



Variaciones de área y volumen del sistema glaciar San Francisco (1955-2020), a partir de imágenes satelitales y ley de potencias, Cuenca del Río Maipo

Area and volume variations of the San Francisco glacier system (1955-2020), from satellite images and power law, Maipo River Basin

Solange Margarita Jara Ortega*¹ Gino Casassa Rogazinski²

Recibido: 29/09/2021

Aceptado: 05/10/2021

*Autor de correspondencia

Resumen

El retroceso de las masas glaciares, se ha vinculado a los efectos del cambio climático. Lo anterior, es especialmente preocupante en la zona central de Chile, derivado que una parte importante de los cauces son alimentados por el derretimiento glaciar en el verano; pese a esto, la investigación en este ámbito es acotada, y este estudio pretende aportar una metodología inicial que pueda ser utilizada en estudios complementarios y que tengan como propósito gestionar mejor este recurso. Este trabajo centra su análisis en la subsubcuenca del río Volcán, en San José de Maipo, Región Metropolitana, Chile, específicamente en la porción de hielo que ocupa el Glaciar San Francisco (SF), y los glaciaretos (1, 2 y 3) y Mirador del Morado (MM). Estos cuerpos de hielo se estudian de forma espacio temporal en el periodo comprendido entre los años 1955-2020. Para ello, se cuantificó el área glaciar a partir de imágenes satelitales (Landsat-7, Landsat-8 OLI y Sentinel-2) y fotografías aéreas (vuelo hycon-55), y con posterioridad estimar la variación de sus volúmenes sobre la base de ecuaciones empíricas del tipo ley de potencias, propuestas por autores como Chen y Ohmura (1990) y Bahr et al. (1997), entre otros. Los resultados evidencian una disminución sostenida y significativa de área y volumen para todos los cuerpos glaciares contenidos en el sistema de estudio. Esta variación negativa corresponde al 70% de área original, lo que se traduce en la pérdida de superficie de todas las masas de hielo en estudio, en función del tiempo. Por otra parte, todas las estimaciones de volumen a partir de las expresiones matemáticas propuestas, presentan una clara caída advirtiendo la disminución de sus volúmenes en función del tiempo.

Palabras clave: Variación de Área, Variación de Volumen, Glaciares, ley de potencias

Abstract

This research focuses its analysis on the sub-basin of the Volcan River, in San José de Maipo, RM. Specifically in the portion of ice that occupies the San Francisco Glacier (SF), glaciers SN (1, 2 and 3) and Mirador del Morado (MM). These ice bodies were studied in a space-time way between 1955-2020. To do this, the glacier area was quantified from satellite images (Landsat-7, Landsat-8 OLI and Sentinel-2) and aerial photographs (hycon-55 flight), and subsequently, the variation of its volumes was estimated based on empirical equations of the power law type, proposed by authors such as Chen and Ohmura (1990) and Bahr et al. (1997), among others. The results show a sustained and significant decrease in area and volume for all the glacial bodies contained in the study system. This negative variation corresponds to 70% of the original area, which translates into the loss of surface of all the ice masses under study, as a function of time. At the same way, all volume estimates based on the proposed mathematical expressions show a clear drop, and the decrease in their volumes as a function of time.

Keywords: Area Variation, Volume Variation, Glaciers, power law

1 Universidad de Talca, Chile

2 Unidad de Glaciología y Nieves, Dirección General de Aguas, DGA, Chile

1. INTRODUCCIÓN

En términos de almacenamiento de agua, los glaciares son importantes fuentes de reserva y regulación de caudales, pero como consecuencia del cambio climático, se han evidenciado alteraciones en el ciclo hidrológico sin precedentes en cientos de miles de años. En varias regiones del mundo las precipitaciones y la sequía se han intensificado. El incremento de la temperatura ha generado grandes impactos como el continuo incremento en el nivel del mar. El aumento en el deshielo del permafrost, el derretimiento de glaciares, la disminución de la capa de hielo estacional y la pérdida de hielo marino en el Ártico en verano, son solo muestras de los cambios que ya se están produciendo y que no podrán ser revertidos sino hasta dentro de varios siglos o quizás milenios (IPCC, 2021). Para el caso de Chile, en los últimos 30 años, los patrones de retroceso y adelgazamiento glaciar se han acelerado y duplicado. Este fenómeno sería explicado por el calentamiento de la atmósfera durante el siglo XX y lo que va del siglo XXI (BCN, 2016). De este modo, los glaciares contenidos en los Andes centrales, para el caso de Chile, adquieren un papel fundamental de abastecimiento de agua, del que depende gran parte de la población que habita la Región Metropolitana, donde se ubica Santiago, la ciudad capital de Chile. Solo el río Maipo atiende cerca del 70% de la demanda actual de agua potable de la región, y con una superficie de 15,304 km², abastece cerca de un 90% de las demandas de regadío (DGA, 2004). Sin embargo, el potencial almacenamiento de este recurso en su forma glacial, cobra aun mayor relevancia, si se considera el aumento de los periodos de sequía en la última década y cómo la preservación de esta reserva hídrica podría mitigar estos impactos (Garreaud et al. 2017). En este sentido, da la impresión que de la combinación de aumentos de temperatura y la declinación de las precipitaciones, ha resultado un ascenso de la línea de nieves, que explicaría algunos cambios glaciares (Carrasco et al., 2011), aunque se estima que existen otros factores no-climáticos incidiendo en su detrimento. Entre estos factores, la intervención antropogénica de estas masas de hielo producto de la gran minería en la zona, son hechos únicos a nivel mundial y fueron estudiados por primera vez por los autores Brenning, A. y, Azócar G.F. en el año 2008, convirtiéndose en un factor limitante adicional, y que, junto a los cambios en el clima, han mermado el equilibrio en los regímenes hidrológicos, la mantención de

distintos ecosistemas, el consumo humano, y las actividades productivas, entre otras. El esfuerzo que hay que hacer en este sentido, es ampliar el campo de investigación hacia todas aquellas relaciones que permitan establecer un vínculo entre la pérdida de masa de hielo y cómo esto influye en la producción de agua en las cuencas, pues la seguridad hídrica de la región está en juego (Bocchiola, et al. 2018). Para ello, en este trabajo, se realiza la caracterización espacio-temporal de cuerpos de hielo circunscritos a la subsubcuenca del río Volcán, ubicada en la comuna de San José de Maipo, Región Metropolitana de Chile. El sistema glaciar en estudio lo conforman cinco cuerpos de hielo, donde la masa predominante es la que ocupa el glaciar San Francisco. El objetivo principal de este trabajo es determinar entre los años 1955-2021, los cambios que han experimentado estas masas glaciales en torno a su área y a partir de ello definir las variaciones en el cálculo de sus volúmenes, a través de una forma empírica utilizada en el mundo por diversos autores que proponen leyes de potencias para relacionar estas variables (Huenante, 2018). Se busca con dichas experiencias, ajustar el cálculo a las singularidades de este territorio, a las limitantes e incertidumbres del mapeo de los cuerpos de hielo, a la calidad de las imágenes satelitales y al ojo discriminador, con el fin de generar insumos que puedan ser consultados en estudios y escenarios futuros.

2. METODOLOGÍA

2.1 Área de estudio

Prácticamente la totalidad del territorio de la región Metropolitana es comprendido por la cuenca del río Maipo, ubicada entre los paralelos 32°55'-34°15' latitud sur y meridianos 69°55'-71°33' longitud oeste. El río Maipo tiene una longitud de 250 km y abastece una superficie de 15.304 km², atendiendo alrededor del 70% de la demanda actual de agua potable de la región y cerca de un 90% de las demandas de riego (DGA, 2004).

Río Volcán

El río Volcán, formado por los deshielos del Volcán San José (5,821m), es un afluente cordillerano andino del Maipo, y tiene un trayecto que recorre los poblados de Baños Morales, El Volcán, Queltehues y Romeral. Desemboca en el río Maipo a la altura de San Gabriel, donde se une con el río el Yeso. En toda la subsubcuenca es posible apreciar un marcado

régimen nival, con caudales mayores en época estival, producto de los deshielos cordilleranos y caudales menores en los meses invernales. En esta zona, se emplaza el estudio con particularidad en la subsubcuenca del río Volcán (figura 1), denominada Glaciar San Francisco, al norte de Baños Morales en lo que corresponde al monumento natural El Morado

y que constituye un área silvestre protegida bajo la custodia de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Entre los 1850 m y los 450 m se encuentran contenidos cinco cuerpos glaciares que conforman el sistema glaciar en estudio. Estos son el Glaciar San Francisco, SN1, SN2, SN3, y Mirador del Morado.

SUBSUBCUENCA Y MICROCUENCA RIO VOLCÁN

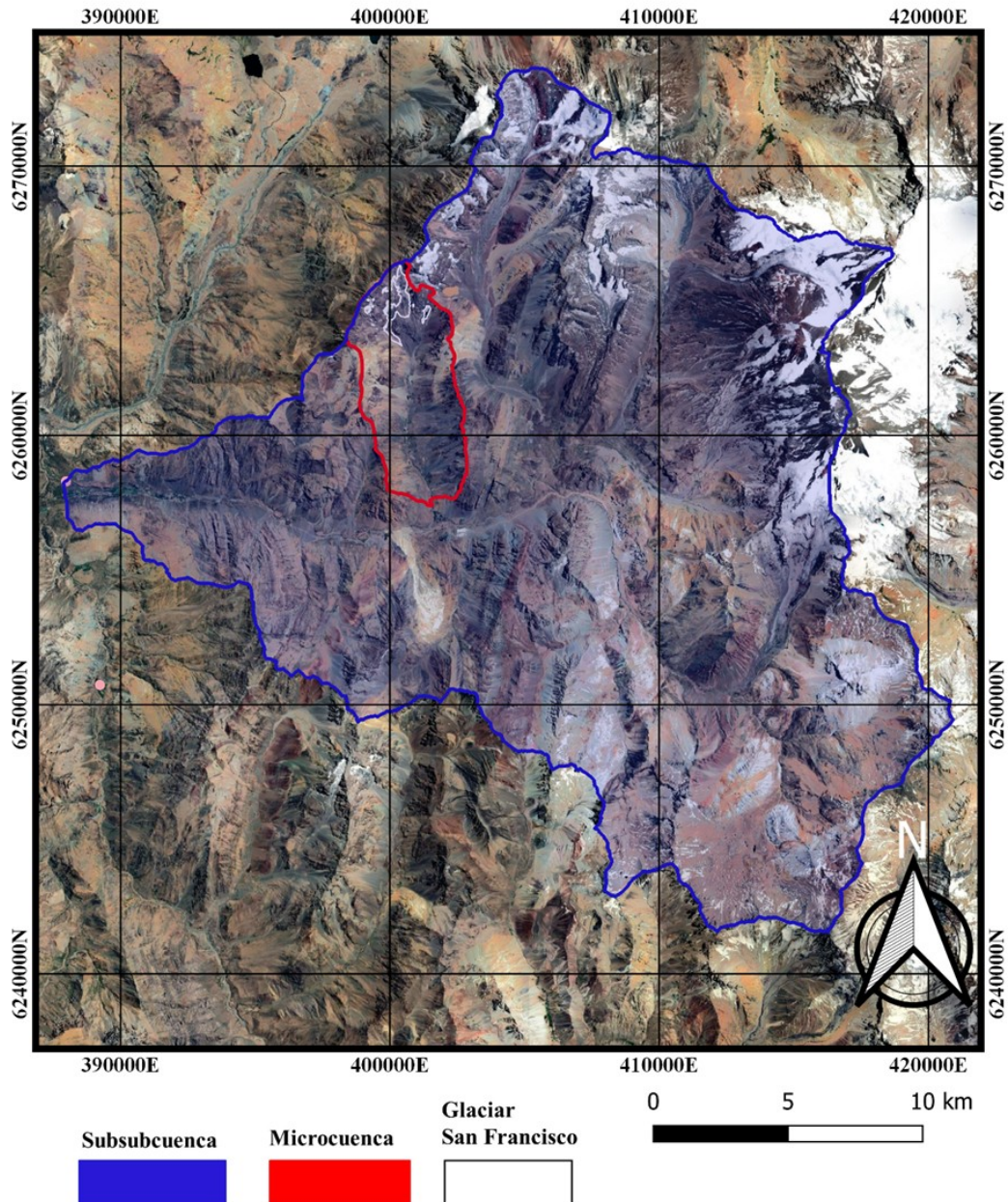


Figura 1. Área de estudio

2.2 Captura de datos

Superficie glaciar

Desde el USGS (United States Geological Survey), se descargó un set de imágenes satelitales enmarcadas en la zona de estudio para los distintos años, con el propósito de delimitar la superficie glaciar y posteriormente estimar la variación de ésta en el periodo de estudio. Estas fueron imágenes Landsat7 ETM+ para los años 200-2003, Landsat8-OLI para los años 2013-2015 (ambos sets de imágenes tratados en una combinación de bandas RGB 753 y 754 recomendado por UGN), y Sentinel-2 para los años 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, tratadas en una combinación de bandas RGB 843. Particularmente el año 1955, fue procesado a partir de fotografías aéreas correspondientes al vuelo HYCON, que fueron georreferenciadas para los mismos fines. La periodicidad de los satélites y la calidad de imágenes multiespectrales y pancromáticas definieron el proceso.

2.3 Procesamiento

Áreas

El primer paso en la elaboración de cálculo de áreas del sistema glaciar, consiste en delimitar a través de una capa vectorial (shp) el polígono correspondiente al cuerpo de hielo de interés. Para ello fue necesaria la descarga de imágenes satelitales (Landsat7 ETM+, Landsat8-OLI Sentinel-2) a través de la plataforma online Earthexplorer de USGS. Los criterios de selección de dichas imágenes fueron principalmente, la baja cobertura de nubes y nieve en el periodo estudiado (periodo estival, meses febrero- marzo-abril). Para cada año se descargó un set de al menos tres imágenes satelitales que fueron tratadas en una combinación de bandas (RGB) 753-754 (Natural con corrección atm) para Landsat y 843 (falso color) para Sentinel. Posterior a ello y usando las imágenes corregidas (+banda pancromática 1,5 m de resolución espacial), a través del software Qgis, se delimitó el contorno del sistema glaciar para los distintos años y se calculó su área. Sin embargo, respecto a los criterios de delimitación de glaciares, la resolución de imágenes Landsat (30 metros para bandas multiespectrales y 15 para banda pancromática) y Sentinel (20 metros para bandas multiespectrales y 10 para banda pancromática), no permitía distinguir en algunos casos y de forma clara los márgenes del glaciar en estudio, debido a la presencia de sombras intensas en algunos lugares de la imagen guía. Por

este motivo se recurrió a la función imágenes históricas de Google Earth y en Qgis a la función BaseMap como apoyo. Los años de estudio para los cuales se descargaron estas imágenes son: 2000 Landsat7 ETM+, 2003 Landsat7 ETM+, 009 Landsat8-OLI, 2015 Landsat8- OLI, 2016 Sentinel-2, 2017 Sentinel-2, 2018 Sentinel-2, 2019 Sentinel-2 y, 2020 Sentinel-2. Por otra parte, para el año 1955 la UGN facilitó un set de fotografías aéreas no rectificadas, del vuelo HYCON, donde dos de ellas, correspondían a la zona de interés. Estas fueron tratadas con el georreferenciador del software Qgis, y una vez rectificadas, se usaron de base para el mapeo de contorno del glaciar en ese año. Sin embargo, adicional a lo anterior fue necesario contar con ortofotos que fueron facilitadas por la UGN para contrastar singularidades en el terreno, lo que fue delimitado como masa glaciar. De igual forma se elaboraron además otros insumos a partir de los DEMs, tales como mapa dependiente, mapa de sombras (Hillshade), y áreas de control (Zonas donde no existe variación entre periodos, hitos y rocas). Una vez demarcadas todas las áreas del sistema glaciar y para los años de estudio, se obtienen las diferencias de superficie entre periodos y se estima con estos insumos el volumen asociado a cada año.

Volúmenes

Para poder estimar el volumen del sistema glaciar a partir de las áreas, se recurrió a la literatura. Varios autores proponen ecuaciones empíricas que relacionan área y volumen de glaciares de todo el planeta. Los autores Chen y Ohmura (1990) obtienen una relación entre área y volumen para glaciares alpinos a través de radio eco sondaje y perfiles sísmicos. Bahr et al. (1997), en cambio, proponen una ecuación ajustada a las características de forma de un glaciar, como su ancho, largo, profundidad y condiciones de borde para el cálculo de su volumen. Radic y Hock (2010), por su parte, luego de analizar cerca de 123,000 glaciares exponen una formula derivada de un método estadístico que calcula volúmenes de hielo a nivel global y local. En tanto, autores más recientes, como Huss y Farinotti (2012) proponen una ecuación validada en más de 300 glaciares de distintas partes del mundo; asimismo, Grinsted (2013), distingue subgrupos de cuerpos de hielo, hasta 25 km² o mayores logrando una estimación también a nivel global. Por último, Huenante (2018), el único autor chileno, estudia 18 glaciares de la zona central de los Andes, con la

finalidad de proponer un modelo que pueda ser adaptado a las condiciones de la cordillera chilena. Estos estudios son hoy muy relevantes, pues permiten usar sus resultados como referencia para el cálculo de volúmenes de masas de hielo. A continuación de describen las seis ecuaciones utilizadas para tales efectos:

Chen y Ohmura (1990), obtienen una fórmula empírica entre la relación Área/Volumen para glaciares alpinos, a través de la medición de estas variables con radio eco sondaje y perfiles sísmicos (Chen y Ohmura, 1990).

Bahr et al. (1997), ajustan ecuaciones concluyendo que el volumen de un glaciar depende del producto de sus características de forma, tales como el ancho, el largo y la profundidad, además de sus condiciones de borde.

Radic y Hock (2010), luego de analizar cerca de 123.000 glaciares, exponen un método estadístico que deriva volúmenes de hielo a nivel global y regional.

Huss y Farinotti (2012), presentan una nueva aproximación al cálculo del espesor de hielo, validando sus resultados en más de 300 glaciares en distintas partes del mundo.

Grinsted (2013), realiza una nueva estimación de volumen de hielo glaciar a nivel global. Para ello calculó distintos subgrupos de cuerpos de hielo, entre los cuales destacan casquetes de hielo y glaciares mayores a 25 km², y glaciares de tamaño menor a 25 km².

Huenante (2018), luego de analizar detalladamente 18 glaciares de la zona central de los Andes, propone un modelo que se adapte a las condiciones de la cordillera chilena.

Tabla 1. Leyes de potencias

Chen y Ohmura (1990) Ecuación 1	$V = 28,5S^{1.35}$
Bahr et al. (1997) Ecuación 2	$V = 27,6S^{1.375}$
Radic y Hock (2010) Ecuación 3	$V = 36,5S^{1.35}$
Huss y Farinotti (2012) Ecuación 4	$V = 28,4028S^{1.327}$
Grinsted (2013) Ecuación 5	$V = 28,4028S^{1.327}$
Huenante (2018) Ecuación 6	$V = 2,45S^{1.27}$

$$V = C * S^Y \quad (1)$$

Donde

- V Volumen de un glaciar en base al área de su superficie (Hm³)
- S Superficie glaciar (km²)
- C, Y Constantes empíricas

3. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

3.1 Variación en área

Los resultados permiten obtener de forma gráfica una variación negativa constituyendo esto una disminución del área de todos los cuerpos glaciares en estudio. Particularmente el área varía un 70% respecto al área original en el periodo estudiado entre los años 1955-2020. Por tanto, todas las masas de hielo consideradas en el sistema pierden superficie a lo largo del tiempo. Dicha información es corroborada a través del test Mann Kendall, el que arroja valores negativos significativos para todos los

cuerpos de hielo en el periodo de estudio, demostrando una caída sostenida en los valores, y por ende se traduce en una caída de la superficie glaciar en función del tiempo. Se observa, además, un quiebre positivo el año 2013, representado en azul en la Figura 3 y que se aleja de la línea de tendencia, o que posiblemente puede ser explicado como un error en la delimitación del área para ese año, pues algunas imágenes utilizadas como insumo para la delimitación presentaban deficiencias en su calidad, producto de zonas de sombras fuertes. No obstante, cabe considerar que pueda tratarse de un leve incremento superficial, tal y como puede ocurrir para otros casos de glaciares en Chile y el mundo.

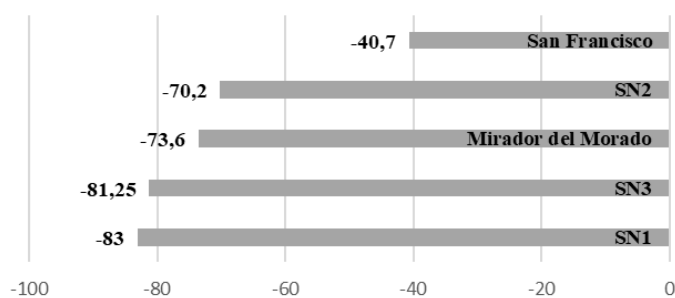


Figura 2. Variación anual de área periodo 1955-2020

VARIACION AREAL SISTEMA GLACIAR 1955 Y 2020

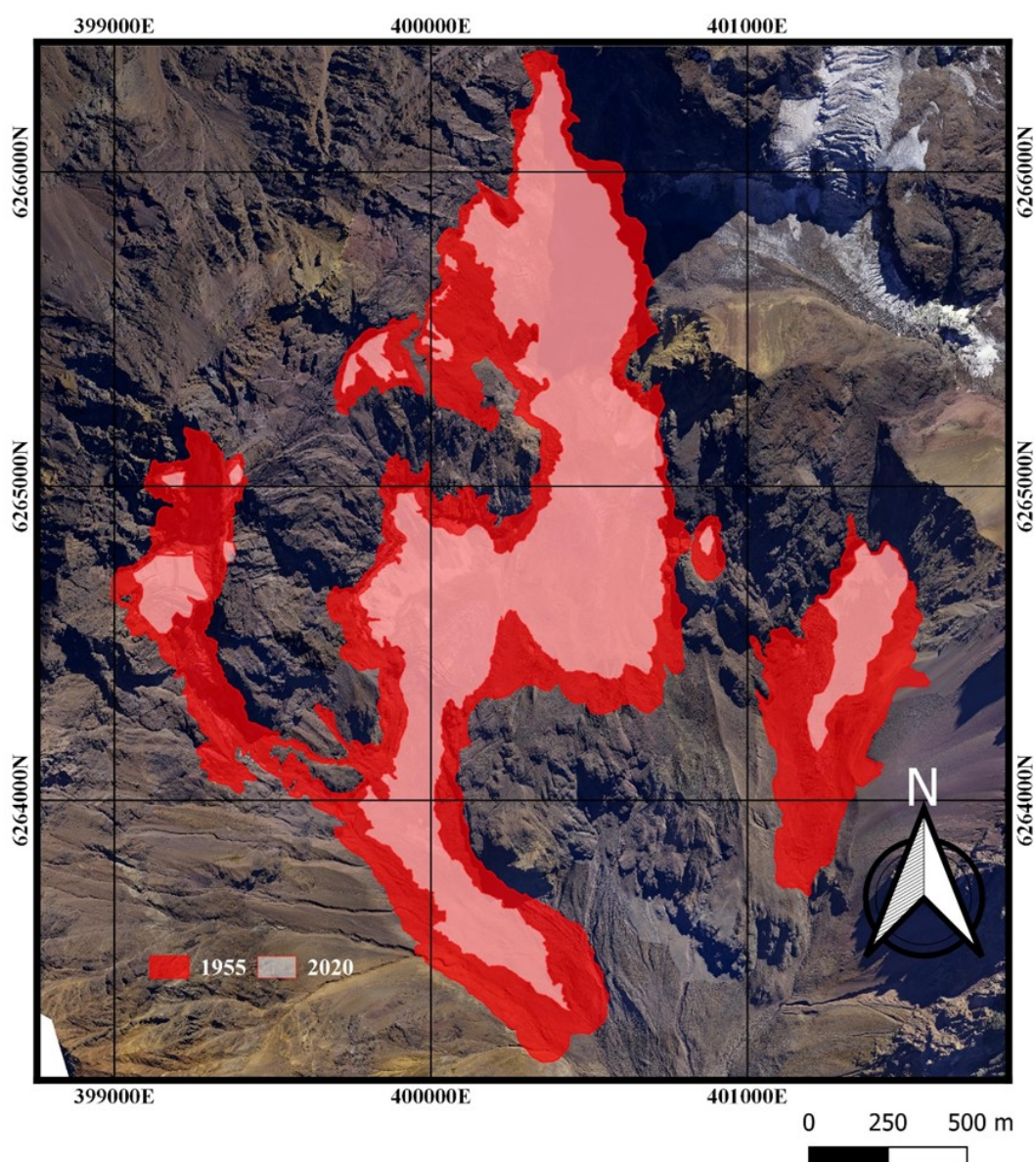


Figura 3. Variación de área

Tabla 2. Resultados Mann-Kendall para Área glaciar (1955-2020)

Glaciar	Variable	Z	Valor p
SF	Área	-4.20*	2.62E-05
MM		-4.20*	2.62E-05
SN1		-3.27*	1.08E-03
SN2		-4.14*	3.49E-05
SN3		-3.92*	8.99E-05

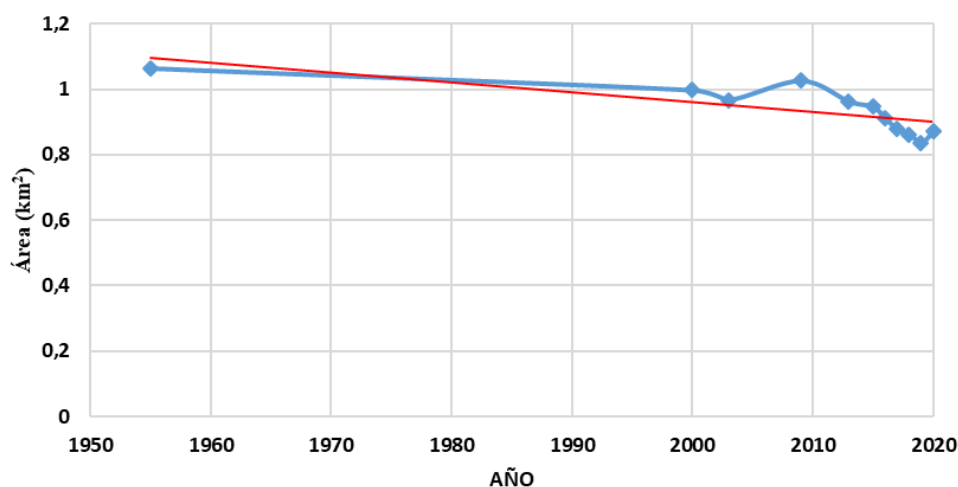


Figura 4. Variación anual de Área glaciar (1955-2020)

Tabla 3. Estimación de volumen

Año	Área (km ²)	Ec. 1 (1990) (Hm ³)	Ec. 2 (1997) (Hm ³)	Ec. 3 (2010) (Hm ³)	Ec.4 (2012) (Hm ³)	Ec. 5 (2013) (Hm ³)	Ec. 6 (2018) (Hm ³)
1955	1.064	47.979	46.601	62.538	46.396	63.963	34.529
2000	0.997	42.632	41.391	55.439	41.388	57.815	31.038
2003	0.967	40.244	39.066	52.275	39.145	55.038	29.466
2009	1.026	40.73	39.527	52.82	39.729	56.43	30.078
2013	0.962	39.354	38.198	51.085	38.323	54.095	28.912
2015	0.946	37.895	36.776	49.148	36.955	52.426	27.961
2016	0.91	35.591	34.534	46.11	34.772	49.629	26.403
2017	0.878	33.323	32.326	43.115	32.629	46.92	24.883
2018	0.862	31.921	30.961	41.256	31.314	45.307	23.966
2019	0.836	30.098	29.187	38.853	29.587	43.106	22.735
2020	0.871	27.718	26.856	35.608	27.472	41.193	21.461

3.2 Variación en volumen

Como se señaló, se probaron las fórmulas propuestas por diversos autores, para calcular el volumen de hielo de cada cuerpo glaciar a partir de su área, obteniéndose lo que se presenta en la tabla 3. De lo anterior, se desprende que los valores más bajos de estimación, son los entregados por la fórmula de Huenante. Esto ocurre porque el autor propone un ajuste de volumen de hielo para glaciares de Chile, equivalente a los Andes Centrales. Sin embargo, los valores obtenidos de los otros 5 autores son primeras aproximaciones utilizadas de forma global para el

cálculo de volúmenes de hielo en otras zonas geográficas del mundo y permiten una aproximación al cálculo. Pero lo medular es que, se distingue para todas las expresiones aplicadas, una notoria caída en términos de volumen para todo el sistema glaciar en estudio, como lo muestra la figura 5. Lo anterior se ve corroborado por la prueba estadística de tendencia Mann-Kendall, aplicada a los volúmenes obtenidos para las distintas fórmulas. Esta se manifiesta en caídas, sostenidas y significativas en el tiempo, con valores-Z menores a -1.96, lo que equivale a un nivel de significancia del 5%.

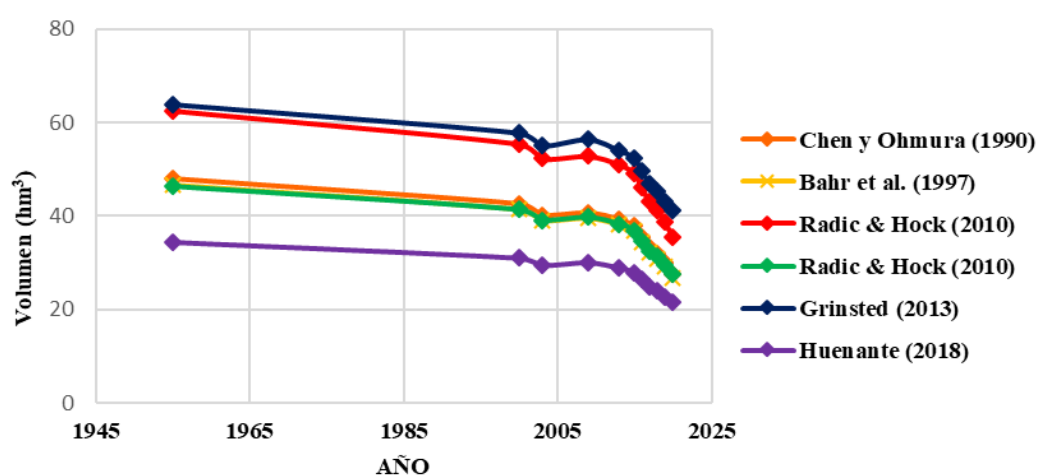


Figura 5. Estimación de volumen para el sistema glaciar (1955-2020)

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Área

- El sistema glaciar en estudio conformado por los glaciares San Francisco, Mirador del Morado, SN1, SN2 Y SN3, presenta una disminución en su área de 61.2%, equivalente a la reducción de 0.922 km² de superficie total para el año 2019, respecto al año 1955.
- El glaciar San Francisco presenta una disminución de 66.6% en su área, equivalente a la reducción de 0.576 km² de superficie para el año 2019, respecto al año 1955.
- El glaciar Mirador del Morado presenta una disminución de 51.9% en su área, equivalente a la reducción de 0.15 km² de superficie para el año 2019, respecto al año 1955.

- El glaciarete SN1 (glaciarete >0.0025 km²), presenta una disminución de 46.2% en su área, equivalente a la reducción de 0.154 km² para el año 2019, respecto al año 1955.
- El glaciarete SN2 (glaciarete >0.0025 km²), presenta una disminución de 32.6% en su área, equivalente a la reducción de 0.031 km² de superficie para el año 2019, respecto al año 1955.
- El glaciarete SN3 (glaciarete >0.0025 km²), presenta una disminución de 31.3% en su área, equivalente a la reducción de 0.005% de superficie para el año 2019, respecto al año 1955.

Volumen

- Chen & Ohmura: un volumen de 71.2 km³ para el año 1955 y de 38.6 km³ para el año

- 2019, lo que se traduce en la disminución de un 54.3% del volumen total del sistema.
- Bahr et al.: un volumen de 69 km³ para el año 1955 y de 37.4 km³ para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 54.2% del volumen total del sistema.
 - Radic & Hock: un volumen de 91.6 km³ para el año 1955 y de 49.4 km³ para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 53.9% del volumen total del sistema.
 - Huss & Farinotti: un volumen de 70.5 km³ para el año 1955 y de 38.6 km³ para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 54.8% del volumen total del sistema.
 - Grinsted: un volumen de 105.8 km³ para el año 1955 y de 60 km³ para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 56.7% del volumen total del sistema.
 - Huenante: un volumen de 55 km³ para el año 1955 y de 30.8 km³ para el año 2019, lo que se traduce en la disminución de un 55.9% del volumen total del sistema.

Tabla 4. Resultados Mann-Kendall para la estimación de volúmenes (1955-2020)

Glaciar	Volumen	Z	Valor p
San Francisco	Chen & Ohmura	-4.20*	3.00E-05
	Bahr et al.	-4.20*	3.00E-05
	Radic &Hock	-4.20*	3.00E-05
	Huss & Farinotti	-4.20*	3.00E-05
	Grinsted	-4.20*	3.00E-05
	Huenante	-4.20*	3.00E-05
Mirador Del Morado	Bahr et al.	-4.20*	3.00E-05
	Radic &Hock	-4.20*	3.00E-05
	Huss & Farinotti	-4.20*	3.00E-05
	Grinsted	-4.20*	3.00E-05
SN1	Huenante	-4.20*	3.00E-05
	Chen & Ohmura	-3.27*	1.00E-03
	Radic &Hock	-3.27*	1.00E-03
	Huss & Farinotti	-3.27*	1.00E-03
SN2	Grinsted	-3.27*	1.00E-03
	Huenante	-3.27*	1.00E-03
	Chen & Ohmura	-4.14*	3.00E-05
	Bahr et al.	-4.14*	3.00E-05
SN3	Huss & Farinotti	-4.14*	3.00E-05
	Grinsted	-4.14*	3.00E-05
	Huenante	-4.14*	3.00E-05
	Chen & Ohmura	-4.00*	9.00E-05
	Bahr et al.	-4.00*	9.00E-05
	Radic &Hock	-4.00*	9.00E-05
	Huss & Farinotti	-4.00*	9.00E-05
	Grinsted	-4.00*	9.00E-05
	Huenante	-4.00*	9.00E-05

SF: San Francisco, MM: Mirador del Morado, SN: Sin Nombre.

El análisis del comportamiento de las áreas durante el periodo en estudio, permite constatar que existe una disminución sostenida y significativa de la superficie en el tiempo de todos los cuerpos glaciares que conforman el sistema San Francisco, y se ve corroborado a través del test de tendencias de Mann Kendall para todas las ecuaciones utilizadas en la estimación de volumen en función del área glaciar.

Por otra parte, los efectos en la disminución del área vinculan de forma directa la pérdida de volumen de las masas de hielo, pues la aplicación de todas las funciones matemáticas a las que se recurrió para estimar el volumen del sistema, definió un decrecimiento sostenido y significativo durante el periodo 1955-2020.

En términos de retroceso, no es posible definir en base a los resultados de este estudio, cuál o cuáles son los factores que lo controlan, sin embargo, para estudios posteriores debería contarse con parámetros climáticos, precipitaciones, caudales, balance de

masa, balance de energía, y línea de nieves, entre otros, los que podrían ayudar a explicar simultáneamente a qué factores responde el ritmo de este retroceso y si existe sincronidad en ello respecto a otros cuerpos glaciares vecinos.

Por último, este estudio puede ser usado como insumo para la elaboración del balance de masa del sistema glaciar San Francisco y como referencia en la validación de volúmenes de hielo equivalentes en agua que se obtengan de dicho cálculo, respecto a los volúmenes calculados en esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

Los autores de este trabajo, quisieran agradecer a la Unidad de Glaciología y Nieves de la Dirección General de Aguas, por el apoyo en la realización de la memoria de pregrado que dio pie para la elaboración de este artículo.

REFERENCIAS

- Bahr, D.; Meier, M.; Peckham, S. (1997). The physical basis of glacier volume-area scaling. *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 102 (B9): 20355-20362. <https://doi.org/10.1029/97JB01696>
- BCN (Biblioteca del Congreso Nacional). (2016). Informe Glaciares de Chile. Departamento de Estudios, Extensión y Publicaciones, Asesoría Técnica Parlamentaria 281 (3-4): 242-268
- Bocchiola, D.; Soncini, A.; Senese, A. y Diolaiuti G. (2018). Modeling hydrological components of the Rio Maipo of Chile, and their prospective evolution under climate change. *Department of Environmental Science and Policies, Università di Milano, Italy* 6 (3):57. <https://doi.org/10.3390/cli6030057>
- Carrasco, J., Casassa, G., Pizarro, R., Saravia, M. (2011). "Impactos del Cambio Climático, Adaptación y Desarrollo en las Regiones Montañosas de América Latina". DOI:10.13140/RG.2.1.2926.6804
- Casassa, G.; Apeim, A.; Bustamante, M.; Marangunic, C.; Salazar, C., & Soza, D. (2015). Contribución Hídrica de glaciares en el estero Yerba Loca y su extrapolación a la cuenca del Río Maipo. XIV Congreso Geológico Chileno, 768-772.
- Castillo, Y. (2015). Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del Río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado. Tesis para optar al grado de Magister Universidad de Chile. Santiago, Chile. 54p.
- Chen, J.; Ohmura, A. (1990). Estimation of alpine glacier water resources and their change since the 1870s. in *Proceedings of two Lausanne Symposia, August 1990. Department of Geography, Swiss Federal Institute of Technology. Zurich, Switzerland.* 127-135.
- DGA (Dirección General de Aguas). (2004). Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivos de calidad cuenca del rio Maipo.
- Farinotti, D.; Huss, M.; Bauder, A.; Funk, M. (2009). An estimate of the glacier ice volume in the Swiss Alps. *Global and Planetary Change* 68: 225-231.
- DOI: 10.1016/j.gloplacha.2009.05.004

- Grinsted, A. (2013). An estimate of global glacier volume. (en línea). *The Cryosphere* 7: 141–151.
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., and Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21, 6307–6327, <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>, 2017.
- Huenante, J. (2018). Procesamiento y análisis de radio eco-sondaje (RES) sobre glaciares chilenos: Relación entre volumen de hielo y área superficial. Tesis para optar al grado de Magister. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 103p.
- Huss, M.; Farinotti, D. (2012). Distributed ice thickness and volume of all glaciers around the globe. (en línea). *J. Geophys. Res.* 117: F04010. Disponible en <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2012JF002523>
- IPCC, (2021): Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press.
- Rivera, A.; Casassa, G.; Acuña, C.; Lange, H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. (en línea). *Investig. Geogr. Chile* 34:29-60.
- Radic, V., Hock, R. (2010). Regional and global volumes of glaciers derived from statistical upscaling of glacier inventory data. *Journal Of Geophysical Research, Earth Surface*.
- Segovia, A.; Videla, Y. (2017). Caracterización glaciológica de Chile. Tesis para optar al grado de Magister. Universidad de Chile, Santiago, Chile. 24p.



Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International
CC BY-NC-SA 4.0 license