



GOBIERNO DE CHILE

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS

**APOYO PARA EL MONITOREO DE DETALLE
INTENSIVO DEL GLACIAR TAPADO,
REGIÓN DE COQUIMBO, MACROZONA
NORTE, 2020-2021**

REALIZADO POR:

CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN ZONAS ÁRIDAS

INFORME FINAL

SIT N°478

SANTIAGO, AGOSTO 2021

MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS

Ministro de Obras Públicas
Ingeniero Civil Industrial Sr. Alfredo Moreno Charme

Director General de Aguas
PhD. Sr. Oscar Cristi Marfil

Jefe Unidad de Glaciología y Nieves Geógrafo
PhD. Sr. Gino Casassa Rogazinski

Inspector Fiscal
Sr. Alexis Segovia Rocha

CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS EN ZONAS ÁRIDAS

Jefa de Proyecto
Dra. Shelley MacDonell

Profesionales
Dr. Álvaro Ayala
Dra. Nicole Schaffer
Dra. Simone Schauwecker
Geólogo Sr. Eduardo Yáñez
Geólogo Sr. Gabriel Palma
Geólogo Sr. Gonzalo Navarro
Ing. Sr. Eduardo González

Profesionales asociados
Dr. Benjamin Robson

Resumen

En la cuenca del río Elqui, Región de Coquimbo, es posible identificar más de 800 glaciares de distintos tipos, como descubiertos, cubiertos y rocosos. Estas masas de hielo constituyen reservas estratégicas de agua dulce para el presente y futuro de la población, actividades económicas y ecosistemas de la región. El monitoreo del balance de masa, la extensión y otras propiedades de estos cuerpos de hielo resulta fundamental para el estudio de sus cambios pasados, y los potenciales impactos futuros del cambio climático. El Laboratorio de Glaciología de CEAZA presenta los resultados del estudio de apoyo a la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la Dirección General de Aguas (DGA) en el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) del glaciar Tapado, el más importante de la cuenca del río Elqui, parte de la Macrozona Norte del país. Durante el desarrollo del proyecto se realizó un monitoreo en terreno de los cambios de elevación a lo largo del glaciar Tapado en el verano 2021 (enero-abril), se calculó su balance geodésico desde 1956 y se analizaron las variaciones históricas de área. Los resultados muestran que los cambios de elevación en el verano 2021 variaron entre -4 y -40 cm en la parte cubierta, entre -1 y -2 m en la sección de penitentes, y fue de -16 cm en la cumbre. El balance de masa en el periodo 1956-2020 se estima en -0.11 ± 0.05 m e.a. a^{-1} usando el método geodésico, con una aceleración significativa de las tasas desde el año 2000 (<-0.3 m e.a. a^{-1}). Desde 1956, el área del glaciar descubierto Tapado se ha reducido en $\sim 29\%$. La información entregada en este estudio es importante para conocer el estado actual del glaciar Tapado, entender sus variaciones recientes y proyectar sus cambios futuros.

Tabla de Contenidos

Resumen	2
1. Introducción	4
2. Objetivos	5
2.1 Objetivo general	5
2.2 Objetivos Específicos	5
3. Zona de estudio	7
4. Monitoreo en terreno verano 2021	9
4.1 Instalación y medición de balizas	9
Definición de sitios	9
Instalación y monitoreo de balizas de ablación en los sitios seleccionados	11
4.2 Condiciones meteorológicas	14
4.3 Resultados del monitoreo	15
5. Recopilación de información histórica	19
6. Balance de masa geodésico	20
6.1 Metodología	20
Generación y corrección de DEMs	20
Incertidumbre	22
6.2 Balances de masa geodésico	22
Periodo histórico (1956-2020)	22
Balance de masa geodésico 2020-2021 con datos LiDAR 2021	24
7. Revisión del inventario actual del glaciar Tapado	27
8. Revisión de las variaciones areales	29
8.1 Datos y métodos	29
8.2 Resultados	31
8.3 Comparación con el informe DGA S.I.T. N261, 2011	32
9. Conclusiones	34
10. Cumplimiento	35

1. Introducción

Los glaciares de la zona centro-norte del país son elementos claves en el paisaje regional, excelentes indicadores de cambios climáticos e importantes generadores de escurrimiento. En efecto, la disponibilidad de agua y la recarga de acuíferos en los valles de la zona centro-norte de Chile (30-34°) depende en gran medida de los glaciares y la acumulación de nieve en la cordillera. Si bien el manto de nieve estacional origina un porcentaje mayoritario del caudal que fluye por los ríos, los glaciares aportan una descarga clave para la provisión de agua durante años y estaciones secas, cuando el manto nival ha desaparecido de las cuencas andinas y las necesidades hídricas son más acentuadas en la población y en los ecosistemas. En efecto, estudios en cuencas glaciadas de Los Andes semiáridos muestran que la contribución de caudal desde los glaciares es mayor a un 50% en años secos (Ragettli y Pellicciotti, 2012; Ohlanders et al., 2013;) e incluso más de un 70% en los meses de verano de los años más secos (Ayala et al., 2020).

La mayoría de los glaciares descubiertos o blancos de la zona centro-norte ha experimentado una disminución de área superficial en las últimas décadas, y probablemente su volumen y contribución hídrica continuarán disminuyendo bajo escenarios de aumento de temperatura. Por esto, es indispensable aumentar el grado de conocimiento sobre el estado actual y la evolución reciente de las masas de hielo en zonas con clima semiárido, con el fin de alimentar modelos matemáticos que permitan simular y entender sus variaciones recientes y proyecciones futuras. Mientras en algunos trabajos recientes se han detallado las tasas de retroceso glaciar a lo largo de todos Los Andes del Sur (Dussillant et al. 2019, Braun et al. 2019), en otros como el de la DGA (2012) se han registrado variables meteorológicas claves para mejorar la calidad y frecuencia de la información de entrada a los modelos numéricos de evolución glaciar. De forma paralela, se han efectuado varias mediciones del espesor del hielo y de la composición interna en los glaciares rocosos (CEAZA, 2012; Monnier & Kinnard 2013; Pourrier et al., 2014), los cuales son uno de los tipos de glaciar predominantes en los Andes semiáridos y tendrían un rol clave en la hidrología de alta montaña (Schaffer et al., 2019; Crespo et al., 2020).

En la zona centro-norte se han contabilizado más de 800 glaciares (Bown et al., 2008; DGA, 2011; CEAZA, 2015; Barcaza et al., 2017), incluyendo rocosos, descubiertos y cubiertos con detritos. A pesar de su importancia y número, su estudio extensivo solo ha sido llevado a cabo en las últimas décadas, con especial énfasis en su evolución reciente y en su rol hidrológico en los sistemas fluviales de cordillera, siendo evidente un retroceso y adelgazamiento general de las masas glaciares (Rivera et al., 2002; Bown et al., 2008; Nicholson et al., 2009; Rabatel et al., 2011).

En el presente informe se muestran los resultados del monitoreo en terreno del balance de masa glaciológico y geodésico en algunos puntos a lo largo del glaciar Tapado en el verano 2021. Además, se presentan los resultados de un balance geodésico y variaciones areales históricas usando un set de Modelos Digitales de Elevación (DEMs) y varias imágenes satelitales y aéreas. La información obtenida es usada para evaluar y corregir el inventario nacional de glaciares DGA.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Apoyar con el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) del glaciar Tapado, código Banco Nacional de Aguas (BNA) CL104300039, cuenca del Río Elqui, región de Coquimbo, ubicado en la Macrozona Norte.

2.2 Objetivos Específicos

Etapas 1: Para el año 2020:

- Revisar, reunir y ordenar información histórica del glaciar Tapado, incluyendo imágenes satelitales, fotos aéreas, información topográfica (incluyendo al menos el modelo SRTM del año 2000 de NASA y la carta(s) de detalle del Instituto Geográfico Militar (IGM), eventuales fotos terrestres, LiDAR aéreo o terrestre e información glaciológica, si existiese.
- Proponer sobre el glaciar un mínimo de 5 y un máximo de 10 sitios para ubicar balizas durante el periodo estival para medir la ablación, idealmente tanto en zonas descubiertas como cubiertas por detritos.
- Revisar, y eventualmente corregir, el IPG2020 en base a la imagen SPOT 6 del 22/01/2015 utilizada por la UGN para confeccionar el inventario del glaciar Tapado. Examinar si es posible utilizar otra imagen de fines del verano 2018/2019 o principios del otoño 2019 o bien otoño 2021 de mejor resolución/calidad para mejorar el inventario.
- Revisar críticamente, y corregir si es preciso, las variaciones del glaciar Tapado en base al informe "Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas" realizado por el Centro de Estudios Científicos (CECs), Informe DGA S.I.T. N°261, 2011, utilizando para ello las mismas 3 imágenes utilizadas en dicho informe (fotografía aérea Hycon de 1955, LANDSAT MSS de 1978 y ASTER de 2005). Utilizar otras imágenes de buena calidad que puedan estar disponibles para ampliar/detallar aún más las variaciones areales del glaciar. Lo óptimo, si fuese posible, sería caracterizar las variaciones del glaciar con una frecuencia decadal (una vez cada década aproximadamente), desde 1955 en este caso.

Etapas 2: Para el año 2021:

- 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 en modo diferencial, y registrando la

altura de cada baliza. La última medición debe ser al final de marzo o en abril de 2021.

- Apoyar logísticamente un levantamiento del glaciar Tapado 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) serán costeados por la DGA.
- Confeccionar un balance de masa geodésico del glaciar Tapado en base a la información topográfica existente, incluyendo al menos el modelo SRTM del año 2000 de NASA, la(s) carta(s) de detalle del Instituto Geográfico Militar (IGM), y el levantamiento LiDAR terrestre del fin de verano 2021, cuyos datos serán proporcionados por la UGN. El tamaño espacial de la grilla deberá ser de 30 metros, modificable previa autorización del Inspector Fiscal.
- Compilar las variaciones areales del glaciar Tapado 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.
- Entregar un Informe Final con el detalle de todos los antecedentes, las tareas, metodologías, cálculos y resultados finales, con anexos digitales de todos los datos brutos y procesados, incluyendo imágenes satelitales, fotos aéreas, y al menos 12 (doce) fotos de las campañas de terreno. El Informe Final entregable deberá ajustarse a la línea editorial DGA, según se especifica en el documento "LÍNEA EDITORIAL DGA: PROCEDIMIENTOS PARA LA EDICIÓN DE PUBLICACIONES DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, SDT N° 18, Versión 2019, disponible en <https://snia.mop.gob.cl/sad/OTR5831.pdf>.

3. Zona de estudio

La zona de estudio de este proyecto es el glaciar Tapado (Figura 1). El glaciar Tapado es un glaciar de montaña ubicado en la parte superior del río La Laguna ($30^{\circ}08'32''\text{S}$, $69^{\circ}55'39''\text{W}$), afluente al río Elqui. Administrativamente, el glaciar Tapado está ubicado en la comuna de Vicuña, región de Coquimbo. El glaciar Tapado es uno de los glaciares más estudiados de la zona norte del país (e.g., CEAZA, 2012, 2015; Nicholson et al., 2016; Monnier et al., 2014). Tiene una gran importancia desde el punto de vista hídrico, ya que aporta el caudal originado en el derretimiento del hielo y nieve al río La Laguna, y posteriormente al embalse La Laguna, el cual cumple un rol clave en el manejo de recursos hídricos en la cuenca del río Elqui. El Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas, CEAZA, ha realizado investigación en diversas disciplinas en el glaciar Tapado desde el año 2008. En la última temporada estival 2020 se instalaron varias estacas de ablación y estaciones meteorológicas en la zona terminal del glaciar descubierto (Figura 1).

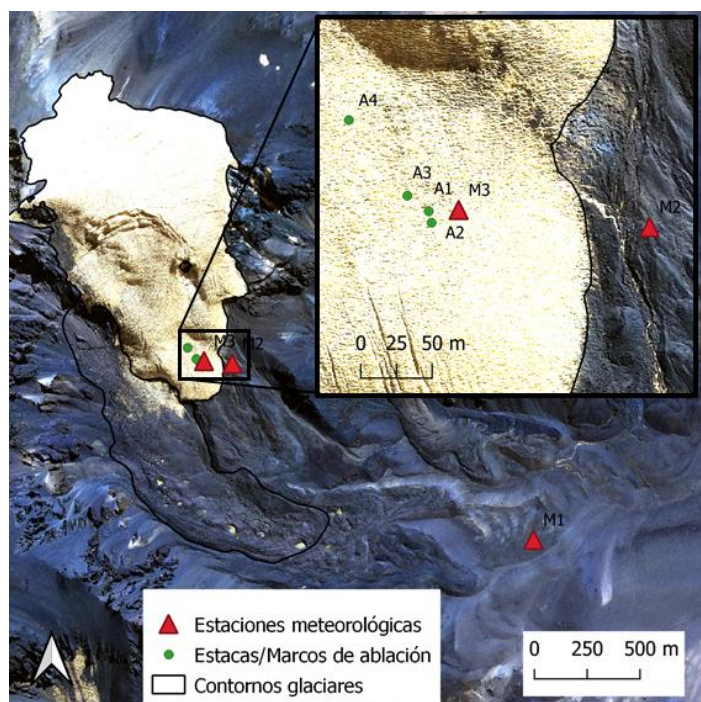


Figura 1: El glaciar Tapado y los puntos del monitoreo meteorológico y glaciológico realizado en el verano 2019-2020. La imagen de fondo corresponde a una imagen satelital GeoEye del 12/04/2010. Los contornos glaciares fueron derivados usando la misma imagen. M1 corresponde a la estación meteorológica llamada El Tapado en la red de www.ceazamet.cl.

El glaciar Tapado está formado por una parte descubierta y otra cubierta de detritos. En su parte descubierta, el glaciar Tapado tiene una orientación Sur, y se extiende desde la cumbre del cerro Tapado (5536 m.s.n.m.) hasta el pie de un circo glacial a los 4600 m.s.n.m. El glaciar descubierta está compuesto por un domo en la parte superior desde donde fluye abajo por una zona de fuertes grietas y pendientes (CEAZA, 2012). En su parte terminal, el glaciar descubierta forma una meseta con una pendiente suave cubierta por penitentes de hasta 3-4 m de altura, la cual termina abruptamente en un frente

escarpado (CEAZA, 2012). Más abajo se encuentra el glaciar cubierto, formado por una zona de baja pendiente cubierta por detritos y topografía rugosa, donde se encuentran numerosos escarpes de hielo y lagunas supraglaciares. En su parte terminal, el glaciar cubierto se encuentra en contacto con el glaciar rocoso Tapado. Según el inventario nacional de glaciares, en el año 2003 el glaciar Tapado poseía un área total de 2.2 km² y mediante sondeos radares se ha estimado un volumen total de 57 millones de m³ (Geoestudios, 2014). En este informe se denomina complejo Tapado al glaciar descubierto, cubierto y rocoso juntos.

4. Monitoreo en terreno verano 2021

4.1 Instalación y medición de balizas

En esta sección se presenta la instalación y medición de balizas de ablación en los sitios seleccionados durante la temporada de verano 2020-2021.

Definición de sitios

Los sitios para la instalación de balizas fueron escogidos mediante los siguientes criterios:

- **Monitorear todos los tipos de superficie que se encuentran en el glaciar Tapado**, principalmente: áreas descubiertas y cubiertas por detritos. Mientras las áreas descubiertas son, a su vez, divididas en zonas con y sin penitentes, las áreas cubiertas son divididas en zonas con capas gruesas y delgadas de detritos. La razón de fijar este criterio es que la ablación en cada una de estas zonas está dominada por procesos característicos.
- **Lograr la mayor extensión espacial posible**, tanto en extensión areal como en el rango de elevación.
- **Instalar las balizas en zonas de baja pendiente (menor a 10 grados)**. Esto permite garantizar la seguridad del equipo de monitoreo y minimizar posibles distorsiones locales en los datos de ablación generadas por el flujo del hielo, ángulos de incidencia en la radiación solar, y otros procesos físicos que se manifiestan en zonas de pendiente alta.
- **En el caso del glaciar cubierto, descartar áreas con un espesor de detritos demasiado grueso**. Este criterio busca mantener bajos los tiempos de instalación de las balizas en el glaciar cubierto, evitando la excavación de una calicata demasiado profunda. Por esta razón, se descartó a priori la instalación de balizas en el lóbulo más bajo del glaciar cubierto (ver Figura 2), la cual se caracteriza por espesores gruesos. De todas formas, la ablación en áreas cubiertas por un espesor de detritos grueso suele ser bastante baja (algunos centímetros por temporada).
- **Garantizar la seguridad de los miembros del equipo de monitoreo**. Se escogieron zonas que permitan un ingreso a pie con seguridad, recorriendo rutas previamente conocidas y evitando sectores peligrosos, como grietas glaciares.

Siguiendo estos criterios, se definieron 5 zonas referenciales para la ubicación exacta de los sitios de monitoreo: Zona 1 (glaciar cubierto bajo), Zona 2 (glaciar cubierto alto), Zona 3 (glaciar descubierto con penitentes - bajo), Zona 4 (glaciar descubierto con penitentes - alto), y Zona 5 (cumbre). La Figura 2 muestra el glaciar Tapado y la ubicación aproximada de las cinco zonas definidas, teniendo como fondo un mapa de pendientes. La Tabla 1 detalla sus características más importantes.

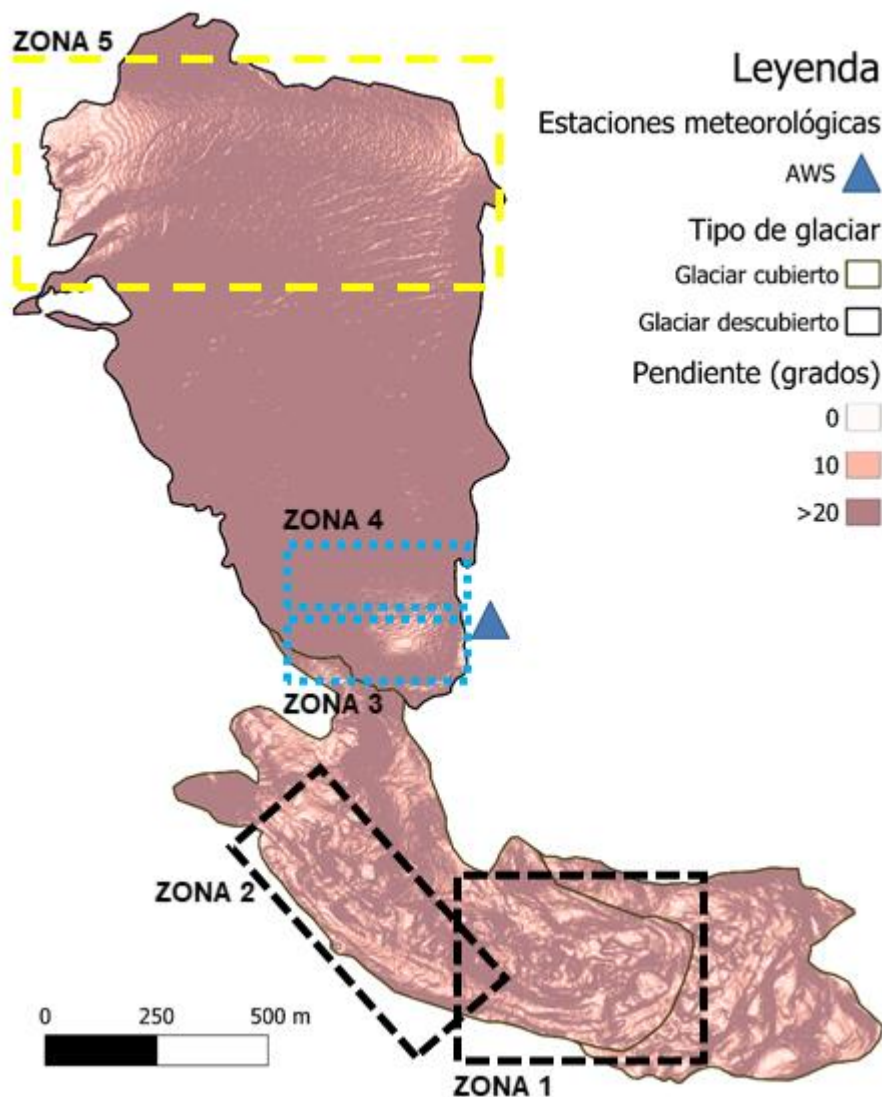


Figura 2: Propuesta de ubicación de balizas de ablación basada en zonas de interés. Las zonas 1 y 2 (marcos negro) se encuentran ubicadas sobre el glaciar cubierto, las zonas 3 y 4 (marco azul) se encuentran ubicadas sobre el término del glaciar descubierto en un área dominada por los penitentes, la zona 5 (marco amarillo) está ubicada en la cumbre del Cerro Tapado. Todas las zonas definidas están ubicadas en áreas dominadas por pendientes menores a 20 grados. La ubicación de las zonas es referencial y la ubicación exacta de los sitios de monitoreo fue definida en terreno dependiendo de las condiciones de acceso, seguridad y logística. El triángulo morado muestra la ubicación de una estación meteorológica actualmente instalada a un costado del sector de penitentes.

Tabla 1: Características principales de las zonas de monitoreo propuestas

Zona	Rango de elevación aproximado [m s.n.m.]	Características principales
1	4500-4700	- Zona de más baja elevación en el glaciar cubierto. - Cubierta de detritos gruesa (>10 cm)

2	4600-4900	- Zona de más alta elevación en el glaciar cubierto. - Cubierta de detritos delgada (<10 cm)
3	4700-4800	- Lengua del glaciar descubierto. - Superficie dominada por penitentes. - Zona de más baja elevación en la zona de penitentes.
4	4800-4900	- Lengua del glaciar descubierto. - Superficie dominada por penitentes. - Zona de más alta elevación en la zona de penitentes.
5	5300-5600	- Zona de cumbre. - Superficie plana, sin presencia de penitentes.

Instalación y monitoreo de balizas de ablación en los sitios seleccionados

Durante el verano de 2021 se realizaron tres campañas de terreno al glaciar Tapado. Mientras en la primera de las campañas se instaló la red de balizas, en las dos siguientes se realizó el monitoreo y mantención de la red. Además, en la tercera campaña se realizó la medición LiDAR por parte del personal de la DGA con el apoyo logístico de CEAZA. Los detalles de cada una de las campañas de terreno se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2: Detalle de las campañas de terreno

Campaña de terreno	Fecha	Objetivos	Comentarios
1	04-01-2021 al 07-01-2021	Instalar red de balizas	Se observó buen tiempo, escasa nieve sobre el glaciar y buenas condiciones generales para el trabajo en terreno.
2	22-02-2021 al 26-02-2021	1ra medición de red de balizas	Se observó buen tiempo, escasa nieve sobre el glaciar (excepto en el sector cumbre) y buenas condiciones generales para el trabajo en terreno
3	05-04-2021 al 09-04-2021	2da medición de balizas y medición LiDAR	Personal DGA fue apoyado logísticamente para la medición LiDAR Se observó buen tiempo, pero con una cubierta de nieve variable desde los 30 cm sobre las partes más altas del glaciar cubierto, hasta los 80 cm sobre los penitentes. Buenas condiciones generales para el trabajo en terreno.

En total se realizó el monitoreo de ocho sitios distribuidos sobre el glaciar cubierto y descubierto. Durante el primer terreno, se eligió la ubicación exacta de los sitios de monitoreo, siguiendo como referencia las cinco zonas propuestas. Debido a motivos de seguridad, logística y dificultad de acceso la ubicación exacta de algunos sitios presenta algunas desviaciones del dibujo de las zonas referenciales en la Figura 2, pero su ubicación final cumple con los mismos criterios con que se definieron las zonas. En particular, los sitios TAP2 y TAP3 se encuentran ubicados en una zona aledaña a la zona 2 originalmente propuesta, pero están situados a la misma elevación (4600-4900 m s.n.m.), y también cumplen con el criterio de “capa de detritos delgada” (<10 cm). Además, los sitios TAP4, TAP5, TAP6 y TAP7 están distribuidos por el perfil de elevación de la zona de penitentes, pero sin cubrir el rango completo propuesto originalmente para la zona 4 (4800-4900 m s.n.m.) ya que en la zona de penitentes sólo fue posible alcanzar una elevación de 4770 m s.n.m. La Tabla 3 y Figura 3 muestran detalles sobre los sitios escogidos. Las balizas instaladas tienen el mismo nombre del sitio, pero se añade un sufijo “a” o “b”.

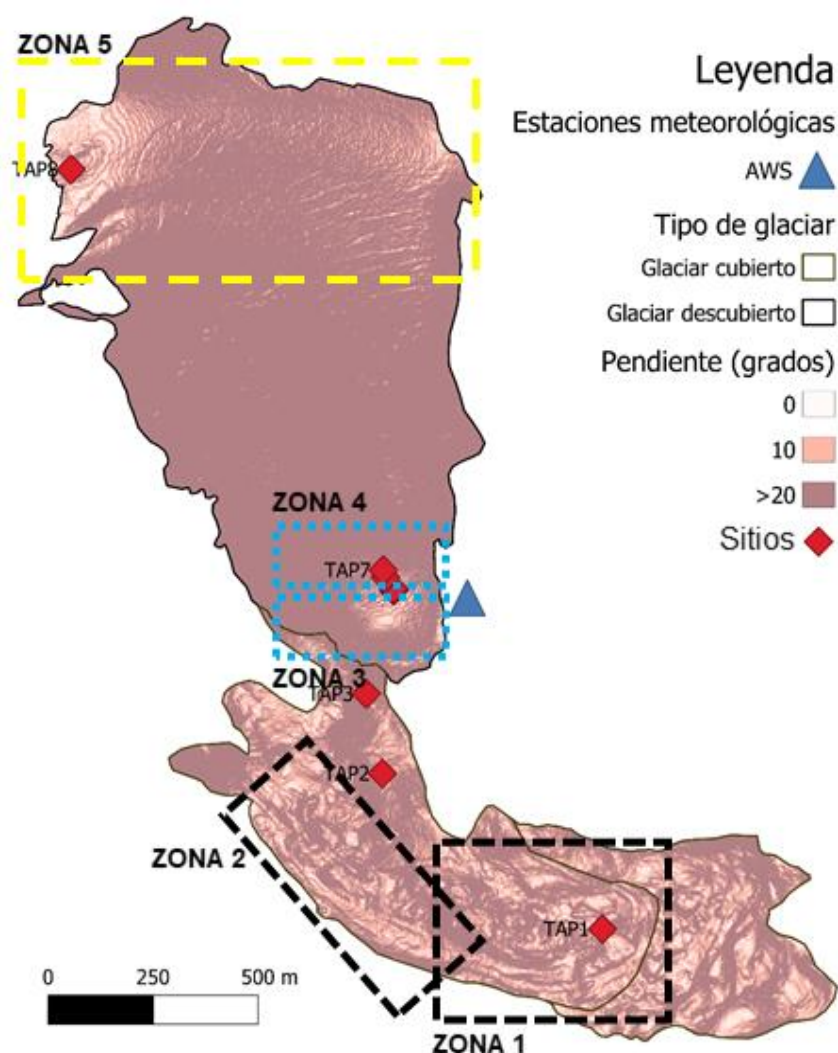


Figura 3: Distribución espacial de los sitios monitoreados (TAP1-TAP8).

Tabla 3: Detalle de los sitios monitoreados

Zona	Sitio (balizas)	N (m) (*)	E (m) (*)	Elevación (m.s.n.m.) (*)	Espesor detritos (cm)	Comentarios de la ubicación	Comentarios sobre desarrollo de la temporada
1	TAP1 (a, b)	6663379.49	411446.02	4536.21	15.0	Detrás de un escarpe de hielo y laguna supraglacial	Después del terreno 1 una gran parte del escarpe de hielo colapsó, por lo que en el terreno 2 se instaló una nueva baliza (TAP1b) en un sitio cercano
2	TAP2 (a)	6663746.02	410918.59	4614.73	5.0	En un sector plano	En el terreno 3 no se encontró la baliza debido a una cobertura nival de 3 cm.
	TAP3 (a)	6663932.90	410880.26	4647.17	4.0	Cercano a un arroyo de origen glaciar	
3	TAP4 (a, b)	6664174.73	410945.59	4754.42	0.0	Durante la temporada se desarrollaron penitentes de 3 a 4 m de alto	En el terreno 2 se instaló una nueva baliza (TAP4b) al lado de la original (TAP4a)
	TAP5 (a)	6664179.63	410945.38	4755.92	0.0		
4	TAP6 (a)	6664205.97	410925.97	4766.10	0.0	Durante la temporada se desarrollaron penitentes de 1 a 2 m de alto	
	TAP7 (a)	6664222.96	410920.56	4772.59	0.0		En el terreno 2 no se encontró la baliza
5	TAP8 (a)	6665163.17	410176.64	5538.87	0.0	Sector plano, sin penitentes	En el terreno 2 no se pudo llegar hasta la baliza

(*): Coordenada medida en el primer terreno

En los tres terrenos se realizaron mediciones GPS con receptor GNSS en modo diferencial y mediciones manuales de las balizas. En el sitio TAP4 se midió además la geometría de los penitentes que rodeaban la baliza de ablación (Rivera et al., 2017) en las campañas de terreno 1 y 3. El cambio de volumen de los penitentes corresponde a un dato más representativo del cambio de elevación en esta zona. Todos los detalles de las mediciones se presentan en los anexos de este capítulo. En los mismos anexos se presenta también un set de fotos de las distintas campañas de terreno.

4.2 Condiciones meteorológicas

La estación meteorológica de CEAZA, situada al pie del glaciar rocoso Tapado (M1 en Figura 1) registró las condiciones meteorológicas desde el 12 de enero hasta el 6 de abril, lo que equivale a prácticamente todo el periodo de monitoreo glaciológico. La Figura 4 muestra un resumen de estas condiciones para añadir un contexto meteorológicos a las mediciones glaciológicas.

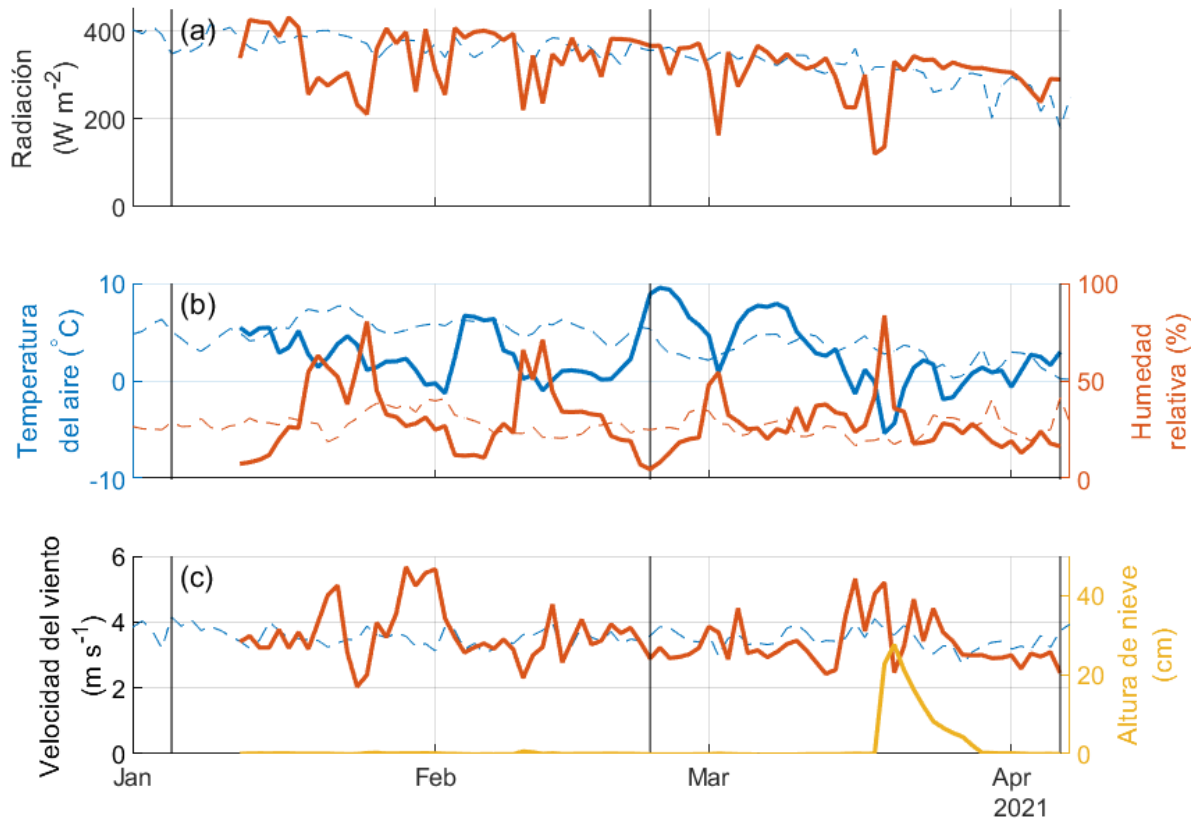


Figura 4: Condiciones meteorológicas medias diarias en la vecindad del glaciar Tapado durante el periodo de monitoreo (líneas continuas) y la comparación con el promedio histórico para esas fechas calculado desde 2013 (líneas punteadas). Las líneas negras verticales señalan la fecha de las campañas de terreno. (a) Radiación solar, (b) temperatura del aire y humedad relativa, (c) velocidad del viento y altura de nieve.

La Figura 4a muestra que los máximos de radiación solar media diaria tienen una tendencia decreciente desde los $\sim 400 \text{ W m}^{-2}$ hasta los $\sim 300 \text{ W m}^{-2}$, la cual está asociada al avance de la temporada de verano. Además, la figura muestra la existencia de una importante variabilidad temporal provocada por períodos ocasionales de nubosidad, durante los cuales la radiación solar media diaria decae en alrededor de 200 W m^{-2} . Por otro lado, la temperatura no presenta una tendencia evidente y se mantiene prácticamente constante en todo el periodo observado (Figura 4b). Si se compara con el promedio histórico se ve que mientras el periodo entre la primera y la segunda campaña de terreno fue más frío que lo normal, el periodo entre el segundo y el tercer terreno fue

cercano al promedio histórico. La humedad relativa varió en torno al promedio histórico con algunos peaks ocasionales asociados a periodos de nubosidad (Figura 4a). La figura 4c muestra que la velocidad del viento presentó valores cercanos al promedio histórico con algunos peaks ocasionales, también asociados a los eventos de nubosidad. Durante el último de estos periodos, el día 19 de marzo, se registró la caída de 30 cm de nieve, lo cual se pudo también apreciar en las mediciones de las balizas de ablación sobre el glaciar.

4.3 Resultados del monitoreo

En base a la información recolectada, se calcularon los cambios de la superficie del glaciar mediante el método geodésico, el método glaciológico y el desplazamiento horizontal de cada una de las balizas (i.e. a escala puntual). Los detalles de estos cálculos se presentan en los anexos de este capítulo y un resumen se presenta en la Tabla 4 y Figuras 5, 6 y 7.

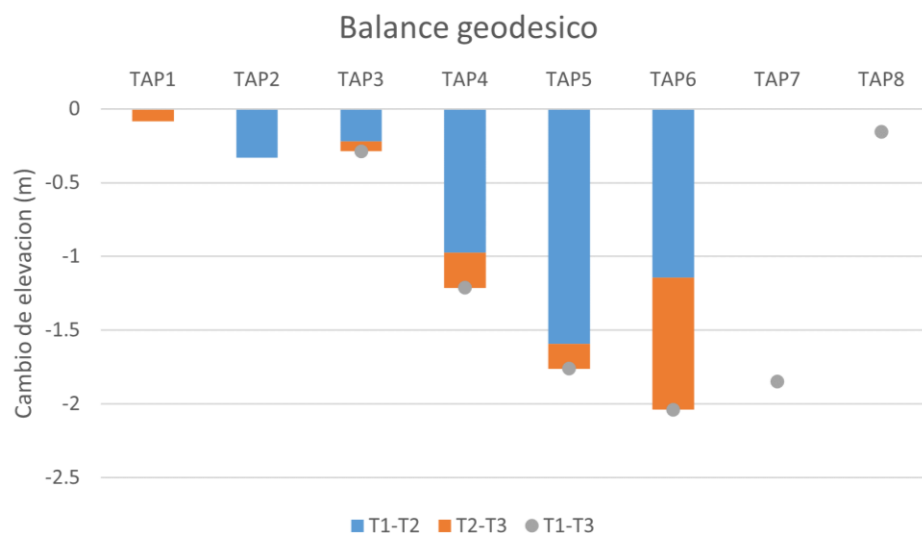


Figura 5: Diferencias de elevación en base al método geodésico en los sitios de monitoreo calculado entre las campañas de terreno 1 y 2 (T1-T2), 2 y 3 (T2-T3) y 1 y 3 (T1-T3)

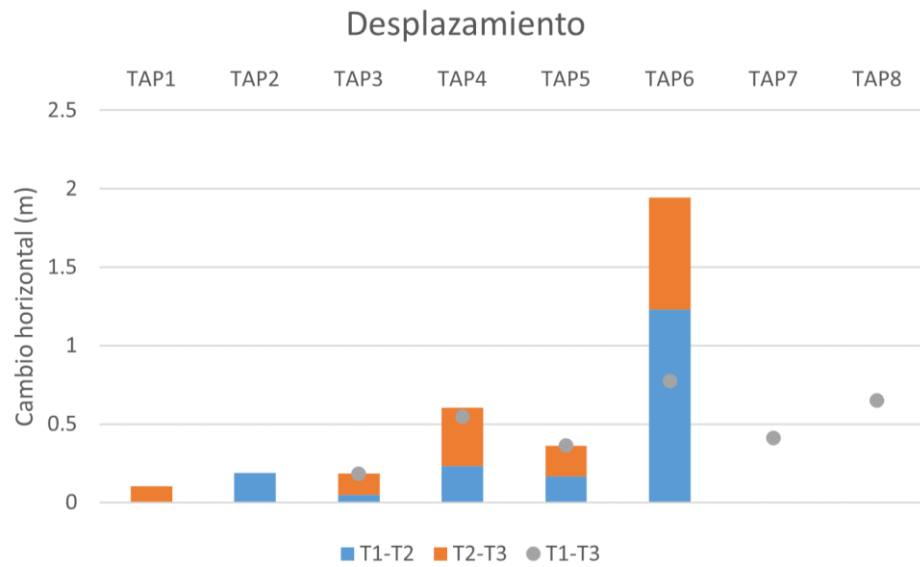


Figura 6: Desplazamiento horizontal de los sitios de monitoreo calculado entre las campañas de terreno 1 y 2 (T1-T2), 2 y 3 (T2-T3) y 1 y 3 (T1-T3)

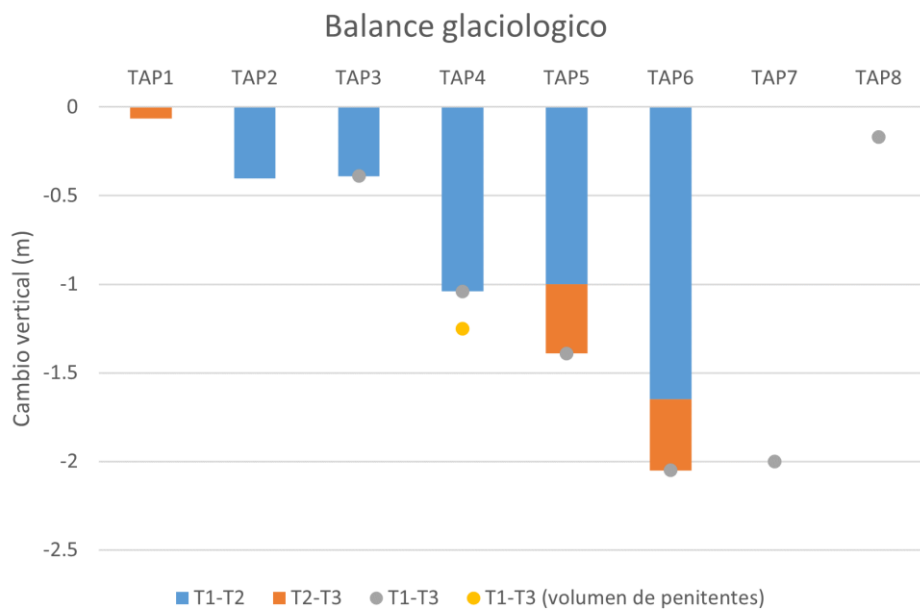


Figura 7: Diferencias de elevación en base al método glaciológico en los sitios de monitoreo calculado entre las campañas de terreno 1 y 2 (T1-T2), 2 y 3 (T2-T3) y 1 y 3 (T1-T3). Se incluye también el cambio vertical derivado del cambio de geometría de los penitentes en TAP4 (Rivera et al., 2017).

Tabla 4: Diferencias de elevación resultantes de las mediciones GPS y glaciológicas. Se incluye también el cambio vertical derivado del cambio de geometría de los penitentes en TAP4 (Rivera et al., 2017).

Identificación		Método geodésico (m)			Desplazamiento (m)			Método glaciológico (m)			
Zona	Sitio	T1-T2	T2-T3	T1-T3	T1-T2	T2-T3	T1-T3	T1-T2	T2-T3	T1-T3	T1-T3 (Cambio de volumen penitentes)
1	TAP1		-0.08			0.10			-0.06		
2	TAP2	-0.33			0.19			-0.40			
	TAP3	-0.22	-0.07	-0.29	0.05	0.14	0.18	-0.39	0.00	-0.39	
3	TAP4	-0.97	-0.24	-1.21	0.23	0.37	0.55	-1.04	0.00	-1.04	-1.25
	TAP5	-1.59	-0.17	-1.76	0.17	0.20	0.36	-1.00	-0.39	-1.39	
4	TAP6	-1.14	-0.90	-2.04	1.23	0.71	0.78	-1.65	-0.40	-2.05	
	TAP7			-1.85			0.41			-2.00	
5	TAP8			-0.16			0.65			-0.17	

En general se observa una clara correspondencia entre las mediciones geodésicas y glaciológicas, lo que sugiere que los cambios de elevación observados son explicados en su mayor parte por la ablación de la superficie y no por cambios derivados del flujo interno de hielo. Es por esto que no se hizo una corrección a la diferencia de elevación introducido por el movimiento del glaciar debido a la baja velocidad de este, los cuales no superaron los 50 cm. Esta magnitud de desplazamiento sería menor que el error del método de medición de ubicación mediante GNSS, y por lo tanto no se consideró para la medición de ablación puntual en cada baliza. La única excepción corresponde al desplazamiento horizontal medido en el terreno 2 en el sitio TAP6, el cual se cree tuvo un error en la medición (ver anexos).

Los resultados muestran que el glaciar cubierto (zonas 1 y 2) sufrió cambios menores de elevación, variando entre -6 cm en la zona con espesor grueso de detritos (>10 cm) a unos -40 cm en la zona de espesor delgado (<10 cm). Sin embargo, se observó que las zonas con hielo expuesto en el glaciar cubierto (escarpes de hielo, lagunas supraglaciares) pueden tener grandes tasas de derretimiento lo que genera fuertes cambios de elevación y morfología, tal como revela el colapso del escarpe de hielo cercano a la baliza TAP1a, la cual fue necesario reemplazar. El cambio horizontal o desplazamiento de los sitios monitoreados en el glaciar cubierto no superó los 20 cm.

El cambio de elevación en el glaciar descubierto con penitentes (zonas 3 y 4) varía entre 1 a 2 m, con una cierta tendencia a mayores descensos a mayor elevación. Esto podría ser explicado por la diferencia en el tamaño de los penitentes desarrollados durante la temporada, los cuales fueron más grandes en los sitios TAP4 y TAP5, lo que podría haber generado una menor exposición a la radiación solar en el fondo de estos penitentes. Los desplazamientos totales en las zonas 3 y 4 variaron entre los 30 y 80 cm.

Finalmente, en la zona de cumbre se observó una ablación de 16 cm, la cual se cree corresponde principalmente a sublimación, aunque no es posible descartar derretimiento ocasional.

5. Recopilación de información histórica

La Tabla 5 contiene un resumen de la información histórica disponible para el glaciar Tapado. Se incluyen las imágenes satelitales utilizadas en este informe, y las fotografías aéreas, información topográfica, e información glaciológica disponibles. Estos productos se encuentran disponibles en el anexo de este capítulo.

Tabla 5: Información histórica del glaciar Tapado incluyendo fotografías aéreas, imágenes satelitales ópticas usadas en este informe, modelos digitales de elevación (DEM), cartas topográficas e información glaciológica. La fuente de las fotografías aéreas son el Instituto Geográfico Militar (IGM) y el Servicio Aerofotogramétrico de Chile (SAF).

Tipo de imagen/datos	Fuente	Año	Resolución
Foto aérea	IGM (Hycon)	1956	1:7.000
Foto aérea	SAF (Hycon)	1978	1:50.000
Foto aérea	SAF	2000	desconocida
Imagen satelital	CBERS	2009	2.5 m
Imagen satelital	SPOT	2010	2.3 m
Imagen satelital	SPOT	2011	2.3 m
Imagen satelital	Aster	2005	15 m
Imagen satelital	Quickbird	2009	0.6 m
Imagen satelital	GeoEye	2010	0.4 m
Imagen satelital	GeoEye	2012	0.4 m
Imagen satelital	Pléiades	2019	0.5 m
Imagen satelital	Pléiades	2020	0.5 m
DEM	SRTM	2000	3 arc-seconds
LiDAR aéreo	Digimapas Chile	2015	1 m
Carta topográfica	IGM	1956	Contornos 50 m
Balance de masa glaciológico (distribuido)	CEAZA (2010)	2009-2010	
Balance de masa glaciológico (distribuido)	CEAZA (2012)	2011-2012	
Balance de masa glaciológico (distribuido)	CEAZA (2015)	2013-2015	
Balance de masa glaciológico (puntual-lengua del glaciar blanco)	CEAZA (2020)	2018-2020	
LiDAR	DGA (2021)	2021	1 m

6. Balance de masa geodésico

6.1 Metodología

Generación y corrección de DEMs

Se calcularon los cambios de elevación de la superficie para el glaciar Tapado diferenciando los modelos de elevación digital (DEM) disponibles para los años 1956, 1978, 2000, 2012, 2015, 2020 y 2021 (Tabla 5). Los DEMs de 1956, 1978, 2012 y 2020 fueron generados fotogramétricamente utilizando el software PCI Geomatica Banff. Mientras que para generar los DEMs de 1956 y 1978 se utilizaron dos sets de fotografías aéreas del Instituto Geográfico Militar (IGM) para el 2012 y 2020 se utilizaron dos imágenes satelitales triestéreo (Geoeye 1 para 2012 y Pléiades para 2020). Por su parte, para el año 2000 se usó el DEM SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de 30 m y el DEM de 2015 fue generado a partir de un levantamiento LiDAR (Light Detection and Ranging) aéreo adquirido por Digimapas Chile. Este levantamiento obtuvo una densidad original de puntos de 13.67 puntos por metro cuadrado y un RMSE vertical de 0.25 m, pero los datos LiDAR fueron proporcionados como un DEM grillado de 1 m. Los resultados se presentan en el anexo de este capítulo.

Los DEM fueron limpiados usando las puntuaciones de correlación de coincidencia de imágenes. Los valores atípicos fueron removidos usando un valor de tres desviaciones estándar del cambio de elevación sobre terreno estable por banda altitudinal de 50 m. Posteriormente, los DEM corregidos fueron corregidos conjuntamente usando un proceso de dos etapas que fue usado implementando los paquetes de Python Numpy y ArcPy. Los sesgos lineales de corrección se eliminaron siguiendo los métodos presentados por Nuth y Kääb (2011), los cuales minimizan los sesgos de elevación normalizados de la raíz cuadrada de la pendiente sobre un terreno estable (Tabla 6). Este proceso fue repetido hasta que la desviación estándar sobre el terreno estable cambiaba en menos de 2%. A continuación, se ajustaron polinomios a los sesgos de elevación en terreno estable contra la elevación según el DEM de 2020 (Figura 8). Al igual que con los sesgos de corrección lineal, las correcciones no lineales se aplicaron iterativamente hasta que la mejor fue inferior al 2%.

Tabla 6: Cambios de corrección lineal calculado sobre terreno estable entre los respectivos pares de DEM

	Cambio de corrección		
Par de DEMs	X (m)	Y (m)	Z (m)
1956 - 1978	0.2	54.2	16.8
1978 - 2000	1	6.7	30.2
2000 - 2012	-1	-0.7	3.1
2012 - 2015	-2.2	-0.9	-8.1

2015 - 2020	-0.2	1.1	2.6
1956 - 2020	0.9	-55.5	-49.9

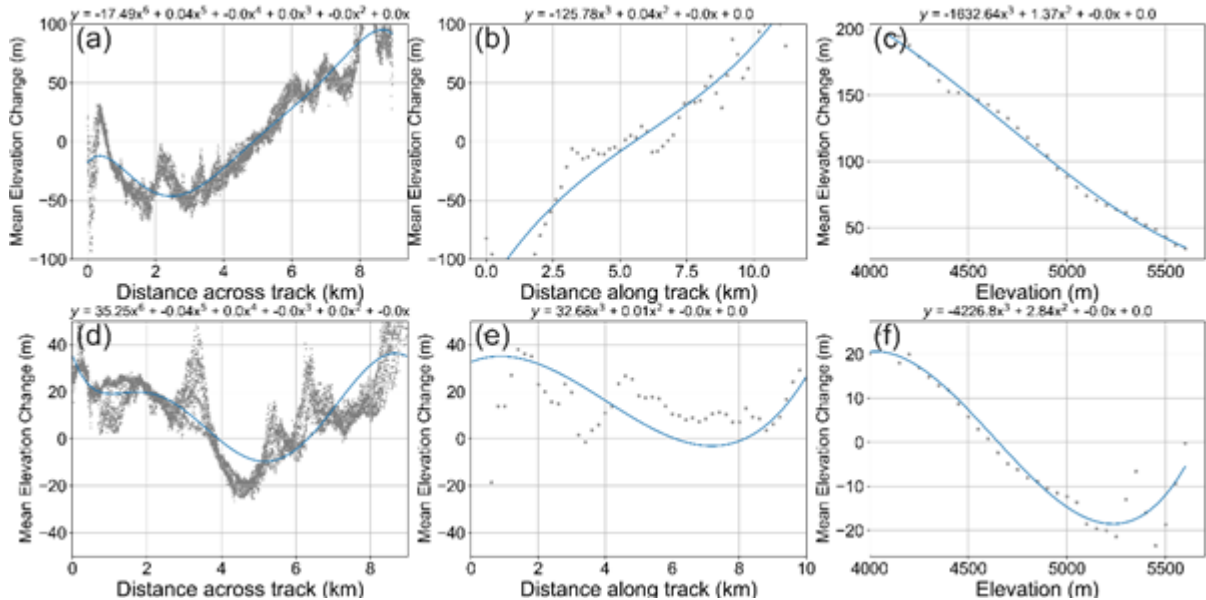


Figura 8: Sesgos no lineales para los DEM de 1956 (a, b, c) y 1978 (d, e, f) cuando se comparan las elevaciones con el DEM de 2020 sobre el terreno estable (no glacial ni fluvial)

Después de limpiar los ráster de cambio de elevación, se encontró que éstos contenían algunos vacíos, predominantemente en la zona de acumulación del glaciar Tapado. Estos vacíos fueron rellenados usando los valores generados por un polinomio ajustado de tercer grado entre la elevación media y el cambio de elevación media por banda altitudinal de 50 m. Esto se realizó para todos los pares de ráster.

Es importante mencionar que los DEMs SRTM están derivados de un radar de apertura sintética de banda C que ha documentado problemas asociados a la penetración en la nieve. A pesar que este problema es menos importante en el hemisferio sur, se verificó que este problema no es importante en el sitio de estudio mediante el examen de una imagen Landsat 7 ETM+ del 12 de febrero de 2000 (un día después de la adquisición del SRTM). Los resultados de este análisis muestran que la línea de neviza se encontraba a una elevación media de 5233 m s.n.m. Por lo tanto, se aplicó una escala lineal de penetración radar desde una corrección de 0 m a esa elevación (5233 m s.n.m.) hasta 5 m en la cota más alta del glaciar.

Para calcular el balance de masa geodésico desde los cambios de elevación se consideró una densidad del hielo glaciar de $860 \pm 60 \text{ kg m}^{-3}$ (Huss, 2013).

Incertidumbre

Para determinar la incertidumbre del balance geodésico ($E\Delta v_{tot}$) se realizó una combinación entre i) la variación del cambio de volumen ($E\Delta v_i$), ii) la conversión de volumen a masa ($E\rho$), iii) el error de la delineación del contorno del glaciar (Ea) que se derivó utilizando el método del buffer (distancias buffer de medio píxel para la sección descubierta y un píxel para el glaciar cubierto y glaciar rocoso), y iv) el error relacionado con la penetración del radar en la nieve y el hielo ($E2r$):

$$E\Delta v_{tot} = \sqrt{E^2\Delta v_i + E^2_{\rho} + E^2_a + E^2_r}$$

donde,

$$E\Delta v_i = \sum_i^n E\Delta h_i \times A_i$$

En esta ecuación, $E\Delta v_i$ (m^3) es la incertidumbre en el cambio de volumen, calculado sumando el error estándar (m) por banda altitudinal de 50 m multiplicado por el área de cada banda altitudinal (A_i) para considerar la hipsometría. A su vez, el error estándar deriva desde la desviación estándar sobre terreno estable (σ_{stable}), dividido por el número efectivo de observaciones (N):

$$E\Delta h_i = \frac{\sigma_{stable}}{\sqrt{N}}$$

donde N es calculado usando el número de píxeles (N_{tot}) en la diferenciación de DEM, el tamaño de píxel (PS) y la distancia de la autocorrección espacial, la cual se supuso igual a 20 píxeles (Bolch et al., 2011):

$$N = \frac{N_{tot} \times PS}{2d}$$

6.2 Balances de masa geodésico

Periodo histórico (1956-2020)

Los resultados muestran que el complejo Tapado tuvo un cambio de elevación promedio de -7.44 m en el período comprendido entre 1956 y 2020. En cuanto a su balance de masa, el glaciar Tapado (en su sección descubierta y cubierta) tuvo una tasa anual de balance de masa de -0.11 ± 0.05 m de equivalente en agua (e.a.) a^{-1} entre 1956 y 2020. Esta tasa se mantuvo casi en equilibrio desde 1956 a 2000 (-0.04 ± 0.08 m e.a. a^{-1} entre 1956 y 1978, y -0.03 ± 0.39 m e.a. a^{-1} entre 1978 y 2000), volviéndose más negativa en tiempos recientes (-0.54 ± 0.10 m e.a. a^{-1} entre 2012 y 2015, y -0.32 ± 0.08 m e.a. a^{-1}

entre 2015 y 2020). Los balances de masa entre cada periodo se presentan en la Figura 9 y en la Tabla 7.

El glaciar blanco es el que ha experimentado las pérdidas de masa más importantes, con -0.15 ± 0.08 m e.a. a^{-1} entre 1956 y 2020. La disminución de este se ha visto acelerada en tiempos recientes (2012 en adelante), con una tasa anual de balance de masa de entre 0.1 y 0.3 m a^{-1} más negativo que en los periodos anteriores en la zona de ablación, y de hasta 0.8 m a^{-1} más negativo en la zona de acumulación para el período 2012-2015 que para los años anteriores.

A su vez, la sección del glaciar blanco es la que ha experimentado las pérdidas de elevación más importantes, con un cambio medio anual de -0.64 ± 0.11 m entre 2012 y 2020, comparado al glaciar cubierto (-0.44 ± 0.11 m) y glaciar rocoso (-0.08 ± 0.11 m). Un claro gradiente de pérdida de hielo se puede observar desde la lengua de hielo descubierto a la sección superior del glaciar cubierto y hacia el límite con el glaciar rocoso. La sección superior del glaciar cubierto presenta adelgazamientos medios entre 1956 y 2020 de ~ 0.7 – 0.8 m a^{-1} , mientras que en general el glaciar cubierto pierde 0.3–0.5 m a^{-1} aunque se pueden encontrar tasas de adelgazamiento de hasta 2 m a^{-1} en las cercanías de las lagunas supraglaciales y los escarpes de hielo.

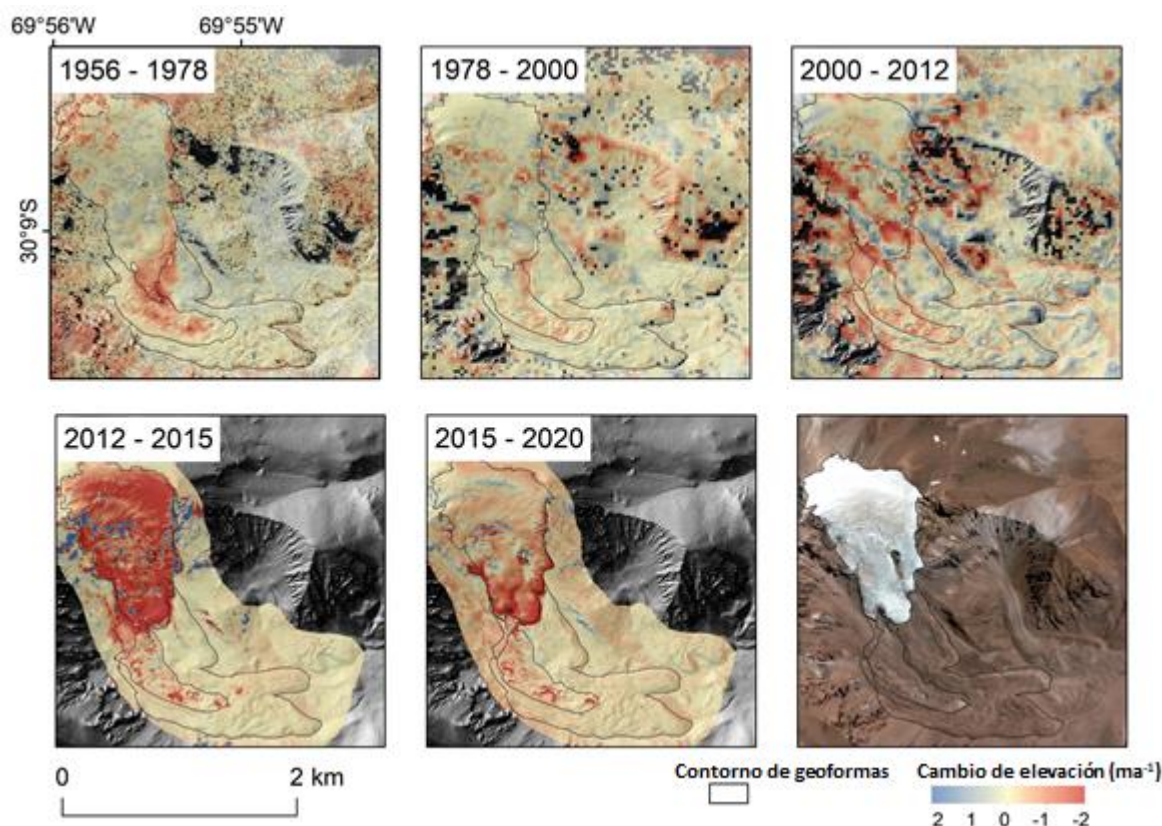


Figura 9: Cambios medios anuales de elevación en el complejo glaciar Tapado entre 1956 y 2020. Se muestra el delineamiento del glaciar blanco, glaciar cubierto y glaciar rocoso.

Tabla 7. Resumen de balance de masa geodésico para el glaciar Tapado entre 1956 y 2020.

Período de tiempo	Balance de masa geodésico en el glaciar Tapado (m e.a. a ⁻¹)	Balance masa geodésico en el glaciar descubierto (m w.e. a ⁻¹)
1956-1978	-0.04 ± 0.08	-0.14 ± 0.18
1978-2000	-0.03 ± 0.39	-0.35 ± 0.52
2000-2012	-0.17 ± 0.15	-0.19 ± 0.84
2012-2015	-0.54 ± 0.10	-1.03 ± 0.18
2015-2020	-0.32 ± 0.08	-0.37 ± 0.11
1956-2020	-0.11 ± 0.05	-0.15 ± 0.08

Balance de masa geodésico 2020-2021 con datos LiDAR 2021

Para complementar el balance geodésico del periodo 1956-2020, se derivó un nuevo DEM a partir de la adquisición del LiDAR terrestre efectuada en abril de 2021 por parte de la UGN. Sin embargo, se encontró que el DEM estaba espacialmente incompleto (Figura 10) con considerables vacíos de datos sobre los componentes del glaciar cubierto y del glaciar rocoso del complejo Tapado (Figura 10a, d), la sección del glaciar blanco (Figura 10b, e) así como el terreno circundante (Figura 10c, f). Esto generó dos problemas para el análisis. En primer lugar, muchas zonas donde se espera que existan mayores cambios de elevación, como la sección de glaciar blanco y secciones de hielo cubierto de detritos del glaciar, tenían pocos puntos de elevación fiables. Aunque existen métodos para interpolar entre los puntos de elevación para rellenar los vacíos de datos (i.e. McNabb et al., 2019), el desequilibrio de los puntos de datos entre las partes más dinámicas y menos dinámicas del área de análisis impiden el uso de estos métodos. En segundo lugar, las técnicas de corrección utilizadas para alinear los DEMs y derivar cambios de elevación de la superficie requieren una buena distribución del terreno estable en las dimensiones X, Y y Z, que puede utilizarse para modelar y eliminar los sesgos de corrección (Nuth y Kääb, 2011). El DEM generado para 2021 no cubre suficiente terreno estable como para registrarlo suficientemente bien con los conjuntos de datos de elevación más antiguos y de esta manera corregir la distorsión radial del objetivo. Por lo tanto, se optó por utilizar una imagen de satélite Pleiades triestéreo de 2020 como base para analizar los cambios de elevación en el verano 2021.

El DEM de 2020 tiene una resolución espacial comparable (0.5 m) a la del 2021, aunque al estar basado en la fotogrametría, los sesgos y errores de elevación son notables en terrenos escarpados o con sombras. Durante el proceso de corrección, se observaron sesgos no lineales de >200 m en relación con el DEM de 2020 (Figura 8), lo que pone de manifiesto la importancia de tener una cobertura suficiente en terreno estable.

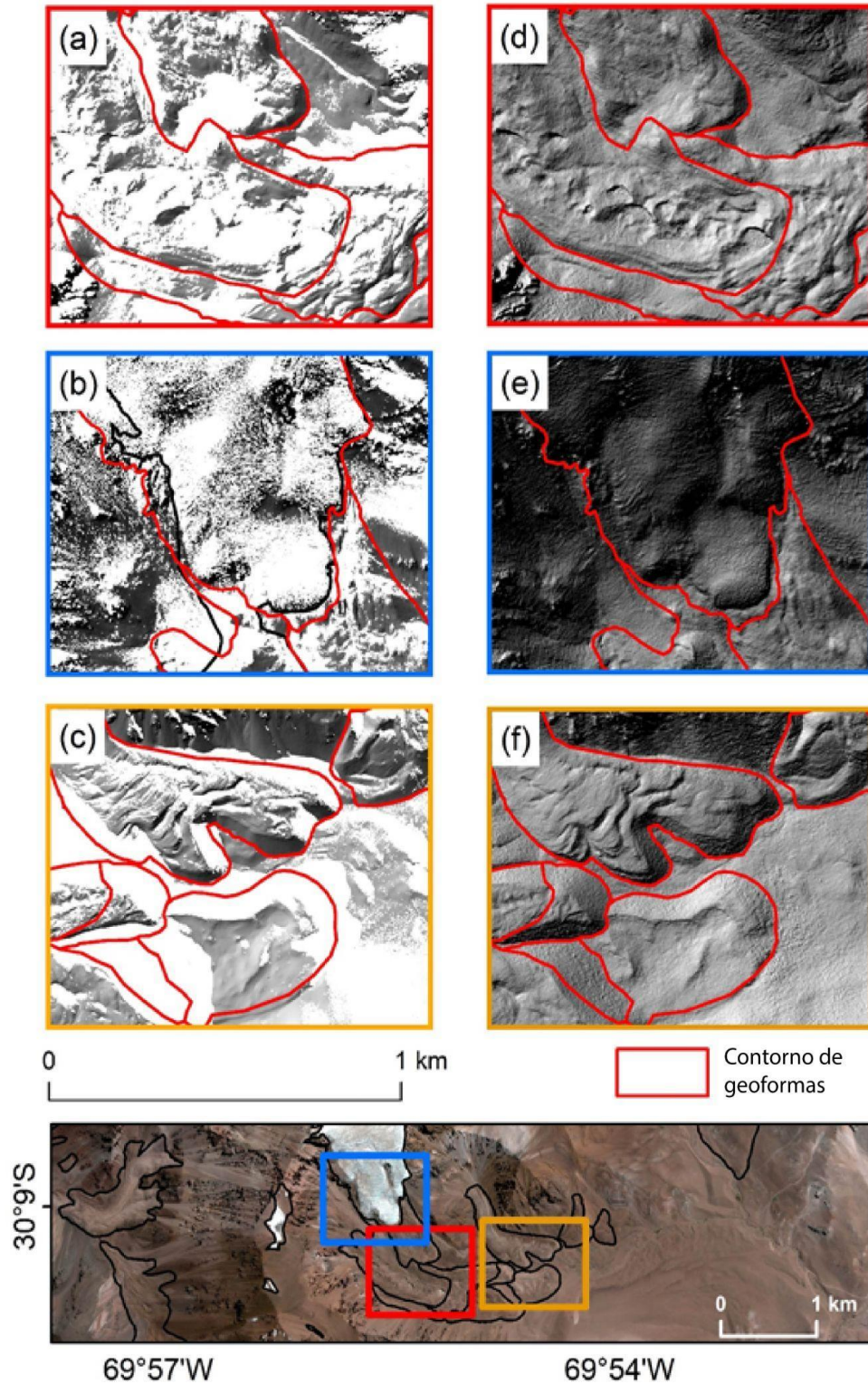


Figura 10: Comparación entre los modelos de sombras basados en el DEM de LiDAR de 2021 (a, b, e) y el DEM de Pleiades de 2020 (d, e, f). El LIDAR de 2021 contiene considerables vacíos de datos en partes del glaciar rocoso, el glaciar y el terreno estable.

La Figura 11 muestra la diferencia entre los DEMs de 2020 y 2021. Los cambios de elevación obtenidos fueron significativos en la sección del glaciar blanco, con partes del glaciar que se adelgaza hasta -3.8 m a^{-1} . Aunque los puntos de datos sobre el glaciar cubierto son escasos, los bordes del componente cubierto muestran un adelgazamiento de aproximadamente -0.8 m a^{-1} , mientras que los cambios de elevación de la superficie del glaciar rocoso varían entre 0.1 y -0.6 m a^{-1} .

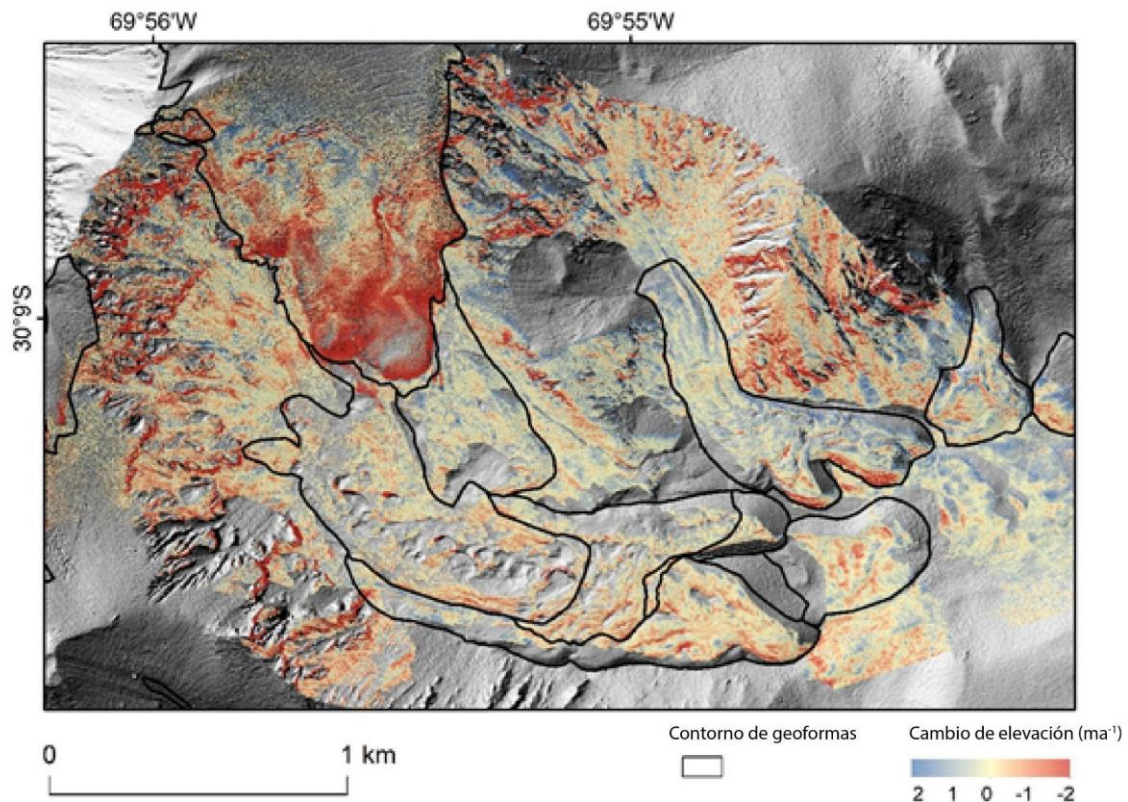


Figura 11: Cambios en la elevación de la superficie entre 2021 y 2020 basados en la campaña LiDAR de 2021 y en las imágenes Pleiades de 2020.

7. Revisión del inventario actual del glaciar Tapado

Usando una imagen Pleiades del 31 de enero de 2019 se revisó el inventario más actualizado de la DGA para el glaciar Tapado (IPG2020) y se creó un nuevo inventario denominado en este informe como "Inventario CEAZA". La imagen Pléiades analizada cuenta con resolución de 0.5 m. Para excluir con seguridad las áreas con nieve estacional también se consultó "ArcGIS basemap" (imagen Maxar_20190311/ Res. 0.46 m) y la imagen base de Google Earth (CNES/Airbus del 20/12/2019). Debido a que en la imagen base había varios parches de nieve estacional y que el área inventariada es relativamente pequeña, se hicieron delineaciones manuales para todo el complejo. En los glaciares cubiertos y rocosos, la delineación está sujeta a más incertidumbre comparada al glaciar descubierto Tapado, debido al menor contraste entre los glaciares y el terreno circundante. Para estas geoformas, se usaron distintas características morfológicas (como la presencia de lagunas supraglaciales, morfologías de crestas y surcos, pendientes frontales, etc.) para identificar los límites de los glaciares. El nuevo inventario se hizo usando el inventario de la DGA como base y fue modificado en zonas donde la disposición de nieve estacional y la geomorfología de los glaciares observada en las nuevas imágenes sugerían cambios. Esto se desarrolló para ser consistente con las reglas de inventarios de glaciares rocosos, propuesta por la IPA (International Permafrost Association; <https://www3.unifr.ch/geo/geomorphology/en/research/ipa-action-group-rock-glacier>).

Al comparar ambos inventarios, se observan diferencias menores en el área total inventariada, resultando en un área del complejo Tapado de 1.97 km² según el inventario CEAZA en comparación al área de 1.99 km² inventariado por la DGA. La diferencia está explicada principalmente por la presencia de nieve estacional y la geomorfología de la lengua del glaciar (Figura 12). Específicamente, en el área demarcada "A", parte del glaciar descubierto, se extendió el contorno del glaciar porque se identificó existencia de nieve perenne, al estar presente en todas las imágenes consultadas. Mientras que en las áreas marcadas "B", "C" y "D" se redujo el contorno del glaciar porque no existe evidencia geomorfológica de la posible presencia de hielo. Además, fue extendido el contorno del Glaciar Cubierto 2 en el área "H" porque hay una continuación de la geoforma no incluida en el inventario DGA.

Se aprecian otras diferencias relativas principalmente a detalles de los límites y continuidad entre los distintos tipos glaciares. En el inventario CEAZA, el glaciar cubierto es inventariado en dos geoformas distintas (en la región "E"), porque hay una lengua glaciar distinta particularmente visible en el límite norte de la zona "E". Por su parte, fue cambiada la delineación de los glaciares rocosos de tal manera que el Glaciar Rcoso 2 (en lugar del Glaciar Rcoso 1) esté conectado con el área "G". No fue posible ver una división entre las geoformas en el lugar "F", más bien se observa que hay una continuación de la forma aquí desde Glaciar Rcoso 2 hacia la zona "G." Finalmente, se extendió el contorno del Glaciar Rcoso 2 en lugar "I" para estar conforme con las reglas propuestas por la IPA, que indica que la pendiente frontal debería ser incluida por completo (inventario tipo "extended footprint") o no incluida (inventario tipo "restricted footprint"). Cabe mencionar, que el inventario de la DGA se encuentra entre los dos tipos

de criterio descritos. Los dos inventarios se muestran en la Figura 4.2 y se encuentran disponibles en el anexo de este capítulo.

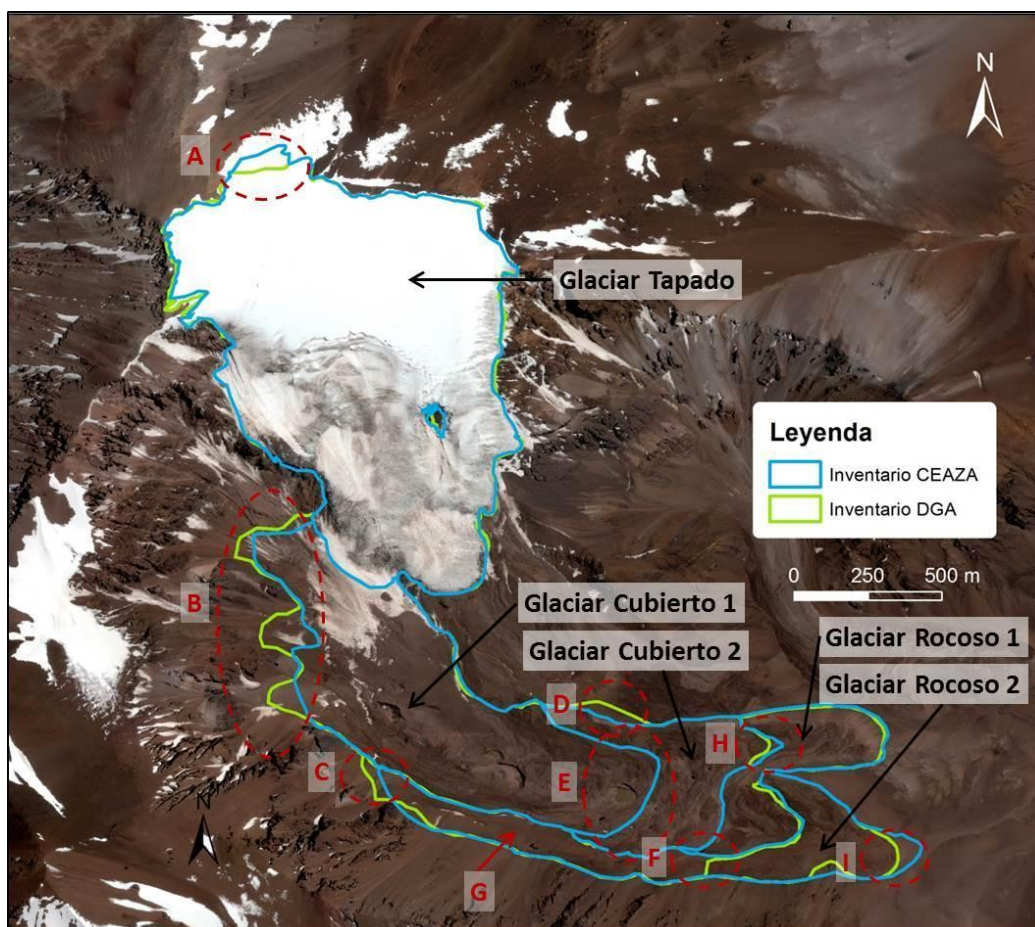


Figura 12: El complejo del Glaciar Tapado con los inventarios DGA (contorno verde) y CEAZA (contorno celeste). Las diferencias fundamentales entre los dos inventarios están resaltadas con un círculo rojo y son explicadas en el texto.

8. Revisión de las variaciones areales

8.1 Datos y métodos

Para comparar las distintas imágenes recopiladas y llevar a cabo la revisión de las variaciones históricas del glaciar Tapado, fue necesario ortorectificar las imágenes aéreas de 1956 y 1978 y las imágenes satelitales de alta resolución de 2012 y 2020 (Tabla 8). Para ambas tareas se empleó el software PCI Geomatica Banff.

Para la ortorectificación se empleó el DEM del 2020. Este último, fue generado en base a los Coeficientes Polinómicos Racionales (RPCs), provisto por las imágenes. No se emplearon Puntos de Control de Terreno externos (GCPs), pero se utilizaron 1311 puntos de unión generados automáticamente para resolver la orientación relativa y realizar un ajuste de paquete. Antes de que el DEM fuera extraído, se generaron imágenes Epipolares de 2 m de distancia, usando el algoritmo Semi-Global Matching, el cual permite superar la correlación cruzada normalizada y por lo tanto producir DEMs más limpios (Hirschmüller 2007). Posteriormente, el DEM fue usado para ortorectificar la imagen y producir un ortomosaico. Estas mismas etapas de trabajo fueron empleadas para el conjunto de los datos restantes, donde se usó como base el ortomosaico del 2020 y DTM para GCPs, con el objetivo de alinear el conjunto de datos lo más estrechamente posible. Los residuales obtenidos para orientaciones exteriores (GCPs) e interiores (puntos de enlace) se muestran en la Tabla 8. Dado que las imágenes de 1956 y 1978 no poseen información de calibración ni tampoco fue posible visualizar los marcadores de referencia en todas las imágenes, no fue posible rellenar los parámetros de distorsión. Esto probablemente generó distorsiones no lineales (parabólicas) dentro del DEM producido. Sin embargo, su impacto es insignificante a los efectos de evaluar los cambios planimétricos. No obstante, sí es importante para cambios volumétricos (e.g. balances de masa geodésicos), donde estos sesgos deben ser eliminados.

Las imágenes Landsat, ASTER y Planet usadas en este informe (Tabla 8) fueron descargadas y pre-procesadas en el software QGIS utilizando la herramienta de Clasificación Semi-Automática (SC). Además, antes de apilar las bandas, las imágenes fueron corregidas atmosféricamente empleando el método de Sustracción de Objetos Oscuros (DOS). Con el objetivo de ayudar a la diferenciación entre el hielo del glaciar y el terreno circundante, se realizó una composición de falso color en las imágenes Landsat y ASTER. Para lo anterior, se emplearon los canales infrarrojos de onda corta (SWIR), infrarrojo cercano (NIR) y rojo. Los contornos glaciares fueron delineados manualmente a una escala 1:1000 con ArcGIS Pro. Debido a la alta resolución espacial de las imágenes Landsat y ASTER, éstas fueron interpretadas a una escala de 1:2500. Por su parte, la delineación de la imagen del 2021 se realizó en función de la redistribución de los valores de píxeles a lo largo de un histograma (Stretching). A partir de esto, se extrajeron sólo los valores de píxel que representaron hielo glaciar (píxel value >1000).

Para cada periodo, se construyeron entidades en formato shapefile (.shp) y se identificaron cuidadosamente zonas con parches de nieve estacional (Figura 13), los cuales se localizan en las zonas más altas. Cada archivo shapefile fue guardado en un Geodatabase (ver anexos de este capítulo).

Tabla 8. Detalle de los productos empleados en esta sección. Para las imágenes que se utilizaron para generar el DEM, se muestran los valores de RMSE para los Puntos de Control de Terreno y los puntos de enlace.

Fecha de adquisición	Sensor	Imagen IDs	Resolución(m)/escala	Puntos de Control de Terreno X-RMSE (pixeles)	Puntos de Control de Terreno Y-RMSE (pixeles)	Puntos de enlace X-RMSE (pixeles)	Puntos de enlace Y-RMSE (pixeles)
04/04/1956	RC-10	26142 - 26143	1:70.000	2.32	2.89	0.15	0.71
31/05/1978	RC-10	3945 - 3946	1:60.000	1.39	1.59	0.37	0.14
26/04/1989	Landsat 5	LT05_L2SP_233081_19890426_20200916_02_T1	30	-	-	-	-
11/04/1995	Landsat 5	LT05_L2SP_233081_19950411_20200912_02_T1	30	-	-	-	-
12/02/2000	Landsat 7	LE07_L1TP_233081_20000212_20170213_01_T1	30	-	-	-	-
09/02/2005	ASTER	AST_L1T_00302092005144933_20150508061706_110130	15	-	-	-	-
23/03/2012	GeoEye-1	2012032314460281603031604888	0.5	0.95	2.17	0.15	0.12
17/03/2015	Landsat 8	LC08_L1TP_233081_20150317_20170412_01_T1	15 (pan-sharpene d)	-	-	-	-
01/03/2020	Pleiades	DS_PHR1B_202003011456169_FR1_PX_W070S31_0120	0.5	-	-	0.16	0.21
05/03/2021	Planet Scope	Tapado_Planet Labs_20210305	3	-	-	-	-

8.2 Resultados

Los resultados de la delineación de los contornos históricos de la superficie del glaciar descubierto Tapado se resumen en la Tabla 9 y se visualizan en la Figura 13. En términos porcentuales el área del glaciar descubierto Tapado se ha reducido en $\sim 29\%$ entre el periodo 1956-2020, esto se ha traducido en una disminución de casi $\sim 0.4 \text{ km}^2$ durante este periodo de tiempo (Tabla 9). Considerando el periodo 1956-1978 (22 años), se calculó la tasa de reducción de superficie anual del glaciar descubierto Tapado igual a $4.5 \times 10^{-3} \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$. Mientras que, para los últimos 21 años (2000-2021), los resultados del cálculo anterior indican que esta tasa de reducción se ha incrementado en casi el doble y es cercana a los $8.6 \times 10^{-3} \text{ km}^2 \text{ a}^{-1}$. Lo anterior implica que desde el 2000, la velocidad a la que el glaciar descubierto Tapado disminuye su área, ha aumentado en casi 2 veces la velocidad de reducción de superficie antes de 1978.

Tabla 9. Detalle de las variaciones areales del glaciar descubierto Tapado para el periodo 1956-2021.

Año	Area (Km ²)	Imagen IDs
1956	1.3	26142 - 2614
1978	1.2	3945 - 3946
2000	1.1	LE07_L1TP_233081_20000212_20170213_01_T1
2012	1.0	2012032314460281603031604888
2015	0.96	LC08_L1TP_233081_20150317_20170412_01_T1
2020	0.92	DS_PHR1B_202003011456169_FR1_PX_W070S31_0120
2021	0.92	Tapado_PlanetLabs_20210305
Reducción de área Acumulada	0.38	

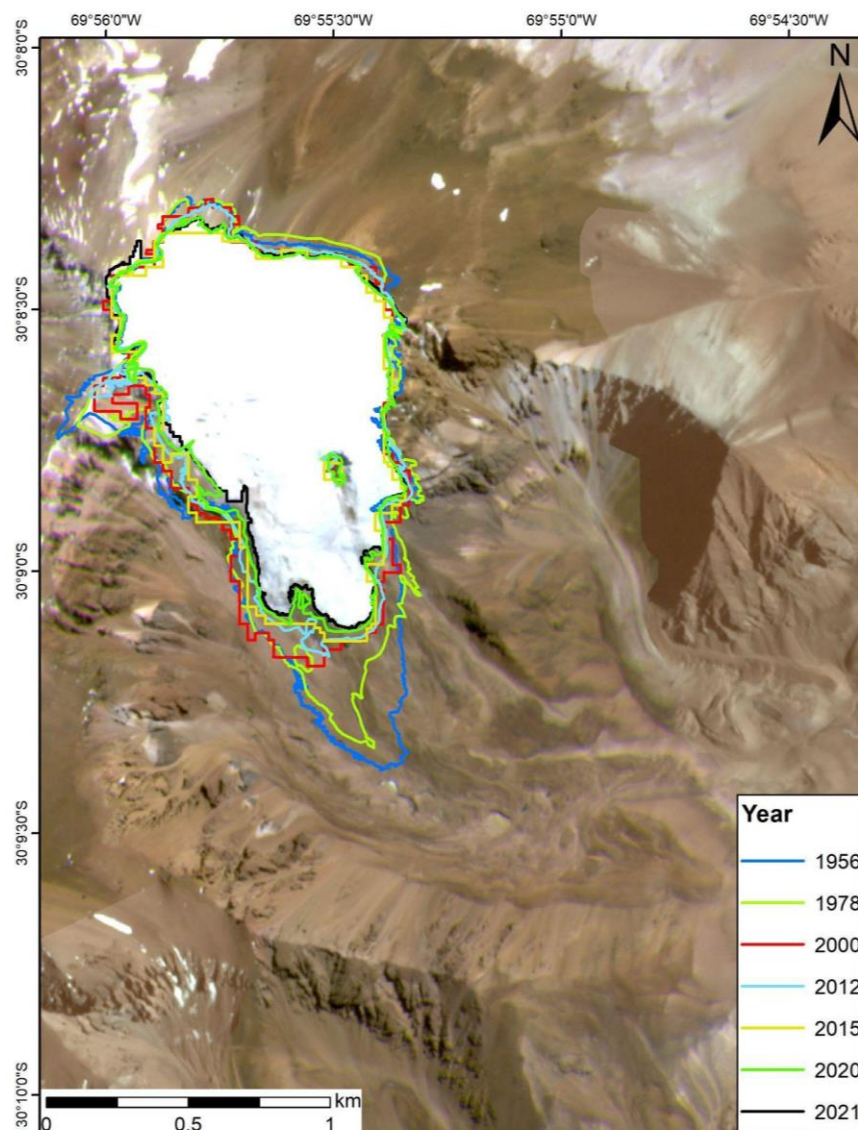


Figura 13: Mapa del glaciar descubierto Tapado donde se muestran las variaciones de su superficie entre 1956 y 2021.

8.3 Comparación con el informe DGA S.I.T. N261, 2011

En esta sección se comparan las variaciones obtenidas con las del informe “Variaciones recientes de glaciar en Chile, según principales zonas glaciológicas” realizado por el Centro de Estudios Científicos, Informe DGA S.I.T. N261, 2011.

El nivel de concordancia entre el shapefile de la zona del glaciar y la posición frontal generado en este trabajo y el del año 1955 es alto. No obstante, es evidente que el shapefile generado en el presente trabajo, se elaboró con una mayor resolución (Figura 14). Los shapefiles de 1978 están entre 30 a 50 m de distancia entre sí. En este caso, las diferencias se pueden atribuir a que el shapefile anterior fue creado con una imagen

Landsat de 30 m., mientras que, en este trabajo se empleó una fotografía aérea de 1 m de resolución (Figura 14). A pesar de que las delineaciones del 2005 se digitalizaron ambas, utilizando la misma imagen ASTER como referencia, sigue habiendo diferencias de hasta 50 m. entre ambas delimitaciones del frente del glaciar (Figura 14). Por lo tanto, es posible que el antiguo analista (CECs, 2011) no siguiera la forma de los píxeles de la imagen y en muchos casos se construyeron vértices distribuidos irregularmente.

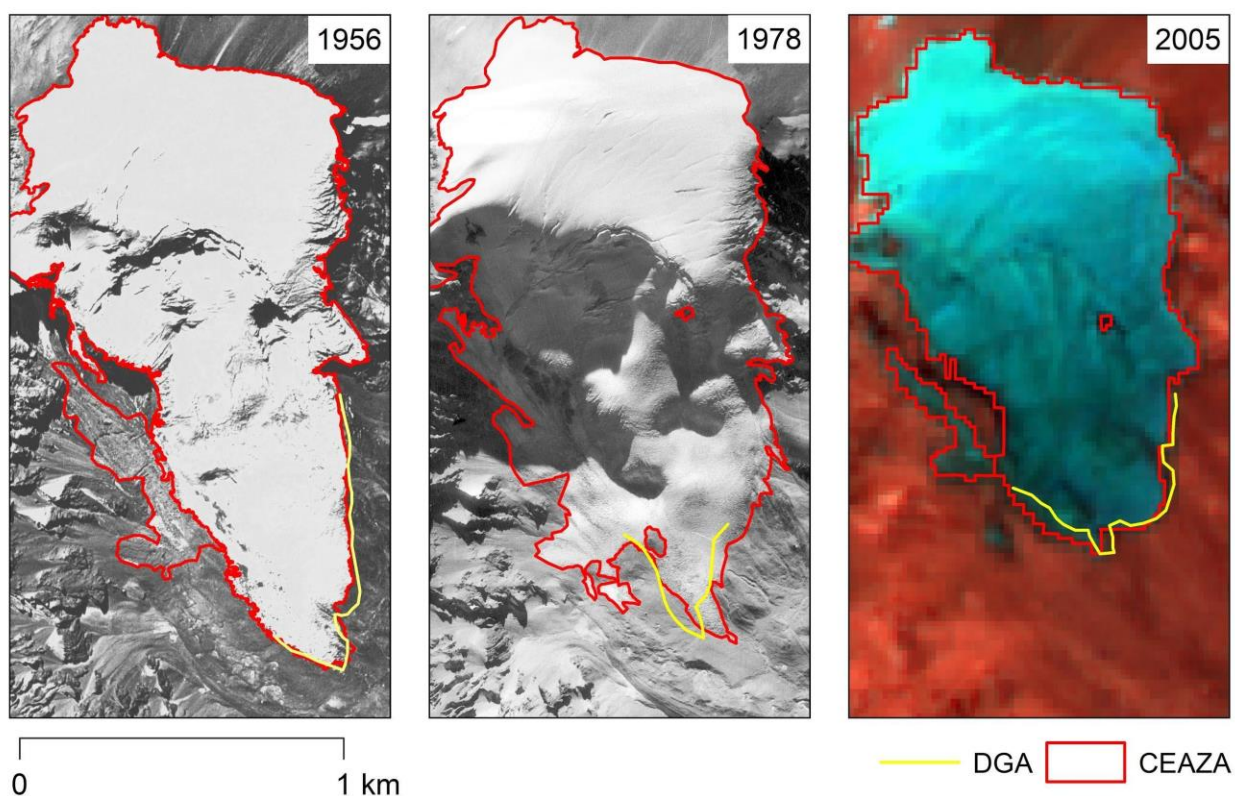


Figura 14: Mapas del glaciar El Tapado para los años 1956, 1978 y 2005, donde se muestran las diferencias entre límite delineado para el frente del glaciar realizado por la DGA (línea de color amarillo) y el generado en este trabajo (línea de color rojo).

9. Conclusiones

Se presentaron los resultados del proyecto “APOYO PARA EL MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL GLACIAR TAPADO, REGIÓN DE COQUIMBO, MACROZONA NORTE, 2020-2021”, como parte del nivel 2 especificado en la Estrategia Nacional de Glaciares, con la finalidad de apoyar y complementar el trabajo del equipo de especialistas de la UGN. Durante el desarrollo del proyecto se realizó un monitoreo en terreno de los cambios de elevación a lo largo del glaciar Tapado en el verano 2021 (enero-abril), se calculó su balance geodésico desde 1956 y se analizaron las variaciones históricas de área.

Los puntos monitoreados en terreno fueron seleccionados con una serie de criterios de representatividad y accesibilidad, y se distribuyen a lo largo de la elevación del glaciar Tapado, desde 4500 hasta 5500 m s.n.m. aproximadamente, y a través de distintos tipos de superficie (hielo cubierto, penitentes y hielo descubierto en cumbre). Los resultados muestran que en el glaciar cubierto los cambios de elevación variaron entre -6 cm en la zona con espesor grueso de detritos (>10 cm) a unos -40 cm en la zona de espesor delgado (<10 cm). Sin embargo, se observó que las zonas con hielo expuesto en el glaciar cubierto (escarpes de hielo y lagunas supraglaciares) pueden tener grandes tasas de derretimiento. Mientras el cambio de elevación en el glaciar descubierto con penitentes varió entre -1 a -2 m, en la zona de cumbre se observó una ablación de 16 cm, la cual se cree corresponde principalmente a sublimación, aunque no es posible descartar derretimiento ocasional.

El balance de masa del glaciar Tapado (sección cubierta y descubierta) calculado con el método geodésico fue de -0.11 ± 0.05 m e.a. a^{-1} entre 1956 y 2020. Esta tasa se mantuvo casi en equilibrio desde 1956 a 2000 (-0.04 ± 0.08 m e.a. a^{-1} entre 1956 y 1978, y -0.03 ± 0.39 m e.a. a^{-1} entre 1978 y 2000), volviéndose más negativa en tiempos recientes (-0.54 ± 0.10 m e.a. a^{-1} entre 2012 y 2015, y -0.32 ± 0.08 m e.a. a^{-1} entre 2015 y 2020).

El análisis de las variaciones históricas del glaciar descubierto Tapado muestra que su área se redujo desde 1.3km^2 hasta 0.92 km^2 entre 1956 y 2020, lo que equivale a una reducción del 29%. Estos cambios ocurrieron principalmente en el área descubierta. Estos resultados fueron contrastados con informes pasados de la DGA (DGA 2011) y se usaron para actualizar el inventario nacional en base a criterios internacionales recientemente definidos (IPA 2020).

10. Cumplimiento

En la Tabla 9 se muestra el cumplimiento de tareas esperadas hasta la fecha.

Tabla 9. Cumplimiento de tareas esperadas en la Etapa 2.

Tarea	Cumplimiento
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.	Sí
Medir al menos 2 veces adicionales las coordenadas y alturas de las balizas mediante receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial, y registrando la altura de cada baliza. La última medición debe ser al final de marzo o en abril de 2021.	Sí
Apoyar logísticamente un levantamiento del glaciar Tapado 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) serán costeados por la DGA.	Sí
Confeccionar un balance de masa geodésico del glaciar Tapado en base a la información topográfica existente, incluyendo al menos el modelo SRTM del año 2000 de NASA, la(s) carta(s) de detalle del Instituto Geográfico Militar (IGM), y el levantamiento LiDAR terrestre del fin de verano 2021, cuyos datos serán proporcionados por la UGN. El tamaño espacial de la grilla deberá ser de 30 metros, modificable previa autorización del Inspector Fiscal.	Sí
Compilar las variaciones areales del glaciar Tapado 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.	Sí
Entregar un Informe Final con el detalle de todos los antecedentes, las tareas, metodologías, cálculos y resultados finales, con anexos digitales de todos los datos brutos y procesados, incluyendo imágenes satelitales, fotos aéreas, y al menos 12 (doce) fotos de las campañas de terreno. El Informe Final entregable deberá ajustarse a la línea editorial DGA, según se especifica en el documento "LÍNEA EDITORIAL DGA: PROCEDIMIENTOS PARA LA EDICIÓN DE PUBLICACIONES DE LA DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS, SDT N° 18, Versión 2019, disponible en https://snia.mop.gob.cl/sad/OTR5831.pdf .	Sí

Referencias

- Ayala, Á., Farías-Barahona, D., Huss, M., Pellicciotti, F., McPhee, J., & Farinotti, D. (2020). Glacier runoff variations since 1955 in the Maipo River basin, in the semiarid Andes of central Chile. *The Cryosphere*, 14(6), 2005-2027.
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., ... & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75pt2), 166-180.
- Bolch, T., T. Pieczonka, and D. I. Benn (2011), Multi-decadal mass loss of glaciers in the Everest area (Nepal Himalaya) derived from stereo imagery, *Cryosphere*, 5(2), 349–358, doi:10.5194/tc-5-349-2011.
- Bown, F., Rivera, A. & Acuña, C. (2008). Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. *Annals of Glaciology*, 48, pp.43–48.
- Braun, M. H., P. Malz, C. Sommer, D. Farías-Barahona, T. Sauter, G. Casassa, A. Soruco, P. Skvarca, and T. C. Seehaus (2019), Constraining glacier elevation and mass changes in South America, *Nat. Clim. Chang.*, 9(2), 130–136, doi:10.1038/s41558-018-0375-7.
- CEAZA (2010), Balance de masa glaciológico y condiciones regionales de nieve en el Norte Chico: Interacción con el clima y su influencia en el deshielo, La Serena, Chile.
- CEAZA (2012), Caracterización y monitoreo de glaciares rocosos en la cuenca del río Elqui, y balance de masa del glaciar Tapado, Santiago: S.I.T. N° 285, Chile.
- CEAZA (2015), Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares del Norte Chico y Chile central, Santiago: S.I.T. N°382, Chile.
- CEAZA (2020), Plan de gestión de glaciares para la región de Coquimbo, La Serena, Chile.
- CECs, (2011). Variaciones Recientes de Glaciares en Chile, según principales zonas Glaciologicas. Santiago: S.I.T. N° 261, Chile.
- 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.
- DGA, (2011). Catastro, exploración y estudio de glaciares en Chile Central, Santiago: S.I.T. N°265, Chile
- DGA, (2012). Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares de Chile central, Santiago: S.I.T. N° 307, Chile.
- Dussaillant, I., E. Berthier, F. Brun, M. Masiokas, R. Hugonnet, V. Favier, A. Rabatel, P. Pitte, and L. Ruiz (2019), Two decades of glacier mass loss along the Andes, *Nat. Geosci.*, 11(10), 5143, doi:10.1038/s41561-019-0432-5.

Geoestudios (2014), Estimación de volúmenes de hielo mediante sondeos de radar en zonas norte, central y sur, S.I.T. 338, Santiago, Chile.

Hirschmuller, H. (2007). Stereo processing by semiglobal matching and mutual information. *IEEE Transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 30(2), 328-341.

Huss, M. (2013), Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change, *Cryosph.*, 7(1), 219–244, doi:10.5194/tcd-7-219-2013.

IPA. (2020). Towards standard guidelines for inventorying rockglaciers–Baseline concepts (Version 4.1).

McNabb, R., C. Nuth, A. Kääb, and L. Girod (2019), Sensitivity of glacier volume change estimation to DEM void interpolation, *Cryosphere*, 13(3), 895–910, doi:10.5194/tc-13-895-2019.

Nicholson, L., Marín, J., Lopez, D., Rabatel, A., Bown, F., & Rivera, A. (2009). Glacier inventory of the upper Huasco valley, Norte Chico, Chile: glacier characteristics, glacier change and comparison with central Chile. *Annals of Glaciology*, 50(53), 111-118.

Nicholson, L. I., M. Petlicki, B. Partan, and S. Macdonell (2016), 3D surface properties of glacier penitentes over an ablation season, measured using a Microsoft Xbox Kinect, *Cryosph.*, 10, 1897–1913, doi:10.5194/tc-2015-207.

Monnier, S. & Kinnard, C. (2013). Internal structure and composition of a rock glacier in the Andes (upper Choapa valley, Chile) using borehole information and ground-penetrating radar. *Annals of Glaciology*, 54(64), pp.61–72.

Monnier, S., Kinnard, C., Surazakov, A., & Bossy, W. (2014). Geomorphology, internal structure, and successive development of a glacier foreland in the semiarid Chilean Andes (Cerro Tapado, upper Elqui Valley, 30 08' S., 69 55' W.). *Geomorphology*, 207, 126-140.

Nuth, C., and Kääb (2011), Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change, *Cryosphere*, 5(1), 271–290, doi:10.5194/tc-5-271-2011.

Ohlanders, N., Rodriguez, M. & McPhee, J., (2013). Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(1), pp.1035–1050.

Pourrier, J., Jourde, H., Kinnard, C., Gascoin, S., & Monnier, S. (2014). Glacier meltwater flow paths and storage in a geomorphologically complex glacial foreland: the case of the Tapado glacier, dry Andes of Chile (30 S). *Journal of hydrology*, 519, 1068-1083.

Rabatel, A., Castebrunet, H., Favier, V., Nicholson, L., & Kinnard, C. (2011). Glacier changes in the Pascua-Lama region, Chilean Andes (29 S): recent mass balance and 50 yr surface area variations.

Ragettli, S., and F. Pellicciotti (2012), Calibration of a physically based, spatially distributed hydrological model in a glacierized basin: On the use of knowledge from glacio-meteorological processes to constrain model parameters, *Water Resour. Res.*, 48(3), W03509, doi:10.1029/2011WR010559.

Rivera, A. et al., (2002). Use of remotely sensed and field data to estimate the contribution of Chilean glaciers to eustatic sea-level rise. *Annals of Glaciology*, 34(1), pp.367–372.

Rivera, A., Bown, F., Napoleoni, F., Muñoz, C. & Vuille, M. (2017). Manual Balance de Masa Glaciar. Ediciones CECs, Valdivia, Chile

Schaffer, N., MacDonell, S., Réveillet, M., Yáñez, E., & Valois, R. (2019). Rock glaciers as a water resource in a changing climate in the semiarid Chilean Andes. *Regional Environmental Change*, 1-17.