



GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

MONITOREO DE DETALLE DEL GLACIAR JUNCAL NORTE, REGIÓN DE VALPARAÍSO, MACROZONA CENTRO, 2020-2021

REALIZADO POR:

LABORATORIO DE ANÁLISIS ISOTÓPICO DE LA UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

S.I.T. N° 518

SANTIAGO, MAYO 2022

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas

Sr. Juan Carlos García P.

Director General de Aguas (S)

Sr. Cristian Nuñez R.

Jefe Unidad Glaciología y Nieves

Sr. Gino Casassa R.

Inspector Fiscal

Sr. Jorge Huenante G.

LABORATORIO DE ANÁLISIS ISOTÓPICO DE LA UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Director de Proyecto

Dr. Francisco Fernandoy

Profesionales

Geóloga Yerelin Cárcamo

Profesionales asociados

Geógrafo Hans Fernández

Profesora Educación Física y Guía de Montaña Tamara Muñoz

Citar este informe como sigue:

Dirección General de Aguas (DGA), 2022. **MONITOREO DE DETALLE DEL GLACIAR JUNCAL NORTE, REGIÓN DE VALPARAÍSO, MACROZONA CENTRO, 2020-2021**, SIT N°518, 2022. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Unidad de Glaciología y Nieves. Realizado por: LABORATORIO DE ANÁLISIS ISOTÓPICO DE LA UNIVERSIDAD ANDRÉS BELLO

Resumen

La cuenca del Aconcagua es una de las principales cuencas glaciares en la zona centro del país. Los cuerpos de hielo de esta cuenca aportan una parte importante al caudal de uno de los ríos principales de la región de Valparaíso, el río Aconcagua, que abastece al segundo valle más productivo del país. En la cabecera de esta cuenca se ubica uno de los glaciares más grandes de la cuenca, el glaciar Juncal Norte, que desciende del Nevado Juncal, desde los 5.800 hasta los 3.000 m s.n.m. aproximadamente.

El Laboratorio de Análisis Isotópico de la Universidad Andrés Bello (UNAB), presenta este estudio para apoyar a la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas (DGA) en el monitoreo de detalle intensivo del glaciar Juncal Norte, Región de Valparaíso, macrozona centro de Chile.

Este estudio permite analizar las variaciones areales del glaciar desde el año 1955 (fecha de las primeras fotografías aéreas de detalle) al 2021. También busca actualizar el Inventario Público (IPG) del glaciar Juncal Norte a través del procesamiento de a) imágenes satelitales con diferentes características de resolución espacial y espectral, b) la recopilación de imágenes aéreas, c) información topográfica y d) documentación glaciológica histórica. Asimismo, se realizaron tres campañas de terreno para monitorear las variaciones de la parte baja del glaciar (2.950 a 3.300 m s.n.m.) mediante la instalación y monitoreo de balizas de ablación. Estos datos fueron complementados con el análisis de balance de masa geodésico ampliando el área de estudio hasta los 4.130 m s.n.m.

Los resultados obtenidos en este estudio muestran una contracción casi continua del glaciar desde, al menos, el año 1955. A lo largo de la serie de variaciones areales (1955-2021) se identificaron periodos de decaimiento abrupto, pero también de crecimiento leve. En cuanto a la variación volumétrica, en los últimos 21 años el glaciar ha presentado una tendencia generalizada de pérdida de volumen. La pérdida volumétrica se ha concentrado en las cotas bajas de la lengua glaciar (bajo los 3.500 m s.n.m.). Esto contrasta con el leve engrosamiento del hielo que se observa entre los 3.500 m s.n.m. y los 4.130 m s.n.m. El balance de masa geodésico evidencia que entre los años 2000 y 2021 hubo una pérdida de 19,8 m equivalente en agua (m eq.a.). Por otro lado, el balance de masa geodésico entre el 21 de febrero y 23 de marzo, es de -2,978 m eq.a.

En cuanto al mapeo geomorfológico, se aprecian dos cambios principales. El primero hace referencia al desarrollo de una cobertura detrítica en los flancos del glaciar que se encuentra en la zona de ablación. El otro cambio hace referencia al crecimiento exponencial de una laguna proglacial desde el año 2018, laguna que comenzó a formarse posterior al año 2017. Por último, en el monitoreo de las balizas de ablación demostró una ablación en el en la zona más cercanas al frente glaciar (2.950 m s.n.m.) y en aquellas zonas con cubierta de detritos de poco espesor (menos de 2 cm).

Índice de contenidos

1.	Introducción	6
2.	Objetivos.....	7
3.	Zona de estudio	8
4.	Metodología.....	9
4.1.	Gabinete	9
4.1.1.	Variaciones areales del glaciar	9
4.1.2.	Balance de masa geodésico	10
4.1.3.	Mapeo geomorfológico	12
4.2.	Terreno.....	13
4.2.1.	Instalación y medición de balizas.....	13
5.	Resultados.....	15
5.1.	Instalación y medición de balizas.....	15
5.2.	Revisión de las variaciones del glaciar Juncal Norte.....	21
5.3.	Balance de masa geodésico	24
	5.3.1 Balance de masa geodésico 2021 GNSS-LiDAR.....	26
5.4.	Mapeo geomorfológico	28
6.	Conclusión.....	32
7.	Sugerencias y recomendaciones	33
8.	Referencias.....	34

Índice de figuras

Figura 1. Localización del glaciar Juncal Norte. La imagen de fondo corresponde a una imagen Landsat 8 OLI/TIRS del 13/02/2021.	8
Figura 2. Mapa del área que cubre el LiDAR capturados con fecha 23 de marzo del 2021. La imagen de fondo corresponde a una imagen de ESRI satélite de QGIS.	11
Figura 3. Fotografía de la campaña de terreno 1, donde se ve la perforación con el perforador de vapor (Heucke).	13
Figura 4. Ubicación de las balizas de ablación instaladas durante el mes de febrero a abril. La imagen de fondo corresponde a una imagen Landsat 8 OLI con fecha 13/02/2021....	15
Figura 5. Fotografías de las campañas de terreno. A) Se muestra la baliza "B7" en la primera campaña de instalación. B) Se muestra la baliza "B7" en la segunda campaña de terreno con la evidente emergencia y en la misma fotografía el GPS diferencial en preparación para acercarlo a la baliza y medir sobre ella.	19
Figura 6. Variación areal del glaciar Juncal Norte entre el periodo 1955-2021.....	23
Figura 7. Variaciones del glaciar Juncal Norte, entre los años 1955 y 2021. La imagen utilizada corresponde a ESRI satélite de QGIS.	24
Figura 8. Variación volumétrica del glaciar Juncal Norte entre los años 2000 y 2021, imagen utilizada corresponde a ESRI satélite de QGIS.	25
Figura 9. Balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte entre febrero y marzo de 2021, imagen utilizada corresponde a ESRI satélite de QGIS.....	27
Figura 10. Vista hacia el sur del glaciar Juncal Norte. En la superficie del glaciar destacan sus flancos cubiertos por detritos.....	28
Figura 11. Mapeo geomorfológico glaciar Juncal Norte.....	29
Figura 12. Evolución de laguna proglacial. La imagen de fondo es una imagen ESRI ArcGis 2020.....	30
Figura 13. Evolución de la laguna proglacial en área desde el 2017 al 2021.	31

Índice de tablas

Tabla 1. Información de imágenes satelitales utilizadas en la delimitación areal del glaciar Juncal Norte.....	9
Tabla 2. Detalles de las zonas y los parámetros a considerar para la instalación de balizas (datos GPS navegador). Coordenadas expresadas en Universal Transversal de Mercator (UTM) datum WGS 84, huso 19 S.	16
Tabla 3. Datos de emergencias de las balizas de ablación medidas en terreno. La instalación se realizó los días 20 y 21 de febrero y los monitoreos de la medición de ablación los días 12 de marzo y 13 de abril. (E.I.: Emergencia inicial, E.T.1: Emergencia terreno 1, E.T.2: Emergencia terreno 2)	17
Tabla 4. Fechas de salidas a terreno y tasa de ablación por día promedio de las balizas.	18
Tabla 5: Coordenadas de las balizas con GPS diferencial.....	19
Tabla 6: Desplazamiento y velocidad de desplazamiento de las balizas.....	20
Tabla 7. Variación de la cobertura del glaciar Juncal Norte en km ² y porcentaje entre el periodo 1955-2021.	22
Tabla 8. Balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte entre el año 2000 a 2021.	26
Tabla 9. Balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte entre el febrero y marzo de 2021.	27

1. Introducción

Chile es un país altamente vulnerable al cambio climático, con evidencias de mayores tasas de derretimiento de hielo en la zona central en las últimas décadas (Rivera *et al.*, 2002). La mayor parte de estos cuerpos de hielo en la zona central se localizan en los Andes semiáridos, caracterizado por una marcada estacionalidad con veranos secos, precipitaciones cercanas a cero, baja humedad relativa e intensa radiación solar (Pellicciotti *et al.*, 2008). En el último tiempo se han producido fluctuaciones negativas de los glaciares, debido a la decreciente cantidad de precipitaciones y el cambio climático (Rivera *et al.*, 2016). Esto se ha visto fuertemente acelerado en las últimas décadas con aumentos significativos en la temperatura media y disminuciones en la precipitación media (Boisier *et al.*, 2016). Lo anterior afecta a la disponibilidad y estabilidad de los recursos hídricos de alta montaña, en especial aquellos que provienen de glaciares.

La cuenca del río Aconcagua (33°S) localizada en la región de Valparaíso es una de las principales cuencas glaciares del centro de Chile. En esta cuenca atraviesa el río Aconcagua, uno de los principales cursos de agua del país que proporciona agua para el consumo humano, minería, agricultura e industrias. Se estima que abastece a 1,7 millones de habitantes de la región de Valparaíso, lo que representa alrededor del 9,6% de la población total de Chile (Dirección General de Aguas, 2012). También es importante mencionar que su principal recarga es de origen nivo-glaciar (Crespo *et al.*, 2020). Producto de esto, es de gran importancia realizar estudios de monitoreos de los glaciares, ya que estos son fundamentales para la contribución hídrica de la región de Valparaíso.

El glaciar Juncal Norte es uno de los glaciares de mayor dimensión de la cuenca del Río Aconcagua. A pesar de los retrocesos generalizados de los glaciares en Chile central, éste ha evidenciado tasas de recesión más lentas (14 ma^{-1}) de 1955 a 2013, perdiendo el 10% de su área (Janke *et al.*, 2015; Malmros *et al.*, 2016).

Es por ello, que en este estudio se apoyará con el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) del glaciar Juncal Norte, cuenca del río Aconcagua, región de Valparaíso, ubicado en la Macrozona Centro. Esto a través del procesamiento de imágenes satelitales con diferentes características de resolución espacial y espectral, la recopilación de imágenes aéreas, información topográfica, e información glaciología histórica. Adicional a esto se realizaron tres campañas de terreno para la instalación y monitoreo de balizas de ablación, junto con una medición de

un Modelo Digital de Elevación (MDE) mediante LiDAR terrestre, realizado por la DGA, para obtener el balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte.

2. Objetivos

- Instalar 5 a 10 balizas de al menos 3 metros de profundidad en cada sitio propuesto, previamente aprobados por el Inspector Fiscal, midiendo sus coordenadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial, y registrando la altura de cada baliza.
- Medir al menos 2 veces adicionales las coordenadas y alturas de las balizas mediante receptor GNSS doble frecuencia diferencial, y registrando la altura de cada baliza. La última medición debe ser al final de marzo o en abril de 2021.
- Apoyar logísticamente, si lo requiere la DGA, un levantamiento del glaciar Juncal Norte con LiDAR terrestre que será realizado por un funcionario de la UGN mediante un instrumento de la UGN, en marzo/abril 2021. Los gastos asociados al traslado de dicho funcionario DGA y su instrumento hasta la zona (específicamente hasta donde se pueda llegar en vehículo o en helicóptero) serán costeados por la DGA.
- Confeccionar un balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte en base a la información topográfica existente, incluyendo al menos el modelo SRTM del año 2000 de la NASA, la(s) carta(s) de detalle del Instituto Geográfico Militar (IGM), datos del levantamiento LiDAR y datos del levantamiento GNSS cinemático del fin del verano (marzo/abril 2021). El tamaño espacial de la grilla deberá ser de 30 metros, modificable previa autorización del Inspector fiscal.
- Compilar las variaciones areales del glaciar Juncal Norte en base a las imágenes históricas, incluyendo su posición al final de marzo o principios de abril 2021. Para la extensión areal de marzo o abril 2021 se podrán usar datos LiDAR terrestre, levantamiento GNSS diferencial o bien otro método que deberá autorizar el Inspector Fiscal.

3. Zona de estudio

El sitio de estudio de este proyecto corresponde al glaciar Juncal Norte, localizado en los Andes semiáridos de Chile central (33°S), Región de Valparaíso, alojado en la cabecera de la cuenca del Río Aconcagua junto a la frontera entre Chile y Argentina. Desde allí se origina el río Juncal, uno de los afluentes principales del río Aconcagua, el cual cuenta con una extensión de 35 km y que es alimentado esencialmente por aguas de deshielo (Figura 1).

El glaciar Juncal Norte es uno de los glaciares más grandes de Chile central con un área de 6,8 km², mantiene los rasgos morfológicos de un glaciar de valle que desciende de un circo superior del Nevado de Juncal en dirección hacia el norte desde los ~5.800 hasta los ~3.000 m s.n.m. Presenta notables cambios topográficos en su zona de acumulación con fuertes pendientes. Luego del quiebre topográfico abrupto la lengua del glaciar se encajona en el fondo del valle. Desde los 3.500 m s.n.m. hacia valle abajo, el glaciar presenta una cubierta de material detrítico que se extiende por aproximadamente 5 km de largo y 0,5 km de ancho.

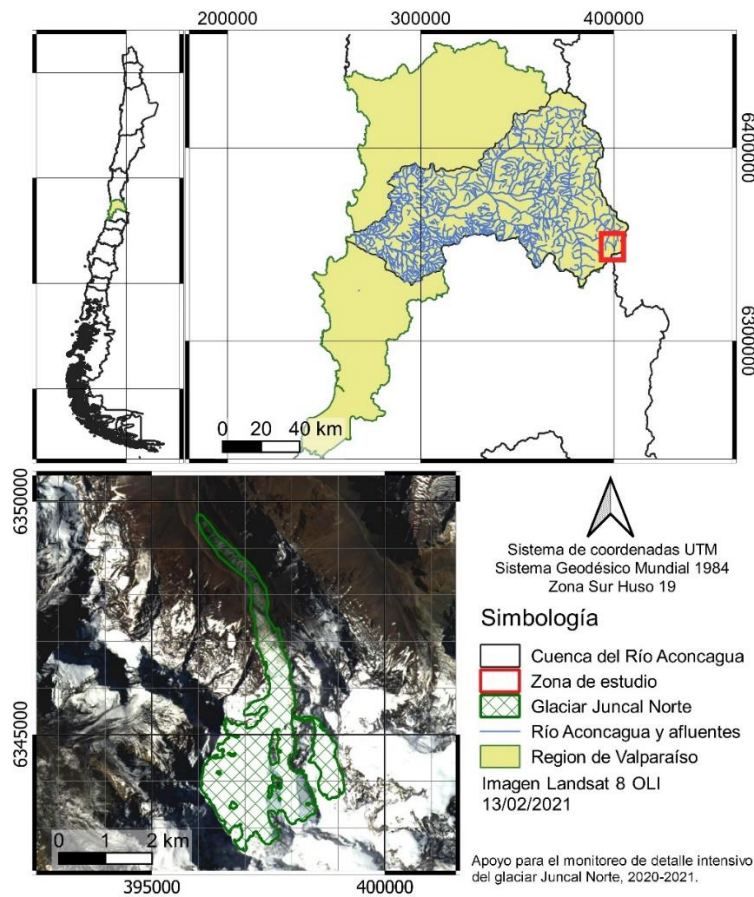


Figura 1. Localización del glaciar Juncal Norte. La imagen de fondo corresponde a una imagen Landsat 8 OLI/TIRS del 13/02/2021.

4. Metodología

4.1. Gabinete

4.1.1. Variaciones areales del glaciar

Las variaciones del glaciar Juncal Norte se delimitaron en base a interpretación de fotografías aéreas y análisis de imágenes satelitales. Se utilizaron fotografías aéreas de los años 1955 (vuelo HYCON, 1:70.000) y 1997 (vuelo GEOTEC, 1:50.000) generadas por el Instituto Geográfico Militar y el Servicio Aerofotogramétrico (SAF) de Chile, respectivamente. La fotografía de 1997 fue georreferenciada con 90 puntos de control y se obtuvo un error cuadrático medio (RMS) de 1 m. Mientras que la fotografía de 1955 fue georreferenciada con 55 puntos y tuvo un RMS de 25 m.

Se utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 y 7 (30 m de resolución) para generar los contornos areales del glaciar en los años 1987, 1997, 2006 y 2010. Las Imágenes Sentinel-2 (10 m de resolución) se utilizaron para delimitar el área glaciar del año 2021 (Tabla 1). Las imágenes fueron descargadas de la página del United States Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). El rango temporal de las imágenes comprende entre el 1 de enero y el 29 de marzo (Tabla 1). Este rango buscó obtener la representación del hielo limpio sin presencia de nieve. Para cada imagen Landsat se realizó una composición de bandas de falso color (bandas 4-5-2) y color natural (Bandas 3-2-1). Para el caso de las imágenes Landsat 7 también se utilizó como referencia la banda pancromática (banda 8) que cuenta con una resolución de 15 m. Para las imágenes Sentinel-2 se confeccionó una composición de bandas de falso color (bandas 8-4-3) y color natural (bandas 4-3-2). Utilizar diferentes composiciones de bandas permitió resaltar la presencia de hielo y contrastar la nitidez de cada imagen. El procesamiento y delimitación del área glaciar, ya sea con fotografías aéreas e imágenes satelitales, se realizó en el programa QGIS versión 3.16.6.

Tabla 1. Información de imágenes satelitales utilizadas en la delimitación areal del glaciar Juncal Norte.

Satélite y sensor	Año/mes/día	Path/row	Cobertura de nubes (%)	Fecha de descarga (año/mes/día)
Landsat 5 TM	1987/02/09	232/83	1	2021/06/30
Landsat 5 TM	1987/03/29	232/83	36	2021/08/06
Landsat 5 TM	2006/03/08	233/83	0	2021/08/07

Landsat 7 ETM	2006/03/16	233/83	0	2021/08/07
Landsat 5 TM	2010/01/14	233/83	1-4	2021/08/11
Landsat 7 ETM	2010/02/23	233/83	0-2	2021/08/12
Sentinel-2B	2021/02/22	No aplica	0	2021/07/10
Sentinel-2A	2021/03/09	No aplica	0	2021/08/13

4.1.2. Balance de masa geodésico

Para el cálculo del balance de masa del glaciar, en primera instancia se procede a delimitar el área del glaciar Juncal Norte en los años 2000, 2015 y 2021, capturadas en el mes de marzo donde se utilizaron imágenes satelitales con los sensores (Anexo III) Landsat 7 ETM+ y 8 OLI/TIRS (15 m de resolución) descargadas desde la plataforma de United States Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Además, se procede a recopilar información topográfica correspondientes a:

- Modelo Digital de Elevación (MDE) de Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) del año 2000 con 30 m de resolución, descargado de la plataforma Open Topography (<https://portal.opentopography.org/datasets>).
- Cartas topográficas del Instituto Geográfico Militar (IGM) del sector Carta Portillo año 2015 y Cordillera de los Piuquenes año 2012, ambas de escala 1:50.000, descargadas desde la plataforma del IGM (<https://www.igm.cl/>).
- Toma de datos LiDAR (Figura 2) por la UGN de la DGA el día 23 de marzo de 2021, los cuales son compartidos posteriormente en formato .las y .tif, con resolución de 1 m y cubre un área de 1,5 km² del glaciar.
- Datos Sistema Global de Navegación por Satélite (GNSS), levantados de manera cinemática en terreno el 21 de febrero de 2021, cubriendo una extensión de 0,0669 km².

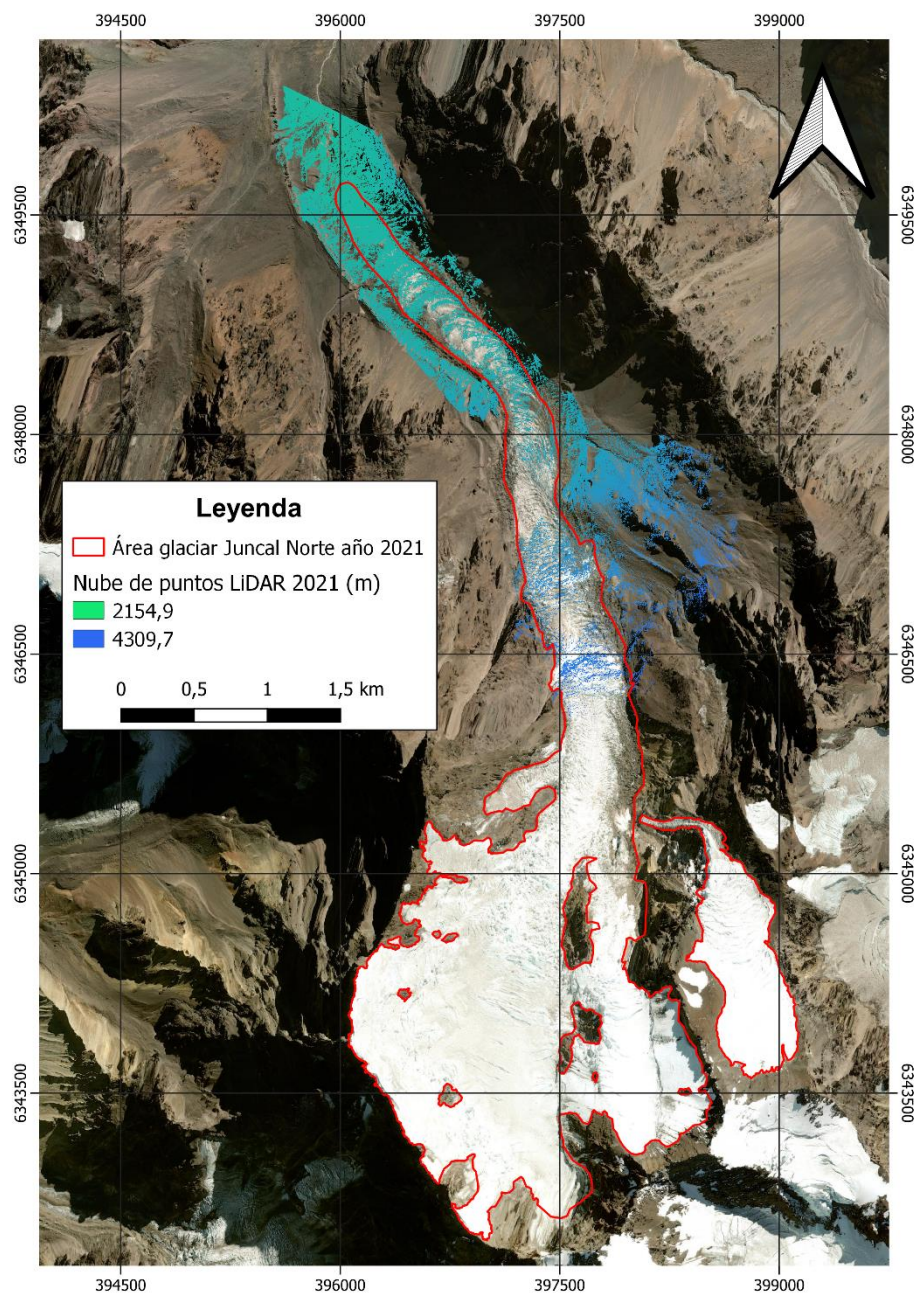


Figura 2. Mapa del área que cubre el LiDAR capturados con fecha 23 de marzo del 2021. La imagen de fondo corresponde a una imagen de ESRI satélite de QGIS.

El procesamiento de la información geoespacial se realizó en QGIS 3.18, con un sistema de coordenadas Universal Transversal Mercator (UTM), Datum WGS84, Huso 19 sur. El preprocesamiento de las imágenes satelitales consiste en corregir de manera radiométrica, atmosférica, además del mal funcionamiento del sensor a cuáles fueran pertinentes y

finalmente se aplicó a todas las imágenes el proceso PanSharpening para la obtención de una resolución de 15 m.

Las cartas topográficas fueron georeferenciadas utilizando 60 puntos de control, las cuales obtuvieron un error medio de 1 m para el año 2012 y 2015. Además, se digitalizaron las curvas de nivel de 50 m y puntos de elevación. Con estos datos se procedió a transformar los vectores a un ráster de 30 m de resolución generando el modelo digital de elevación del IGM.

En cuanto a los datos LiDAR, se realizó un ráster de 30 m de resolución desde la nube de puntos (.las), con la herramienta LAStools, utilizando todos los retornos del pulso laser, los cuales corresponden a la superficie glaciar.

Los datos del GNSS fueron inicialmente transformados a formato shp. y posteriormente a raster con una resolución de 30 m.

Una vez ya generados los 3 MDE, se realiza el co-registro con la metodología de Nuth and A. Kaab (2011) para alinear los MDE, recortan con respecto al área de cada año en estudio. Para posteriormente realizar una resta entre estos MDE, los cuales son MDE2000-MDE2021, MDE2000-MDE2015 y MDE2015-MDE2021, MDEGNSS-MDELIDAR y así calcular la diferencia de elevación entre estos años por el área de cada píxel, obteniendo el cambio de volumen entre MDE, el cual multiplicado por la densidad del hielo (900 kg m^{-3}) nos mostraría el balance de masa. También, se extrajeron curvas de nivel de 30 m y 200 m para visualizar el cambio de elevación entre estos años.

4.1.3. Mapeo geomorfológico

El mapeo geomorfológico está basado en la interpretación de imágenes satelitales GeoEye (2015), Digital Globe (2018) y Maxar (2019, 2020). También se efectuó un análisis estereoscópico de fotografías aéreas escala 1:70.000 del vuelo GEOTEC de 1997 del Servicio Aerofotogramétrico de Chile (SAF). Trabajos de campo fueron realizados durante tres campañas de terreno en los meses de febrero, marzo y abril. Esto permitió chequear y mejorar el mapeo hecho en gabinete. Un Modelo Digital de Elevación de 12,5 m de resolución fue hecho en base a las imágenes ALOS-PALSAR (<https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>). El mapa geomorfológico se confeccionó con el programa QGIS versión 3.16.6.

4.2.Terreno

4.2.1. Instalación y medición de balizas

El monitoreo del glaciar Juncal Norte mediante balizas de ablación se realizó en tres campañas de terreno. La primera campaña de terreno se realizó en los días 20 al 21 de febrero del 2021, donde la superficie glaciar se encontraba sin nieve y se instalaron un total de ocho balizas de ablación en la parte baja del glaciar Juncal Norte. El sitio de instalación se escogió en base a una primera propuesta ilustrada en la etapa I de este estudio, sin embargo, las coordenadas GPS varían levemente debido a que los puntos exactos fueron determinados en base a las condiciones de terreno. La instalación se llevó a cabo mediante un perforador de vapor "Heucke" (Figura 3).



Figura 3. Fotografía de la campaña de terreno 1, donde se ve la perforación con el perforador de vapor (Heucke).

Las balizas se construyeron en base a secciones de coligües lo que nos permite retirar cada sección superior sobrante en las distintas campañas de terreno a medida que el glaciar va perdiendo hielo, con un largo total de balizas desde 4,1 a 5 metros. Las profundidades bajo el hielo después de la instalación de balizas varían desde los 3,5 m a 4,6 m (Anexo I y II).

En cada baliza se midió la coordenada con GPS diferencial modelo Polaris-100 que permite una precisión de hasta 5 cm y 2 metros en la horizontal y algunos decímetros en la vertical.

También se utilizó un GPS navegador con precisión de 3 metros horizontales y entre 5 y 10 metros verticales y la altura sobre la superficie (emergencia) expuesta en cada campaña con la descripción general de las características del lugar donde se instaló. Las campañas de mediciones se realizaron el 23 de marzo y el 13 de abril del 2021.

Para las tres campañas la metodología de medición de coordenadas fue la misma. En el sitio de la baliza el GPS diferencial se situó con un jalón (1,5 y 2 metros) por sobre la baliza. Con el objetivo de mejorar la precisión de cada medición el GPS se mantuvo en esta posición durante un mínimo de 15 minutos. Finalizado este tiempo se procedió a recorrer hasta la siguiente baliza, intervalo durante el cual el GPS siguió registrando datos cinemáticos, los cuales posteriormente serían utilizados en el balance de masa geodésico.

5. Resultados

5.1. Instalación y medición de balizas

En este apartado se presenta la instalación y monitoreo de las balizas de ablación en la temporada de febrero a abril de 2021.

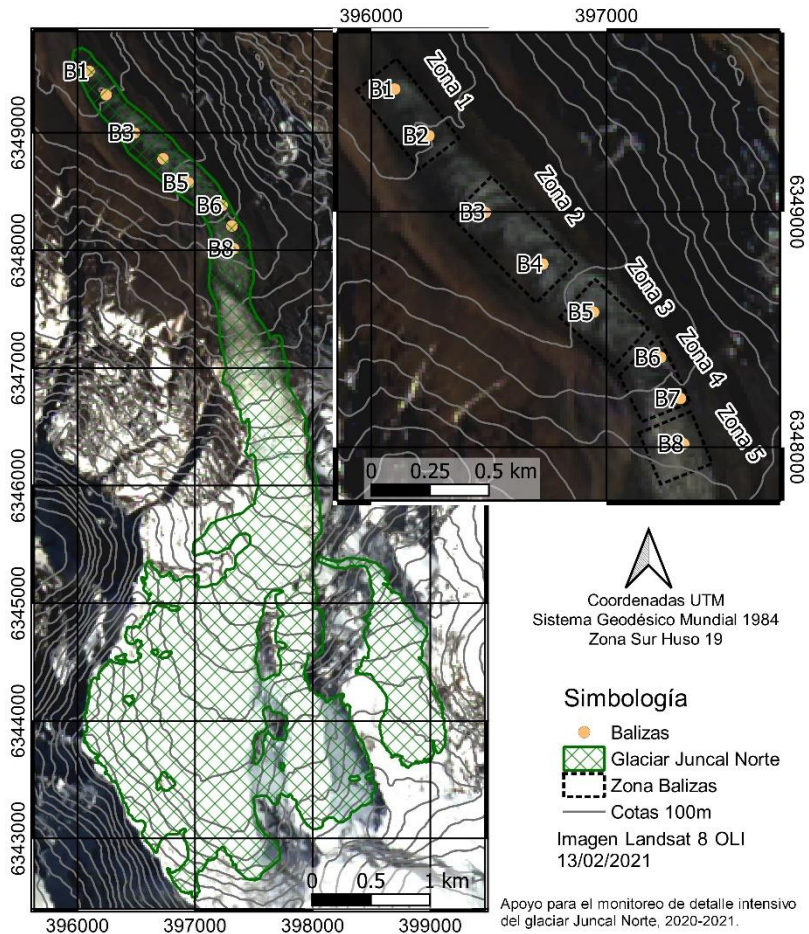


Figura 4. Ubicación de las balizas de ablación instaladas durante el mes de febrero a abril. La imagen de fondo corresponde a una imagen Landsat 8 OLI con fecha 13/02/2021.

Los criterios para la instalación de balizas se basaron en zonas representativas de la zona, las cuales se describen a continuación:

- **Representatividad dentro del glaciar Juncal Norte**, principalmente llegar a todos los tipos de hielo que se encuentran en el glaciar tanto cubiertos por detritos como descubiertos.
- **Lograr mayor cobertura posible**, tanto para extensión areal como para rango altitudinal, intentar abarcar la mayor área posible.

- **Considerar hipsometría del glaciar**, permite la instalación de balizas con pendientes que no superen los 10°, para no exponer al equipo de monitoreo.
- **Garantizar la seguridad del equipo de monitoreo.** Las zonas propuestas se escogieron con la logística de ser zonas seguras y que no pongan en peligro al equipo, es por esto por lo que no se propuso instalación de balizas en la parte alta del glaciar.

Con los antecedentes expuestos anteriormente se instalaron un total de ocho balizas de ablación distribuidas dentro de la lengua del glaciar en el rango de elevación desde los 3.044 a 3.325 m s.n.m. (Figura 4). Cinco de las balizas se instalaron en hielo descubierto y tres de ellas en hielo parcialmente cubierto (Tabla 2).

Tabla 2. Detalles de las zonas y los parámetros a considerar para la instalación de balizas (datos GPS navegador). Coordenadas expresadas en Universal Transversal de Mercator (UTM) datum WGS 84, huso 19 S.

Baliza	Sector	Coordenadas (UTM)		Rango elevación (m s.n.m.)	Características de superficie
		Este	Sur		
B1	Extremo norte, cercano al frente	396.100	6.349.522	3.044	Hielo parcialmente cubierto por detritos de poca profundidad <2 cm, color blanco parduzco, pequeños canales de 2 cm a 2 m de la baliza
B2	Cercano al frente	396.245	6.349.324	3.070	Hielo parcialmente cubierto por detritos de <2 cm, color pardo oscuro, moderada cobertura de detritos de poca profundidad angulosos y prismoidales de tamaño arena a grava, pequeñas grietas y flujos de agua de 3 cm de ancho a 3 m de las balizas
B3	Zona media de la lengua glaciar	396.485	6.348.998	3.122	Hielo descubierto, color blanco parduzco, con leve cantidad de detritos
B4	Zona media de la lengua cercana al frente	396.729	6.348.778	3.157	Hielo descubierto, color blanco grisáceo, con leves grietas cercanas de 1-2 cm de ancho
B5	Zona media	396.945	6.348.574	3.193	Hielo descubierto, de color blanco grisáceo, con leves grietas cercanas de 3 cm de

	de la lengua				ancho, cubierto detrítica <2% de arena a grava polimicticas
B6	Zona media de la lengua	397.230	6.348.381	3.245	Hielo descubierto, color blanco grisáceo, con pequeñas grietas cercanas de 1-2 cm de ancho a 3 m de la baliza
B7	Zona alta de la lengua	397.314	6.348.207	3.285	Hielo parcialmente cubierto por detritos de poca profundidad, color pardo grisáceo, con 2 cm de cubierta detrítico, sin grietas cercanas
B8	Zona alta de la lengua	397.328	6.348.014	3.325	Hielo descubierto con mínimos porcentaje de detritos, color blanco parduzco, sin detritos

En la Tabla 3, se presentan los datos de la instalación y emergencias tomadas durante las tres campañas de terreno entre los meses de febrero a abril del 2021. En la primera campaña de medición (emergencia terreno 1) solo se pudieron medir desde la baliza B3 a la B8, de las cuales la mayor emergencia fue de la baliza B3 (118 cm) como se muestra en la Figura 5. Mientras que en la segunda campaña de medición (emergencia terreno 2) las más significativas se mostraron en las balizas B6 (96 cm), B8 (94 cm) y B7 (89 cm). En cuanto a la ablación total los mayores centímetros se midieron en las balizas B1 (248 cm) y B2 (290 cm), las cuales se localizan en la parte baja del glaciar muy cercanas al frente glaciar levemente cubierto por detritos (<2cm de espesor). Por otro lado, las balizas que tuvieron menos ablación fueron las balizas B4 (149 cm) y B5 (128 cm), localizadas en la parte media de la lengua glaciar.

Tabla 3. Datos de emergencias de las balizas de ablación medidas en terreno. La instalación se realizó los días 20 y 21 de febrero y los monitoreos de la medición de ablación los días 12 de marzo y 13 de abril. (E.I.: Emergencia inicial, E.T.1: Emergencia terreno 1, E.T.2: Emergencia terreno 2)

Baliza	Largo total baliza (cm)	Profundidad instalación (cm)	E.I. (cm)	E.T.1 (cm)	E.T.2 (cm)	Ablación total (cm)
B1	500	448	52	X	300	248
B2	500	451	49	X	339	290
B3	500	455	45	163	224	179
B4	500	436	64	152	213	149
B5	420	360	60	142	188	128
B6	410	345	65	167	263	198
B7	420	350	70	180	269	199
B8	415	350	65	139	233	168

El periodo total de posicionamiento de las balizas en el glaciar fue de 53 días, desde el 21 de febrero hasta el 13 de abril del 2021. Las tasas de ablación diarias medidas en las balizas van desde 2,41 cm d⁻¹ hasta 5,57 cm d⁻¹. Esta última corresponde a la baliza 2, que junto con la baliza 1 (4,76 cm d⁻¹) son los valores de tasas mas altos, localizados en las cercanías del frente glaciar. Por otro lado, las menores tasas corresponden a las balizas 4 (2,81 cm d⁻¹) y 5 (2,41 cm d⁻¹) localizados en la parte media de la lengua, coincidente con lugares muy sombreados durante el día.

Tabla 4. Fechas de salidas a terreno y tasa de ablación por día promedio de las balizas.

Balizas	Fecha emergencia instalación	Fecha emergencia terreno 2	Fecha emergencia terreno 3	Total días de medición	Tasa de ablación (cm d⁻¹)
B1	21/02/2021	23/03/2021	13/04/2021	52	4,76
B2	21/02/2021	23/03/2021	13/04/2021	52	5,57
B3	21/02/2021	23/03/2021	13/04/2021	52	3,44
B4	20/02/2021	23/03/2021	13/04/2021	53	2,81
B5	20/02/2021	23/03/2021	13/04/2021	53	2,41
B6	20/02/2021	23/03/2021	13/04/2021	53	3,73
B7	20/02/2021	23/03/2021	13/04/2021	53	3,75
B8	20/02/2021	23/03/2021	13/04/2021	53	3,16

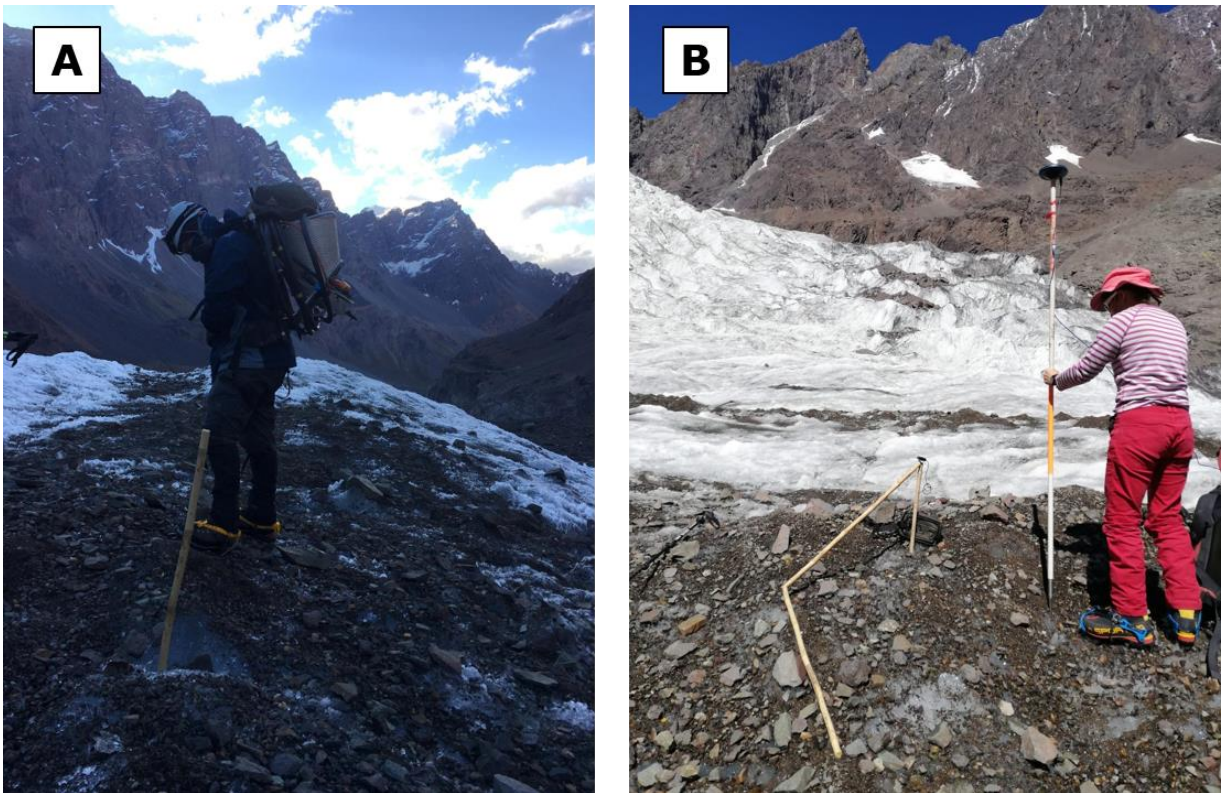


Figura 5. Fotografías de las campañas de terreno. A) Se muestra la baliza "B7" en la primera campaña de instalación. B) Se muestra la baliza "B7" en la segunda campaña de terreno con la evidente emergencia y en la misma fotografía el GPS diferencial en preparación para acercarlo a la baliza y medir sobre ella.

En la Tabla 5 se observan todas las mediciones tomadas a las balizas con el GPS diferencial. La orografía propia del sector, en conjunto con el tiempo relativamente acotado (~15 min) llevaron a conducir dificultades técnicas la toma del dato GPS, principalmente en las campañas de terreno 2 y 3. Las mediciones con un porcentaje de error alto fueron eliminadas y marcadas con una "X".

Tabla 5: Coordenadas de las balizas con GPS diferencial.

Baliza	Fecha	Coordenada Este UTM Huso 19 WGS 84	Coordenada Norte UTM Huso 19 WGS 84	Altura (m s.n.m.)
Baliza 1	21/02/2021	396.099,36	6.349.525,09	2.993,82
	23/03/2021	X	X	X
	13/04/2021	396.098,01	6.349.525,63	2.991,46
Baliza 2	21/02/2021	396.195,77	6.349.335,18	3.025,62

	23/03/2021	X	X	X
	13/04/2021	396.195,67	6.349.335,93	3.023,32
Baliza 3	21/02/2021	396.486,03	6.348.998,78	3.094,65
	23/03/2021	X	X	X
	13/04/2021	396.484,11	6.349.000,64	3.092,45
Baliza 4	21/02/2021	396.728,96	6.348.775,90	3.133,79
	23/03/2021	X	X	X
	13/04/2021	X	X	X
Baliza 5	20/02/2021	396.940,51	6.348.574,77	3.170,10
	23/03/2021	X	X	X
	13/04/2021	X	X	X
Baliza 6	20/02/2021	397.228,80	6.348.380,79	3.235,92
	23/03/2021	X	X	X
	13/04/2021	397.224,89	6.348.388,14	3.231,10
Baliza 7	20/02/2021	X	X	X
	23/03/2021	397.311,63	6.348.213,76	3.267,40
	13/04/2021	397.312,07	6.348.216,19	3.265,69
Baliza 8	20/02/2021	X	X	X
	23/03/2021	397.326,46	6.348.018,39	3.303,63
	13/04/2021	397.330,17	6.348.025,19	3.302,99

En la Tabla 6, se muestran los desplazamientos horizontales para todas las balizas, junto con la velocidad de desplazamiento para cada baliza en metros por día. Debido al error metodológico explicado anteriormente con los puntos GPS de la Tabla 5, se marca con "X" los desplazamientos que no se pueden calcular.

Tabla 6: Desplazamiento y velocidad de desplazamiento de las balizas.

Baliza	Desplazamiento intervalo 21/02 - 23/03	Desplazamiento intervalo 23/03 - 13/04	Desplazamiento intervalo 21/02 - 13/04	Velocidad de desplazamiento (m/d)
	31 días	21 días	52 días	
Baliza 1	X	X	1,45	0,03
Baliza 2	X	X	0,76	0,01
Baliza 3	X	X	2,67	0,05
Baliza 4	X	X	X	X

Baliza	Desplazamiento intervalo 20/02 - 23/03 33 días	Desplazamiento intervalo 23/03 - 13/04 21 días	Desplazamiento intervalo 20/02 - 13/04 53 días	Velocidad de desplazamiento (m/d)
Baliza 5	X	X	X	X
Baliza 6	X	X	8,33	0,16
Baliza 7	X	2,47	X	0,11
Baliza 8	X	7,75	X	0,35

5.2. Revisión de las variaciones del glaciar Juncal Norte

La comparación de las fotografías aéreas e imágenes satelitales da cuenta de una pérdida generalizada de área englacada desde 1955. El área del glaciar Juncal Norte ha disminuido cerca de 1,9 km² entre los años 1955 y 2021 (Tabla 7). Lo anterior equivale a una pérdida relativa del 22% de la cobertura glaciar. Los principales cambios se observan entre los periodos 1987-1997 y 2010-2021 (Figura 6). Durante el periodo 1987-1997 el glaciar perdió una superficie de 0,6 km², lo que es equivalente al 7% del área englacada si se considera la cobertura de 1955 como dato inicial. Mientras que durante los años 2010-2021 la pérdida de área glaciar alcanzó 1,4 km². Solo este último periodo significó una reducción relativa del 17,5% de la cobertura glaciar si se utiliza como referencia el año 1955 (Figura 7).

La reducción del área glaciar desde mediados del siglo XX se asocia a la contracción de la zona de ablación que se encuentra bajo los 3.500 metros sobre el nivel del mar (m s.n.m.) (Figura 7). El mapeo permitió visualizar periodos de intenso retroceso glaciar entre los años 1987-1997 y 2010-2021. Durante el primer periodo la retirada del frente del glaciar alcanzó un total de -168 m, lo que fue equivalente a una tasa de retroceso anual cercano a -17 m a⁻¹. El segundo periodo de retirada frontal del hielo ocurrió entre los años 2010-2021. Solo durante los últimos 11 años el frente del glaciar Juncal Norte ha retrocedido -310 m, lo que es equivalente a una contracción aproximada de 28 m a⁻¹ (Tabla 4).

Tabla 7. Variación de la cobertura del glaciar Juncal Norte en km² y porcentaje entre el periodo 1955-2021.

Año	Área glaciar (km²)	Cambio de área (km²) desde 1955	Cambio de área (%) desde 1955	Retroceso del frente (m) desde 1955	Tasa de retroceso (m a⁻¹) desde 1955
1955	8,7				
1987	8,8	0,1	1	-77	-2,4
1997	8,1	-0,6	-7	-245	-5,9
2006	8,2	-0,5	-6	-350	-6,9
2010	8,2	-0,5	-6	-360	-6,5
2021	6,8	-1,9	-22	-670	-10,0

La pérdida de área glaciar también se puede explicar a través del proceso de ablación que ocurre en los flancos oeste y sureste del valle entre los 4.000 y 5.500 m s.n.m. La Figura 7 permite identificar que la sección inferior del glaciar que se encuentra adosada a la pared rocosa oeste ha tenido un retraimiento cercano a -340 m desde 1955. Asimismo, es posible observar que el flujo principal del glaciar ha perdido fuentes de alimentación a lo largo del tiempo. Las fotografías de 1955 dan cuenta de la conexión de la zona de acumulación sureste al glaciar principal a través de una cascada de hielo. La conexión persiste en 1987. Sin embargo, desde el año 1997 la cascada de hielo aparece desconectada del flujo principal del glaciar (Figura 7).

A pesar de que existe una pérdida generalizada de área englacada, cabe destacar que se identifican dos periodos en que la cobertura del glaciar Juncal Norte crece levemente (Figura 6). El mapeo sugiere que para el año 1987 el área glaciar creció cerca de 1% (0,1 km²) en referencia a su cobertura de 1955 (Tabla 4). Este mínimo aumento de área no fue acompañado por, al menos durante la captación de la imagen satelital de marzo de 1987, de un crecimiento del frente glaciar. Se visualizó un retroceso del frente glaciar entre los años 1955 y 1987 de aproximadamente -77 m, lo que es similar a una tasa de retirada del frente glaciar de -2,4 m a⁻¹.

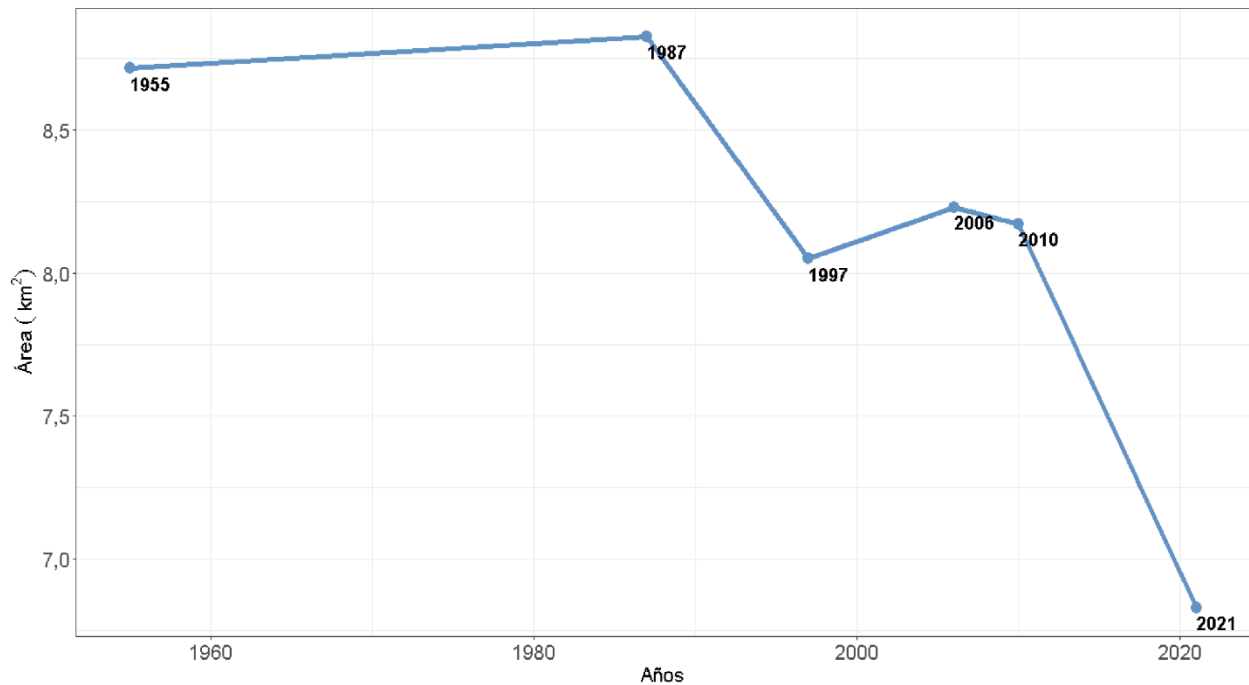


Figura 6. Variación areal del glaciar Juncal Norte entre el periodo 1955-2021.

El segundo periodo de crecimiento de cobertura glaciar ocurre entre los años 1997 y 2006, donde el glaciar Juncal Norte vuelve a tener un aumento de 0,1 km² (Tabla 4, Figura 6). Al igual que en el caso anterior, aunque existe un cambio positivo de área englacada, no se percibe un avance significativo del frente glaciar. Entre 1997 y 2006 el frente del glaciar Juncal Norte retrocede cerca de -105 m, lo que es igual a una tasa de contracción de casi -11 m a⁻¹.

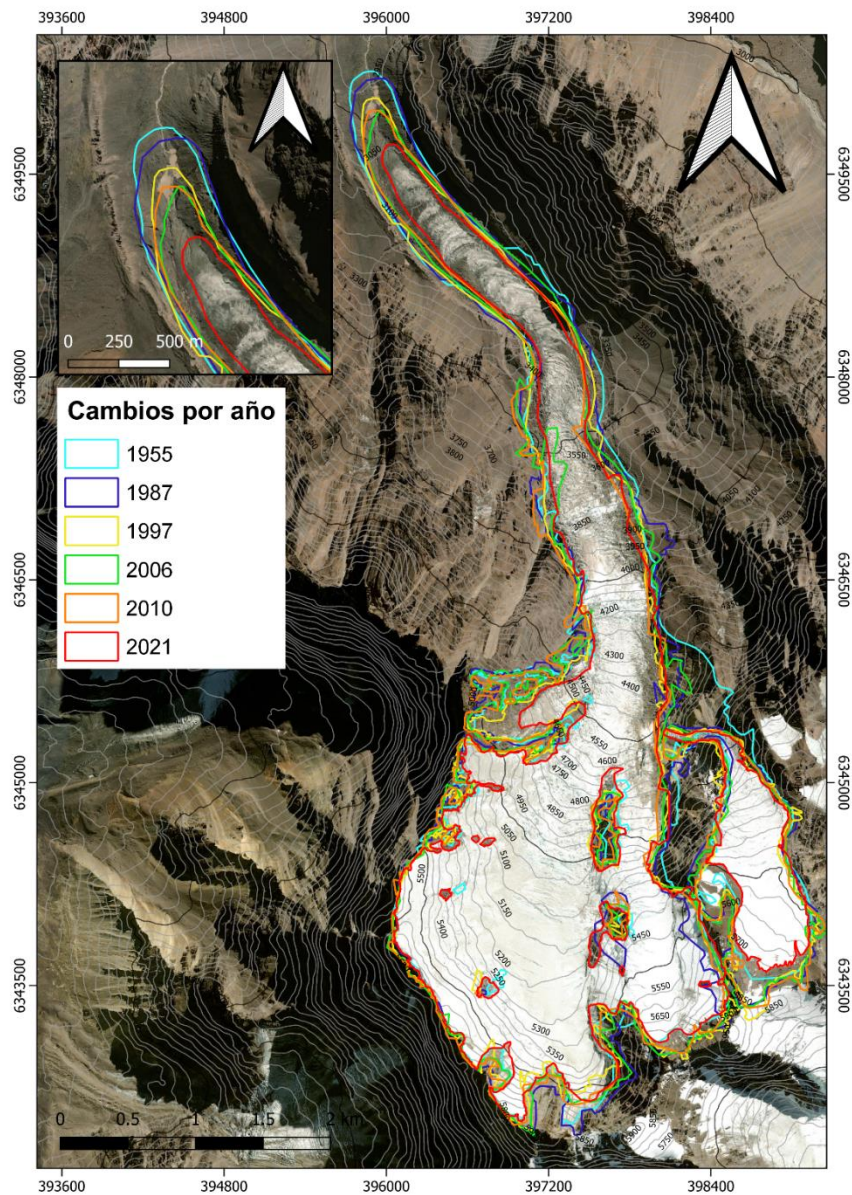


Figura 7. Variaciones del glaciar Juncal Norte, entre los años 1955 y 2021. La imagen utilizada corresponde a ESRI satélite de QGIS.

5.3. Balance de masa geodésico

El cálculo de balance de masa geodésico (Tabla 8) se realizó en la lengua del glaciar Juncal Norte, presentando una variación volumétrica negativa de $0,303 \text{ km}^3$ en los últimos 21 años. Entre los años 2000 y 2015 (Figura 8) evidenció una pérdida de $4,72 \text{ (m eq.a.)}$, esto medido en un área de $2,35 \text{ km}^2$, con cambios de elevación en la superficie del glaciar que varían entre los $-77,75 \text{ m}$ y $29,18 \text{ m}$, mientras que en los últimos 6 años (2015-2021), el glaciar ha

presentado un adelgazamiento significativo entre los 2.950 y 3.150 m s.n.m., con pérdidas de $-2,51 \text{ m eq.a. a}^{-1}$, cálculo realizado en un área de $1,73 \text{ km}^2$, el cual se basa en el área que cubren los datos LiDAR del año 2021. En total, en el periodo 2000-2021, el glaciar perdió $-0,94 \text{ m eq.a. a}^{-1}$, en un área de $2,04 \text{ km}^2$. Coincidiendo con una progresiva disminución areal desde el año 2010, además destaca la zona central de la parte baja de la lengua, mostrando valores de mayor adelgazamiento, los cuales pueden ser asociados a el hielo descubierto, en comparación a sus bordes los cuales se encuentran cubiertos por una fina capa de detritos. Por otro lado, debido a su dirección de flujo este tiende a acumularse en la zona medial de la lengua ($\sim 3.500 \text{ m s.n.m.}$), también por la curvatura donde se encuentra emplazado, abrupto cambio de pendiente y aumento de cubierta de detritos, se pueden encontrar valores positivos en la variación de la superficie glaciar.

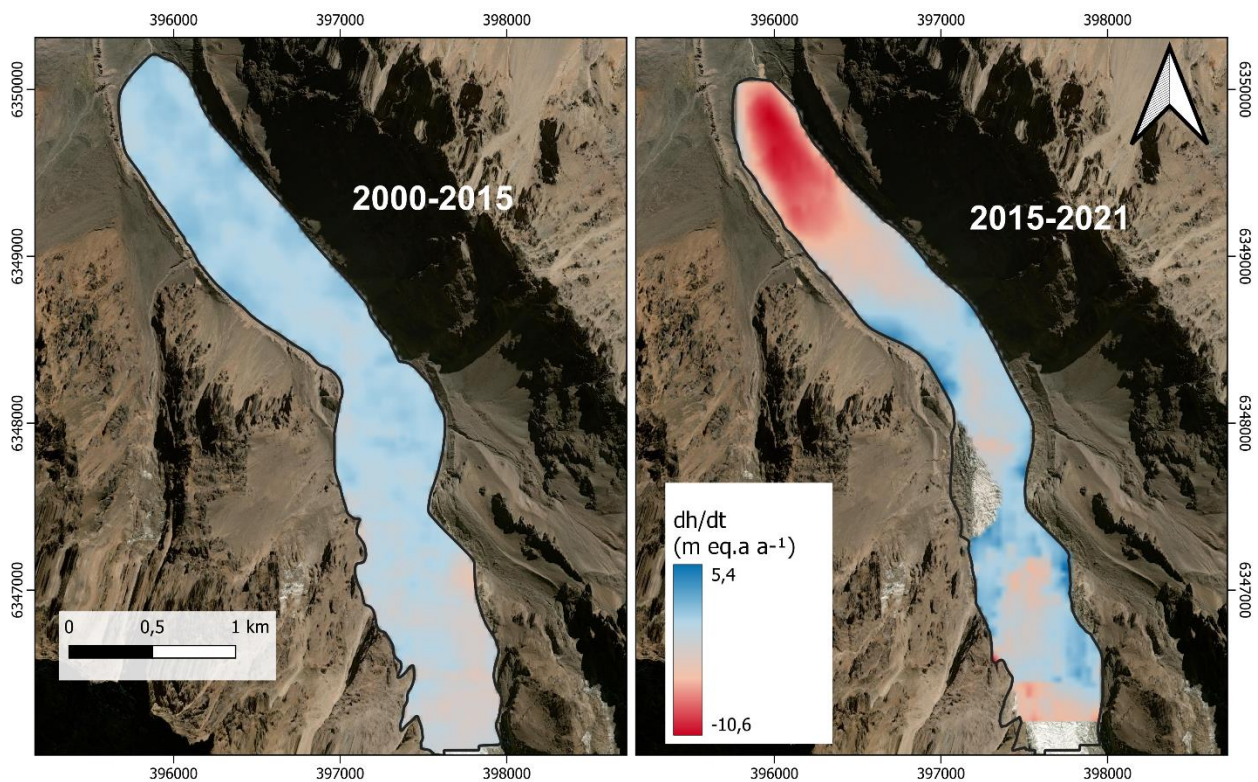


Figura 8. Variación volumétrica del glaciar Juncal Norte entre los años 2000 y 2021, imagen utilizada corresponde a ESRI satélite de QGIS.

Tabla 8. Balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte entre el año 2000 a 2021.

MDE y años	Años entre estudios	Área considerada (km²)	Variación volumétrica (km³)	Balance de masa equivalente en agua (m eq.a.)	Balance de masa equivalente en agua al año (m eq.a. a⁻¹)
SRTM2000 - IGM2015	15,00	2,351	-0,012	-4,721	-0,315
IGM2015 - LiDAR2021	6,00	1,734	-0,291	-15,089	-2,514
SRTM2000-LiDAR2021	21,00	2,043	-0,303	-19,807	-0,943

5.3.1 Balance de masa geodésico 2021 GNSS-LiDAR

El balance de masa geodésico (Tabla 8) se realizó en un área de 0,07 km², sobre la lengua del glaciar Juncal Norte, entre los 2.990 a 3.158 m s.n.m. La variación evidenció un balance neto negativo de 2,93 m eq.a. en los 31 días de este periodo estudiados (Figura 9), los cuales correspondieron a datos GNSS y LiDAR, con un RMSE (error cuadrático medio) de 3,3 m.

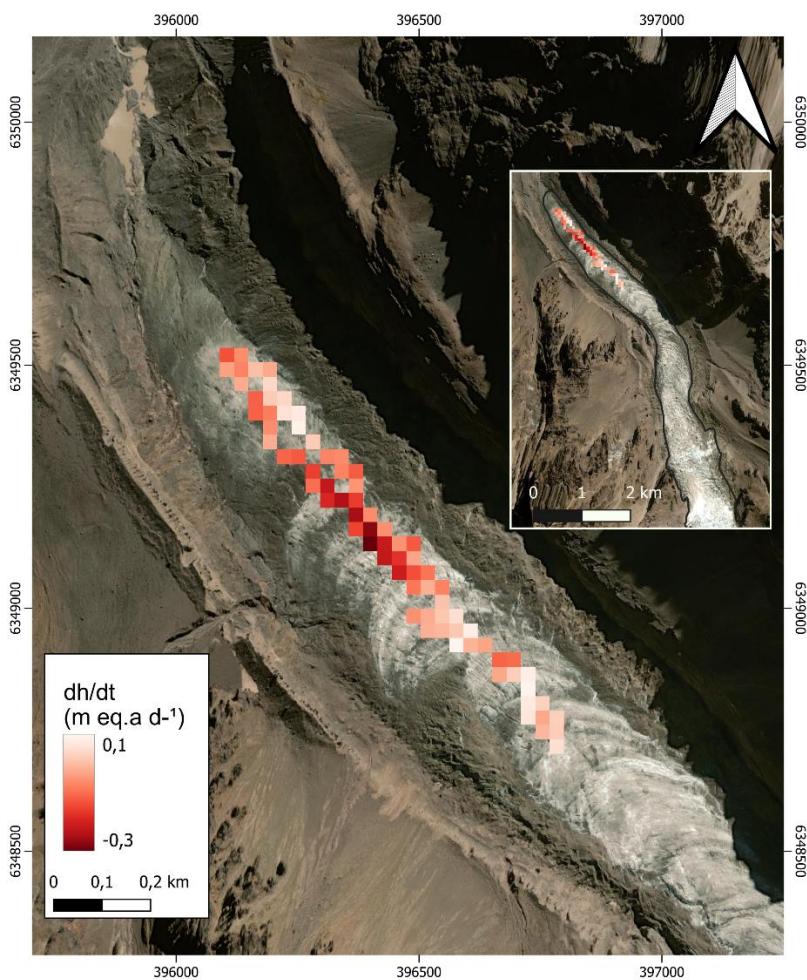


Figura 9. Balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte entre febrero y marzo de 2021, imagen utilizada corresponde a ESRI satélite de QGIS.

Tabla 9. Balance de masa geodésico del glaciar Juncal Norte entre el febrero y marzo de 2021.

MDE	Días entre estudios	Variación volumétrica (m³)	Balance de masa equivalente en agua (m eq.a.)	Balance de masa equivalente en agua al día (m eq.a. d⁻¹)
GNSS – LIDAR 2021	31,00	-220.565,360	-2,977	-0,096

5.4. Mapeo geomorfológico

El mapeo geomorfológico se realizó para entender y graficar la evolución del paisaje glacial durante el reciente proceso de deglaciación. Se han identificado dos cambios morfológicos significativos desde 1955. El primer cambio está asociado al desarrollo de una cobertura por detritos que resalta en los márgenes del glaciar. La cobertura detrítica se extiende desde los 3.500 m s.n.m. hasta la zona del frente (3.050 m s.n.m.), y alcanza un área de 0,6 km² (Figura 9). La zona cubierta por detritos es una topografía irregular caracterizada por la presencia de acantilados de hielo de distinto tamaño. Los acantilados de hielo de mayor envergadura tienen una altura de 5 m y pendientes mayores a 30°. Hacia las morrenas laterales el hielo gradualmente deja de ser visible en superficie.

Conos coluviales se acumulan entre las paredes del valle y la superficie de las morrenas laterales (Figura 10). La cartografía ha permitido identificar el desarrollo de canales de descarga de detritos que han erosionado los conos coluviales y también las morrenas laterales. Los canales de descarga de detritos comúnmente se extienden hasta la superficie del glaciar, facilitando la deposición de material sobre el hielo.



Figura 10. Vista hacia el sur del glaciar Juncal Norte. En la superficie del glaciar destacan sus flancos cubiertos por detritos.

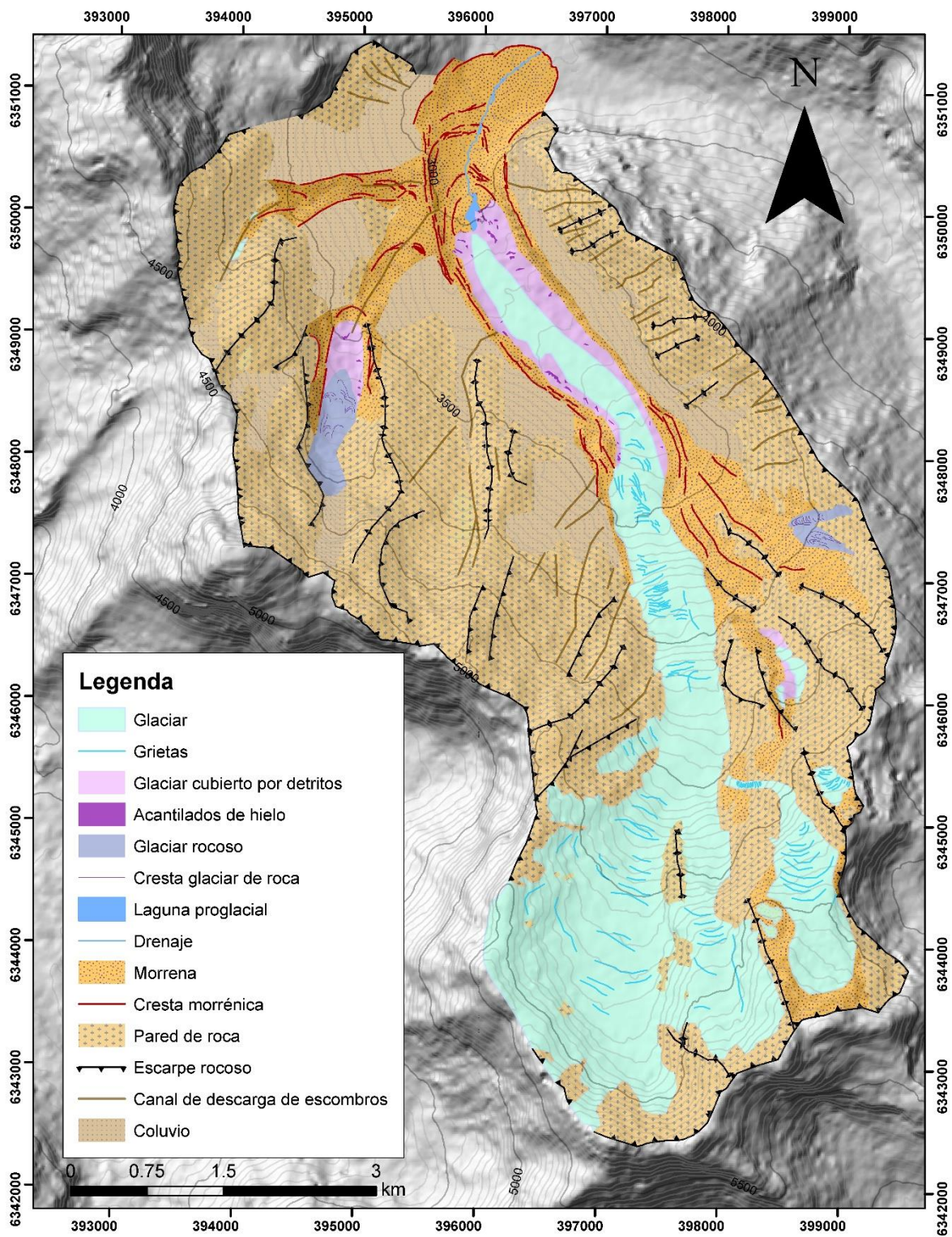


Figura 11. Mapeo geomorfológico glaciar Juncal Norte.

Un segundo cambio morfológico está asociado al notable represamiento de agua de deshielo entre los 2.950 y 3.050 m s.n.m. De esta forma, una laguna proglacial ha ido formándose desde el año 2018 (sin observarse evidencia de una laguna en 2017) entre una morrena frontal cercana a la posición de margen de hielo de 1955 y el espacio liberado por el retroceso del frente glaciar (Figura 11). Por los costados la laguna proglacial está siendo represada por hielo cubierto por detritos.

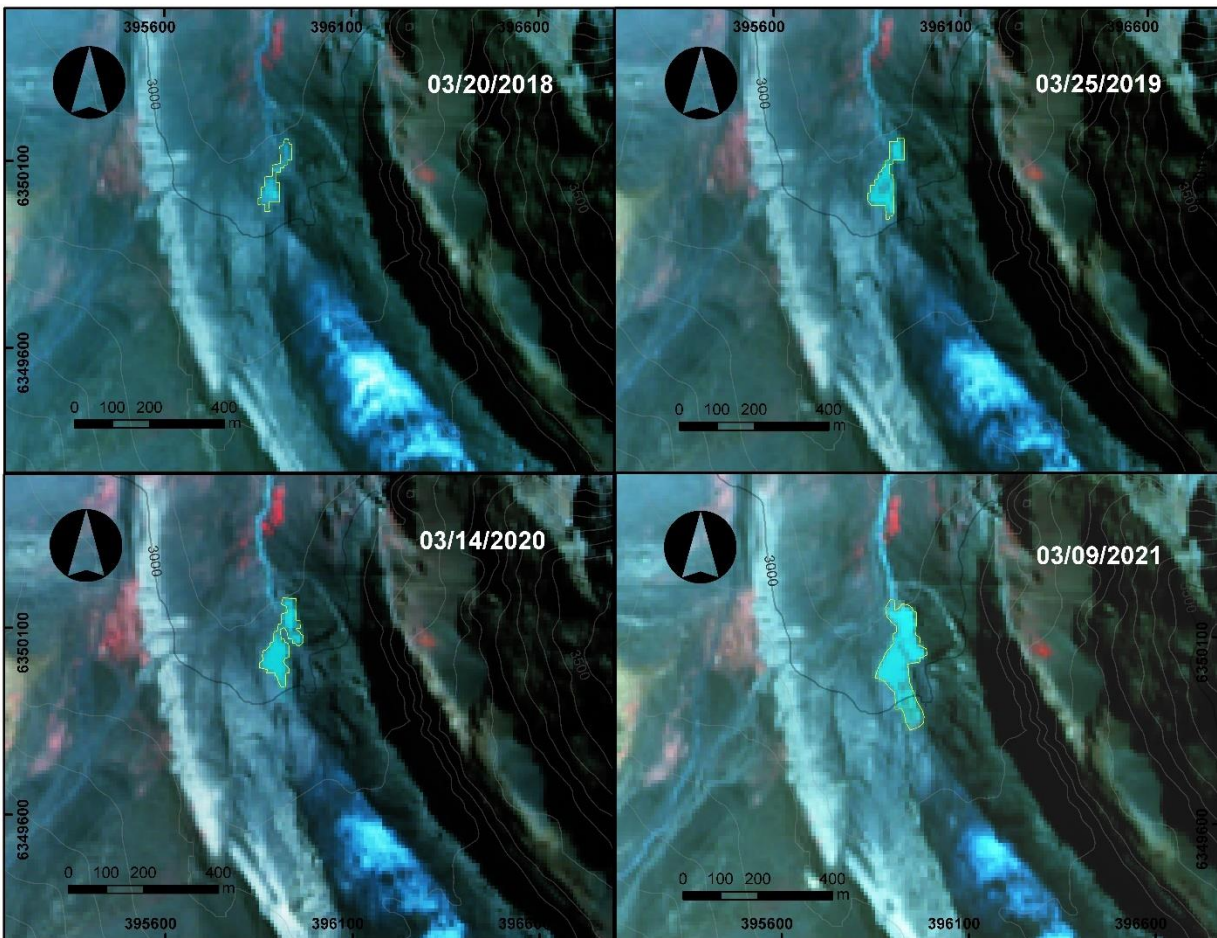


Figura 12. Evolución de laguna proglacial. La imagen de fondo es una imagen ESRI ArcGis 2020

Las imágenes satelitales sugieren que el crecimiento de la laguna se ha acelerado con el tiempo (Figura 12). Durante el año 2018 la dimensión de la laguna fue de 0,3 hectáreas (ha). El año 2019 el área de la laguna creció a 0,7 ha. Mientras que para el año 2020 su superficie llegó a 1,2 ha. El cambio más abrupto ocurrió entre los años 2020 y 2021. La imagen del 9 de marzo del 2021 indica que la cobertura de la laguna es mayor a 2,2 ha. Lo anterior implica un aumento areal mayor a 630% en casi 4 años (Figura 12).

El análisis de imágenes satelitales indica que no ha habido una descarga abrupta de la laguna o algún otro proceso que ayude a su vaciamiento. Por lo cual el represamiento de agua de deshielo solo ha tendido a la expansión.

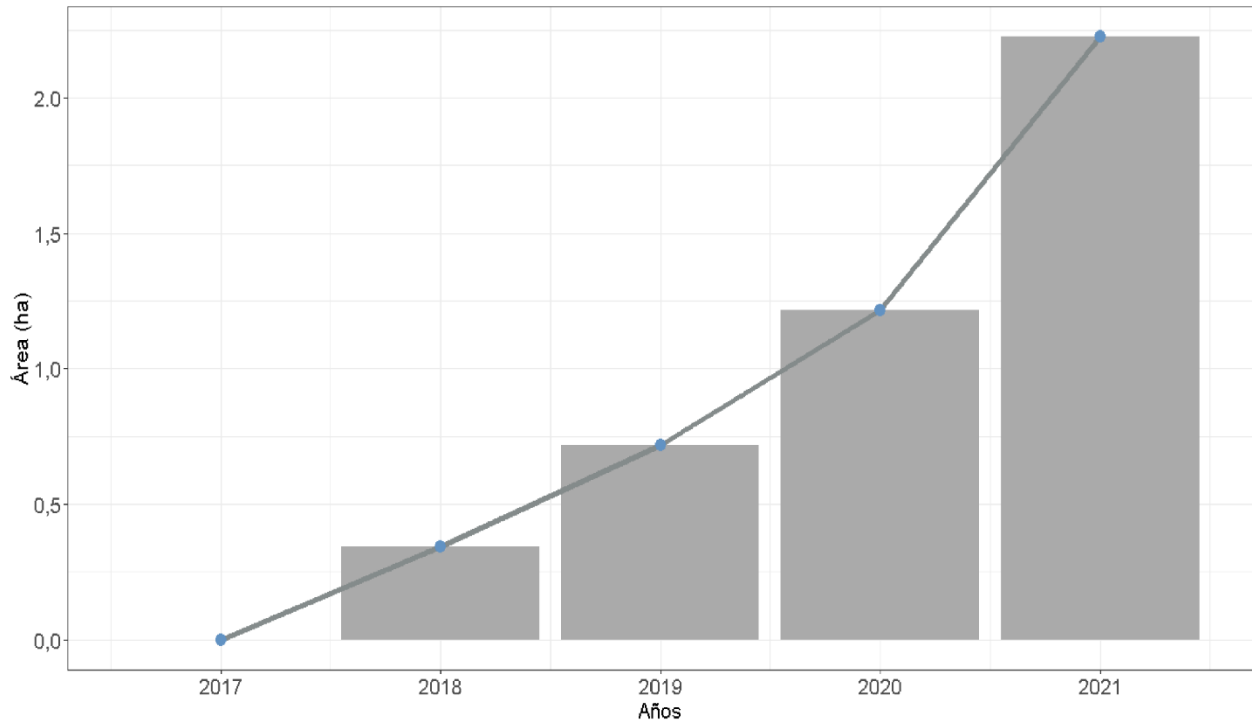


Figura 13. Evolución de la laguna proglacial en área desde el 2017 al 2021.

6. Conclusión

El glaciar Juncal Norte ha experimentado una contracción casi continua desde 1955. A lo largo de la serie de variaciones areales (1955-2021) se identificaron periodos de retroceso abrupto, pero también de crecimiento leve. Los periodos de mayor retirada glacial fueron los años 1987-1997 y 2010-2021. Este último periodo es sin lugar a duda el más dramático en términos de pérdida de cobertura de hielo. Por otro lado, los periodos comprendidos entre los años 1955-1987 y 1997-2006 dieron cuenta de leves crecimientos areales. Asimismo, en estos últimos años el glaciar Juncal Norte ha presentado una progresiva variación volumétrica negativa con mayores pérdidas principalmente en las cotas bajas de la lengua glaciar (2.950 a 3.150 m s.n.m.). En comparación, desde los 3.500 m s.n.m., se aprecia engrosamiento leve de pocos metros. El balance neto del sector bajo del glaciar Juncal Norte (cota 2.950 a 4.130 m s.n.m.) equivale a una pérdida de 0,94 m equivalente en agua por año en los últimos 21 años, con un aumento significativo de casi 3 veces (-2,51 m eq.a. por año) en las tasas de adelgazamiento en los últimos 6 años. Esta tasa de -0,94 m eq.a. por año es unas 3 veces superior a $-0,31 \pm 0,19$ m eq.a. por año para dicho rango de cotas, tasa determinada como promedio para los glaciares de los Andes centrales de Chile en el periodo 2000-2018 (Dussaillant et al., 2019). Para la lengua del glaciar Juncal Norte Dussaillant et al. (2019) calcularon una tasa similar, de $-0,26$ m eq.a. a^{-1} .

Por otra parte, el mapeo geomorfológico realizado entrega información valiosa para entender la evolución que ha sufrido el paisaje ocupado por este gran cuerpo de hielo. Se aprecian dos cambios morfológicos significativos desde 1955. El primer cambio se asocia al aumento de la cobertura detrítica que cubre en gran parte la lengua glaciar desde su frente (2.950 m s.n.m.) hasta los ~ 3.500 m s.n.m. El segundo cambio morfológico está relacionado al notable represamiento de agua de deshielo entre los 2.950 y 3.050 m s.n.m., originando una laguna proglacial que ha aumentado un 630% en un periodo de 4 años, laguna que no existía al año 2017 (ver anexos). En las campañas de terreno se observó una ablación total desde 128 cm hasta los 290 cm en un periodo de 53 días entre el 21 de febrero y el 13 de abril de 2021. El periodo de mayor ablación en las balizas se observó al final del verano, en la segunda campaña de terreno correspondiente a la primera medición post instalación (febrero 2021). Las balizas que tuvieron una importante emergencia fueron las balizas B1 (248 cm) y B2 (290 cm), las más cercanas al frente glaciar, y también las balizas B6 (198 cm) y B7 (199 cm), localizadas en la parte superior de la lengua glaciar. La particularidad de estas balizas es que se instalaron en zonas del glaciar parcialmente cubierto por detritos, con espesores detríticos someros, de 1-2 cm. Por otro lado, el balance de masa geodésico determinó que entre el 21 de febrero a

23 de marzo de 2021 disminuyó 0,0096 m eq.a. al día, y tuvo variaciones de altura de entre los 2,2 m hasta 11,0 m.

7. Sugerencias y recomendaciones

Para un monitoreo de más detalle en la laguna proglacial, que va en una tendencia de aumento general, se recomienda fijar un monitoreo de detalle donde se pueda observar la profundidad de la laguna con batimetría y diferencia de área mensual en la temporada de monitoreo a través de ortomosaicos.

En cuanto a la toma de datos de LiDAR, se recomienda realizar una toma de datos más amplia que incluyan zonas estables fuera del glaciar para la realización de un co-registro entre modelos digitales de elevación más fina.

8. Referencias

- Boisier, J.P.; Rondanelli, R.; Garreaud, R.D.; Muñoz, F. 2016. Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent megadrought in central Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 43:413–421.
- Crespo, S. A., Lavergne, C., Fernandoy, F., Muñoz, A. A., Cara, L., & Olfos-Vargas, S. (2020). Where does the Chilean Aconcagua river come from? Use of natural tracers for water genesis characterization in glacial and periglacial environments. *Water*, 12(9), 2630. doi: 10.3390/w12092630
- Das, I., Hock, R., Berthier, E., & Lingle, C. (2014). 21st-century increase in glacier mass loss in the Wrangell Mountains, Alaska, USA, from airborne laser altimetry and satellite stereo imagery. *Journal of Glaciology*, 60, 283-293. doi:10.3189/2014JoG13J119.
- Dirección General de Aguas (DGA), 2012. Servicios generales de estudio y análisis de caudales y apoyo en la redistribución de aguas, en la segunda sección del Río Aconcagua, SIT N°289, Minitero de Obras Públicas, Dirección General de Aguas, Santiago Chile, Realizado por: Hidrometría Chile, LTDA.
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Faviar, V., Rabatel, A., Pitte, P., Ruiz, L. 2019. Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*. 12(10), 810-808.
- Janke, J. R., Bellisario, A. C., & Ferrando, F. A. 2015. Classification of debris-covered glaciers and rock glaciers in the Andes of central Chile. *Geomorphology*. 241:98-121.
- Nuth, C., Kääb, A. 2011. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *The Cryosphere*, 5, 271-290.
- 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.
- Pellicciotti, F., Helbing, J., Rivera, A., Favier, V., Corripio, J., Araos, J., Sicart, J., Carenzo, M. 2008. A study of the energy balance and melt regime on Juncal Norte Glacier, semi-arid Andes of central Chile, using melt models of different complexity. *Hydrological Processes*. 22(19):3980-3997.
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C. 2002. Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur. *Investigación Geográfica de Chile*. 35:67-100
- Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, C., Muñoz, C., Vuille, M. 2016. Balance de masa glaciar. Ediciones CECs, Valdivia, Chile.
- Torres, H., Brenning, A., & García, J.-L. (2013). Balance de masa del glaciar cubierto del Pirámide (Chile Central, 33°S) entre 1965 y 2000 aplicando métodos geodésicos. *Revista de Geografía Espacios*, 3, 11-25.