rosa) reportaron las menores longitudes entre todas las analizadas, con máximos entre 19,21 km en la vertiente pacífica y 21,85 km en la vertiente atlántica. Sin embargo, aún en el contexto de mayor recesión se detectó la existencia atípica de un glaciar con la mayor longitud observada incluso desde el UMG local (37,6 km), que se localizaba en la cuenca del río Atuel de la vertiente atlántica (Figura 23).

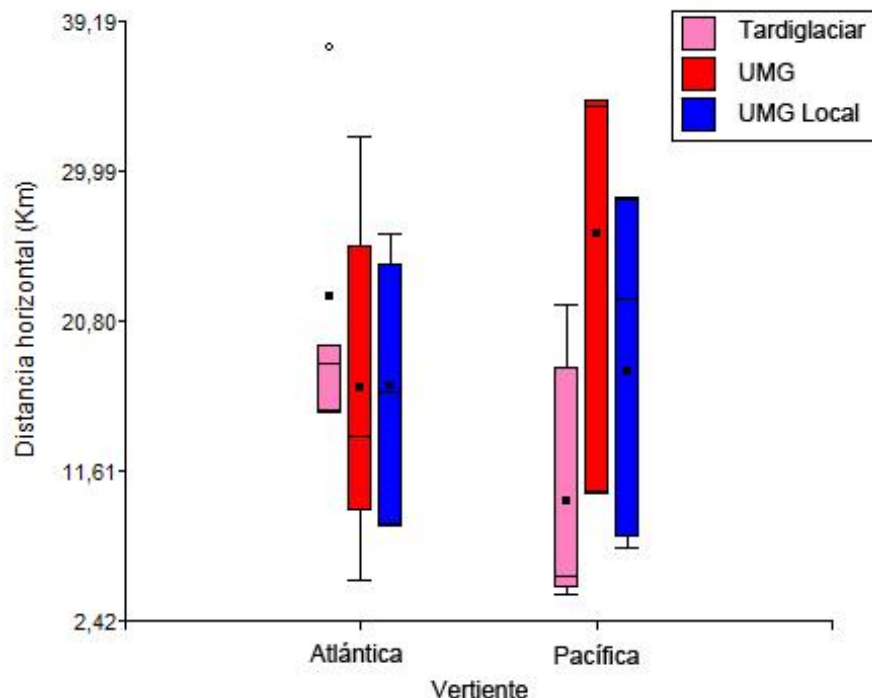


Figura 23: Rango de las distancias recorridas por los glaciares pleistocenos tardíos (Tardiglacial, UMG y UMG Local) por vertiente.

Durante el UMG los sistemas glaciares recorrieron longitudes muy variables a lo largo de los distintos valles de los Andes Centrales (Figura 24). La máxima longitud

alcanzada durante la Glaciación Penitentes en la cuenca del río Mendoza fue de 32,15 km, en tanto que sobre la vertiente pacífica la máxima longitud registrada alcanzó los 34,36 Km en la cuenca del Río Cachapoal. Del análisis de las máximas longitudes se obtuvo que en promedio la longitud máxima en los valles argentinos fue de 20,11 km mientras que en los valles de Chile fue levemente mayor, registrando un valor de 22,3 km.

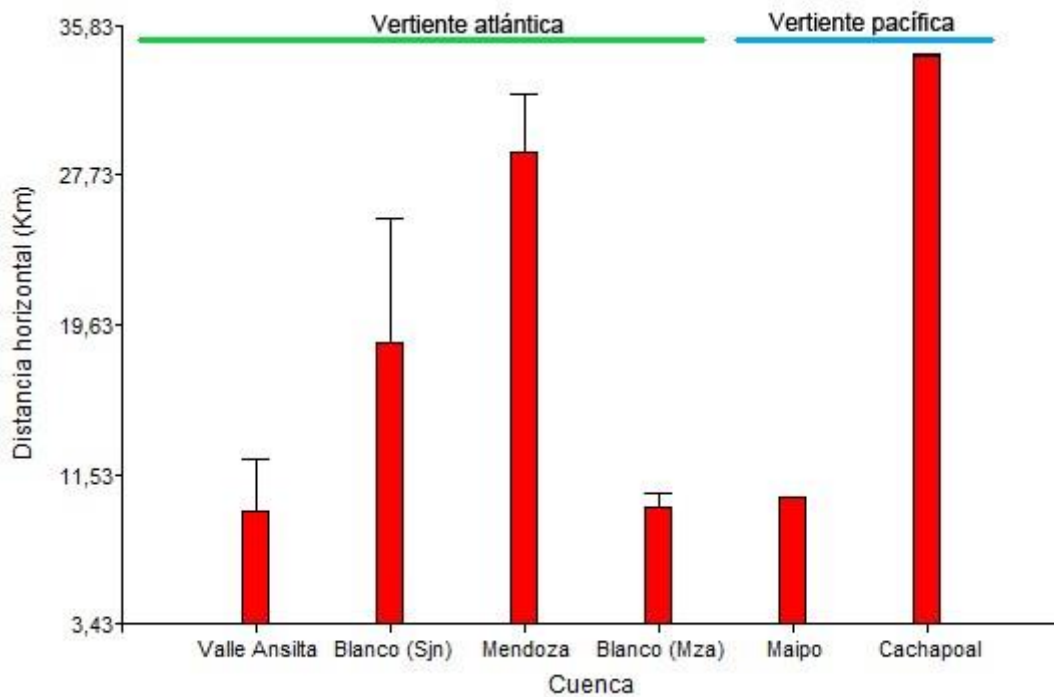


Figura 24: Máximas longitudes medidas para las morenas datadas del UMG de la vertiente atlántica y pacífica por cuenca.

Escenario II: Morenas correlacionadas por altitud

Las máximas longitudes recorridas por las morenas asociadas temporalmente por la altitud de los depósitos (Figura 25) en los valles vecinos nos permite analizar las distancias recorridas por los paleoglaciares del Pleistoceno tardío.

Sobre la ladera oeste se observa un comportamiento similar al descrito para las morenas datadas (Escenario I). El UMG fue el evento en el que los glaciares recorrieron mayores distancias, registrando una longitud máxima de 37,42 km, mientras que el UMG Local alcanzó menores longitudes donde la máxima distancia recorrida fue de 30,43 km. El Tardiglaciario fue el evento que quedó más restringido, avanzando un máximo de 8,12 km.

En cambio, sobre la vertiente atlántica los depósitos correlacionados al UMG indican que el avance quedó más restringido sobre esta vertiente y el UMG Local fue un evento superador en extensión registrando una longitud máxima de 43,36 km. Cabe destacar que el Tardiglaciario se observa como un evento que superó en longitud al

UMG puede deberse a los depósitos que se correlacionaron con el valor atípico que se observa en la distribución de los depósitos datados.

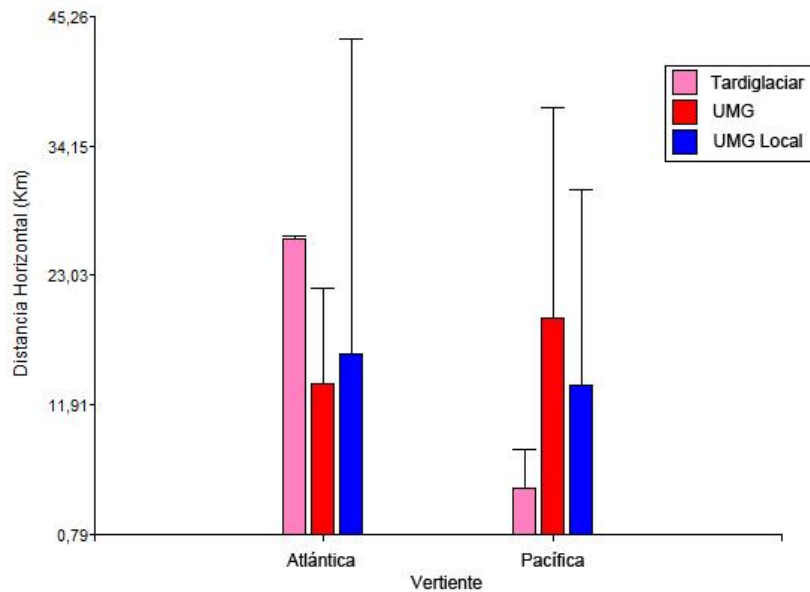


Figura 25: Máximas longitudes alcanzadas por los depósitos morénicos correlacionados por altitud durante el Tardiglacial, UMG y UMG Local por vertiente.

Análisis estadístico

Tabla 6: ADEVA entre morenas correlacionadas y datadas del UMG de la variable distancias recorridas (km).

Glaciación	Variable	N
UMG	Distancia Horizontal (Km)	33

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	p-valor
Modelo	0,3909

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=6,34852
Error: 79,2760 gl: 31

Tipo	Medias	n	E.E.
Correlacionadas	15,93	18	2,10 A
Datadas	18,64	15	2,30 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05)

De la tabla 6 de Análisis de la Varianza se puede destacar que las distancias de las morenas a las cabeceras de cuenca no son estadísticamente diferentes entre las morenas datadas y las correlacionadas para el UMG, es decir, que la distribución de distancias de los avances correlacionados se mantiene en el mismo rango que la distribución de las longitudes de las morenas datadas., Patrón que también se repite para el UMG Local (Tabla 7) y el Tardiglacial (Tabla 8). Esto permite extender el estudio a las cuencas donde se estiman las edades y calcular la extensión de las glaciaciones pleistocenas tardías para cada ladera en base a estos avances.

Tabla 7: ADEVA entre morenas corralacionadas y datadas del UMG Local de la variable distancias recorridas (km).

Glaciación	Variable	N
UMG Local	Distancia Horizontal (Km)	20

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	p-valor
Modelo	0,4474

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=10,36672
Error: 120,5226 gl: 18

Tipo	Medias n	E.E.
Correlacionadas	13,53 9	3,66 A
Datadas	17,36 11	3,31 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Tabla 8: ADEVA entre morenas corralacionadas y datadas del Tardiglaciario de la variable distancias recorridas (km).

Glaciación	Variable	N
Tardiglaciario	Distancia Horizontal (Km)	15

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	p-valor
Modelo	0,8150

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=13,04415
Error: 121,5219 gl: 13

Tipo	Medias n	E.E.
Correlacionadas	13,32 5	4,93 A
Datadas	14,76 10	3,49 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

Escenario III: Morenas datadas y correlacionadas

A partir de las edades inferidas por altitud para los avances glaciares que no disponen de cronologías absolutas hasta el momento, se amplió el estudio de la de las distancias recorridas por los glaciares durante el Pleistoceno tardío en Los Andes Centrales a una mayor cantidad de cuencas.

El análisis por vertiente (Figura 26) demuestra que el UMG fue el evento glaciar que más se extendió en la vertiente pacífica de la cordillera donde la mayoría de sus morenas se conservan entre 15,33 km y 33,95 km de distancia a la cabecera de cuenca indicando un máximo de 37,42 km.

Por su parte las distancias recorridas en la vertiente atlántica indican que este evento quedó mucho más restringido abarcando un rango de distancias desde 6,4 km hasta 20,17 km, indicando que la máxima extensión fue de 32,15 km correspondiente al avance Penitentes. Cabe destacar que en los valles argentinos el UMG Local fue el evento superador en extensión con una distancia media de avance de 21 km y una distancia máxima de 43,36 km; coincidente con lo que postularon Moreiras et al. (2021) en su última revisión del estado del UMG en los Andes Centrales donde declaran que los máximos avances de los cuerpos de glaciares de hielo ocurrieron durante el UMG Local.

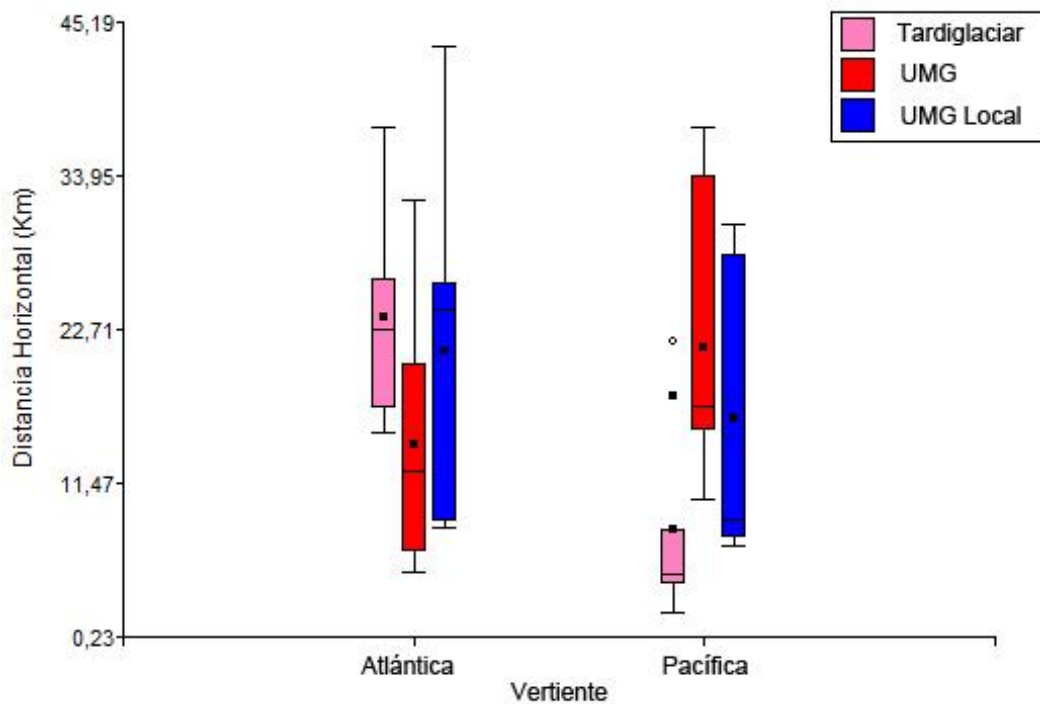


Figura 26: Rango de distancias recorridas por los glaciares durante las glaciaciones pleistocenas tardías (Tardiglacial, UMG y UMG Local) por vertiente.

Analizando en detalle el evento del UMG por segmento de latitud (Figura 27), se observa que sólo en el segmento de los 33° S de latitud se pudo reconstruir esta glaciación a ambos lados de la cordillera. Donde la posición de las morenas indica que los glaciares quedaron más restringidos en la vertiente occidental que la oriental para esta latitud; con una diferencia de 11,65 km de recorrido. En las latitudes restantes (31°S, 32°S y 34°-35° S) la ausencia de morenas datadas o correlacionadas al UMG no permite establecer si los avances alcanzaron mayores extensiones en forma comparativa por segmento, pero sí delimitar el evento glacial en la cuenca del río Jáchal donde la máxima longitud recorrida fue de 10 km y al suroeste en el valle del río Mataquito que recorrió 37,42 km, mayor longitud alcanzada por un avance glacial durante el UMG para toda la zona de estudio.

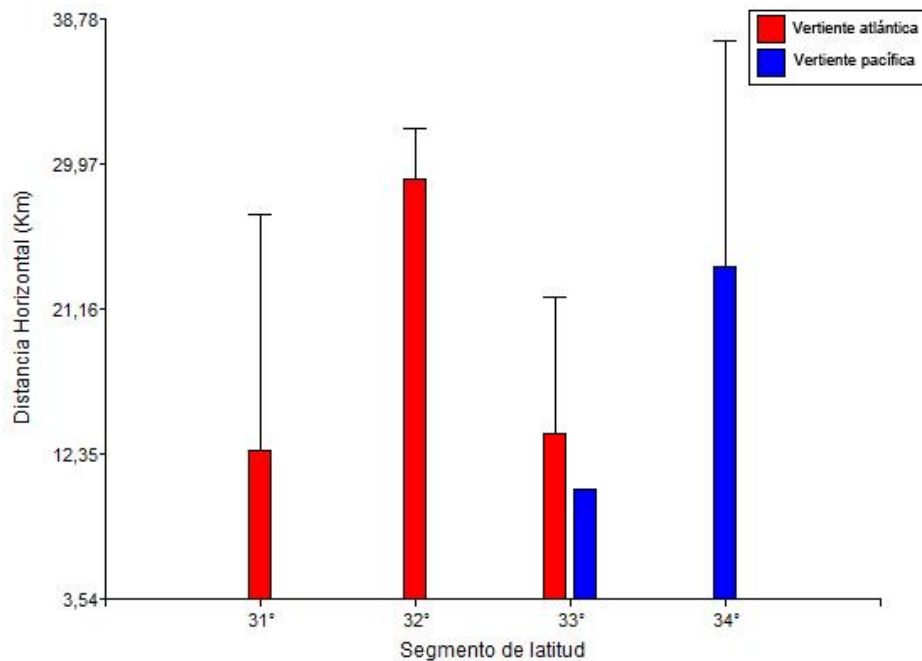


Figura 27: Longitudes máximas de los avances del UMG por latitud y vertiente.

Análisis estadístico de las distancias recorridas por los glaciares durante el UMG por vertiente.

El análisis de la varianza paramétrica (Tabla 9) no presento diferencias significativas entre vertientes para las distancias a las que se preservan las morenas datadas del UMG ($p\text{-valor} = 0,1528 > 0,05$), es decir, que los glaciares recorrieron en promedio las mismas longitudes en la vertiente atlántica (este) y pacífica (oeste) de la cordillera de Los Andes durante su máxima extensión.

Tabla 9: ADEVA de las distancias recorridas por las morenas datadas del UMG según la ladera.

Tipo	Variable	N
Datadas	Distancia Horizontal (Km)	15

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	p-valor
Modelo	0,1528

Test: Tukey Alfa=0,05 DMS=13,41517

Error: 92,5439 gl: 13

Ladera	Medias	n	E.E.
Este	16,76	12	2,78 A
Oeste	26,18	3	5,55 A

Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$)

ANALISIS DE LA DISTRIBUCION ALTITUDINAL

Análisis por segmento de latitud

Tomando como base el Modelo Digital de elevación (MDE) en la zona de estudio se hallaron valores de altitud para las morenas en el rango de 935 m s.n.m a 5.440 m s.n.m (Figura 28), indicando que el desarrollo pasado del ambiente glaciario fue muy importante. Durante el Pleistoceno tardío las glaciaciones que afectaron a los Andes Centrales se desarrollaron entre los 1.124 y 4.239 m s.n.m (Figura 29 a), rango altitudinal que coincide con los límites máximo y mínimo en el que se encuentran los avances del UMG con una altitud promedio de 2.771 m s.n.m (Figura 29 b).

Las mayores altitudes se aprecian en la sección norte, correspondiente a los valles de Jáchal y San Juan en Argentina y las cuencas del río Elqui y Limarí en Chile, donde se observa que la mayor parte de los avances se encuentran por encima de la media de la distribución altitudinal de todos los avances glaciarios a 3.323 m s.n.m. Al desplazarse a los 32° S de latitud, las morenas se hallan en un rango de altitud menor donde las elevaciones del río Mendoza son levemente mayores al valle Aconcagua, con gran parte de sus depósitos ubicados entre los 2.778 m s.n.m., hasta altitudes de 3.527 m s.n.m., mientras que la cuenca del río Aconcagua las morenas se posicionan entre los 2.471 m s.n.m. y 3.063 m s.n.m.

En los 33° S de latitud disminuyen levemente la elevaciones de las morenas en los valles del río Blanco y el río Maipo con respecto a los valles de latitudes superiores, pero se puede observar que este comportamiento no ocurre sobre las cuencas del río de Las Tunas y Tunuyán donde las distribuciones de altitud se encuentran por encima de altura promedio de todos los avances con la mayoría de los depósitos en el rango de 3.854- 4.315 m s.n.m y 3.265- 3.693 m s.n.m, respectivamente.

A medida que avanzamos mas hacia la dirección sur, por los valles comprendidos sobre 34° S, sigue disminuyendo el intervalo altitudinal morénico. Los avances de la cuenca del río Diamante se encuentran concentrados principalmente alrededor de la media, con una altitud mínima de 1.795 m s.n.m y un máximo de 4.037,81 m s.n.m. Más hacia el sur, en el valle del Atuel y Salado, la distribución de altitudes se encuentran por debajo de la media al igual que hacia el oeste en las cuencas del río Cachapoal y Mataquito, donde se registran las menores altitudes en las que se han desarrollado las morenas de los Andes Centrales.

En general, la distribución de las altitudes es la esperada para estas latitudes, es decir que, a medida que se desplaza hacia el sur, sobre los diferentes segmentos de latitud, se observa que las altitudes ocupadas por las masas de hielo durante el Pleistoceno tardío alcanzaron elevaciones menores (Figura 29 a). Comportamiento que también se observa, en los avances del UMG (Figura 29 b).

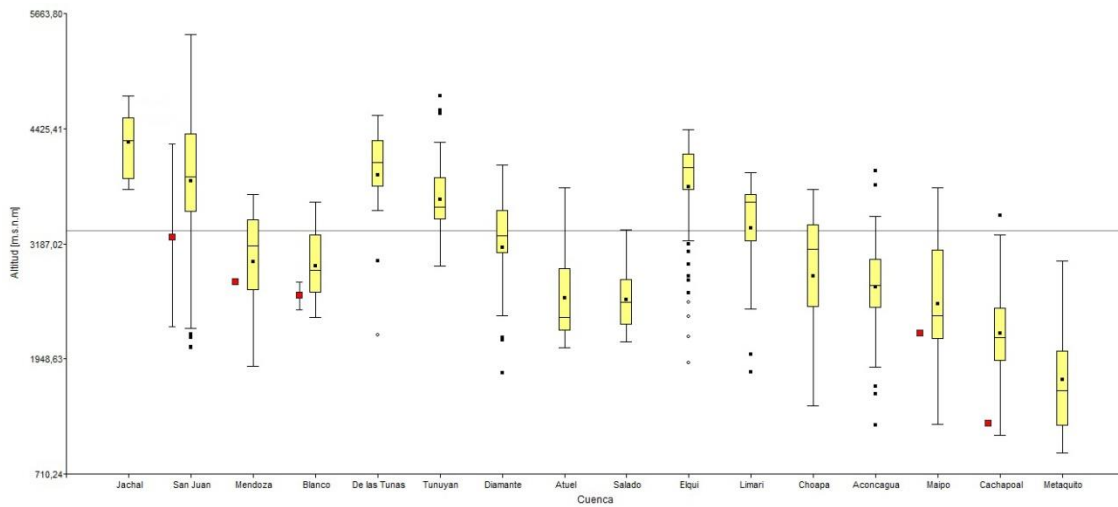


Figura 28: Rango de elevaciones máximas y mínimas de las morenas identificadas por cuenca (box amarillo). Diagrama de puntos (color rojo) indicando los avances datados del UMG en la distribución altitudinal.

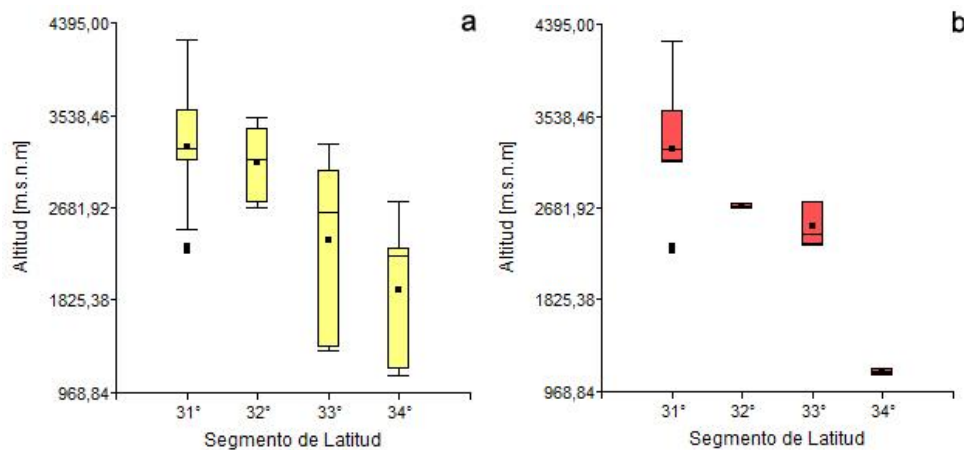


Figura 29: Rango de elevaciones de las morenas del Pleistoceno tardío (Tardiglacial, UMG y UMG Local) por segmento de latitud (a). Rango de elevaciones de las morenas del UMG por latitud (b).

Análisis por Vertiente

La distribución de las elevaciones de las morenas pleistocenas tardías a lo largo de las dos vertientes analizadas nos indica que la variabilidad de altitudes es mayor en la vertiente pacífica que en la atlántica, pero la mayoría de las altitudes en las que se encuentran las morenas pleistocenas tardías están comprendidas en un rango similar desde ~2.300 m s.n.m en ambas vertientes hasta los ~3.400 m s.n.m. en el este y ~3.500 m s.n.m. en el Oeste (Figura 30 a).

Los avances glaciares correspondientes al UMG están representados en altitudes menores sobre los valles de Chile, con un valor mínimo de 1.124 m s.n.m, mientras que en los valles de Argentina las altitudes mínimas para estos depósitos se registran a 2.272 m s.n.m. Asimismo en Argentina las altitudes sobre las que se

desarrollaron las masas de hielo son mayores con un valor máximo de 4.239 m s.n.m, mientras que en los valles chilenos el máximo medido es de 2.335 m s.n.m, indicando una diferencia de 1.900 metros entre las máximas elevaciones en cada vertiente(Figura 30 b).

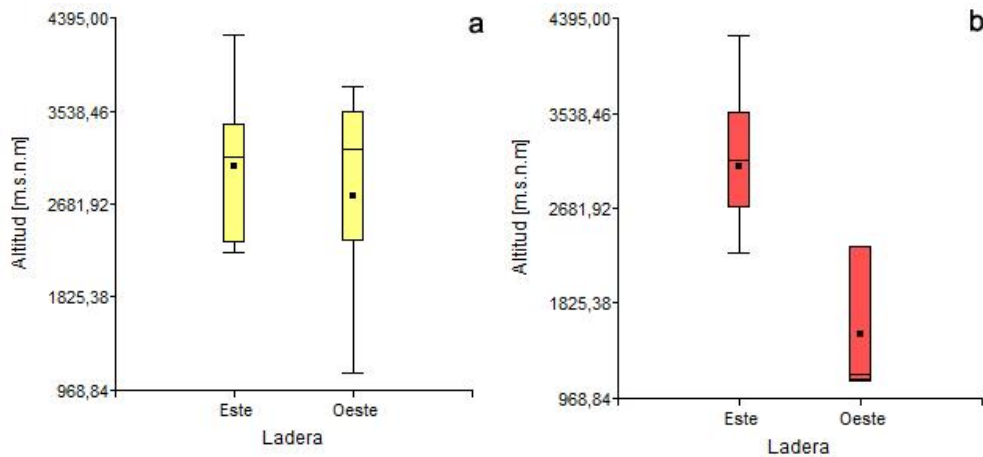


Figura 30: Rango de elevaciones de morenas del Pleistoceno tardío (Tardiglacial, UMG, UMG Local) por vertiente(a). Rango de elevaciones de las morenas del UMG por vertiente(b).

ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCION DE ORIENTACIONES

A partir del Modelo Digital de Orientaciones se obtuvieron las exposiciones promedio de los depósitos morénicos y de esta forma se determinaron sobre qué vertientes se desarrollaron los glaciares durante las glaciaciones pleistocenas tardías, principalmente durante el UMG.

Orientación de morenas Pleistocenas tardías datadas

El análisis de la orientación media de las morenas pleistocenas tardías en los Andes Centrales (Figura 31) indica una predominancia a las exposiciones ubicadas hacia el sur con una segunda moda hacia el sureste, que coincide con la orientación en la que actualmente se encuentran la mayoría de todos los glaciares para el área de estudio dado que son las laderas de menor insolación en el hemisferio Sur (Zalazar et al., 2017). Específicamente durante el UMG, los cuerpos de hielo también se desarrollaron en su mayoría en las exposiciones sur y sureste, con la diferencia que durante este evento predominan igualmente las orientaciones hacia el este que hacia el sur. Posiblemente, esta diferencia esté relacionada a la orientación SO-NE de los valles principales o tributarios en los que se ha reconocido esta glaciación.

Los resultados de orientaciones de depósitos morénicos por vertiente (Figura 32) coincide con el patrón de exposiciones de toda el área, dado que en ambas vertientes la mayoría de los depósitos se encuentran en laderas sur y sureste. Sobre la vertiente pacífica, se observa que existió un desarrollo de glaciares hacia el NE, lo que posiblemente esté vinculado a la orientación NO-SE de algunos valles analizados, condicionando las lenguas glaciares en esta dirección. En el caso de los glaciares del UMG en la vertiente atlántica se mantienen las exposiciones descritas para el área en

general, pero sobre la vertiente pacífica no se observan depósitos datados hacia el SE, sólo sobre las laderas S, SO y E.

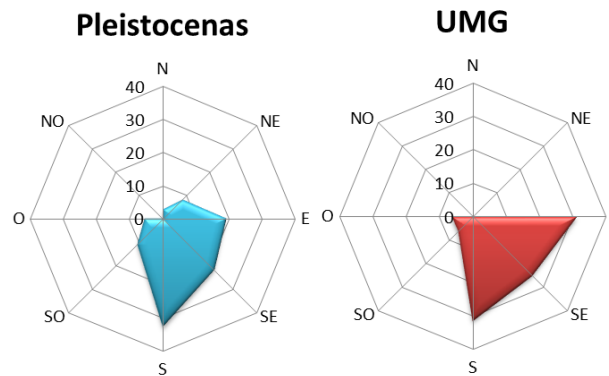


Figura 31: Orientación de las morenas pleistocenas tardías (%) y del UMG (%) de Los Andes Centrales.

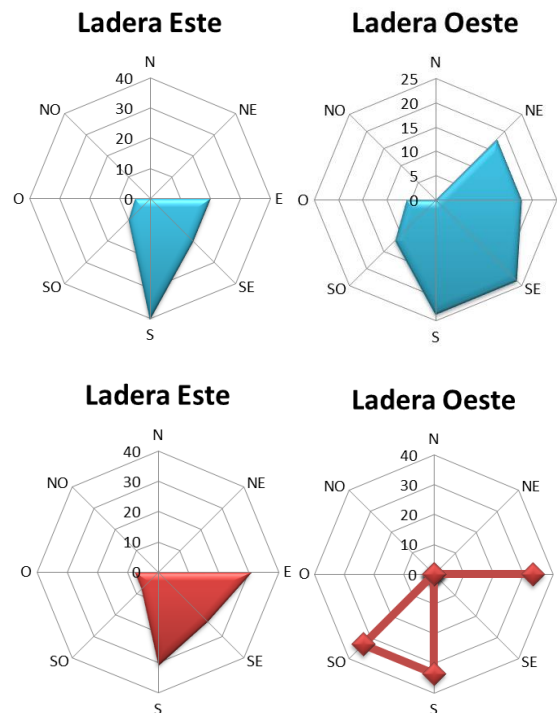


Figura 32: Orientación de las morenas pleistocenas tardías (color celeste) y del UMG (color rojo) por vertiente. Expresado en %.

Orientación de las morenas correlacionadas por altitud.

En términos generales, se observa que los depósitos morénicos correlacionados por altitud (Figura 33) están orientados hacia el SO, con una segunda moda hacia el S y SE, manteniéndose en las laderas mas frías del área, comportamiento que también se observa para la morenas asociadas al UMG con una primer moda hacia el SO y una segunda moda en la exposición SE.

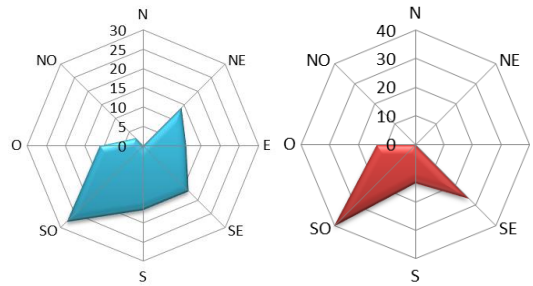


Figura 33: Orientación morenas pleistocenas tardías correlacionadas por altitud (grafico color celeste) y morenas correlacionadas por altitud al UMG (grafico color rojo). Expresado en %.

Orientación de morenas datadas y correlacionadas.

Si se analiza en conjunto todas la morenas, tanto que las presentan dataciones como las correlacionadas por altitud, los resultados de las orientaciones de depósitos morénicos por vertiente (Figura 34) muestran que existió un tendencia a desarrollarse una mayor cantidad de glaciares en las laderas con orientación sureste (50%) con una segunda moda hacia el suroeste (30%) en los valles de Chile, mientras que en los valles argentinos se desarrollaron predominantemente en laderas con exposición sur (28%) y suroeste (28%) de manera equitativa.

Cabe señalar que el desarrollo de geoformas con mayor intensidad en las laderas con orientación sur (Figura 35) en el área de estudio (S, SO, SE) coincide con las laderas de menor insolación en el hemisferio sur. Estas laderas menos expuestas a la radiación solar tienden a ser más frías que las laderas que miran al norte, manteniendo por períodos más prolongados la nieve del invierno y favoreciendo los procesos que dan origen a los glaciares y crioformas (ING, 2018).

De esta forma se podría afirmar que las orientaciones sobre las que se desarrollaron los glaciares pleistocenos tardíos coinciden con las exposiciones en las que actualmente se encuentran los cuerpos de hielo en Los Andes Centrales.

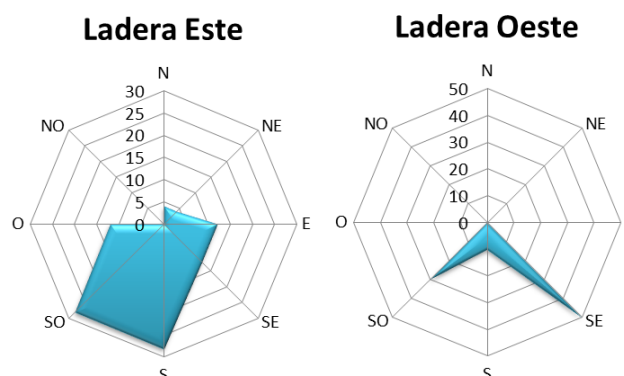


Figura 34: Orientaciones de las morenas pleistocenas tardías inventariadas en los Andes Centrales por vertiente. Expresado en % .

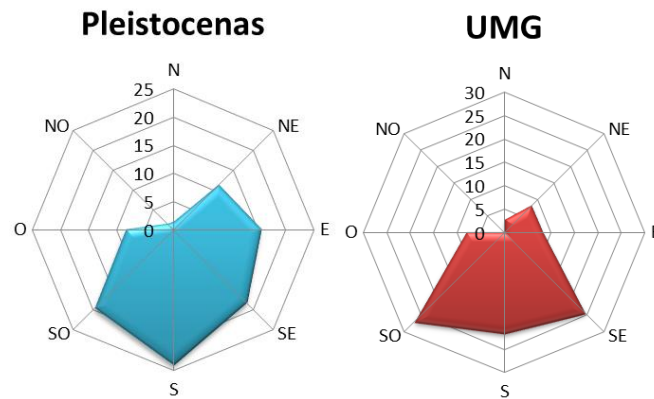


Figura 35: Orientaciones de las morenas pleistocenas y del UMG inventariadas en los Andes Centrales. Expresado en %.

DISCUSIÓN

A lo largo de los Andes Centrales, la extensión máxima de los glaciares durante el último ciclo glacial ocurrió simultáneamente durante el Último Máximo Glacial (UMG). Las morenas datadas para las diferentes Glaciaciones del Pleistoceno tardío muestran que los glaciares avanzaron más durante UMG en ambas vertientes de la cordillera en comparación con el UMG Local y el Tardiglacial. Pero el análisis de las morenas correlacionadas por altitud sugiere que el UMG Local o Pre-UMG fue un evento superador en longitud en la vertiente atlántica, que coincide con lo que postularon Moreiras et al, (2021) en su última revisión del estado del UMG en los Andes Centrales donde declaran que los máximos avances ocurrieron durante el UMG Local.

Asimismo, el estudio de todos los depósitos en su conjunto (datados y correlacionados) confirman que el avance previo al UMG se extendió más en la vertiente atlántica. Mientras que en la vertiente pacífica se mantiene el mismo comportamiento para los tres escenarios analizados, siendo el UMG el evento que recorrió mayores distancias.

La reconstrucción del UMG, evento relacionado con la mayor extensión de los cuerpos de glaciares de hielo en los valles de las montañas presenta ciertas ambigüedades en los Andes Centrales (31°-35°S). Del análisis por vertiente y latitud se ha postulado que las longitudes máximas de los glaciares en esta región árida / semiárida fue mayor en los valles argentinos sólo para lo 33° de latitud sur (valles de río Blanco/ de las Tunas/ Tunuyán - Maipo), único segmento que dispone de cronologías absolutas o relativas (correlacionadas por altitud) para el evento del UMG en ambas vertientes de la cordillera.

En el caso de los segmentos extremos del área de estudio, 30° S (Jáchal-Elqui), 31°S (San Juan-Limarí/ Choapa) y 34°S-35°S (Cachapoal-Diamante/ Atuel/Salado) se ha establecido principalmente el UMG Local (~ 35-40 Ka) (Zech et al.2008, 2011, 2017) y el Tardiglacial (~ 15 Ka) (Riquelme, 2011, 2019; Zech et al., 2007, 2008) con escasos registros del máximo avance en estos estos valles o

ausencia en alguna de las laderas. En la latitud central (32° S: ríos Mendoza-Aconcagua), los avances cartografiados en la cuenca del río Aconcagua no muestran coincidencias altitudinales con las dataciones disponibles en los valles vecinos por lo que la cronología de la cuenca permanece incierta; no permitiendo comparar la Glaciación Penitentes en la cuenca del río Mendoza con su equivalente en la vertiente pacífica.

A pesar de que siempre se ha postulado que las glaciaciones en la vertiente atlántica eran más grandes y extensas porque los valles son más amplios y con pendientes más suaves, en tanto los Andes chilenos la pendiente es más abrupta, de tal manera que el glaciar tiene menor recorrido o extensión, los resultados para toda el área de estudio indican que las lenguas glaciares recorrieron las mismas distancias a lo largo de los valles argentinos y chilenos.

Hasta ahora, las cronologías absolutas disponibles son escasas. Esto hace difícil llegar a una conclusión final sobre el momento de las glaciaciones pleistocenas tardías estudiadas en la presente tesis y determinar su extensión con precisión. La falta de material orgánico para la datación por radiocarbono ha sido la principal causa de la débil cronología glaciar en el área de estudio.

No obstante, las dataciones relativas basadas en la altitud de los depósitos morénicos ayudan a esclarecer y delimitar espacialmente los eventos glaciares sin precisar detalladamente la edad que tienen. Se postuló que las morenas correlacionadas con este tipo de datación se mantienen en el mismo rango de avance que las morenas datadas en los valles vecinos sobre las mismas vertientes, amparando esta correlación ante la ausencia de dataciones absolutas. Mostrando un grado de acierto interesante.

Las alturas alcanzadas por las masas de hielo durante el UMG parecen rondar en ~2.700 m s.n.m en los Andes Centrales. Sin embargo, la extensión y alcance de las lenguas de hielo han estado principalmente vinculadas a la latitud. Los glaciares quedaron más restringidos en la vertiente pacífica (chilena) durante el UMG que en la vertiente atlántica (argentina) en los valles comprendidos en torno a los 33° S. En tanto en las latitudes extremas (34° -35°S), la extensión de las masas de hielo o la cota menor alcanzada ha sido menor. Los cuerpos de hielo han alcanzado las menores cotas en valles más australes. Esto es lógico, ya que hacia el sur disminuye la temperatura y por otro lado aumentan precipitaciones, sobre todo las precipitaciones de invierno que son las que más pueden hacer avanzar los glaciares. Justamente, por estas dos variables climáticas es que los glaciares del segmento norte de los Andes Centrales estuvieron más acotados durante el UMG.

La edad obtenida para la morena los cerrillos (cuenca del río Cachapoal) coincide con edades obtenidas más al norte en la cuenca del río Maipo por Herrera (2016) y en la vertiente argentina de la cordillera (cuenca del río Mendoza por Espizúa (1999) y el río Blanco (Moreiras et al., 2017)) sin embargo, en esta región no se han encontrado depósitos anteriores al UMG como ha ocurrido en las otras regiones mencionadas. Esta diferencia y la considerablemente menor altitud de los depósitos datados para el UMG sugieren que la cuenca del Cachapoal correspondería a una

zona de transición hacia una región más húmeda hacia el sur y pone en evidencia la necesidad de continuar con estudios de este tipo para precisar la cronología glacial y las condiciones climáticas que imperaron en la región central de Chile en el Pleistoceno tardío (Charrier et al, 2019).

Por su parte, la orientación media de las morenas en general se mantiene en las orientaciones sur (S, SE y SO), independientemente del momento o glaciación en las que se formaron. Actualmente, en los Andes Centrales, todos los tipos de glaciares se desarrollan predominantemente sobre las laderas SE y S (ING, 2019; DGA, 2014) dado que las elevadas topografías y las estrechas quebradas, producen un aumento en las horas de sombra sobre la superficie del suelo, disminuyendo la heliofanía, la radiación solar y consecuentemente la temperatura permitiendo que los glaciares se desarrollen predominantemente en estas direcciones.

De esta forma históricamente los glaciares se han concentrado principalmente en estas exposiciones tanto en períodos glaciares como interglaciares. Claramente, la situación en la zona de acumulación o circo glacial deben coincidir con estas condiciones ambientales. Sin embargo, en este estudio se observa que la lengua del glaciar también prefiere estas condiciones, por lo cual la orientación de los valles en todo su recorrido debió forzar la preservación y escurrimiento de los cuerpos de hielo en el pasado. Esto al menos se deduce a partir de los depósitos morénicos preservados hasta hoy en día.

En función de lo antes mencionado, la existencia de un glaciar y su alcance no sólo responderá a las condiciones climáticas (temperaturas y precipitaciones) como bien se conoce, sino también a las condiciones del terreno en cuanto a la pendiente, alturas y orientaciones. Estos factores son interesantes de conocer en el contexto del cambio climático que enfrenta la humanidad.

Si bien, el aumento de las temperaturas en el contexto del calentamiento global vaticina el retroceso inminente de los glaciares; en su potencial de preservación será esencial comprender en el contexto geomorfológico en cual se encuentren.

CONCLUSIONES

A partir de las evidencias se postula que el UMG (~ 18-30 Ka) fue el máximo avance glacial relacionado con la mayor extensión de los cuerpos de glaciares de hielo en los valles de montaña chilenos de Los Andes Centrales, mientras que en los valles argentinos un avance previo denominado UMG Local (~40 Ka) superó en extensión al UMG.

La reconstrucción de los glaciares durante el UMG, nos permite afirmar que las masas de hielo alcanzaron en promedio las mismas distancias en ambas vertientes de los Andes Centrales. A pesar de que en la vertiente argentina las pendientes son más suaves las lenguas glaciarias recorrieron las mismas distancias a lo largo de los valles andinos que las glaciaciones en los valles de fuertes pendientes en Chile.

Esto es un resultado original ya que siempre se pensó las lenguas del sector argentino habían sido más extensas. Estos resultados se correlacionan también con las alturas de los depósitos morénicos a ambos lados de la cordillera que parecen ser simétricos y pausibles de ser correlacionados temporalmente en función de la altura. Este resultado original tiene fuerte impacto en los estudios estratigráficos relativos, ya que si bien trabajos previos como los de Espizúa (1998, 1999); Moreiras (2004) han utilizado las alturas de los depósitos morénicos para su correlación temporal, siempre han estado localizados en el mismo valle y la misma vertiente de los Andes. Los resultados obtenidos en este estudio permiten extender esta técnica al menos a escala regional.

Por lo tanto la hipótesis de trabajo “la distribución del Último Máximo Glacial fue condicionada por la topografía y geomorfología de los valles, de tal manera que este avance quedo más restringido en la vertiente pacífica (chilena) que en la vertiente atlántica (argentina)” se rechaza dado que en ambas vertientes recorrió las mismas longitudes.

Los factores topográficos analizados señalan que el rango altitudinal en el que se desarrollaron las masas de hielo durante su máxima extensión oscila desde 1.124 m s.n.m a los 4.239 m s.n.m en toda el área de estudio. En los valles chilenos las morenas están limitadas entre los 1.124 m s.n.m y 2.335 m s.n.m mientras que en argentina los avances posicionan en altitudes mayores entre 2.272 m s.n.m y 4.239 m s.n.m.

Inferir edades en función de la posición topográfica no modificó los patrones de distribución observados en las morenas datadas, avalando esta técnica de datación relativa ante la ausencia de cronologías absolutas. Pero cabe destacar que aunque estadísticamente el error sea bajo, las técnicas de datación absoluta nos dan estimaciones cuantitativas de edad aumentando la precisión del análisis.

La reinterpretación de algunos de estos depósitos glaciales como grandes colapsos asociados con la tectónica activa de esta región ha generado interpretaciones erróneas en torno a los ciclos glaciares e interglaciares, afectando la calidad de los fechados de las morenas a partir de los cuales se reconstruyen los eventos glaciares, por esto la revisión e inventariado de estos depósitos por imágenes satelitales contribuye a esclarecer el origen de los mismos.

La cantidad de morenas inventariadas en las diferentes orientaciones muestra que los glaciares se desarrollaron principalmente en laderas con orientación SO y en segundo lugar en exposiciones S y SE de manera equitativa. Considerando que la distribución actual de los cuerpos de hielo en Los Andes Centrales se concentra en laderas con exposición SE y S, podríamos afirmar que la disposición de los valles ha condicionado históricamente (Pleistoceno tardío a la actualidad) el desarrollo de las masas de hielo a las orientaciones mencionadas lo que nos permitiría inferir que este comportamiento es independiente al cambio climático que atravesamos actualmente.

Por último, aunque se han presentado hechos que demuestran que las masas de hielo de los Andes Centrales han respondido a los factores topográficos, se debería

comprobar si esta hipótesis es definitivamente consistente con nuevas reconstrucciones espacio-temporales de los glaciares en otros enclaves que todavía están sin estudiar.

Asimismo sería de interés agregar una corroboración de campo para este estudio como trabajo futuro, más aun teniendo en cuenta que el reconocimiento de depósitos morénicos es realizado mediante clasificación visual de imágenes ópticas.

BIBLIOGRAFIA

- Atlas de Glaciares de la Argentina, IANIGLA (2019). pp. 14,19.
- Azócar, G. y Brenning, A. (2010). Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27–33°S). *Permafr. Periglac. Process*, 21, pp. 42–53.
- Bravo, C. (2008). Reconstrucción de sistemas glaciares en el volcán villarrica, región de los lagos, Chile. Universidad de Chile, facultad de arquitectura y urbanismo escuela de geografía, Santiago Chile. pp. 3.
- Beck, H., Zimmermann, N., McVicar, T. et al. (2018). Mapas de clasificación climática de Köppen-Geiger presentes y futuros con una resolución de 1 km. *Sci Data* 5, 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>
- Brüggen, J. (1950). *Fundamentos de la Geología de Chile*. Instituto Geográfico Militar, Santiago, Chile, 1, pp. 616- 621.
- Cabrera, A.L. y Willink, A. (1973). *Biogeografía de América Latina*. Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, Departamento de Asuntos Científicos, Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos, Washington, District of Columbia, p. 120.
- Caviedes, C.L. Paskoff R. (1975). Glaciaciones cuaternarias en los Andes del centro-norte de Chile. *Revista de Glaciología*, 14, pp. 155-170.
- Charrier, R., Iturrizaga, L., Carretier, S., Regard, V. (2019). Geomorphologic and Glacial Evolution of the Cachapoal and southern Maipo catchments in the Andean Principal Cordillera, Central Chile (34°-35° S) *Andean Geology* 46 (2) 240-278. doi: 10.5027/andgeoV46n2-3108 *Andean Geology*
- Clapperton, Chalmers. (2000). Interhemispheric synchronicity of Marine Oxygen Isotope Stage 2 glacier fluctuations along the American cordilleras transect. *Journal of Quaternary Science*, 15, pp. 435 - 468.
- Clapperton, C. M., (1993). *Quaternary Geology and Geomorphology of South America*. Elsevier, Amsterdam, 779 pp.
- Chile. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Aguas. (2008). *Manual de Glaciología*. Santiago, Chile, 2, pp. 75-78.
- Corte, A. E. & Espizua, L. E. (1981). Inventario de glaciares de la cuenca del Río Mendoza. IANIGLA-CONICET. Mendoza, pp. 15, 47-58.
- Crozier, M.J. (1984). Field assessment in slope stability, en Brunsdén, D., Prior, D.B. (eds.), *Slope Instability*: Wiley, Chichester, pp.103-142.
- Douglass, D.C., B.S. Singer, M.R. Kaplan, D.M Mickelson & M.W. Caffee (2006): Cosmogenic nuclide surface exposure dating of boulders on last-glacial and late-glacial moraines, Lago Buenos Aires, Argentina: interpretive strategies and paleoclimate implications. – *Quat. Geochronology*, 1 (1): 43-58.

- Espizúa, L.E. (1993). Quaternary Glaciations in the Río Mendoza Valley, Argentine Andes. *Quaternary Research*, 40, pp.150 - 162.
- Espizúa L.E. (1999). Chronology of Late Pleistocene glacier advances in the Río Mendoza Valley, Argentina. *Global and Planetary Change*, 22, pp. 193–200.
- Espizúa, L. E., Bigazzi, G., Ianes, P. J., Hadler, J. C. y Osorio, A. M. (2002). Fission-track dating of a tephra layer related to Poti-Malal and Seguro drifts in the Río Grande basin, Mendoza, Argentina. *J. Quaternary Sci.*, 17, pp. 781–788. ISSN 0267-8179.
- Espizúa, L.E (2004). Pleistocene glaciations in the Mendoza Andes, Argentina. In: *Quaternary Glaciations: Extent and Chronology. Part III: South America, Asia, Africa, Australasia, Antarctica*, Ehlers, J., Gibbard, P. (eds.). Elsevier: Cambridge, MA, pp.69 - 73.
- Forte, A. P. & Villarreal, C. D. (2019). Reconstrucción geomorfológica del último máximo glaciar en la cuenca del río San Juan, Argentina. *Cuaternario y Geomorfología*, 33, pp. 60-82.
- Falvey, M.; Garreaud, R.D. (2009). Regional cooling in a warming world: Recent temperature trends in the southeast Pacific and along the west coast of subtropical South America (1979–2006). *J. Geophys. Res. Atmos.*, pp.1-16.
- Fauqué, L., R., Hermanns, K., Hewitt, M., Rosas, C., Willson, V., Baumann, S., Lagorio & I. DiTommaso (2009). Mega-landslide in the southern wall of the Aconcagua and its relationship with deposits assigned to Pleistocene glaciations. – *Rev. Asoc. Geol. Argent.*, 65 (4) pp. 691-712.
- Garreaud, R. D. (2009). The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, 7, pp. 1-9.
- Gosse, J.C. y Evenson, E. B. (1994). Reinterpretation of the evidence for a significant mid-Holocene ice advance in the Río Atuel valley, Mendoza Province, Argentina. *Geomorphology*, 38, pp. 327- 338.
- Gosse, J. C. & Phillips, F. M. (2001) Terrestrial in situ cosmogenic nuclides: theory and application. *Quaternary Science Reviews*, 20, 1475-1560
- Gutiérrez Elorza, M. (2000). *Geomorfología Climática*. Ediciones Omega, Barcelona, 642 pp
- Hastenrath, S., (1967). Observations on the snowline in the Peruvian Andes. *Journal of Glaciology*, 6: 541-550.
- Hastenrath, S., (1985). A review of Pleistocene to Holocene glacier variations in the tropics. *Z. Gletscherk Glacialgeol*, 21: 183-194.
- Herrera, M.J., (2016). Estimación de las altitudes de las líneas de equilibrio en glaciares de montaña para el último ciclo glacial-interglacial en los Andes de Santiago, Chile central (Tesis de Doctorado). Universidad de Chile facultad de ciencias físicas y matemáticas, pp. 1, 122.
- IPCC. (2001). *Climate Change 2001: The scientific basis*. Universidad de Cambridge Prensa, USA., pp.
- Kaplan, M.R., Moreno, P.I. & Rojas, M. (2008): Glacial dynamics in southernmost South America during Marine Isotope Stage 5e to the Younger Dryas chron: a brief review with a focus on cosmogenic nuclide measurements. - *J. Quat. Sci.* 23, 649–658.
- Maidana, G.E., (2014). Aportes de las glaciaciones a la historia geológica de la tierra y la evolución y distribución de las especies. *Contribuciones Científicas GÆA*, 26, pp. 155-167.

- Malmros, J. K., Mernild, S. H., Wilson, R., Yde, J. C., & Fensholt, R. (2016). Glacier area changes in the central Chilean and Argentinean Andes 1955-2013/14. *Journal of Glaciology*, 62(232), 391-401. <https://doi.org/10.1017/jog.2016.43>
- Martini, I; Ambrosetti, E. and Sandrelli, Fabio.(2017). The role of sediment supply in large-scale stratigraphic architecture of ancient Gilbert-type deltas (Pliocene Siena-Radicofani Basin, Italy). *Sedimentary Geology*. 350. 10.1016/j.sedgeo.2017.01.006.
- Mernild , SH y otros 6 (2015) Pérdida de masa y desequilibrio de glaciares a lo largo de la Cordillera de los Andes hasta las islas subantárticas . *Glob. Planeta. Cambio.* , 133 , 109 - 119 (doi: 10.1016 / j.gloplacha.2015.08.009) CrossRef Google Scholar
- Mix, A.C., Bard, E., Schneider, R. (2001). Environmental processes of the ice age: land, oceans, glaciers (EPILOG): *Quaternary Science Reviews*, 20, pp. 627–657.
- Moreiras S.M., Veit H., García, J.L., and Maldonado, A. (2021). Timing of the Last Glacial Maximum in the Arid Central Andes (31°-35° S): an update.
- Moreiras S.M., Páez M.S., Lauro C. and Jeanneret P. (2017). First cosmogenic ages for glacial deposits from the Plata range (33° S): new inferences for Quaternary landscape evolution in the Central Andes. *Special Volume. Interactions between Quaternary climatic forcing, tectonics and volcanism along some different tectonic settings of South America. Quaternary International*, 438, pp. 50-64. DOI: 10.1016/j.quaint.2016.08.041.
- Moreiras, S.M. and Paez, M.S. (2015) Historical damage and earthquake environmental effects related to shallow intraplate seismicity of central western Argentina. *Geological Society, London, Special Publications*, 399, 369-382.
- Moreiras, S.M., Sepúlveda, S.A., González, P. (2012). New studies on large mass movements in the high mountain range of the Maipo basin, Central Chile. En *XI Congreso Geológico Chileno*, pp. 1006-1008.
- Moreiras, S.M. (2018). *Procesos geomorfológicos: Unidad 5 [Apunte de Clase], Geología & Geomorfología- IRNR*. pp.5-7. Universidad Nacional de Cuyo.
- NASA Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)(2013). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) Global. Distributed by OpenTopography. <https://doi.org/10.5069/G9445JDF> Accessed: 2020-10-27
- Leiva, J.; Cabrera, G.; Lenzano, L. (2007). 20 years of mass balances on the Piloto glacier, las Cuevas river basin, Mendoza, Argentina. *Glob. Planet. Chang.* , 59, pp. 10-16.
- Lliboutry, L. (1998). Glaciers of Chile and Argentina. En: *Satellite image atlas of glaciers of the world. Glaciers of South America* (R. S. Williams y J. G. Ferrigno, eds). USGS, Prof Paper, 1 - 1386.
- Pellicciotti, F.; Ragetti, S.; Carenzo, M.; McPhee, J. (2014). Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Sci. Total Environ.* , 493, pp. 1197–1210.
- Pérez Alberti, A. (2004). El análisis geomorfológico en la reconstrucción paleoambiental. El ejemplo de los procesos de origen frío en el Noreste de la Península Ibérica, pp. 140-152.
- Poblete, A.G.; Minetti, J.L. (2017). Influye el calentamiento global en la disminución de las nevadas en los Andes Áridos. *Revista Universitaria de Geografía* , 26, pp. 11–29

- Polanski, J. (1963): Estratigrafía, neotectónica y geomorfología del Pleistoceno pedemontano entre los ríos Diamante y Mendoza. – *Ass. Geol. Argentina, Revista*, 17 (3-4): 127-349.
- Riquelme, R., Rojas, C., Aguilar, G. y Flores, P. (2011). Late Pleistocene–Early Holocene paraglacial and fluvial sediment history in the Turbio valley, semiarid Chilean Andes. *Quaternary Research*, 75, pp. 166-175.
- Riquelme, R., Aguilar, G., Rojas, C., Lohse, P. (2019). Cronología ^{10}Be y ^{14}C del último avance glacial en Chile semiárido ($29\text{-}30^\circ\text{ S}$) y factores que controlan los cambios climáticos del Pleistoceno tardío-Holoceno, pp. 1-4.
- Riquelme, R., Rojas, C., Aguilar, G., and Flores, P. (2011). Late Pleistocene–early Holocene paraglacial and fluvial sediment history in the Turbio valley, semiarid Chilean Andes. *Quaternary Science Reviews*, 75, 166 -175.
- Terrizano, C.M., García Morabito, E., Christl, M., Likerman, J., Tobal, J., Yamin, M., Zech, R. (2017). Climatic and Tectonic forcing on alluvial fans in the Southern Central Andes. *Quaternary Science Reviews*, 172, pp. 131-141.
- Valero Garcés, B.L., González-Sampériz, P. y Ana Moreno Caballud. Paisajes y climas del último ciclo glacial en el NE de la Península Ibérica. (2014), pp. 17-48.
- Viale, M.; Bianchi, E.; Cara, L.; Ruiz, L.; Villalba, R.; Pitte, P.; Masiokas, M.; Rivera, J.; Zalazar, L. (2019) Contrasting Climates at Both Sides of the Andes in Argentina and Chile. *Front. Environ. Sci.*, 7, 69, doi:10.3389/fenvs.2019.00069.
- Villarroel, C. D., Tamburini Beliveau, G., Forte, A. P., Monserrat, O. y Morvillo, M. (2018). DInSAR for a Regional Inventory of Active Rock Glaciers in the Dry Andes Mountains of Argentina and Chile with Sentinel-1 Data. *Remote Sensing*, 10, 1588.
- Wayne, W.J. (1990). Diamictos of the Río Blanco basin, Cordón del Plata, Mendoza. *Quaternary of South America and the Antarctic Peninsula*. *Quaternary of South America and the Antarctic Peninsula*. pp.9-31.
- Wayne, W.J. (1985). Pleistocene stream diversion and static rejuvenation, Cordon del Plata, Mendoza Province, Argentina. *Geological Society of America, Abstracts and Programs*.
- Zalazar, L., Ferri, L., Castro, M., Gargantini, H., Giménez, M., Pitte, P., y Villalba, R. (2017) Glaciares de Argentina: Resultados Preliminares del Inventario Nacional de Glaciares. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*. pp. 13-22
- Zech, R., May, J.H., Kull, C., Ilgner, J., Kubik, P. W. and Veit, H. (2008). Timing of the late Quaternary glaciation in the Andes from 15 to 40° S . *J. Quaternary Sci.*, 23, pp. 635–647.
- Zech, R., Kull, Ch., Kubik, P. W. and Veit, H. (2007). Exposure dating of Late Glacial and pre-LGM moraines in the Cordon de Doña Rosa, Northern/Central Chile (31°S), 3, pp.1–14.
- Zech, J., Zech, R., Kubik, P and Veit, H. (2010). A high-altitude calibration site for ^{10}Be surface exposure dating at Tres Lagunas, NW-Argentina, 12, p.1.
- Zbyněk, E., Andrzej, T., Braucher, R., Woronko, B., and Křížek, M. (2011). Use of ^{10}Be exposure ages and Schmidt hammer data for correlation of moraines in the Krkonoše Mountains, Poland/Czech Republic. *Zeitschrift für Geomorphologie*. 55. pp.175-196. 10.1127/0372-8854/2011/0055-0036.