

---

**Reporte N° 4017014.2g**

---

**Alto Maipo SpA**

Monitoreo de Glaciares

# Informe Consolidado de Línea de Base de glaciares 2019

Rev. 0

Santiago de Chile, 12.08.2020

GEOTEST CHILE SPA  
AV. VITACURA 2771  
OF. 802, LAS CONDES  
CL-SANTIAGO DE CHILE  
T + 56 2 2840 35 59  
M + 56 9 9505 72 97  
[www.geotest.cl](http://www.geotest.cl)

12.08.2020

Autores	Temas tratados / Áreas de especialización
Anne Schauss	Línea Base Monitoreo de Glaciares
Sebastián Fernández	Cálculo de balance de Masa
Flavia Burger	Línea Base Monitoreo de Glaciares
Supervisión	Contenidos supervisados
Lukas Rohrbach	Control de calidad, supervisión técnica
Indicios	

GEOTEST CHILE SPA



Lukas Rohrbach

Representante Legal  
Geotest Chile SpA



Flavia Burger

Especialista

12.08.2020

## Resumen

Geotest Chile SpA ha realizado un estudio de línea base de glaciares en el área del Cajón del Morado, Monumento Natural El Morado, Cajón Rubillas y Cajón El Yeso con el objetivo de describir la evolución de las superficies de los glaciares descubiertos (glaciares blancos), glaciares cubiertos y glaciares rocosos desde 1955 hasta 2019 a través del uso de fotografías aéreas, imágenes satelitales e imágenes LIDAR.

Lo anterior, por encargo de Alto Maipo, para cumplir con la línea de base requerida por la Dirección General de Aguas Región Metropolitana (DGA RM) mediante Ord. DGA RM N° 602 del 12 de abril de 2017, en el marco del proceso de aprobación del “Programa de Monitoreo de Vibraciones por Tronaduras en Túnel El Volcán, Etapa II”, aún cuando lo solicitado por la autoridad se refiere solo al estado actual de los glaciares en el “Sitio Protegido” correspondiente al Monumento Natural El Morado.

A partir de la estimación de la superficie de los glaciares en el área de estudio, se calcula su volumen, el equivalente de agua de las masas de hielo y los balances de masa de cada glaciar. Con respecto a los glaciares rocosos, se estima además el porcentaje de hielo/detritos y el equivalente de agua.

Durante el período analizado se pudo constatar una tendencia significativa de retroceso de los glaciares descubiertos y cubiertos, y consecuentemente, una disminución de los volúmenes y del equivalente en agua de éstos. Los balances de masa respectivos muestran pérdida de masa en los glaciares. No se detectaron modificaciones en la superficie de los glaciares rocosos durante el período analizado.

12.08.2020

## Contenido

1.	Antecedentes y objetivos .....	5
2.	Metodología .....	8
2.1	Superficies de los glaciares y glaciares rocosos .....	8
2.2	Volumen de los glaciares descubiertos y cubiertos .....	11
2.3	Equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares descubiertos y cubiertos .....	12
2.4	Porcentaje de detritos de glaciares rocosos .....	12
2.5	Determinación de equivalente de agua del contenido de hielo de los glaciares rocosos .....	16
2.5.1	Estimación de espesor promedio .....	16
2.5.2	Estimación del volumen de los glaciares rocosos .....	16
2.5.3	Determinación equivalente de agua .....	16
2.6	Balance de masa para glaciares descubiertos y cubiertos .....	17
3.	Resultados .....	19
3.1	Evolución de las superficies de los glaciares .....	19
3.1.1	Glaciares descubiertos y cubiertos .....	21
3.1.2	Evolución de la superficie del glaciar El Morado .....	21
3.1.3	Evolución de la superficie del glaciar San Francisco .....	23
3.1.4	Evolución de la superficie del glaciar Loma Larga .....	24
3.1.5	Glaciares rocosos .....	25
3.2	Volumen de glaciares descubiertos y cubiertos .....	28
3.3	Equivalente en agua de las masas de hielo de los glaciares descubiertos y cubiertos .....	28
3.4	Porcentaje de detritos de glaciares rocosos .....	28
3.5	Equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares rocosos .....	30
3.6	Balance de masa geodésico .....	30
4.	Discusión .....	37
5.	Conclusiones y recomendaciones .....	41
	Bibliografía .....	42
	Anexos .....	44

12.08.2020

## 1. Antecedentes y objetivos

Por mandato de Alto Maipo SpA, Geotest Chile SpA se encuentra realizando un programa de monitoreo de glaciares en el área de estudio que se muestra en Figura 1 que cubre una superficie de 150 km<sup>2</sup>, desde el río Yeso por el noroeste hasta el río Volcán por el sur.

El área de estudio ha sido definida considerando la incorporación de todos los cuerpos glaciares, a lo largo de la proyección en superficie del trazado del túnel El Volcán; la que incluye, a su vez, a todos los glaciares presentes localizados en el Monumento Natural El Morado y aquellos pertenecientes al Sitio Prioritario El Morado<sup>1</sup> que comparten divisoria de cuenca con el Monumento Natural.

Cabe señalar que el área de estudio corresponde al sector propuesto por Alto Maipo para el monitoreo de superficie y de volumen de glaciares en el documento “Programa de Monitoreo de Vibraciones por Tronaduras en Túnel El Volcán, Etapa II”. Sin perjuicio que la Dirección General de Aguas Región Metropolitana (DGA RM), al aprobar el programa de monitoreo en cuestión, mediante Ord. DGA RM N° 602 del 12 de abril de 2017, solicitó la preparación de una línea de base actual de los glaciares del Sitio Protegido, correspondiente al Monumento Natural El Morado, estableciendo los siguientes objetivos específicos:

- Describir la evolución reciente de las superficies de los glaciares del sitio protegido en base a imágenes satelitales y fotografías aéreas.
- Registrar las superficies actuales de los glaciares del sitio protegido.
- Estimar el volumen y el equivalente en agua de estas masas de hielo del sitio protegido.
- Calcular el porcentaje de detritos de los glaciares rocosos del sitio protegido y calcular su equivalente en agua.
- Calcular balance de masa geodésico para los glaciares del sitio protegido.

---

<sup>1</sup> El sitio prioritario El Morado abarca una superficie de 141.827 ha, en las que confluyen las subcuencas de los ríos Yeso, Volcán y Colorado.

12.08.2020

En tanto, en cumplimiento de lo requerido mediante el Ord. DGA RM N° 399, del 22 de marzo de 2019, en el capítulo 2.1 del presente informe, se incluye un ajuste de los levantamientos LIDAR y re-análisis de todos los balances de masa, al mismo tiempo, se incorpora el estudio de monitoreo de albedo para los 10 años antes del inicio de la fase de construcción del proyecto, cuyos resultados fue incorporado en un informe separado (Informe Geotest N°. 4017014.3).

Finalmente, en cumplimiento de lo requerido mediante Ord. DGA RM N° 724 de 2 de julio de 2020, mediante la actualización del presente "Informe Consolidado de Línea de Base de glaciares 2019" se hace entrega de los antecedentes técnicos necesarios para cumplir con el compromiso establecido por la DGA RM, mediante Ord. DGA RM N° 602 del 12 de abril de 2017, en cuanto a contar con una línea de base de los glaciares del Monumento Natural El Morado.

12.08.2020

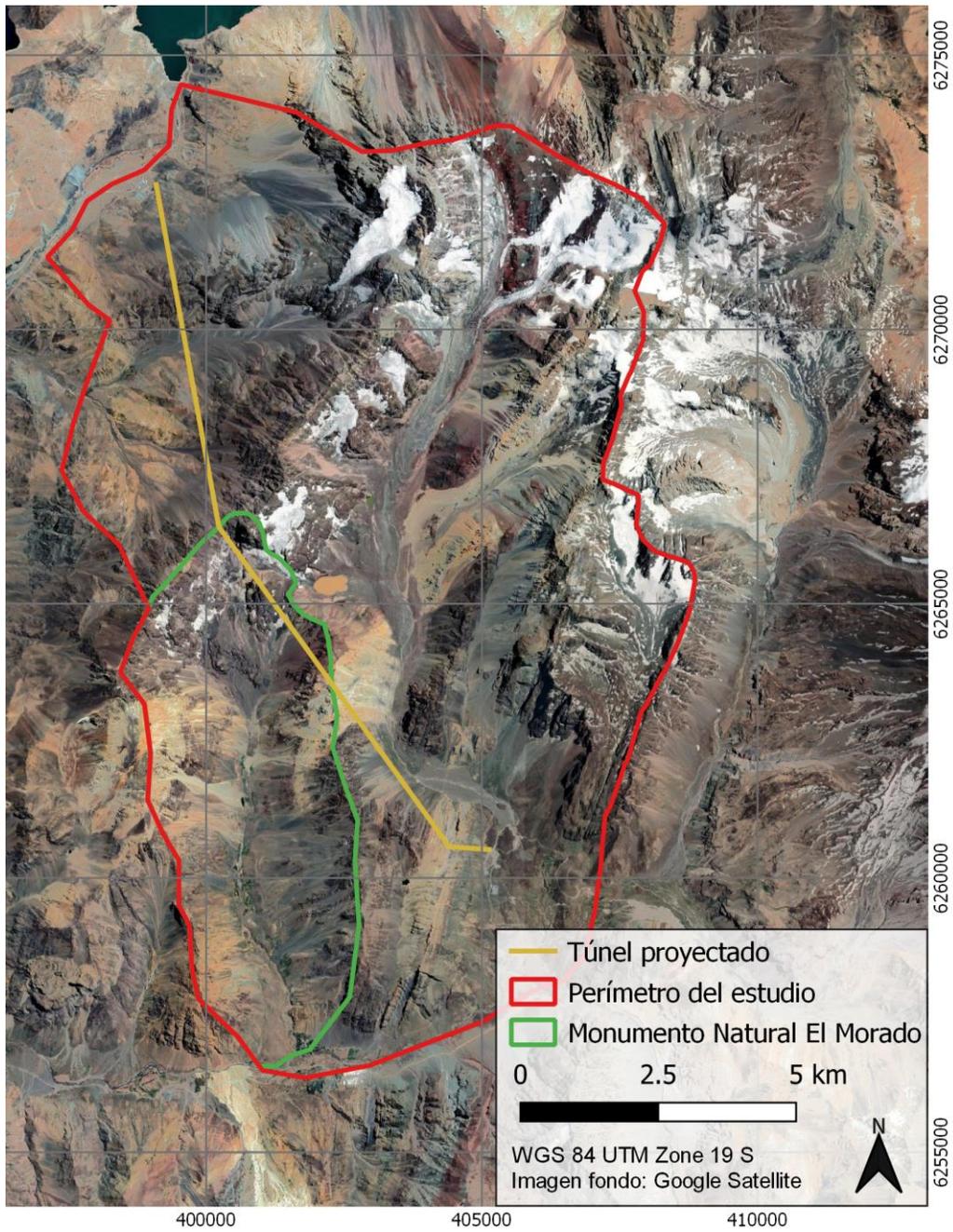


Figura 1: Área de estudio del monitoreo de glaciares.

12.08.2020

## 2. Metodología

### 2.1 Superficies de los glaciares y glaciares rocosos

Para la determinación de superficies se compararon fotografías aéreas e imágenes de alta resolución entre 1955 y 2019. Los criterios de selección de las imágenes fueron su resolución y la presencia de cobertura nival mínima. Para asegurar que el mapeo de la superficie de los glaciares sea fiable, se necesita una resolución de imagen en el rango de 1 metro y la fecha de su captura debe ser en los meses de menor cobertura nival, lo que coincide con el fin de la época de ablación<sup>2</sup> (Marzo, Abril). Para la ortofoto de marzo 2016 se programó exclusivamente el satélite Worldview-2 con el fin de obtener una foto ortogonal de resolución 0,5 m. Los datos más recientes de los años 2017, 2018 y 2019 fueron levantados por un vuelo LIDAR (Tabla 1).

Tabla 1: Imágenes utilizadas para el estudio

Año / mes	Tipo	Fuente	Escala/Resolución Espacial
Febrero 1955	Fotografía aérea	IGM, vuelo Hycon	1:60.000
Marzo 1996	Fotografía aérea	SAF	1:30.000
Mayo 2010	Imagen satelital	Worldview-2	2 m
Marzo 2015	Imagen satelital	Geoeye-1	2 m
Febrero 2016	Imagen satelital	Worldview-2	0,5 m
Marzo 2017	Foto aérea LIDAR	UAS Vision	0,2 m
Marzo 2018	Foto aérea LIDAR	UAS Vision	0,1 m
Marzo/ Abril 2019	Foto aérea LIDAR	UAS Vision	0,1 m

---

<sup>2</sup> Ablación: Pérdida de hielo o nieve de un glaciar, ya sea por fusión, sublimación o calving. La época o temporada de ablación es el periodo durante el cual los glaciares pierden más masa de la que ganan, coincidiendo con el verano.

12.08.2020

El levantamiento LIDAR más reciente (Marzo/Abril de 2019) fue realizado con una nube de puntos más densa, con el propósito de cumplir con las mejoras solicitadas por Ord. DGA RM N° 399 del 22 de marzo de 2019. Se ejecutó un levantamiento LIDAR registrando una nube de puntos con densidad de 4 puntos por m<sup>2</sup> y ortofoto de resolución de 10 cm. Además se aumentaron los puntos de control en terreno significativamente. Se levantaron 6014 muestras de autocontrol cinemático en modo PPK (método de levantamiento Stop and Go) (Figura 2). El levantamiento fue realizado los días 27, 28 de marzo y 2, 3, 5, 6 y 7 de abril de 2019. Usando los datos de 2019 como base, se ajustaron los levantamientos de los años 2017 y 2018, sin embargo, dado que estos levantamientos fueron realizados con una menor densidad de puntos, los DEMs no mostraron cambios significativos. De este modo, se aplicó un re-análisis sobre el DEM 2018, y se utilizó el mismo DEM 2017, dado que la densidad de la nube de puntos del levantamiento ejecutado el año 2017 es insuficiente para un re-cálculo con mejora significativa.



Figura 2: Autocontroles altimétrico El Morado

12.08.2020

De acuerdo al mencionado requerimiento de la autoridad, y ajuste de las ortofotos de los últimos 3 años, las imágenes más antiguas (1955, 1996, 2010 y 2015) fueron reortorectificadas, con el fin de mejorar la calidad del mapeo de los glaciares. De esta manera, el límite de los glaciares y cálculos de área fueron ajustados. En el caso de las imágenes áreas del año 1955 y 1996, debido al proceso de georeferenciación y orto-rectificación, existen sectores con distorsión (estiramiento de los píxeles de la fotografía). Con respecto a la imagen GoogleEarth del año 2013 que fue incluida en las líneas de base anteriores, en el presente informe fue excluida debido a su escasa calidad.

Para todos los años, la extensión de los glaciares fue digitalizada manualmente sobre la referencia de criterios morfológicos mediante el software ArcGIS, a una escala 1:2000. Se digitalizaron glaciares descubiertos (o blancos)<sup>3</sup>, cubiertos y glaciares rocosos. Las variaciones fueron identificadas a través de cambios en superficie y en longitud de las lenguas a lo largo de la línea central de los glaciares.

En el caso de los glaciares rocosos, estos fueron delimitados utilizando la imagen 2017 y 2019, sin obtener cambios significativos en superficie (área), mientras que los cambios de elevación son cercanos a cero y dentro del error vertical calculado.

---

<sup>3</sup> En este informe se empleará el nombre de glaciares descubiertos o blancos de forma indistinta.

12.08.2020

## 2.2 Volumen de los glaciares descubiertos y cubiertos

Para la determinación de la cantidad de reservas de agua almacenada en los glaciares es fundamental estimar el volumen de hielo.

La metodología aplicada para la estimación de volumen es el enfoque del “V-A-scaling” (escalamiento Volumen-Área). Se trata de una metodología simple y robusta con fórmulas empíricas derivadas de glaciares estudiados en detalle. El volumen de hielo está calculado como función de la superficie, teniendo en cuenta que glaciares de tamaños grandes generalmente tienden a ser más potentes (Monnier & Kinnard, 2013). La fórmula base es:

$$V = cA^{\gamma}$$

Con V = volumen, A=superficie, c y  $\gamma$  dos parámetros de escala.

En este estudio fueron aplicados los enfoques de Chen & Ohmura (1990) en Frey *et al.* (2014), donde se usan mediciones de 63 glaciares para determinar los parámetros de escala y el enfoque de Bahr (1997), el cual deriva una relación teórica entre volumen y superficie mediante tendencias empíricas, observadas en más de 100 glaciares. En la Tabla 2 se muestran los parámetros derivados para establecer estas relaciones.

Tabla 2 : Parámetros de las relaciones V-A aplicadas.

Fuente	c	$\gamma$
Chen & Ohmura (1990) en Frey <i>et al.</i> (2014), con el área en m <sup>2</sup>	0,2055	1,360
Bahr (1997), con el área en km <sup>2</sup>	27,6	1,375

12.08.2020

### 2.3 Equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares descubiertos y cubiertos

El equivalente de agua de las masas de hielo es calculado utilizando el volumen del glaciar y la densidad del hielo. La densidad de hielo de glaciares blancos o descubiertos utilizada para la conversión es de  $850 \text{ kg m}^{-3}$  (Huss, 2013)<sup>4</sup>, utilizada en otros trabajos para los Andes Centrales (Dussaillant *et al.* 2019; Farías-Barahona *et al.* 2019).

La fórmula correspondiente es:

$$\text{Masa de hielo} = \text{Volumen de hielo} \times \text{Densidad de hielo}$$

### 2.4 Porcentaje de detritos de glaciares rocosos

Generalmente, los glaciares rocosos se pueden clasificar en tres clases:

- **Activos** (contienen hielo, presenten movimiento)
- **Inactivos** (contienen hielo pero ya no se mueven)
- **Fósiles** (el hielo ya se derritió completamente).

Esta clasificación junto a la diferenciación de los glaciares rocosos influyen en el porcentaje de detritos o contenido de hielo de un glaciar. En la definición de un glaciar rocoso y su formación o génesis todavía hay preguntas abiertas y discusiones en la comunidad científica. Los geomorfólogos y glaciólogos a menudo ven un origen glacial (Janke *et al.* 2015), mientras investigadores del permafrost están convencidos de un desarrollo periglacial (Barsch, 1996; Frauenfelder, 2004). Por ende, se encuentran glaciares rocosos con origen glacial, con origen periglacial y formas transicionales, por lo que emplear el término “continuo” resulta apropiado en esta materia. En el área de estudio se encuentran glaciares rocosos de diferentes orígenes, tal como origen de protalud, origen de un glaciar (cubierto) anterior u origen de una morrena.

---

<sup>4</sup> El valor de la densidad usado en este informe fue actualizado en comparación con la línea de base 2018 (Geotest, 2018), dado que existe bibliografía nueva que utiliza este valor para glaciares de Chile central.

12.08.2020

Según Janke *et al.* (2015), la morfología superficial del glaciar rocoso está relacionada con la composición interna de hielo y de roca. La clasificación visual se basa en características comunes que relacionan el espesor y la extensión de la cobertura con la proporción de hielo a roca.

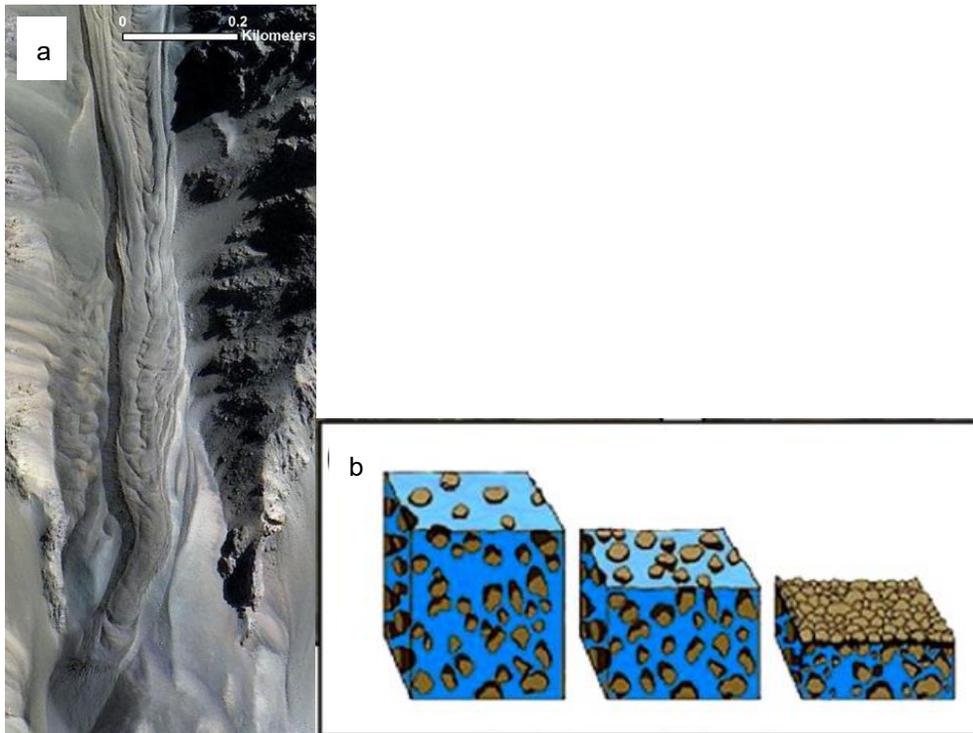


Figura 3: a) Glaciar rocoso de clase 4 (de Janke *et al.* 2015).

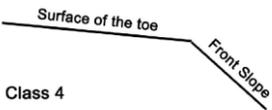
b) Explicación de la formación de un glaciar rocoso totalmente cubierto: La evolución de un glaciar descubierto a un glaciar cubierto de detritos y posiblemente a un glaciar rocoso se caracteriza por la reducción de la proporción de hielo interno en relación al volumen de detritos en glaciares y depósitos morrénicos (de Janke *et al.* 2015).

Sobre la base de formas geomorfológicas y según juicio de experto, se clasificaron los glaciares rocosos en seis clases (Janke *et al.* 2015), indicando el contenido de hielo aproximado por clase (Tabla 3). En base a esta clasificación, se analizaron los glaciares rocosos presentes en el área de estudio, considerando su morfología superficial, frontal y probables características de evolución mediante las imágenes de alta resolu-

12.08.2020

ción, estableciéndose que en el área de estudio se encuentran únicamente glaciares rocosos de las clases 4, 5 y 6.

Tabla 3: Clasificación de glaciares modificado basado en Janke *et al.* (2015). Los porcentajes se refieren al volumen.

Clase	Descripción	Contenido de Hielo [%]	Detritos [%]
1 "Semicovered" (semicubierto)	Cobertura de detritos no más de 0,5 m. Más del 75% de hielo visible en la superficie del glaciar.	>85%	<25%
2 "Fully covered" (completamente cubierto)	Más del 95 % del glaciar cubierto con detritos de espesor 0,5-3,0 m.	65-85 %	15-35 %
3 "Buried glacier" (glaciar enterrado)	Cobertura de detrito ~3-5 m. Origen glacial. Hielo puede ser visible en grietas o derrumbes de thermokarst.	45-65 %	35-55 %
4 "Rock glacier proper" (glaciar rocoso propiamente)	Cubierto completamente por detritos. No hay hielo visible en superficie. Hielo interno en forma de un núcleo de hielo o hielo masivo, hielo segregado y/o hielo intersticial.  Class 4	25 -45 %	55-75 %

12.08.2020

Clase	Descripción	Contenido de Hielo [%]	Detritos [%]
5 "Transitional rock glacier" (glaciar rocoso)	<p>Manifestación de estructuras de movimiento muy leve.                      Frente de glaciar menos empinado, forma general más redondeado.</p>  <p>Class 5</p>	10-25 %	75-90 %
6 "Glacier of rock" (glaciar rocoso)	<p>Origen de morrena, detritos morrénicos.                      No hay movimiento.                      Superficie caracterizada por detritos desordenados, pequeños cerros y bloques.                      Frente de glaciar casi inexistente.</p>  <p>Class 6</p>	< 10 %	>90 %

12.08.2020

## **2.5 Determinación de equivalente de agua del contenido de hielo de los glaciares rocosos**

### **2.5.1 Estimación de espesor promedio**

El espesor promedio de los glaciares rocosos fue estimado sobre la base del LIDAR 2018 (Diferencia de altura del cuerpo del glaciar respecto al terreno adyacente). El espesor se clasificó en 2 clases de 10 y 20 m de potencia.

### **2.5.2 Estimación del volumen de los glaciares rocosos**

El volumen fue calculado en base a la siguiente fórmula:

$$\text{Volumen glaciar rocoso} = \text{Espesor promedio} \times \text{Superficie}$$

Dada la ausencia de datos de sondajes y/o calicatas en los glaciares rocosos, se usaron criterios morfológicos, tales como líneas de flujo, presencia de crestas y surcos como mayor indicador de actividad glaciar para la definición del porcentaje de hielo del glaciar. Para los glaciares clase 4, se utilizó el valor medio de la clase (35%), para los glaciares rocosos de clase 5 se utilizaron dos valores (20 y 25%). Para los glaciares de clase 6 se utilizó un porcentaje de hielo de 10%.

### **2.5.3 Determinación equivalente de agua**

Para la determinación del equivalente de agua se calculó el volumen de hielo en base al volumen del glaciar rocoso y el porcentaje de hielo presente en él.

Luego, el equivalente de agua de las masas de hielo fue determinado tal como en el capítulo 2.3 según la siguiente fórmula:

$$\text{Masa de hielo} = \text{Volumen de hielo} \times \text{Densidad de hielo}$$

12.08.2020

## 2.6 Balance de masa para glaciares descubiertos y cubiertos

El balance de masa geodésico para un período determinado, se calculó como la diferencia entre los respectivos DEMs. De esta manera se obtuvo la diferencia de altura distribuida para el terreno, asociada a cada período.

Se realizaron balances de masa geodésicos para dos períodos de tiempo: (2017-2018 y 2018-2019); adicionalmente, se incluye en el Anexo 7 el balance de masa geodésico para el glaciar San Francisco (período 2009-2015), elaborado por la DGA. El balance de masa geodésico para el período 2017-2018 fue re-calculado con el nuevo DEM 2018 tal como se solicitó por Ord. DGA RM N° 399 del 22 de marzo de 2019.

Cada par de DEMs fue co-registrado con el objetivo de reducir los errores sistemáticos horizontales y verticales de cada levantamiento, debido al bias (o sesgo) asociado a pendiente, aspecto, y a los sensores de captura del DEM (Nuth & Kääb, 2011). Este procedimiento fue realizado siguiendo el método iterativo de Nüth, basado en las zonas estables (Nuth & Kääb, 2011). Este método ha sido utilizado para el balance de masa por diversos estudios tanto en los Andes como Himalayas (Braun *et al.* 2019; Dussaillant *et al.* 2019; Farías-Barahona *et al.* 2019).

Si bien, todos los DEMs utilizados se encuentran disponibles para 1 m de resolución horizontal, dado los altos requerimientos computacionales del método iterativo de co-registración, los cálculos de balance de masa fueron realizados a una resolución de 2 m (Tabla 4).

Para cada par de DEMs se calculó el error cuadrático medio en las zonas estables (no glaciares ni cuerpos de agua), antes y después de la co-registración (Tabla 5), con el objetivo de tener un indicador de la incerteza vertical del balance de masa. El criterio para la elección de áreas estables, obedeció a un criterio visual, en base a la comparación de las ortofotos y zonas que evidenciaban menores cambios de elevación, previo a la co-registración. Con ello se consigue encontrar áreas estables cercanas a los glaciares, con la idea de reducir el error vertical en torno a ellos.

12.08.2020

Tabla 4: Características DEM LIDAR empleados.

	LIDAR 2017	LIDAR 2018	LIDAR 2019
Fecha adquisición	19-22 de Marzo 2017	06 -15 de Marzo 2018	25 de Marzo – 7 de Abril 2019
Resolución horizontal	2 m	2 m	2 m
Resolución vertical	0,5 m	0,5 m	0,5 m

El promedio de las diferencias de altura (suma de diferencias de cada celda, divididas por el número de celdas de los DEM del glaciar) fue multiplicado con la superficie de glaciar respectivo, para tener el volumen total perdido o ganado entre los años examinados.

12.08.2020

### **3. Resultados**

#### **3.1 Evolución de las superficies de los glaciares**

En total se estudiaron 31 glaciares con un rango de superficie para el año 2019 que va de 0,001 km<sup>2</sup> a 8,2 km<sup>2</sup>. Estos glaciares se encuentran a una distancia horizontal de hasta 8 km a la proyección en superficie del eje del túnel El Volcán del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo (PHAM), cuyo trazado se encuentra a una profundidad promedio de 900 m. La Figura 4 muestra de ubicación de todos los glaciares estudiados. Un detalle del nombre, coordenadas centrales, clasificación de la cobertura del glaciar, longitud y área para el año 2019 se presenta en el anexo 1. La clasificación de la cobertura glaciar se realizó siguiendo las recomendaciones de la guía del programa de mediciones globales de hielo terrestre (GLIMS - “*Global Land ICE Measurements from Space*”).

12.08.2020

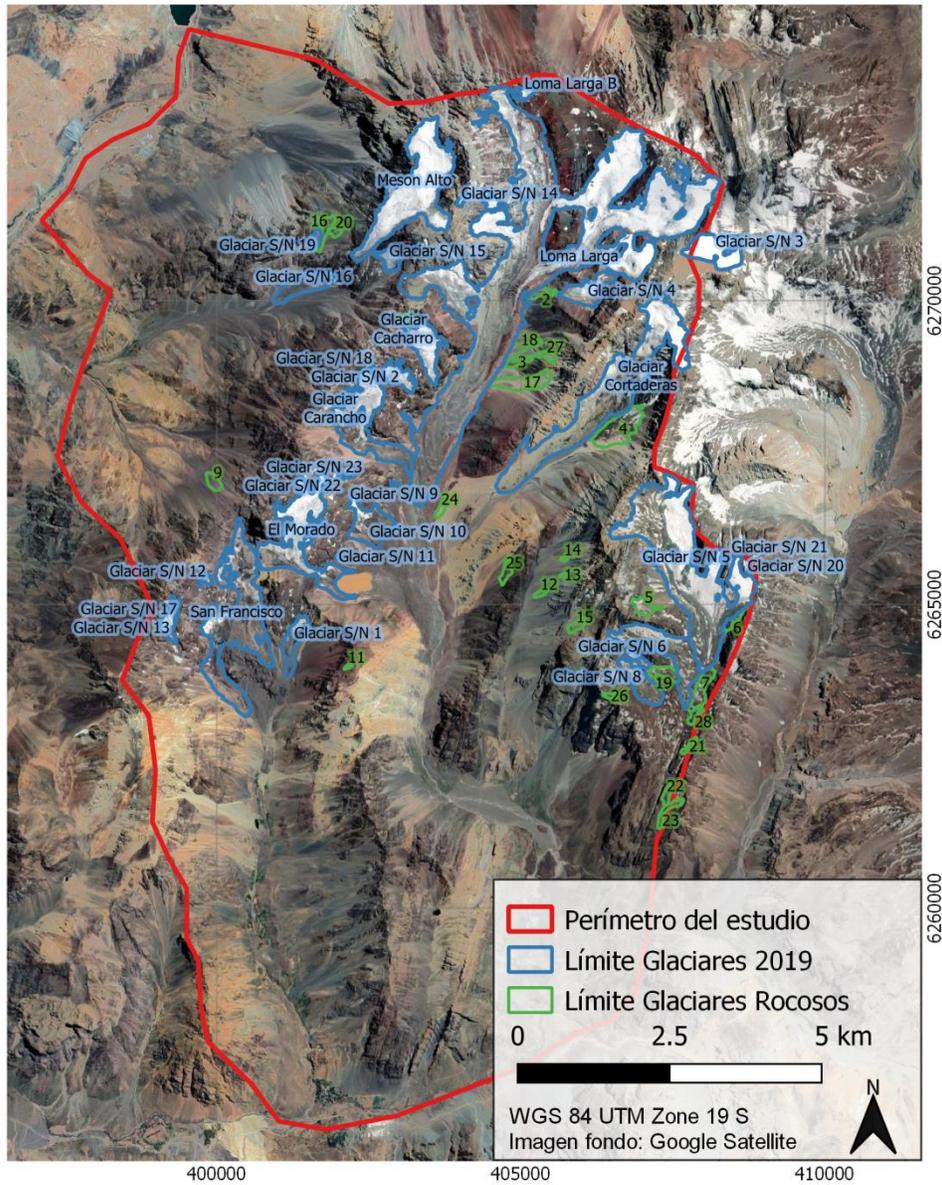


Figura 4: Identificación de los glaciares, tanto cubiertos y descubiertos (azul), como los glaciares rocosos (verde, con su respectivo número de identificación). Un detalle de la clasificación, coordenadas y área se presenta en el Anexo 1.

12.08.2020

### 3.1.1 Glaciares descubiertos y cubiertos

En general, se pudo constatar una tendencia de retroceso de los glaciares en el área de estudio durante el período analizado (Anexo 2). En el año 1955 la superficie total de los glaciares en el área de estudio se estimó en  $24,6 \text{ km}^2 \pm 0,1 \text{ km}^2$ <sup>(5)</sup>; mientras que para el año 2019 el área estimada disminuyó a una superficie de  $20,6 \text{ km}^2 \pm 0,006 \text{ km}^2$ <sup>(5)</sup>: Durante los últimos 64 años la superficie total de los glaciares estudiados disminuyó alrededor de  $4 \text{ km}^2$ . El glaciar de circo Mesón Alto disminuyó su superficie durante las últimas décadas en un 9,6 %. Asimismo, los glaciares con cobertura de detritos, por ejemplo el glaciar Carancho, muestra un cambio en su superficie de -29%. Para el caso del glaciar Mirador El Morado, ubicado en el monumento El Morado, el glaciar ha variado su superficie en un -35,5%, con un retroceso de la lengua de 1,6 m por año.

Las variaciones de la superficie de los glaciares se concentran principalmente a la zona de ablación<sup>6</sup>, específicamente en las lenguas glaciares. Cambios en superficie en la zona alta de los glaciares son escasos y de poca magnitud.

### 3.1.2 Evolución de la superficie del glaciar El Morado

El glaciar El Morado muestra en el período 1955-2019 un retroceso continuo y acelerado en recientes años (Figura 5). Desde 1955 hasta 2015, la lengua del glaciar El Morado muestra un retroceso continuo promedio de aproximadamente 6,7 m anuales.

Las imágenes recientes de 2017, 2018 y 2019 muestran el progreso de esta tendencia, donde el período 2017-2018 dobló la tasa de retroceso experimentada durante el período 2018-2019, en el frente del glaciar El Morado. Además se observa un retroceso lateral a ambos costados de la lengua (zona cubierta por detritos).

El área del glaciar El Morado ha disminuido un 36% entre 1955 y 2019. Las mayores pérdidas de área se observan entre los años 2017-2018 ( $-0,07 \text{ km}^2$  por año) y 2016-

---

<sup>5</sup> Valor actualizado, al mejorar la ortorectificación de imágenes antiguas.

<sup>6</sup> Zona de ablación: Es el área del glaciar bajo la línea de equilibrio, donde ocurre la pérdida de masa.

12.08.2020

2017 (-0,05 km<sup>2</sup> por año), mientras que el reciente período 2018-2019 evidenció una pérdida de 0,03 km<sup>2</sup> por año. Especialmente, las mayores pérdidas de superficie del glaciar El Morado, se observan en el frente glaciar, el cual está en contacto con la laguna del Morado, cuya formación tiene lugar entre 1955 y 1996 (Figura 5) y se asocia al represamiento de aguas de fusión glaciar debido a la existencia de una morrena frontal, estas lagunas son denominadas lagunas proglaciales. Esta laguna continúa su expansión gradual debido al retroceso de la lengua glaciar. Cabe mencionar que, muchas veces los lagos proglaciales contribuyen al aumento del retroceso del glaciar, debido a la exposición del hielo en contacto con el agua del lago.

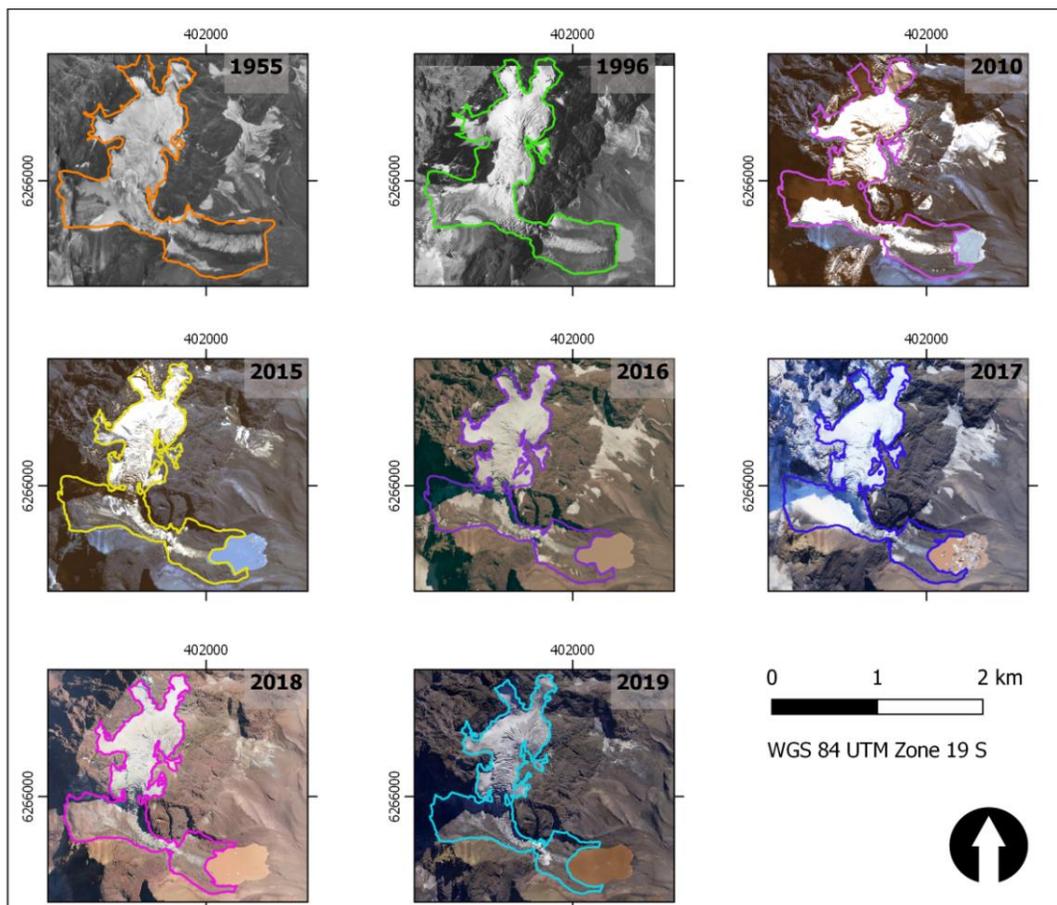


Figura 5: Representación de la evolución de la superficie del glaciar El Morado de 1955 a 2019 en base a las imágenes de la Tabla 1.

12.08.2020

### **3.1.3 Evolución de la superficie del glaciar San Francisco**

El glaciar San Francisco es un glaciar cubierto con detritos en sus dos lenguas. Mientras la lengua sur ha experimentado modificaciones significativas desde 1955, la lengua norte ha permanecido relativamente estable.

La lengua sur retrocedió en promedio 5 metros por año entre 1955 y 2010. Por otra parte, entre 2010 y 2017 se registró un retroceso de casi 8 metros por año (Figura 6).

La superficie del glaciar San Francisco ha disminuido entre 1955 y 2019 un 23%, con una mayor tasa de pérdida de superficie glaciar durante el período 2017-2018, asociada a una pérdida de 0,05 km<sup>2</sup> por año. En los años más recientes, en particular el 2018 y 2019, el glaciar San Francisco presenta una mayor cobertura de detritos en la superficie del glaciar, producto de la menor depositación de nieve y a la constante caída de roca de las laderas adyacentes, dejando el hielo y detritos más expuestos.

12.08.2020

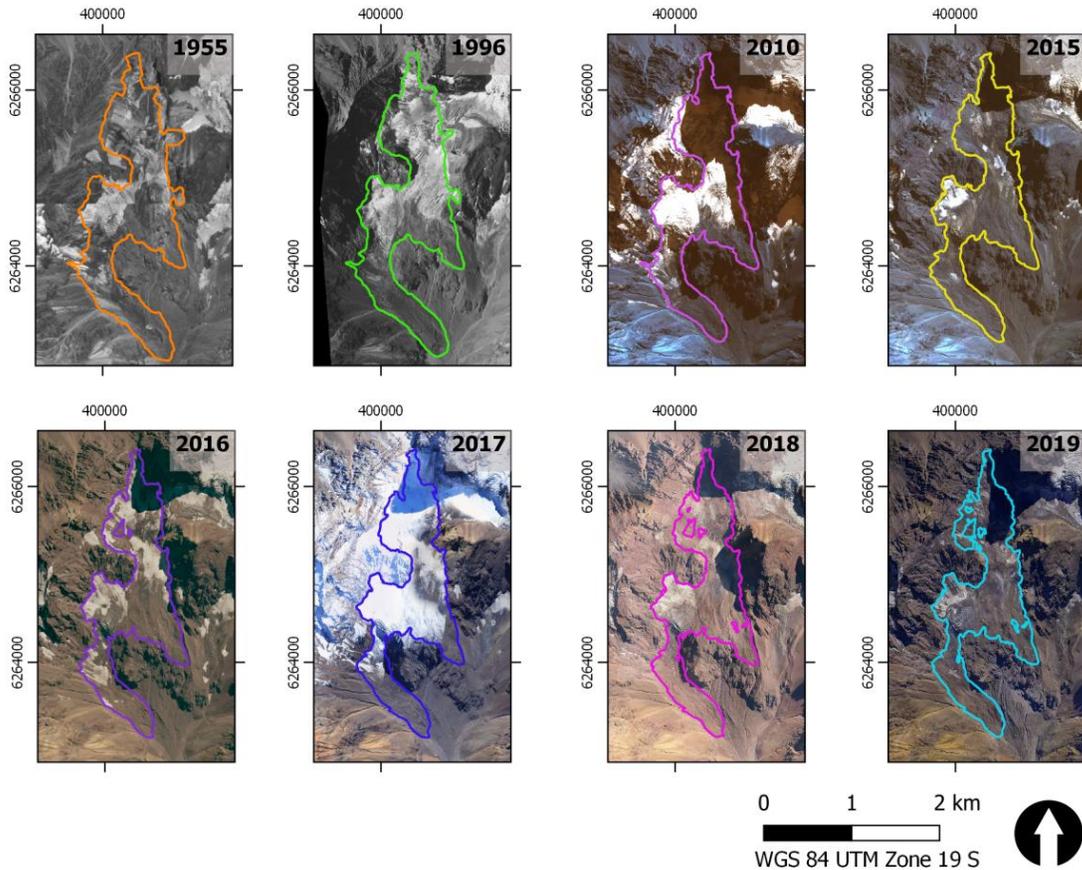


Figura 6: Representación de la evolución de la superficie del glaciar San Francisco de 1955 a 2019, en base a las imágenes de la Tabla 1.

### 3.1.4 Evolución de la superficie del glaciar Loma Larga

El glaciar Loma Larga es uno de los glaciares más extenso de la subsubcuenca Río Volcán, presentando glaciares tributarios a los costados que alimentan a la lengua principal.

El área del glaciar Loma Larga ha disminuido un 12,4% entre 1955 y 2019, con una superficie actual de 8,1 km<sup>2</sup>, conforme al límite 2019 (Figura 7). Los mayores cambios de área de registraron entre el año 2018 y 2019 con una pérdida de 0,19 km<sup>2</sup>/año, con

12.08.2020

la separación en la parte norte del glaciarete Loma Larga B, seguido por el periodo 2016-2017, con una disminución del área en  $0,11 \text{ km}^2/\text{año}$ .

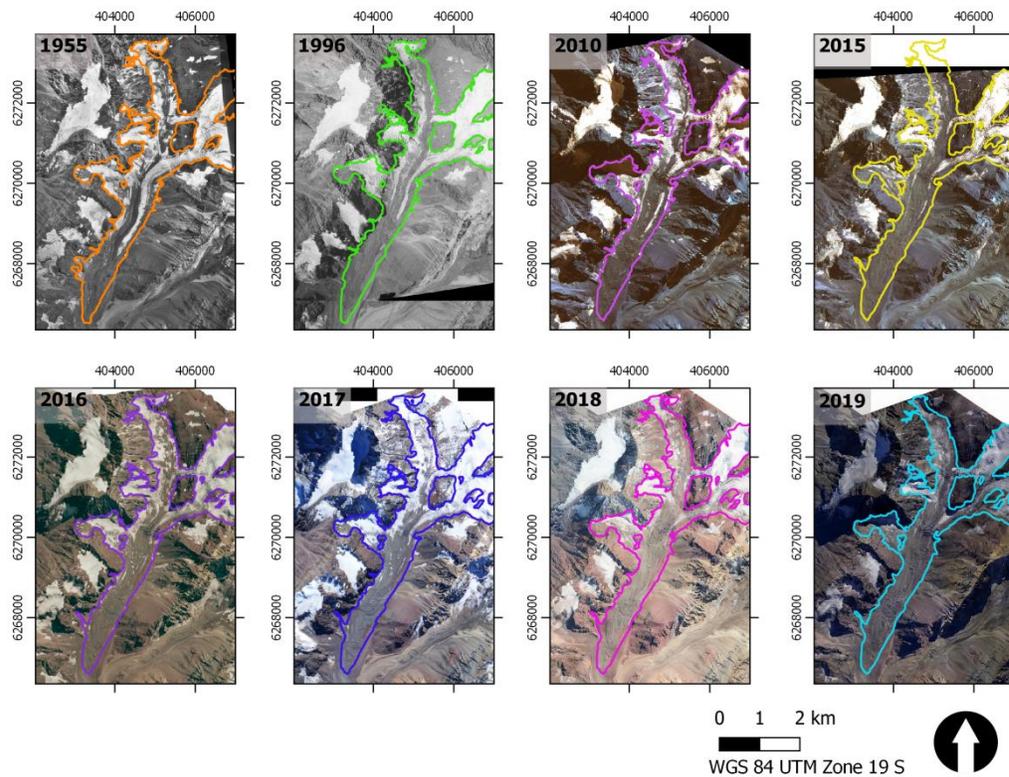


Figura 7: Representación de la evolución de la superficie del glaciar Loma Larga de 1955 a 2019 en base a las imágenes de la Tabla 1.

### 3.1.5 Glaciares rocosos

En base al análisis de las imágenes de los años 2017, 2018 y 2019 se identificaron 26 glaciares rocosos en el área de estudio. Se incluyen los glaciares periglaciares, como por ejemplo los glaciares n°13 y 14.

12.08.2020

Estos glaciares rocosos, distribuidos en laderas con exposición sur y oeste, presentan superficies individuales que varían entre 0,005 km<sup>2</sup> y 0,30 km<sup>2</sup> <sup>(7)</sup>.

Algunos de los glaciares rocosos se encuentran adyacentes al glaciar cubierto Mesoncito (Figura 8). Durante el período analizado (1955-2019) no se detectaron modificaciones en la superficie de los glaciares rocosos. Al respecto, Janke *et al.* (2015) señalan que los glaciares rocosos no demuestran el mismo movimiento y comportamiento que (o de) los glaciares blancos/descubiertos. En general los glaciares rocosos suelen experimentar mayores cambios en la vertical (variación de espesor y reducción de volumen), que en su superficie.

---

<sup>7</sup> Valores actualizados, al mejorar la ortorectificación de imágenes antiguas.

12.08.2020

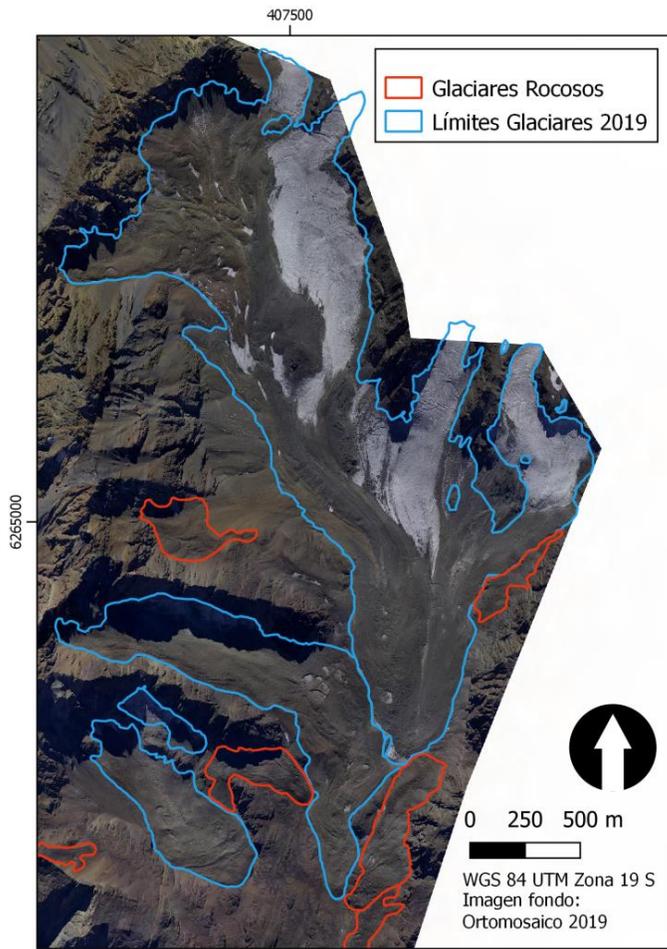


Figura 8: Glaciar Mesoncito (o Glaciar S/N 5) en el área sureste del perímetro de estudio y varios glaciares rocosos y cubiertos adyacentes. Los límites glaciares e imagen corresponden al año 2019.

12.08.2020

### 3.2 Volumen de glaciares descubiertos y cubiertos

Los volúmenes de los glaciares se estimaron según las fórmulas de Chen & Ohmura (1990) y Bahr (1997). Las fórmulas fueron desarrolladas para glaciares descubiertos y por ende no se pueden aplicar en glaciares rocosos.

Para el año 2019 se estimó un volumen total de los glaciares estudiados de 912 y 847 hm<sup>3</sup><sup>(8)</sup> (Chen & Ohmura / Bahr respectivamente). Comparando con el volumen de hielo total estimado para el año 1955 (1.128 y 1.048 hm<sup>3</sup><sup>(9)</sup>, Chen & Ohmura / Bahr respectivamente), es decir para los últimos 64 años, ha habido una pérdida aproximada de 216 y 200 hm<sup>3</sup> (Chen y Ohmura / Bahr respectivamente). Los volúmenes individuales para los glaciares descubiertos en el área de estudio se entregan en el Anexo 2.

### 3.3 Equivalente en agua de las masas de hielo de los glaciares descubiertos y cubiertos

El equivalente en agua de las masas de hielo fue calculado a partir los volúmenes resultantes según Chen & Ohmura (1990) y Bahr (1997). En total, se estimó un volumen para el año 2019 de 775 y 720 hm<sup>3</sup> de agua (Chen & Ohmura / Bahr respectivamente) en los glaciares del área de estudio.

### 3.4 Porcentaje de detritos de glaciares rocosos

En base a observaciones de la ortofoto 2017 y 2019 se clasificaron los glaciares según el esquema de clasificación propuesto en la Tabla 3 en base a Janke *et al.*, (2015). Sin embargo, se consideraron solamente glaciares rocosos originados de glaciares cubiertos por detritos. En la clasificación de Janke *et al.* (2015) no se incluyeron glaciares rocosos periglaciares formados a partir de taludes de detritos. Los glaciares

---

<sup>8</sup>: hm<sup>3</sup> corresponde a hectómetro cúbico, equivalente a 1.000.000 m<sup>3</sup>.

<sup>9</sup> Valores actualizados, dado que al georectificar las imágenes antiguas, permitió mejorar la identificación y delimitación de glaciares.

12.08.2020

rocosos periglaciares dentro del área de estudio fueron detectados y en este informe se clasifican en clase 5, como por ejemplo los glaciares 13 y 14.

En el área de estudio se encuentran glaciares de clase 4-6. La figura 7 ilustra los glaciares rocosos estudiados en este informe y su respectivo porcentaje de contenido de hielo (Anexo 3)<sup>10</sup>.

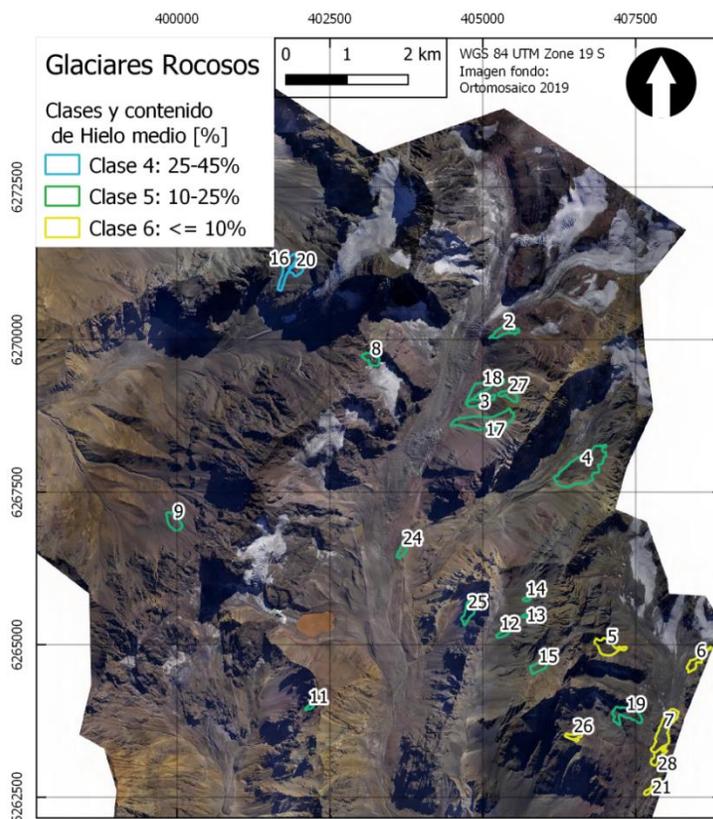


Figura 9: Glaciares rocosos en el área de estudio indicando el contenido de hielo de su volumen estimado en porcentaje (%) según clasificación de Janke *et al.* (2015).

<sup>10</sup> Valores actualizados, dado que al re-georectificar las imágenes antiguas, permitió mejorar la identificación y delimitación de glaciares.

12.08.2020

### 3.5 Equivalente de agua de las masas de hielo de los glaciares rocosos

El equivalente en agua del contenido de hielo en los glaciares rocosos se calculó a partir del volumen de hielo, el cual a su vez fue estimado en base a su espesor promedio. En total, se estimó que al año 2017, los glaciares rocosos dentro del área de estudio poseen un valor equivalente de agua de aproximadamente  $4,3 \text{ hm}^3$ <sup>(11)</sup> de agua. Para los años 2018 y 2019 no se detectaron variaciones respecto al año 2017.

En el Anexo 3 se muestra la clasificación de los 26 glaciares rocosos identificados en el área de estudio, señalando para cada uno de ellos los valores estimados de contenido de hielo promedio [%], contenido de detritos [%], espesor promedio [m], superficie [m<sup>2</sup>], volumen [m<sup>3</sup>], volumen de hielo [m<sup>3</sup>] y equivalente de agua [m<sup>3</sup>].

### 3.6 Balance de masa geodésico

El balance de masa fue calculado para 30 glaciares entre los períodos 2017-2018 y 2018-2019 (el glaciar S/N 3 no está cubierto por los DEMs). Como se mencionó en la sección 2.6, se realizó una co-registración a cada par de DEM que se trabajaron. Los valores de cambio de elevación promedio y pérdida de volumen por glaciar para el período 2017-2018 y 2018-2019 se muestran en el Anexo 4. Por su parte, el balance de masa geodésico distribuido se incluye en los Anexos 5 y 6, donde se presenta la variación de elevaciones por cada glaciar, indicando el número de celdas, el promedio de la variación, desviación estándar y volumen total asociado a los cambios de elevaciones. La desviación estándar da cuenta de la variabilidad espacial en los cambios de elevación, y no debe interpretarse como un error de cálculo, sino como una dispersión de los cambios en el glaciar.

El error vertical calculado en las áreas estables para el período 2018-2017 bajó de 0,5 a 0,4 m tras la co-registración, mientras que para el período 2019-2018 el error bajó de 0,7 a 0,2 m (Tabla 5). Esta reducción en el error vertical deriva de la co-registración

---

<sup>11</sup> Valores actualizados, dado que al re-georectificar las imágenes antiguas, permitió mejorar la identificación y delimitación de glaciares, modificando las áreas y volúmenes.

12.08.2020

de DEMs, por lo que se tratan de errores verticales para evaluar la variación de elevación.

Tabla 5: Errores verticales de áreas estables para cada par de DEM co-registrado. RMSE: Raíz de error cuadrático medio. RMSE inicial corresponde al error sin co-registrar, mientras que RMSE final es el error calculado luego de realizar la co-registración. Estos errores derivan de la co-registración de DEMs, por lo que se trata de errores verticales para evaluar la variación de elevación.

Período	RMSE [m]	
	Inicial	Final
2019-2018	0,7	0,2
2018-2017	0,5	0,4

Los valores promedio de cambios de elevación en los glaciares para el período 2018-2019 fluctúan entre -4,28 m (glaciar S/N 9) y 0,26 m (glaciar S/N 20) (Anexo 4 y Figura 10). Por su parte, para el período 2017-2018, el valor promedio mínimo se registra en el glaciar S/N 21 con -2,79 m, y máximo en el glaciar S/N 14, de 0,7 m.

La distribución espacial del balance de masa para el período 2017-2018 muestra pérdida de elevación en gran parte de la superficie, con escasos valores positivos en las pendientes más abruptas y glaciares más extendidos, como el glaciar El Morado y el glaciar Loma Larga. Este último evidencia el flujo descendente debido a la gravedad. En las figuras del balance de masa geodésico, se incluye la laguna El Morado, mostrando un balance positivo para período 2017-2018. Para el período 2018-2019 la distribución espacial en la superficie de los glaciares es bastante similar, sin embargo, la laguna el Morado muestra una disminución de la elevación de su superficie. Es importante destacar que tanto para el balance 2017-2018, como para el balance de masa geodésico 2018-2019 no se incluyó la laguna El Morado para los valores promedio del glaciar.

El promedio para todos los glaciares muestra valores similares, con una pérdida de masa para el período 2017-2018 de  $-1,37 \pm 0,4$  m, mientras que el período 2018-2019 tuvo un promedio de  $-1,05 \pm 0,2$  m.

Para el periodo más reciente (2018-2019), la pérdida de volumen total de los glaciares cubiertos y descubiertos fue de  $22.723.274 \text{ m}^3$  (disminución).

12.08.2020

Para los glaciares rocosos, los valores promedio de cambio de elevación son inferiores en magnitud comparados con los glaciares cubiertos y descubiertos, para el periodo 2017-2018, se registra una pérdida de  $-0,38 \pm 0,4$  m, mientras que para el periodo 2018-2019 se presenta una variación de elevación de  $0,12 \pm 0,2$  m. Estos valores promedio se encuentran dentro del rango de error vertical calculado. Sin embargo existen glaciares rocosos con pérdidas de elevación que alcanzan  $-0,7$  y  $-0,9$  m (glaciar rocoso 17 y 18 respectivamente) en el periodo 2017-2018.

12.08.2020

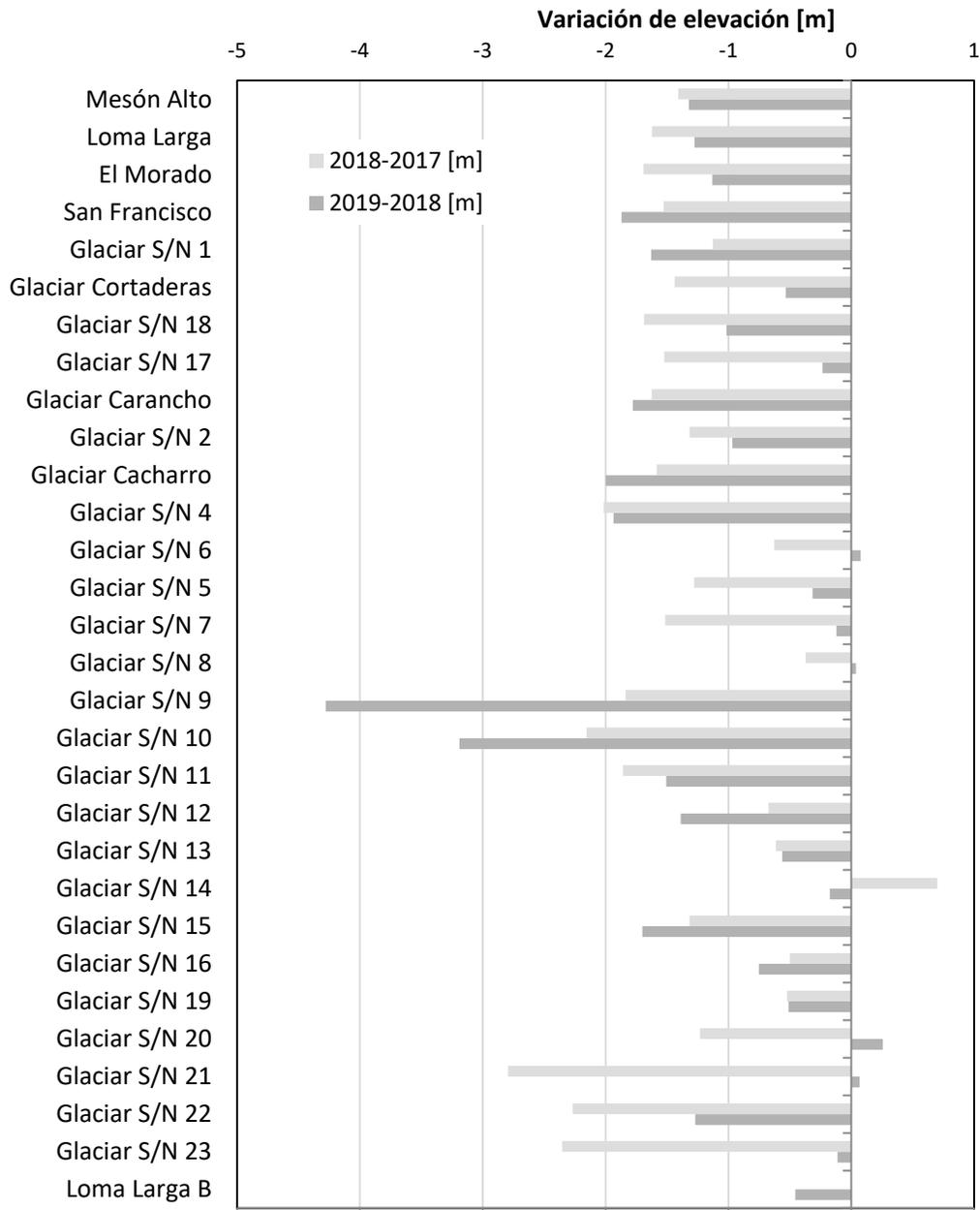


Figura 10: Variación de elevación para los glaciares que conforman la Línea Base, en el periodo 2017-2018 (gris claro) y 2018-2019 (gris oscuro). El glaciar S/N 3 fue omitido de la figura dada la poca cantidad de pixeles que incluyen al glaciar.

12.08.2020

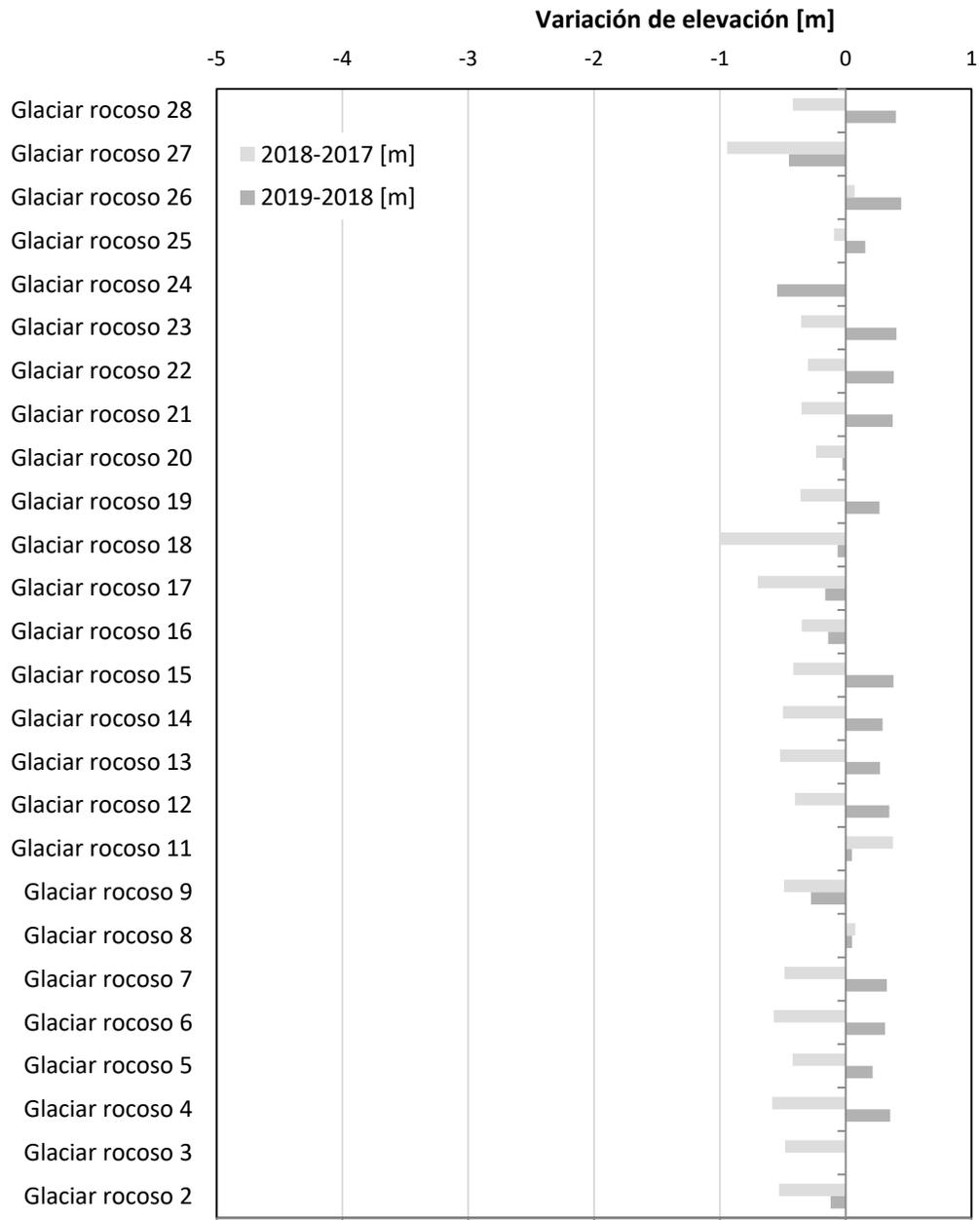


Figura 11: Variación de elevación para los glaciares rocosos que conforman la Línea Base, en el periodo 2017-2018 (gris claro) y 2018-2019 (gris oscuro). El detalle de los valores por glaciar se encuentra en el Anexo 4.

12.08.2020

### Balance de Masa geodésico en bandas de elevación

La Figura 12 muestra el balance de masa geodésico por bandas de elevación para los glaciares San Francisco, El Morado, Loma Larga y Mesón Alto.

Tanto en el glaciar San Francisco como el Loma Larga se observa un perfil de mayores pérdidas de elevación de la superficie a menores altitudes del glaciar. El glaciar San Francisco presenta mayor variación en su perfil, posiblemente debido a la alimentación de las laderas más empinadas producto de avalanchas de nieve y caída de material detrítico, que se evidencia en la Figura 6. Algo similar ocurre en el glaciar El Morado, donde incluso a 3.600 m s.n.m. el balance es positivo. Esta elevación corresponde al glaciar colgante (en la lengua terminal), donde la pendiente en ciertos sectores es mayor a 50°. En esta zona se evidencia el mayor flujo del glaciar y constante movimiento de los bloques de hielo.

El perfil del glaciar Loma Larga muestra una continua disminución con la altura, con un pequeño aumento en la parte baja de la lengua del glaciar, probablemente por la cobertura de detritos que aísla el hielo bajo éste, amortiguando la pérdida de masa.

Las variaciones altitudinales del glaciar Mesón Alto muestran principalmente pérdida, con mayores disminuciones de elevación a menor altitud, a excepción de una pequeña área alrededor de 4.100 m s.n.m. que no muestra cambios (Figura 12).

12.08.2020

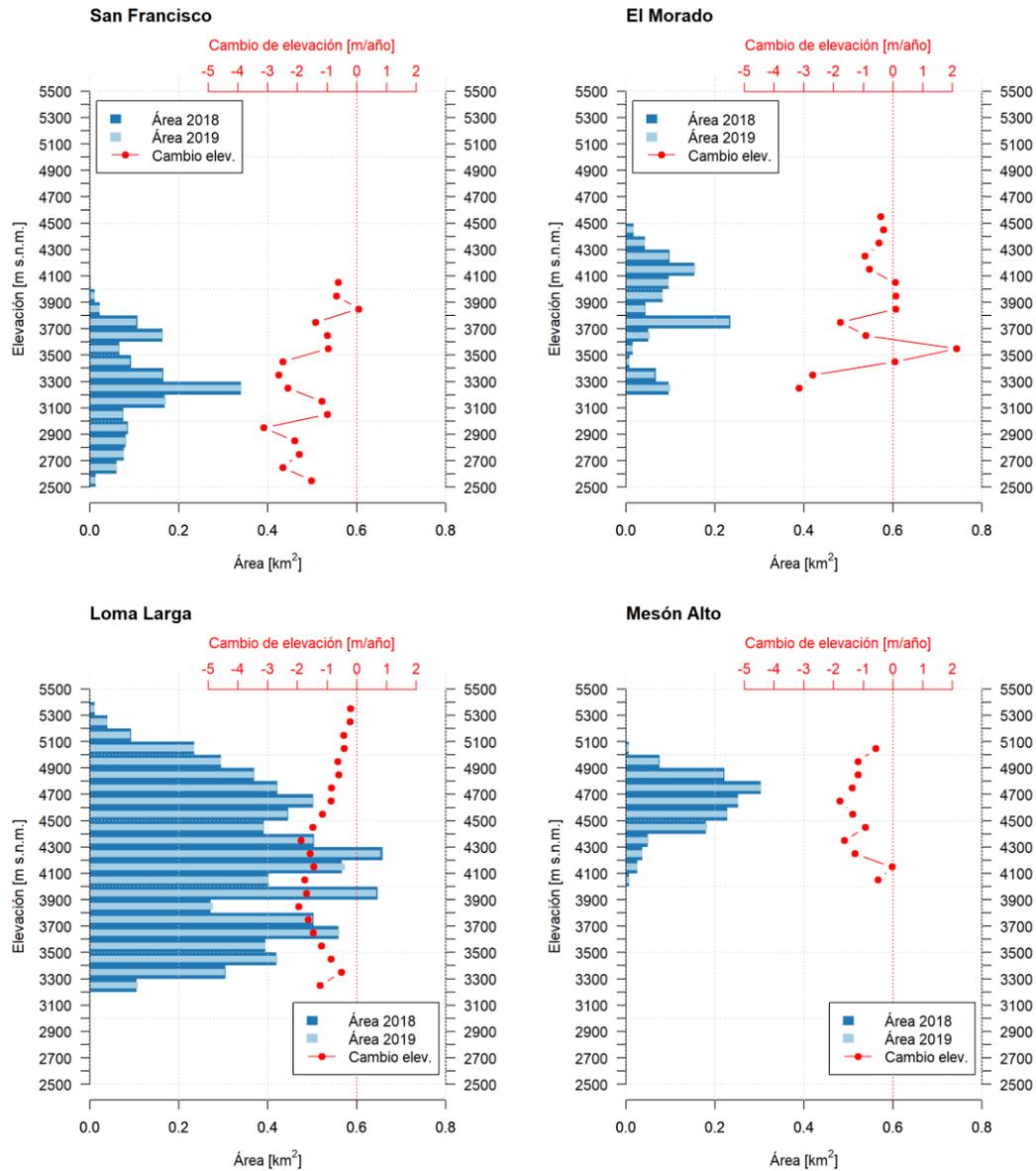


Figura 12: Hipsometría y balance de masa por bandas de elevación cada 100 m para el período 2018-2019 en los glaciares San Francisco, El Morado, Loma Larga y Mesón Alto. El histograma de color azul representa el área del glaciar por banda de elevación en el año 2018, el histograma en color celeste representa el área del glaciar (eje horizontal inferior) por banda de elevación en el año 2019 (eje vertical). En color rojo se representa los cambios de elevación en m/año (eje horizontal superior).

12.08.2020

#### 4. Discusión

Las superficies de los glaciares fueron delimitadas manualmente en base de fotografías aéreas e imágenes satelitales, con ayuda de *hillshade* (mapa de sombras) y del DEM para el año respectivo. Se destaca que la resolución de las imágenes usadas mejoró significativamente a partir del 2017 y en particular para el año 2019.

Tal como lo solicitó el Ord. DGA RM N° 399 del 22 de marzo de 2019, se corrigió el DEM 2018, así como también las ortofotos 2017 y 2018. Además para el año 2019 se aumentó la cantidad de puntos de muestreo del levantamiento LIDAR, registrando una nube de puntos con una densidad de 4 puntos por metro cuadrado. De esta manera se generó un DEM con mejor calidad. Esta mejora y corrección de imágenes previas, permitió re-georectificar imágenes satelitales antiguas (1955, 1996, 2010 y 2015) (sección 2.1). Lo anterior permitió revisar las delimitaciones retroactivamente, implicando un ajuste en los valores de área de glaciares descubiertos, cubiertos y rocosos. En consecuencia, con el mejoramiento de las imágenes se logran observar detalles en la morfología imposibles de identificar en las imágenes de menor calidad. Al mismo tiempo, surgen variaciones en la identificación de glaciares rocosos, dada la dificultad de distinguirlos respecto a glaciares cubiertos a través de imágenes satelitales de media resolución (Racoviteanu *et al.* 2009).

Los volúmenes netos se calcularon sobre la base de las superficies mapeadas. Éstas mismas representan por consiguiente un factor muy sensible en el cálculo de volúmenes. Otros factores que influyeron en los resultados volumétricos fueron los detritos que cubren las lenguas de los glaciares y dificultan la delimitación de la extensión de los mismos. Hay que tener en cuenta que no siempre es factible derivar el volumen a partir de la superficie de un glaciar. Muchas veces los glaciares no presentan modificaciones en su superficie pero disminuyen el volumen por cambios de elevación (espesor). Este proceso no se puede abordar con el enfoque de *V-A-scaling* empleado en el presente estudio, sin embargo es posible conocer las variaciones volumétricas a través del balance de masa geodésico.

Por su parte, un informe elaborado por Geoestudios, (2011), realizó un análisis detallado de los glaciares San Francisco y Mirador El Morado. En dicho estudio, se calcularon volúmenes de glaciares a partir de mediciones de espesor empleando georadar (GPR). En ambos glaciares se observa que la superficie delimitada por Geoestudios es mayor (Tabla 5), lo que resulta a su vez en volúmenes mayores.

12.08.2020

En general, en los sectores con altas pendientes (glaciares colgantes y zona con seracs<sup>12</sup>), el *V-A scaling* sobreestima el volumen de los glaciares (Haeberli, 2016). Además, el error del método aumenta en glaciares pequeños. Las estimaciones para el glaciar San Francisco (Geotest, 2019) están en el orden de magnitud en comparación con el resultado de Geoestudios, mostrando una diferencia menor al 5%, según Chen & Ohmura (1990) (Tabla 6).

En el caso del glaciar Mirador El Morado se obtuvo una gran diferencia al comparar los volúmenes obtenidos en ambos estudios. Esta variación se explica por las distintas superficies consideradas en los dos estudios. Se destaca que a pesar de la sobreestimación de volúmenes para glaciares pequeños y de alta pendiente (condición que aplica al glaciar Mirador El Morado), el resultado del *V-A-scaling* de Geotest resulta en un menor volumen frente al volumen estimado por Geoestudios.

Se hace presente que el detalle de las variaciones experimentadas por los glaciares San Francisco y Mirador El Morado se entrega en cumplimiento de lo requerido por la DGA RM que mediante Ord. DGA RM N° 602 del 12 de abril de 2017, solicitó la preparación de una línea de base actual de los glaciares del Sitio Protegido, correspondiente al Monumento Natural El Morado.

---

<sup>12</sup> Seracs: Son un conjunto de complejas grietas y bloques de hielo fragmentado, de diversos tamaños y formas, producidos por cambios de pendientes.

12.08.2020

Tabla 6: Comparación resultados de superficie y estimación volumétrica de Geoestudios y resultados de este estudio, referente a la situación en el año 2010.

Glaciar	Geoestudios Situación en 2010		Geotest Situación en 2010		
	Superficie [km <sup>2</sup> ]	Volumen [hm <sup>3</sup> ]	Superficie [km <sup>2</sup> ]	(Bahr, 1997)	(Chen & Ohmura, 1990)
				Volumen [hm <sup>3</sup> ]	Volumen [hm <sup>3</sup> ]
<b>San Francisco</b>	1,47	60,5	1,74	58,5	63,0
<b>Mirador El Morado</b>	0,27	8,3	0,22	3,5	3,8

En general las estimaciones en glaciares más pequeños (0,10 a 0,25 km<sup>2</sup>) son más sensibles a los errores de delimitación.

Los cálculos de balance de masa entre 2017, 2018 y 2019 cuentan con una base mucho más sólida, ya que para los dos períodos (2017-2018 y 2018-2019) están disponibles imágenes LIDAR de alta resolución y procesado por la misma metodología. Además al aplicar el método de co-registración de Nuth & Kääb (2011), disminuye el error vertical en zonas de gran pendiente, permitiendo un mejor ajuste al momento de la sustracción de los DEMs.

Sin embargo, aun así existen fuentes de error debido al ángulo del disparo láser, calibración del sistema LIDAR, variación del GPS (*Global Positioning System*) al INS (*Inertial Navigation System*), pendiente del terreno, pos tratamiento de los datos, entre otros (Figura 13).

12.08.2020

Estos errores son normales y típicamente son atribuibles a los cambios en las condiciones de vuelo, por ejemplo: influencia de viento y altura de vuelo, las que generan variaciones en el ángulo de disparo del láser. Además hay que interpretar cuidadosamente el resultado de la sustracción de la imagen 2018 y 2017 ya que, la imagen de 2017 tiene más nieve que la imagen de 2018. Especialmente los glaciares descubiertos cuentan con capas de nieve ubicadas encima del cuerpo del glaciar, lo que resulta en un cambio de volumen que no corresponde al balance de masa de fines de temporada de ablación, sobreestimando el balance de masa negativo en unos cuantos milímetros. Esas magnitudes se encuentran dentro del error vertical para el periodo (0,2 m), lo que explicaría un balance de masa mayor para el periodo 2017-2018, en comparación con el período más reciente 2018-2019.

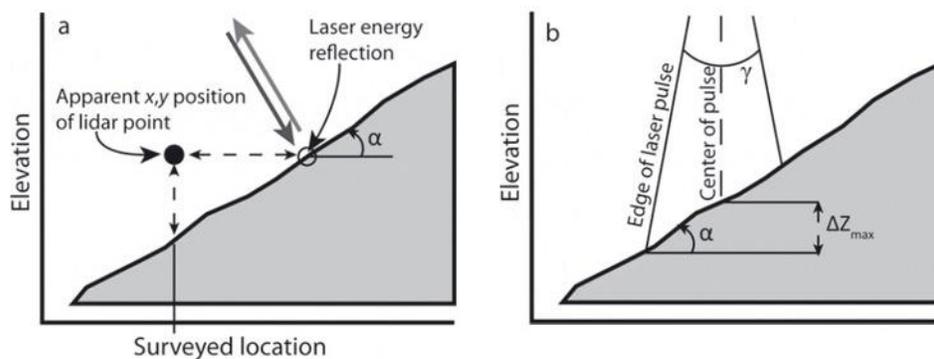


Figura 13: Errores inducidos por la pendiente del terreno: a) Error vertical inducido por errores horizontales; b) Error vertical ("Time-walk") inducido por la mancha láser extendida sobre terreno inclinado.  $\alpha$  = ángulo de inclinación;  $\gamma$  = divergencia del rayo láser;  $\Delta Z_{max}$  = error de elevación máximo;  $\Delta x, y, max$  = error horizontal máximo. Fuente: (Deems *et al.* 2013).

Las variaciones de espesor promedio de -1,05 m/año (periodo 2018-2019), que corresponde a una pérdida total de volumen 22.723.274 m<sup>3</sup> para los glaciares cubiertos y descubiertos, muestran al igual que otros estudios para los Andes, un acelerado derretimiento para los glaciares de Chile central durante los últimos 10 años (Braun *et al.* 2019; Burger *et al.* 2018; Dussailant *et al.* 2018; Farías-Barahona *et al.* 2019), período que a su vez coincide con la megasequía (Boisier *et al.* 2016; R. Garreaud *et al.* 2017; R. D. Garreaud *et al.* 2019).

12.08.2020

## 5. Conclusiones y recomendaciones

En primer término, cabe indicar que en cumplimiento de lo requerido mediante Ord. DGA RM N° 724 de 2 de julio de 2020, mediante la actualización del presente se ha hecho entrega de los antecedentes técnicos necesarios para tener por cumplido el compromiso establecido por la DGA RM, mediante Ord. DGA RM N° 602 del 12 de abril de 2017, en cuanto a contar con una línea de base de los glaciares del Monumento Natural El Morado.

Al respecto, las investigaciones demostraron un retroceso general de los glaciares en el área de estudio para el período analizado. Comparando la evolución de los glaciares estudiados con glaciares de referencia de características similares, se concluye que el comportamiento de retroceso de estos glaciares es parte de un proceso progresivo observado desde varias décadas, anteriores al inicio del Proyecto Hidroeléctrico Alto Maipo.

Se pudo constatar una reducción tanto de superficie como de volumen en los glaciares descubiertos y cubiertos durante el período de estudio (1955 a 2019). No se detectaron modificaciones en superficie de los glaciares rocosos.

Acerca de la metodología para la estimación de volúmenes de los glaciares, hay que tener presente que para este estudio no se han usado mediciones de espesor glaciar en terreno. Por ende, la calidad de los resultados obtenidos depende de la similitud de las propiedades físicas (altura, pendiente, etc.) que existan entre los glaciares incluidos en los estudios de Bahr *et al.* (1997) y Chen & Ohmura (1990) con los glaciares analizados en este informe.

En base a la aplicación de criterios de clasificación de glaciares rocosos elaborados según Janke *et al.* (2015) sobre la interpretación de las imágenes para el área de estudio, los glaciares rocosos se asociaron a las clases 4, 5 y 6 de la Tabla 3. A partir de esta identificación se estimó el contenido de detritos y el equivalente en agua respectivo (Anexo 3).

La variación del volumen total de los glaciares cubiertos y descubiertos para el período 2018-2019, fue de  $-22.723.274 \text{ m}^3$  (disminución), estimada a partir del balance de masa geodésico, con un promedio de disminución de elevación de  $-1,05 \text{ m}$  por año (período 2018-2019), similar a las pérdidas de elevación registradas por otros estudios en los Andes de Chile central.

12.08.2020

## Bibliografía

- Bahr, D. B. (1997). Width and length scaling of glaciers. *Journal of Glaciology*, 43(145), 557–562. <https://doi.org/10.1017/S0022143000035164>
- Barsch, D. (1996). Rockglaciers. *Rockglaciers. Series: Springer Series in Physical Environment, ISBN: 978-3-642-80095-5. Springer Berlin Heidelberg (Berlin, Heidelberg), Edited by Dietrich Barsch, Vol. 16, 16.*
- Boisier, J. P., Rondanelli, R., Garreaud, R. D., & Muñoz, F. (2016). Anthropogenic and natural contributions to the Southeast Pacific precipitation decline and recent mega-drought in central Chile. *Geophysical Research Letters*, 43(1), 413–421. <https://doi.org/10.1002/2015GL067265>
- Braun, M. H., Malz, P., Sommer, C., Fariás-Barahona, D., Sauter, T., Casassa, G., et al. (2019). Constraining glacier elevation and mass changes in South America. *Nature Climate Change*, 9(2), 130–136. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0375-7>
- Burger, F., Ayala, A., Farias, D., Shaw, T. E., Pellicciotti, F., Brock, B., et al. (2018). Interannual variability in glacier contribution to runoff from a high-elevation Andean catchment: understanding the role of debris cover in glacier hydrology. *Hydrological Processes*, 33(2), 214–229. <https://doi.org/10.1002/hyp.13354>
- Chen, J., & Ohmura, A. (1990). Estimation of Alpine glacier water resources and their change since the 1870s. *Hydrology in Mountainous Regions. I - Estimation of Alpine Glacier Water Resources and Their Change since the 1870s I - Hydrological Measurements; the Water Cycle (Proceedings of Two Lausanne Symposia)*, (193), 127–135. <https://doi.org/10.1021/jz900178u>
- Deems, J. S., Painter, T. H., & Finnegan, D. C. (2013, July). Lidar measurement of snow depth: A review. *Journal of Glaciology*. <https://doi.org/10.3189/2013JoG12J154>
- Dussailant, Berthier, E., & Brun, F. (2018). Geodetic Mass Balance of the Northern Patagonian Icefield from 2000 to 2012 Using Two Independent Methods. *Frontiers in Earth Science*, 6(February), 1–13. <https://doi.org/10.3389/feart.2018.00008>
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., et al. (2019). South American Andes elevation changes from 2000 to 2018, links to GeoTIFFs. PANGAEA. <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.903618>
- Fariás-Barahona, D., Vivero, S., Casassa, G., Schaefer, M., Burger, F., Seehaus, T., et al. (2019). Geodetic Mass Balances and Area Changes of Echaurren Norte Glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote Sensing*, 11(3),

12.08.2020

260. <https://doi.org/10.3390/rs11030260>

Frauenfelder, R. (2004). *Regional-scale Modelling of the Occurrence and Dynamics of Rockglaciers and the Distribution of Paleopermafrost*. University of Zurich.

Frey, H., Machguth, H., Huss, M., Huggel, C., Bajracharya, S., Bolch, T., et al. (2014). Estimating the volume of glaciers in the Himalayan&ndash;Karakoram region using different methods. *The Cryosphere*, 8(6), 2313–2333. <https://doi.org/10.5194/tc-8-2313-2014>

Garreaud, R., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., et al. (2017). The 2010-2015 mega drought in Central Chile: Impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, (April), 1–37. <https://doi.org/10.5194/hess-2017-191>

Garreaud, R. D., Boisier, J. P., Rondanelli, R., Montecinos, A., Sepúlveda, H. H., & Veloso-Aguila, D. (2019). The Central Chile Mega Drought (2010–2018): A climate dynamics perspective. *International Journal of Climatology*, (January), joc.6219. <https://doi.org/10.1002/joc.6219>

Geoestudios. (2011). *Captura de información y evaluación de glaciares San Francisco y Mirador del Morado del año 2010*.

Geotest. (2018). *Informe Consolidado de Línea de Base 2018. Informe 4017014.1*. Santiago, Chile.

Haeberli, W. (2016). Brief communication: On area- and slope-related thickness estimates and volume calculations for unmeasured glaciers. *The Cryosphere Discussions*, (January), 1–18. <https://doi.org/10.5194/tc-2015-222>

Huss, M. (2013). Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*, 7(4), 877–887. <https://doi.org/DOI 10.5194/tc-7-877-2013>

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. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.03.034>

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), 61–72. <https://doi.org/10.3189/2013AoG64A107>

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

12.08.2020

Racoviteanu, A. E., Paul, F., Raup, B., Khalsa, S. J. S., & Armstrong, R. (2009). Challenges and recommendations in mapping of glacier parameters from space: Results of the 2008 global land ice measurements from space (GLIMS) workshop, Boulder, Colorado, USA. *Annals of Glaciology*, 50(53), 53–69. <https://doi.org/10.3189/172756410790595804>

## **Anexos**

Anexo 1 Tabla de identificación de todos los glaciares.

Anexo 2 Tablas de superficies, volúmenes y equivalente en agua de glaciares.

Anexo 3 Tabla porcentaje de detritos de glaciares rocosos y equivalente en agua.

Anexo 4 Tabla balances de masa geodésico de glaciares.

Anexo 5 Mapa balance de masa geodésico de glaciares 2017 -2018.

Anexo 6 Mapa balance de masa geodésico de glaciares 2018 -2019.

Anexo 7 DGA: Balance de masa geodésico glaciar San Francisco 2009 – 2015.