



**GOBIERNO DE CHILE
MINISTERIO DE OBRAS PÚBLICAS
DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS
UNIDAD DE GLACIOLOGÍA Y NIEVES**

**APOYO PARA EL MONITOREO DE DETALLE
INTENSIVO DEL GLACIAR SUR-ORIENTAL DEL
VOLCÁN MOCHO, REGIÓN DE LOS RÍOS,
MACROZONA SUR, 2020-2021
Informe Final**

**REALIZADO POR:
UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
S.I.T. N°479**

Santiago, Agosto 2021

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS

**Ministro de Obras Públicas
Sr. Alfredo Moreno Charme**

**Director General de Aguas
Sr. Oscar Cristi Marfil**

**Jefe Unidad de Glaciología y Nieves
Sr. Gino Casassa Rogazinski**

**Inspector Fiscal
Sr. Alexis Segovia Rocha**

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE

**Jefe de Proyecto
Sr. Marius Schaefer**

**Profesionales
Sr. José Luis Rodríguez Lagos
Sr. Jorge Berkhoff Leal
Sr. David Farías Barahona**

ÍNDICE

	Página
ÍNDICE.....	i
ÍNDICE DE TABLAS.....	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. OBJETIVOS.....	2
2.1. Objetivo General.....	2
2.2. Objetivos Específicos.....	2
2.3. Carta Gantt.....	4
3. METODOLOGÍA.....	5
3.1. Imágenes Satelitales y Criterios de Selección.....	5
3.1.1. Corrección Atmosférica.....	6
3.1.2. Relleno Bandeado.....	7
3.1.3. Combinación de Colores.....	8
3.1.4. Delimitación de Cuencas.....	10
3.1.5. Delimitación de Glaciares.....	10
3.1.6. Softwares para Análisis Geográfico.....	12
3.2. Sitios de Medición de Ablación.....	12
3.3. Balance de Masa Geodésico.....	12
3.3.1. Variación Areal.....	13
3.3.2. Balance de Masa Geodésico y Cambios de Volumen.....	13
3.3.3. Incertidumbre.....	14
3.4. Adquisición y Procesamiento de Datos GNSS.....	15
4. RESULTADOS.....	17
4.1. Información Histórica y Variaciones del Glaciar Sur-Oriental del Volcán Mocho (Objetivo 1, objetivo 3, objetivo 4, objetivo 10).....	17
4.1.1. Imágenes Satelitales.....	17
4.1.2. Imágenes de Alta Resolución.....	18
4.1.3. Fotos Aéreas.....	19

4.1.4.	Información Topográfica	19
4.1.5.	Cartas IGM	20
4.1.6.	Información Glaciológica	20
4.1.7.	Fotografías Históricas de Campañas de Terreno en el Volcán Mocho	21
4.1.8.	Actualización IPG2020	21
4.1.9.	Variaciones Areales del Glaciar Mocho 1976-2011 S.I.T. N°261.....	24
4.1.10.	Variaciones Areales del Glacial Sur-Oriental del Volcán Mocho.....	27
4.2.	Balance de Masa del Glaciar Mocho (Objetivo 9, objetivo 2, objetivo 5)	30
4.2.1.	Sitios de Medición de Ablación	30
4.2.2.	Balance de Masa Método Geodésico	32
4.2.2.1	Variación Areal	32
4.2.2.2	Balance de Masa Geodésico	33
4.2.2.3	Balance de masa GPS-LiDAR	37
4.2.3.	Balance de Masa Método Glaciológico	38
4.3.	Mediciones GNSS & Desplazamiento del Glaciar (Objetivo 6, objetivo 7).....	40
5.	PLAN DE CONTINGENCIA Y TRABAJO SEGURO.....	45
5.1.	Antecedentes Generales.....	45
5.2.	Objetivos	46
5.2.1.	Objetivo General	46
5.2.2.	Objetivos Específicos	46
5.3.	Vigencia del Plan	46
5.4.	Identificación de Escenarios.....	47
5.4.1.	Ubicación Geográfica de la Zona.....	47
5.4.2.	Identificación y Descripción de Escenarios posibles	48
5.5.	Estrategia de Respuesta.....	48
5.5.1.	Medios de Telecomunicación	48
5.5.2.	Evaluación y Respuesta.....	49
5.6.	Planes Sectoriales	49
5.6.1.	Plan de Contingencia por Variable Volcánica Mocho	49

5.6.2. Plan de Contingencia por Emergencia Sanitaria (COVID-19)	49
5.7. Coordinación.....	50
6. CONCLUSIONES.....	51
7. BIBLIOGRAFÍA.....	53
ANEXO I.....	56
ANEXO II.....	67

ÍNDICE DE TABLAS

	Página
Tabla 2.3-A. Carta Gantt.	4
Tabla 3.1-A. Características de imágenes (USGS, 2014).	5
Tabla 3.1.3-A. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Landsat MSS.	9
Tabla 3.1.3-B. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Landsat TM.	9
Tabla 3.1.3-C. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Landsat ETM+.	9
Tabla 3.1.3-D. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Landsat OLI.	9
Tabla 3.1.3-E. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Sentinel.	10
Tabla 3.3-A. Resumen de datos topográficos utilizados para calcular las diferencias de elevación del glaciar.	13
Tabla 3.3.1-A. Resumen de las imágenes utilizadas para mapear la variación areal.	13
Tabla 4.1.1-A. Imágenes satelitales.	17
Tabla 4.1.2-A. Imágenes de alta resolución.	18
Tabla 4.1.3-A. Características de fotografías aéreas.	19
Tabla 4.1.4-A. Información topográfica.	19
Tabla 4.1.5-A. Cartas IGM.	20
Tabla 4.1.6-A. Investigaciones científicas.	20
Tabla 4.1.6-B. Informes técnicos.	21
Tabla 4.1.8-A. Inventario del glaciar sur-oriental del volcán Mocho.	23
Tabla 4.1.9-A. Variaciones areales 1976-2011 S.I.T. N°261 capa de hielo Mocho-Choshuenco.	25
Tabla 4.1.9-B. Variaciones areales 1976-2011 glaciar Mocho.	26
Tabla 4.1.10-A. Resumen de las variaciones areales históricas del glaciar.	27
Tabla 4.2.1-A. Coordenadas de balizas instaladas en el glaciar SO Mocho.	31
Tabla 4.2.2.2-A. Resumen de cambios de volumen y balance de masa geodésico para cada periodo. Obsérvese que se utilizó una densidad de hielo de $850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ según Huss (2013).	36
Tabla 4.2.3-A. Balance de masa en balizas, temporada estival 2020-2021.	38
Tabla 4.2.3-B. RMSE (m eq.a.) de interpolaciones para determinar método para realizar balance glaciológico.	39
Tabla 4.3-A. Coordenadas de las balizas obtenidas por las mediciones GNNS.	42
Tabla 4.3-B. Desplazamiento y velocidades interferidos.	43
Tabla 4.3-C. Variación vertical medida con GNSS.	44
Tabla 5.3-A. Vigencia del plan de contingencia y trabajo seguro.	46
Tabla 5.4.2-A. Descripción de Escenarios y Amenazas.	48

Tabla 5.5.1-A. Medios de Telecomunicación.	48
Tabla A I-A. Campañas de terreno temporada 2020-2021.	56
Tabla A I-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho enero 2021.	59
Tabla A I-C. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña enero 2021.	60
Tabla A I-D. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña febrero 2021.	62
Tabla A I-E. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho febrero 2021.	63
Tabla A I-F. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña marzo 2021.	64
Tabla A I-G. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho marzo 2021.	64
Tabla A I-H. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho abril 2021.	65

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 3.1.2-A. Izquierda. Imagen con bandeado. Derecha. Imagen con relleno de datos.	8
Figura 3.1.5-A. Delimitación de glaciares con imagen falso color.	11
Figura 4.1.8-A. Cartografía de actualización IPG2020.....	21
Figura 4.1.8-B. Divisoria de aguas calculada con el DEM TanDEM-X del 2012-2014. Nótese las subcuencas que dividen el glaciar.	22
Figura 4.1.9-A. Cartografía de variaciones areales S.I.T. N°261.	23
Figura 4.1.9-B. Cartografía de variación areal de 1976 delimitadas por CECs y Uach.	24
Figura 4.1.9-C. Cartografía de variación areal de 2011 delimitadas por CECs y Uach.	25
Figura 4.1.9-D. Evolución de la superficie del glaciar Mocho 1976-2011.	26
Figura 4.1.10-A. Variación areal desde 1976 hasta 2021, con sus respectivos errores. ..	27
Figura 4.1.10-B. Variación areal desde 1976 hasta 2021.....	28
Figura 4.1.10-C. Posición actual del glaciar, con contornos históricos.	29
Figura 4.2.1-A. Ubicación de balizas en el glaciar sur-oriental del volcán Mocho.	30
Figura 4.2.2.1-A. Variación areal del glaciar Mocho entre 1976-2000. 1: Corresponde a una imagen satelital Landsat MSS (432 composición de banda) y 2: Corresponde a una imagen satelital Landsat ETM+ (432 composición de banda).	32
Figura 4.2.2.1-B. Variación areal del glaciar Mocho entre 2000-2021. 1: Corresponde a una imagen satelital Landsat ETM+ (432 composición de banda) y 2: Corresponde a una imagen satelital Sentinel 2 (432 composición de banda).	32
Figura 4.2.2.2-A. Gráfico de dh/dt sin correjistro y con correjistro para el periodo 1961- 2000.....	34
Figura 4.2.2.2-B. Gráfico de dh/dt sin correjistro y con correjistro para el periodo 2000- 2021.....	35
Figura 4.2.2.2-C. Mapa de tasa de cambio de elevación para el glaciar Mocho (dh/dt) entre 1961-2021. 1: Corresponde a la pérdida de masa glaciar 1961-2000 en metros equivalentes en agua por año, 2: Corresponde a la pérdida de masa glaciar 2000-2021 en metros equivalentes en agua por año.....	36
Figura 4.2.2.3-A. Mapa de tasa de cambio de elevación para el glaciar Mocho (dh/dt) entre enero y febrero mediante levantamiento GNSS y LiDAR.	37
Figura 4.2.2.3-B. Diferencias entre balance glaciológico y balance GNSS-LiDAR, calculadas mediante RMSE.	38
Figura 4.2.3-A. Balance de masa método glaciológico para el periodo estival 2021.	39
Figura 4.2.3-B. Balance de masa acumulado método glaciológico para el periodo estival 2021.....	40

Figura 4.3-A. Datos altimétricos del mes de enero levantado mediante GNSS, cuenca SO Glaciar Mocho.	41
Figura 4.3-B: Desplazamiento horizontal de las balizas observado entre enero y abril 2021.	43
Figura 5.4.1-A. Ubicación del área de trabajo.	47
Figura A I-A. Perforación con taladro Heucke en B15.	58
Figura A I-B. Instalación de baliza de PVC en B15.	58
Figura A I-C. Medición de baliza de PVC instalada en B15.	59
Figura A I-D. Mediciones de densidad en pozo B18.	61
Figura A I-E. Levantamiento GNSS. Izq. Medición de baliza. Der. Medición en modo cinemático.	62
Figura A I-F. Levantamiento LiDAR terrestre en el glaciar Sur Oriental del Volcán Mocho.	66

1. INTRODUCCIÓN

La Dirección General de Aguas (DGA) requiere desarrollar el estudio denominado **“APOYO PARA EL MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL GLACIAR SUR-ORIENTAL DEL VOLCÁN MOCHO, REGIÓN DE LOS RÍOS, MACROZONA SUR, 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 Unidad de Glaciares y nieves (UGN).

El glaciar Mocho se encuentra ubicado sobre el complejo volcánico Mocho-Choshuenco y está incluido dentro de la zona glaciológica comprendida entre las cuencas de los ríos Bío-Bío y Bueno.

Este glaciar posee un historial de monitoreo que data del 14 de mayo de 2003, iniciado por el Centro de Estudios Científicos (CECs) y posteriormente por la Universidad Austral de Chile (UACH), habiéndose reportado el balance de masa glaciológico, así como también sus variaciones frontales y areales, velocidades y espesores de hielo, en publicaciones científicas, como en Rivera, et al (2005) o Schaefer, et al (2017), y estudios encargados por la DGA (S.I.T. N°261, 338 y 327), por lo tanto, es de gran relevancia mantener actualizado y operativo el estudio del mismo.

En el presente estudio se llevaron a cabo mediciones de ablación en una red balizas instaladas en el glaciar, mediciones de densidad de nieve en pozo nivométrico, mediciones puntuales y cinemáticas con GPS diferencial y un levantamiento con LiDAR terrestre. Con ellas se realizaron los cálculos de balance de masa por el método glaciológico y geodésico, y también se determinó la velocidad de desplazamiento del glaciar.

Otro objetivo planteado en este estudio fue la determinación de las variaciones areales del glaciar Mocho, utilizando imágenes de satélite que abarcan desde el año 1976 hasta el 2021.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Apoyar con el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) del glaciar sur-oriental del volcán Mocho, código Banco Nacional de Aguas (BNA) CL110301001, cuenca del Río Bueno, región de Los Ríos, ubicado en la Macrozona Sur.

2.2. Objetivos Específicos

ETAPA 1

1. Revisar, reunir y ordenar información histórica del glaciar sur-oriental del volcán Mocho, 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.
2. Proponer sobre el sector bajo del glaciar un mínimo de 5 y un máximo de 10 sitios para ubicar balizas durante el periodo estival para medir la ablación.
3. Revisar, y eventualmente corregir, el IPG2020 en base a la imagen LANDSAT OLI del 11/02/2017 utilizada por la UGN para confeccionar el inventario del glaciar sur-oriental del volcán Mocho. Examinar si es posible utilizar otra imagen de finales del verano 2018/2019 o principios del otoño 2020 de mejor resolución/calidad para mejorar el inventario.
4. Revisar las variaciones del glaciar sur-oriental del volcán Mocho en base al informe "Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas" realizado por el Centro de Estudios Científicos, Informe DGA S.I.T. N°261, 2011, utilizando para ello las mismas 2 imágenes utilizadas en dicho informe (imagen satelital LANDSAT MSS de 1976 y LANDSAT ETM+ de 2011. Utilizar otras imágenes de buena calidad que puedan estar disponibles para ampliar/detallar aún más las variaciones areales del glaciar.

ETAPA 2

5. Instalar una baliza de al menos 3 metros de profundidad en los sitios propuestos, previamente aprobados por el Inspector Fiscal, midiendo sus coordenadas con receptor GNSS doble frecuencia en modo diferencial, y registrando la altura de cada baliza.
6. Medir al menos 2 veces adicionales las coordenadas y alturas de las balizas mediante receptor GNSS doble frecuencia diferencial, registrando la altura de cada baliza. La última medición debe ser al final de marzo o en abril de 2021.
7. Realizar un levantamiento de al menos el 50% del área del glaciar mediante GNSS doble frecuencia diferencial en modo cinemático, con un intervalo de mediciones cada 1 segundo.
8. Apoyar logísticamente, si lo requiere la DGA, un levantamiento del glaciar Sur-oriental del volcán Mocho 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.
9. Confeccionar un balance de masa geodésico del glaciar sur-oriental del volcán Mocho 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), el levantamiento GNSS cinemático 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.
10. Compilar las variaciones areales del glaciar sur-oriental del volcán Mocho 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.

11. 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>.

2.3. Carta Gantt

A continuación, se presenta la Carta Gantt (Tabla 2.3-A) para la programación y ejecución del estudio. Esta contempla la planificación de la etapa 1 durante el mes de diciembre de 2020 y la etapa 2 a realizarse entre enero y agosto de 2021.

Tabla 2.3-A. Carta Gantt.

OBJETIVOS	Diciembre	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto
Inf. Inicial									
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
Inf. Avance									
11									

Fuente: Elaboración propia.

3. METODOLOGÍA

El abordaje del estudio solicitado por la DGA contempla dos aspectos para su realización; uno práctico, que consta de actividades en el Volcán Mocho ejecutadas durante 4 campañas de terreno, con un plazo de 3 a 4 días de duración en cada campaña (Anexo I); y otro analítico, donde se procesó toda la información obtenida en terreno y se desarrollaron los objetivos específicos planteados en este estudio.

Para el ordenamiento cronológico de los servicios encargados por la DGA, se consideraron dos etapas para su cumplimiento:

ETAPA 1: Trabajo de gabinete para el desarrollo de los objetivos 1 al 4. Finalizó con la entrega del Informe de Avance Etapa 1.

ETAPA 2: Trabajo en terreno entre los meses de enero y abril para el desarrollo de los objetivos 5 al 8 y trabajo de gabinete desde mayo hasta agosto, para el desarrollo de los objetivos 9 al 11. Finaliza con la entrega del Informe Final.

3.1. Imágenes Satelitales y Criterios de Selección

Para cumplir los objetivos 1, 3, 4, 10, se revisaron imágenes desde la interfaz de Earth Explorer del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (<http://earthexplorer.usgs.gov/>). Los sensores que se emplearon en este informe son Landsat y Sentinel (Tabla 3.1-A).

Tabla 3.1-A. Características de imágenes (USGS, 2014).

Plataforma	Sensor	Resolución espectral (Bandas)	Resolución espacial (metros)	Resolución radiométrica (Bits)
Landsat	MSS	4	60	8
Landsat	TM	7	30	8
Landsat	ETM+	8	30-15	8

Plataforma	Sensor	Resolución espectral (Bandas)	Resolución espacial (metros)	Resolución radiométrica (Bits)
Landsat	OLI	11	30-15	16
Sentinel	2 A	12	10-60	12
Sentinel	2 B	12	10-60	12

Fuente: USGS.

La selección de imágenes corresponde a aquellas adquiridas entre los meses de febrero y abril, ya que la nieve se derrite en la época estival, disminuyendo el porcentaje de error entre la confusión del hielo y nieve, teniendo una mejor delimitación de los cuerpos de hielo.

Estas imágenes están previamente procesadas en su nivel 1, solo corregida topográfica y radiométricamente, por lo que fue necesario realizar una corrección atmosférica a todas las imágenes de la plataforma Landsat y Sentinel.

Otro detalle que debe tomarse en cuenta es que las imágenes del sensor ETM+ presentan un error de bandeo desde mayo del año 2003 (Scaramuzza et al., 2004), para lo cual se realizó un procedimiento de relleno de datos faltantes, cuando se dispone de información pertinente a la época de adquisición de la imagen a rellenar (Figura 3.1.2-A).

3.1.1. Corrección Atmosférica

Se realizó un tratamiento digital a las imágenes, utilizando el método de sustracción de objetos oscuros (DOS) también conocido como método de Chávez, esta técnica sirve para eliminar el efecto de la dispersión de la radiación electromagnéticas originada por las gases y partículas atmosférica (Delúquez, 2008) *“este método recurre al ND mínimo de cada banda como medida de la radiancia debida a la dispersión atmosférica, mientras que la transmisividad atmosférica para el flujo descendente se extrapola de experimentos físicos llevados a cabo sobre atmósferas reales sin cobertura nubosa”* (Chuvienco, Salas y Riaño, 2000), es decir, la corrección fue realizada para cada banda en todos los pixeles de la escena, efectuando una diferencia entre el valor teórico y el almacenado por el sensor.

Los valores estimados que sirven para calibrar la imagen se obtienen en la ecuación:

$$\rho\lambda = \frac{\pi * L\lambda * d^2}{ESUN_{\lambda} * \cos(\theta_s)}$$

Dónde:

$\rho\lambda$ = Reflectancia planetaria TOA

π = Constante matemática igual a $\sim 3,14159$ (sin unidad)

$L\lambda$ = Resplandor espectral en la apertura del sensor (Watts/m²*srad* μ m)

d = Distancia Tierra-Sol (unidades astronómicas)

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia solar exoatmosférica media (Watts/m² μ m)

θ_s = ángulo cenital solar (grados)

3.1.2. Relleno Bandeado

En mayo del 2003, el sensor ETM+ de Landsat 7 presentó una falla en el Scan Line Corrector (SLC), por esta razón las imágenes obtenidas por el satélite después de esa fecha presentan bandas regulares que se inician en la porción central hasta los bordes de cada escena. Para corregir este error, se utiliza la metodología de relleno de datos faltantes (SLC_Gap_Fill_Methodology), desarrollada por Pat Scaramuzza, Esad Micijevic y Gyanesh Chander (USGS, 2004), en las imágenes del año 2004 hasta las del año 2013 que presentan este defecto (Figura 3.1.2-A).



Figura 3.1.2-A. Izquierda. Imagen con bandeado. Derecha. Imagen con relleno de datos.

3.1.3. Combinación de Colores

Las imágenes satelitales son registradas simultáneamente en varias regiones del espectro electromagnético, las imágenes satelitales pueden ser estudiadas individualmente mediante una escala de grises o en imágenes coloreadas mediante la combinación de bandas espectrales, estas últimas se generan según el color RGB (rojo, verde y azul) (Chuvieco, 2014).

La combinación de las bandas SWIR, NIR, GREEN de la plataforma Landsat, se utilizó para generar una imagen en falso color, resaltando los cuerpos de hielo. (Tabla 3.1.3-A, Tabla 3.1.3-B, Tabla 3.1.3-C y Tabla 3.1.3-D)

La combinación de las bandas NIR, RED y GREEN se aplicaron en las imágenes Sentinel, las que corresponden a una imagen en falso color, utilizado para obtener un mejor resalte de las masas de hielo (Tabla 3.1.3-E).

Tabla 3.1.3-A. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Landsat MSS.

Color	N° Banda	Banda	Rango Espectral (μm)	Resolución (m)
Red	7	SWIR	0,80-1,10	60
Green	6	NIR	0,70-0,80	60
Blue	4	GREEN	0,50-0,60	60

Fuente: USGS.

Tabla 3.1.3-B. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Landsat TM.

Color	N° Banda	Banda	Rango Espectral (μm)	Resolución (m)
Red	5	SWIR	1,55-1,75	30
Green	4	NIR	0,76-0,90	30
Blue	2	GREEN	0,52-0,60	30

Fuente: USGS.

Tabla 3.1.3-C. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Landsat ETM+.

Color	N° Banda	Banda	Rango Espectral (μm)	Resolución (m)
Red	5	SWIR	1,55-1,75	30
Green	4	NIR	0,76-0,90	30
Blue	2	GREEN	0,52-0,60	30

Fuente: USGS.

Tabla 3.1.3-D. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Landsat OLI.

Color	N° Banda	Banda	Rango Espectral (μm)	Resolución (m)
Red	6	SWIR	1,57-1,65	30
Green	5	NIR	0,64-0,67	30
Blue	3	GREEN	0,53-0,59	30

Fuente: USGS.

Tabla 3.1.3-E. Combinación de bandas utilizadas en Imágenes Sentinel.

Color	Nº Banda	Banda	Rango Espectral (μm)	Resolución (m)
Red	6	NIR	0,69-0,71	10
Green	5	RED	0,65-0,68	10
Blue	3	GREEN	0,54-0,57	10

Fuente: USGS.

3.1.4. Delimitación de Cuencas

La delimitación de la cuenca se realizó mediante el Software ArcMap 10.8, donde se procedió a calcular los puntos de drenaje de la cuenca, para estos cálculos se emplearon diversos algoritmos de ArcMap 10.8. El primer algoritmo que se utilizó es FILL, esta herramienta busca eliminar las imperfecciones que puede tener el modelo de elevación digital, una vez rellenado los datos, se calculó la dirección de flujo de la pendiente con la herramienta FLOW DIRECTION, ya calculado este parámetro se establece la acumulación de flujo con la herramienta FLOW ACCUMULATION, por último, con todos estos parámetros anteriores mencionados se calcularon las cuencas con la herramienta Basin.

3.1.5. Delimitación de Glaciares

La delimitación del glaciar se realizó mediante una digitalización manual, para ello se compone la vista de la imagen en la combinación de bandas falso color mencionado en la sección anterior, en esta tarea se utilizó el software QGIS 3.16 (Figura 3.1.5-A).

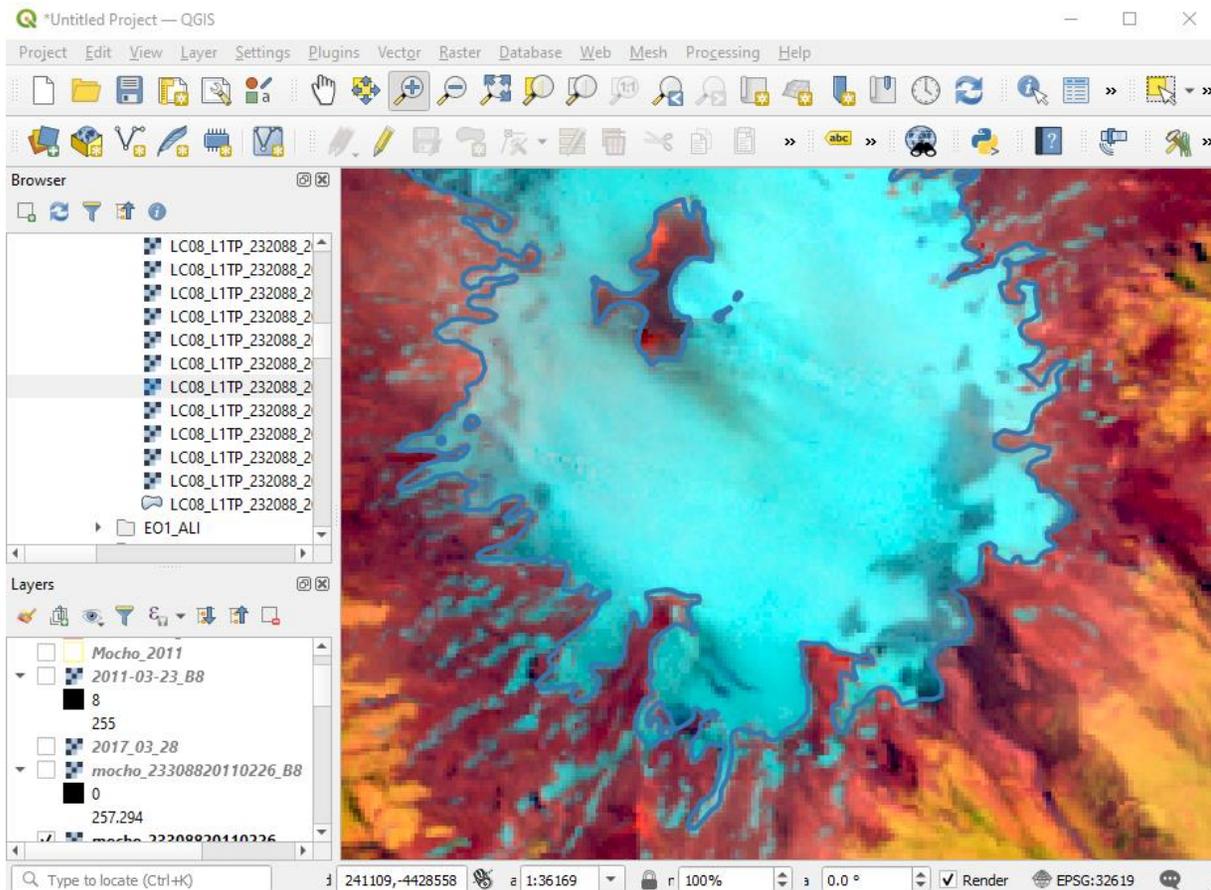


Figura 3.1.5-A. Delimitación de glaciares con imagen falso color.

La determinación del error de interpretación del glaciar se realizó utilizando la resolución espacial de cada imagen, ponderado por la longitud de los bordes del cuerpo de hielo delimitado en cada caso, (Rivera et al., 2006; Williams et al., 1997).

Una vez delineado el glaciar se procedió a calcular su área y perímetro, así mismo se realizó el cálculo del error de interpretación para obtener la incertidumbre respecto de la superficie cubierta por el glaciar en cada época basado en la siguiente fórmula:

$$Error = \frac{Perimetro (km)}{\sqrt{2}} * Resolución (km)$$

3.1.6. Softwares para Análisis Geográfico

Para realizar los análisis de imágenes satelitales y digitalización mencionados anteriormente, se usaron softwares de Sistemas de Información Geográfica (SIG), en este estudio se utilizó el software QGIS versión 3.16, que está disponible en forma gratuita, y también se usó el software ArcMap 10.8, para realizar procesos de delimitación de cuencas.

3.2. Sitios de Medición de Ablación

Se realizó una propuesta de 10 sitios para la instalación de balizas de ablación (una baliza para cada sitio propuesto), en cada uno de ellos se midió la posición geográfica por medio de un sistema GNSS con corrección diferencial, conjuntamente se midió la altura de cada baliza, con esta medida se calculó la ablación de nieve o hielo, según corresponda, utilizando la siguiente fórmula:

$$BM = (ha - hv)\rho$$

Dónde:

BM: Balance de masa (m eq.a.)

ha: altura de la baliza en la época anterior (m)

hv: altura de la baliza actual (m)

ρ : Densidad de la nieve o hielo (kg/m³)

El criterio de selección de los sitios para la instalación de balizas corresponde a la continuidad del estudio glaciológico que se lleva realizando desde el año 2003.

3.3. Balance de Masa Geodésico

Se realizó un balance de masa geodésico del glaciar sur-oriental del volcán Mocho en base a la información topográfica existente, incluyendo el modelo de elevación digital SRTM del año 2000 de la Nasa, la Carta regular del IGM, la información del levantamiento GNSS

cinemático y levantamiento LiDAR terrestre a fin del verano 2021 cuyos datos son proporcionados por la UGN (Tabla 3.3-A), conservando una resolución espacial de 30 metros.

Tabla 3.3-A. Resumen de datos topográficos utilizados para calcular las diferencias de elevación del glaciar.

Fecha	Datos	Escala/Resolución espacial	Fuente
12-12-1961	Carta regular	1:50.000	IGM
11-22 febrero 2000	DEM SRTM	30 m	USGS/NASA
5-6 enero 2021	GNSS Cinemático	0,2 m	UACH
27 abril 2021	LiDAR	1 m	UGN/DGA

Fuente: Elaboración propia.

3.3.1. Variación Areal

El contorno del área glaciar se derivó a partir de imágenes satelitales (Tabla 3.3.1-A) con corrección atmosférica para obtener un polígono con el mínimo error de digitalización del glaciar.

Tabla 3.3.1-A. Resumen de las imágenes utilizadas para mapear la variación areal.

Fecha	Sensor	Resolución espacial	Fuente
02-04-1976	Landsat MSS	60 m	USGS
31-03-2000	Landast ETM+	30 m	USGS
25-04-2021	Sentinel 2	10 m	USGS

Fuente: Elaboración propia.

3.3.2. Balance de Masa Geodésico y Cambios de Volumen

El balance de masa geodésico estima los cambios del volumen a partir de un cambio en la elevación del glaciar en función del tiempo (dt/dh) (Zemp et al., 2013). Estos balances nos

proporcionan información topográfica sobre la variable altimétrica actual del glaciar (Farias-Barahona et al., 2020).

Fischer, en el año 2016, determina la siguiente ecuación para calcular la variación de la masa en función al tiempo

$$B_{geo} = \frac{\Delta V f_{\Delta v}}{A \rho_w} (m \text{ eq. a.})$$

Dónde:

ΔV = Variación altimétrica del glaciar

$f_{\Delta v}$: Densidad de hielo definida en 850 (kg/m³) (Huss, 2013)

ρ_w : Densidad de agua definida en 1000 (kg/m³)

A = Área del glaciar

Para calcular ΔV que se define como el cambio de volumen que se obtiene entre la diferencia de la elevación en función al tiempo se establece con la siguiente formula:

$$\Delta V = r^2 \sum_{k=1}^k \Delta h_k (m^3)$$

Dónde:

K = Número de pixeles que abarca el área glaciar

Δh_k : Diferencia de elevación entre dos pixeles k y r

3.3.3. Incertidumbre

Debido a la incertidumbre en las variaciones de elevación de un terreno, se calculó el error o inexactitud de la estimación (Farias-Barahona et al., 2020), esta incertidumbre se evalúa en zonas fuera del glaciar, donde se buscan áreas estables, con el mínimo cambio de elevación. Además, estas zonas de control o sin variación altimétrica, deben presentar una

pendiente estable $<40^\circ$ (Farias-Barahona et al.,2020). Estos datos se ingresarán para computar un co-registro de los DEM, para posteriormente realizar correcciones verticales y horizontales (Nuth & Kaab, 2011). Por lo tanto, el error del balance de masa geodésico se estimará mediante la ecuación de propagación de error (Farias-Barahona et al.,2020), utilizando la siguiente expresión:

$$dM = |M| * \sqrt{\left[\frac{\delta dh}{dt}\right]^2 + \left[\frac{\delta A}{A}\right]^2 + \left[\frac{\delta \rho}{\rho}\right]^2}$$

Dónde:

dM = Error de incertidumbre en el balance geodésico (M)

$\left[\frac{\delta dh}{dt}\right]^2$ = Error de incertidumbre en las variaciones de altura

$\left[\frac{\delta A}{A}\right]^2$ = Error de incertidumbre del área glaciar

$\left[\frac{\delta \rho}{\rho}\right]^2$ = Error de incertidumbre de la densidad de hielo

3.4. Adquisición y Procesamiento de Datos GNSS

Durante las campañas de enero, marzo y abril se realizaron mediciones sobre las balizas de ablación mediante GNSS. El procedimiento consistió en la instalación de un receptor GNSS en la base del volcán mocho (BMCH). La georreferenciación de BMCH se realizó mediante el método PPP (precise point positioning) usando servicios internacionales como OPUS de NASA. No obstante, también es posible utilizar el servicio RTX que ofrece la compañía Trimble. Para llevar a cabo dicho procesamiento, se utilizó el archivo con el mayor tiempo de medición (>12 hrs), como resultado se obtuvieron las coordenadas BMCH con precisiones de 0,01 m horizontal y 0,04 m vertical.

El receptor móvil GNSS se instaló en cada una de las balizas y se realizaron mediciones en promedio de >15 min. Desafortunadamente, durante la campaña de enero, específicamente el día 6 hubo pérdida de información de la base BMCH, por lo que fue

necesario realizar el enlace de las observaciones (balizas) a la estación GNSS activa PGLL (Panguipulli) perteneciente a la red sismológica e Instituto Geográfico Militar (sirgaschile.cl).

El postproceso y obtención de las coordenadas finales se realizó mediante el software Trimble Business Center (TBC). En la Tabla 4.3-A se indican las coordenadas (UTM-WGS84 -HUSO 18) y altura elipsoidal de cada una de las balizas. De manera general, los ajustes y cálculos geodésicos realizados tanto con BMCH y PGLL presentan precisiones del orden centimétrico, específicamente precisiones horizontales y verticales del orden 0,03 m y 0,02 m, respectivamente. El error combinado total, tanto para la determinación de las velocidades superficiales (diferencia entre coordenadas) y cambio de elevación, es estimado a partir de la sumatoria cuadráticas de las incertidumbres/error de las balizas y la base. Por lo tanto, para la estimación de velocidades superficiales y cambio de elevación obtuvimos un error total de 0,05 m y 0,06 m, respectivamente.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos se presentan en cuatro objetivos generales. El primer objetivo detalla la información histórica, corrección del IPG2020 y sus variaciones areales desde 1976 hasta el 2021. El segundo objetivo está basado en los balances de masa glaciológicos para los meses de febrero, marzo, abril y un balance acumulado estival. Como tercer objetivo se presentan los balances de masa obtenidos a través del método geodésico entre los periodos 1961-2000 y 2000-2021, este último fue levantado durante una campaña en conjunto a equipo de la DGA. Por último, se presentan los datos obtenidos a través de mediciones GNSS y cálculos de velocidades del glaciar.

4.1. Información Histórica y Variaciones del Glaciar Sur-Oriental del Volcán Mocho (Objetivo 1, objetivo 3, objetivo 4, objetivo 10)

4.1.1. Imágenes Satelitales

En total se seleccionaron 27 imágenes satelitales de diversas plataformas, que abarcan entre los años 1976 hasta el 2020 (Tabla 4.1.1-A).

Tabla 4.1.1-A. Imágenes satelitales.

Fecha	Plataforma	Sensor	Código	Path	Row	Huso
02/04/1976	Landsat	MSS	0501804233435_13282	249	88	19S
29/03/1987	Landsat	TM	0501702123441_03820	232	88	19S
31/03/2000	Landsat	ETM+	LE72330882000091AGS02	233	88	18S
03/04/2001	Landsat	ETM+	LE72330882001093EDC00	233	88	18S
01/02/2002	Landsat	ETM+	LE72330882002032EDC00	233	88	18S
17/03/2003	Landsat	ETM+	LE72320882003076EDC00	232	88	19S
-/-/2003	Aster	-	-	-	-	-
23/03/2004	Landsat	ETM+	LE72330882004054EDC02	233	88	18S
29/03/2005	Landsat	ETM+	LE72330882005088ASN00	233	88	18S
25/03/2006	Landsat	ETM+	LE72320882006084EDC00	232	88	19S
03/04/2007	Landsat	ETM+	LE72320882007087EDC03	232	88	19S

Fecha	Plataforma	Sensor	Código	Path	Row	Huso
14/03/2008	Landsat	ETM+	LE72320882008074EDC00	232	88	19S
18/04/2009	Landsat	ETM+	LE72320882009108EDC09	232	88	19S
27/03/2010	Landsat	ETM+	LE72330882010086EDC00	233	88	18S
23/03/2011	Landsat	ETM+	LE72320882011082EDC00	232	88	19S
25/03/2012	Landsat	ETM+	LE72320882012085ASN00	232	88	19S
05/04/2013	Landsat	ETM+	LE72330882013126EDC00	233	88	18S
26/02/2014	Landsat	OLI	LC82330882014057LGN01	233	88	18S
01/03/2015	Landsat	OLI	LC82320882015069LGN01	232	88	19S
19/03/2016	Landsat	OLI	LC82330882016079LGN01	233	88	18S
11/02/2017	Landsat	OLI	LC82320882017042LGN00	232	88	19S
15/03/2017	Landsat	OLI	LC82320882017074LGN00	232	88	19S
20/03/2017	Sentinel	2A	S2A20170320T143741	204	96	18S
14/02/2018	Landsat	OLI	LC82320882018045LGN00	232	88	19S
01/02/2019	Landsat	OLI	LC82320882019032LGN00	232	88	19S
25/03/2020	Landsat	OLI	LC82330882020074LGN00	233	88	18S
26/03/2020	Sentinel	2B	S2B20200326T142729	209	53	19S

Fuente: USGS.

4.1.2. Imágenes de Alta Resolución

Desde la aplicación de Google Earth se obtuvieron imágenes RGB de alta resolución correspondiente al glaciar sur-oriental Mocho. Las imágenes obtenidas se listan en la Tabla 4.1.2-A.

Tabla 4.1.2-A. Imágenes de alta resolución.

Fecha	Fuente	Nombre	Huso
18/03/2016	Google Earth	Mocho_20160318	18S
19/03/2018	Google Earth	Mocho_20180319	18S

Fuente: Google Inc.

4.1.3. Fotos Aéreas

Desde el IGM y el Servicio Aero fotogramétrico de la Fuerza Aérea de Chile (SAF) se pueden obtener fotografías aéreas de diversos años, con distintas escalas para el área sur-oriental del glaciar Mocho. Las imágenes obtenidas se listan en la Tabla 4.1.3-A.

Tabla 4.1.3-A. Características de fotografías aéreas.

Vuelo	Escala	Año	Cobertura	Fuente
TRIMETROGON	1:40000	1943-1944	Nacional	IGM
OEA	1:50000	1961	Latitud 37°00' - 43°30' Longitud 70°50' - 74°20'	IGM
CH-30	1:30000	1983		SAF
GEOTEC	1:70000	1998		SAF

Fuente: IGM, SAF.

4.1.4. Información Topográfica

Para el análisis topográfico se usaron modelos de elevación digital (DEM) de distintas fechas y resolución espacial, como el DEM del IGM creado a partir de las curvas de nivel que se obtuvieron mediante técnicas de fotogrametría, con fotografías análogas del vuelo OEA en 1961. La información obtenida se especifica en la Tabla 4.1.4-A.

Tabla 4.1.4-A. Información topográfica.

Misión	Resolución espacial (metros)	Fecha
IGM	90	12/12/1961
SRTM	30	11-22/02/2000
Alos Palsar	12,5	31/03/2011
TANDEM-X	12	2012-2014
LiDAR 2015	1	03/2015

Fuente: IGM, USGS, NASA, Digimapas, DGA.

4.1.5. Cartas IGM

Desde el IGM se pueden encontrar dos cartas digitales de la sección G, las cuales abarcan la zona del glaciar sur-oriental Mocho. Estas cartas contienen información de vegetación, caminos, red hidrográfica y elevación. Las Cartas utilizadas se detallan en la Tabla 4.1.5-A.

Tabla 4.1.5-A. Cartas IGM.

Carta	Número
Choshuenco	122
Neltume	123

Fuente: IGM.

4.1.6. Información Glaciológica

Diversos autores han realizado investigaciones glaciológicas en la cara sur-oriental del glaciar Mocho (Tabla 4.1.6-A), además de informes técnicos solicitados por el Ministerio de Obras Públicas (Tabla 4.1.6-B).

Tabla 4.1.6-A. Investigaciones científicas.

Autor	Año	Nombre
Rivera et al.	2005	Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean Lake District (40°S).
Rivera et al.	2006	Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile.
Bown et al.	2007	Recent glacier mass balance calculations at Volcán Mocho-Choshuenco (40°S), Chilean Lake District.
Schaefer et al.	2017	Climate and Surface mas balance of Mocho Glacier, Chilean Lake District, 40°S.
Scheiter, et al.	2021	The 21st-century fate of the Mocho-Choshuenco ice cap in southern Chile

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.1.6-B. Informes técnicos.

Autor	Año	Nombre	N° Informe
CECS	2011	Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas.	S.I.T. 261
Geoestudios	2013	Implementación nivel 2 estrategia nacional de glaciares: Mediciones glaciológicas terrestres en Chile central, zona Sur y Patagonia.	S.I.T. 327
Geoestudios	2014	Estimación de volúmenes de hielo mediante sondeos de radar en zonas norte, central y sur.	S.I.T. 338

Fuente: Elaboración propia.

4.1.7. Fotografías Históricas de Campañas de Terreno en el Volcán Mocho

Se cuenta con un registro fotográfico de campañas realizadas en el glaciar sur-oriental del volcán Mocho, que abarca desde el año 2008 hasta el 2014.

4.1.8. Actualización IPG2020

El inventario IPG2020 contiene un área de 7,15 km² para la cuenca sur-oriental del glaciar Mocho (Figura 4.1.8-A), definida dicha área a partir de una imagen Landsat OLI con fecha 11/02/2017 (DGA, 2020). Al actualizar este inventario con la interpretación de los márgenes del glaciar con una imagen reciente del sensor Sentinel 2 de fecha 26/03/2020 (Figura 4.1.8-A), se obtiene un polígono de 5,14 km² de superficie (Tabla 4.1.8-A). Sin embargo, en la Figura 4.1.8-B, llama la atención la gran diferencia en la superficie de la cuenca sur-oriental del glaciar Mocho, definida en el inventario IPG2020 (línea roja), con la cuenca usada en estudios recientes (Schaefer et al. 2017, línea verde). Adicionalmente se muestran en la Figura 4.1.8-B las cuencas resultantes del análisis "watershed" del TanDEM WorldDEM (línea negra). Estas delimitaciones, usando TanDEM WorldDEM, indican que lo que se llama la cuenca sur-oriental del glaciar Mocho en el IPG2020, en verdad contiene varias subcuencas, de las cuales la más grande es la que se ha analizado en estudios anteriores (Schaefer et al. 2017, Bown et al. 2007, Rivera et al., 2005). Por su consistencia

con las cuencas usadas en estudios anteriores, proponemos incorporar la cuenca indicada con línea azul (Figura 4.1.8-A), derivada del análisis “watershed” del TanDEM WorldDEM, en el IPG2020. Esta cuenca tiene un área de 5,14 km².

Otra información que se puede obtener con imágenes satelitales actualizadas del sensor Sentinel 2, es la formación de un nuevo lago pro-glaciar, ubicado en el frente oriental del glaciar Mocho. Nótese el nivel de llenado del cuerpo de agua (Figura 4.1.8-A), situación que puede originar un evento de GLOF.

En la imagen Sentinel del 26/03/2020 se puede identificar la presencia de nieve, con ello se puede estimar la superficie de la zona de acumulación y la zona de ablación respectivamente, así como también la Línea de Equilibrio del glaciar, detectable entre la transición nieve-neviza-hielo.

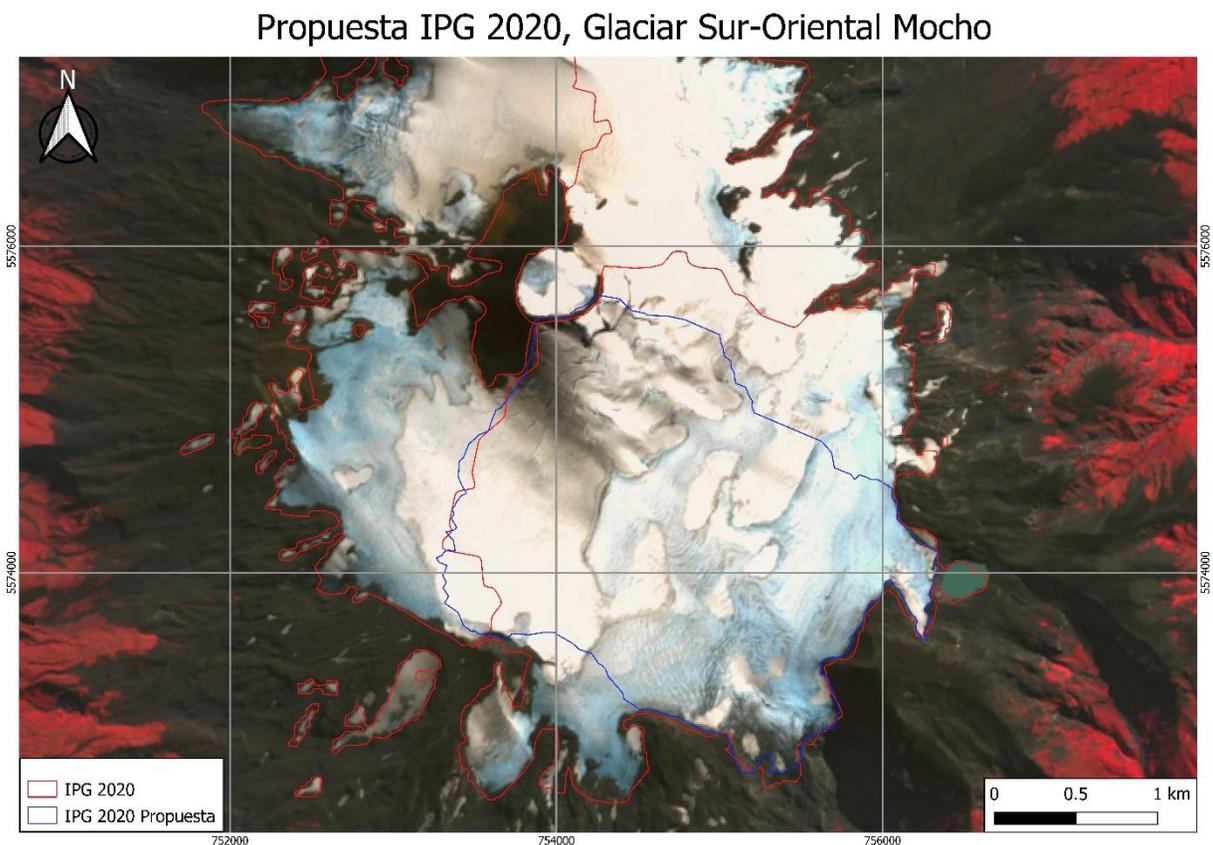


Figura 4.1.8-A. Cartografía de actualización IPG2020.

Delimitación de cuencas

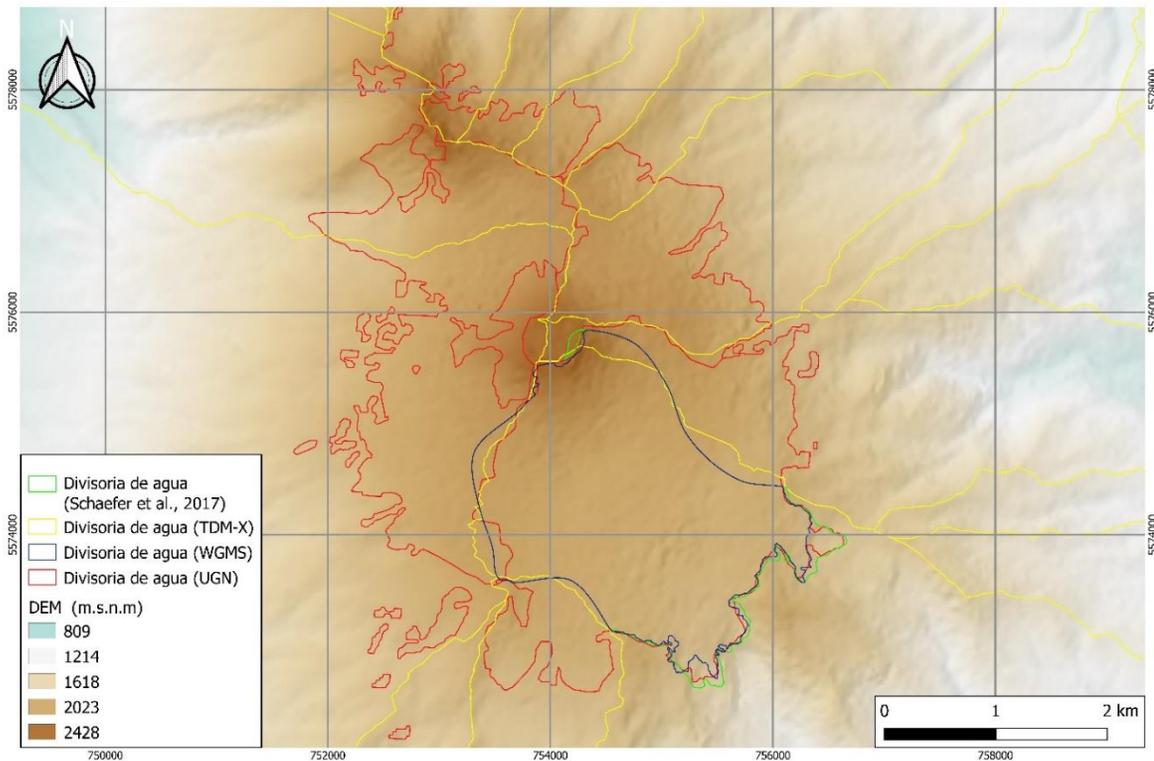


Figura 4.1.8-B. Divisoria de aguas calculada con el DEM TanDEM-X del 2012-2014. Nótese las subcuencas que dividen el glaciar.

Respecto de la divisoria de aguas utilizada en el estudio de Schaefer et al., (2017), esta fue calculada a partir de la información topográfica del IGM, curvas de nivel y cotas, con ellas se realizó, como primer paso, el DEM con una resolución de 90 m, para luego continuar con la delimitación de las subcuencas con el proceso “Watershed”.

Esta cuenca ha sido informada en el servicio mundial de monitoreo de glaciares, WGMS por sus siglas en inglés, con una superficie al año 2013 de 5,11 Km².

Tabla 4.1.8-A. Inventario del glaciar sur-oriental del volcán Mocho.

Inventario	Autor	Superficie (km ²)	Error (km ²)	Área (km ²)
2017	UGN	7,15	0,38	7,15±0,38
2017	UACH	5,19	0,23	5,19±0,23
2020	UACH	5,14	0,11	5,14±0,11

Fuente: Elaboración propia.

4.1.9. Variaciones Areales del Glaciar Mocho 1976-2011 S.I.T. N°261

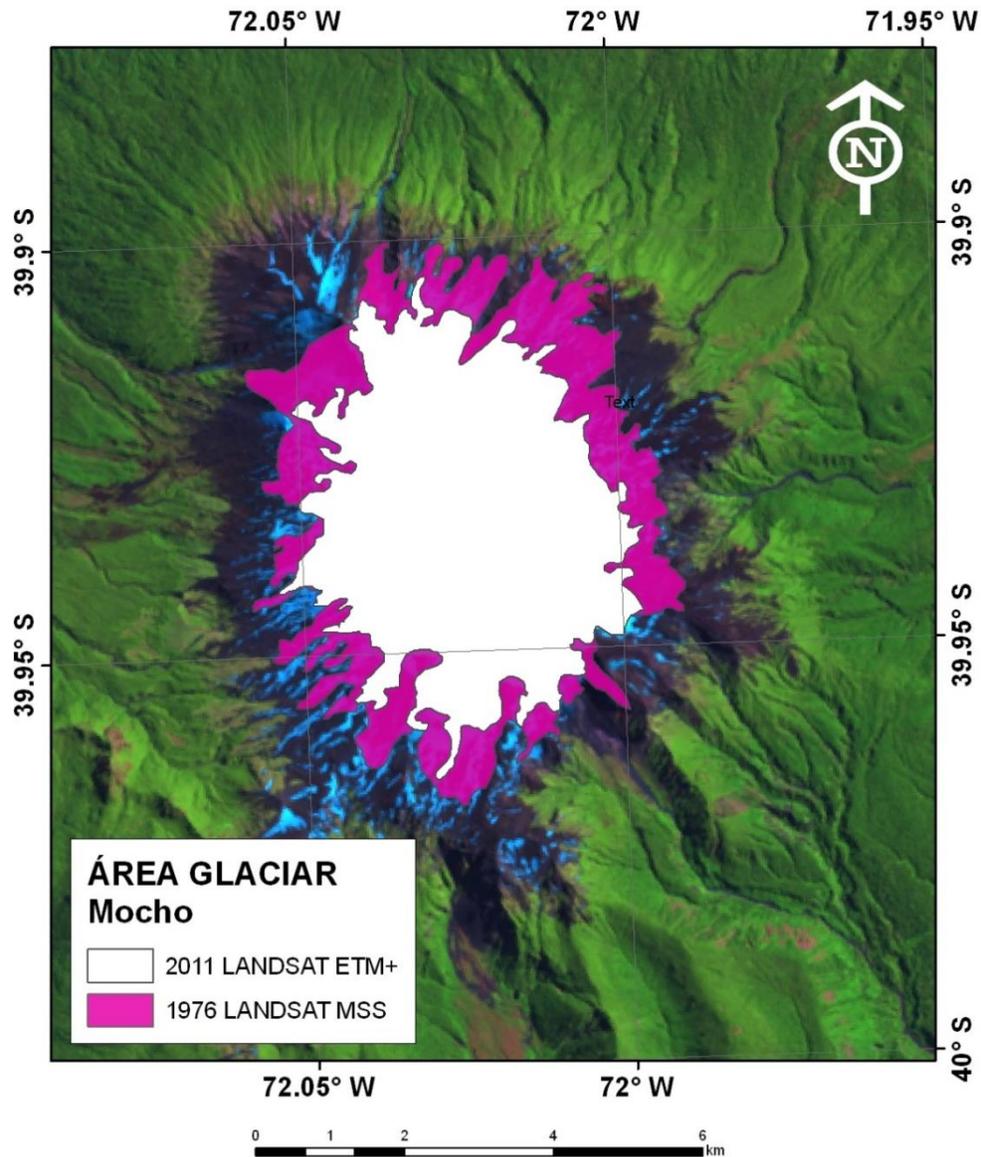


Figura 4.1.9-A. Cartografía de variaciones areales S.I.T. N°261.

El año 2011 el CECs realizó el informe DGA S.I.T. N°261, donde se estudian las variaciones areales del glaciar Mocho (Figura 4.1.9-A), los resultados se muestran en la Tabla 4.1.9-A,

donde destaca el error del año 1976 debido a la resolución espacial de 60 metros de la imagen Landsat MSS disponible para esa fecha.

Tabla 4.1.9-A. Variaciones areales 1976-2011 S.I.T. N°261 capa de hielo Mocho-Choshuenco.

Año	Resolución (m)	Área (km²)	Perímetro (km)	Error (km²)	Área total (km²)
1976	60	27,4	48,72	2,06	27,4±2,06
2011	30	17,72	39,73	0,84	17,72±0,84

Fuente: DGA.

Una vez revisado este documento, se procedió a generar nuevas áreas para el glaciar Mocho de distintas fechas, además de generar nuevamente los límites del glaciar para el año 1976 y 2011 para contrastar dichos límites presentados en el informe S.I.T. N°261.

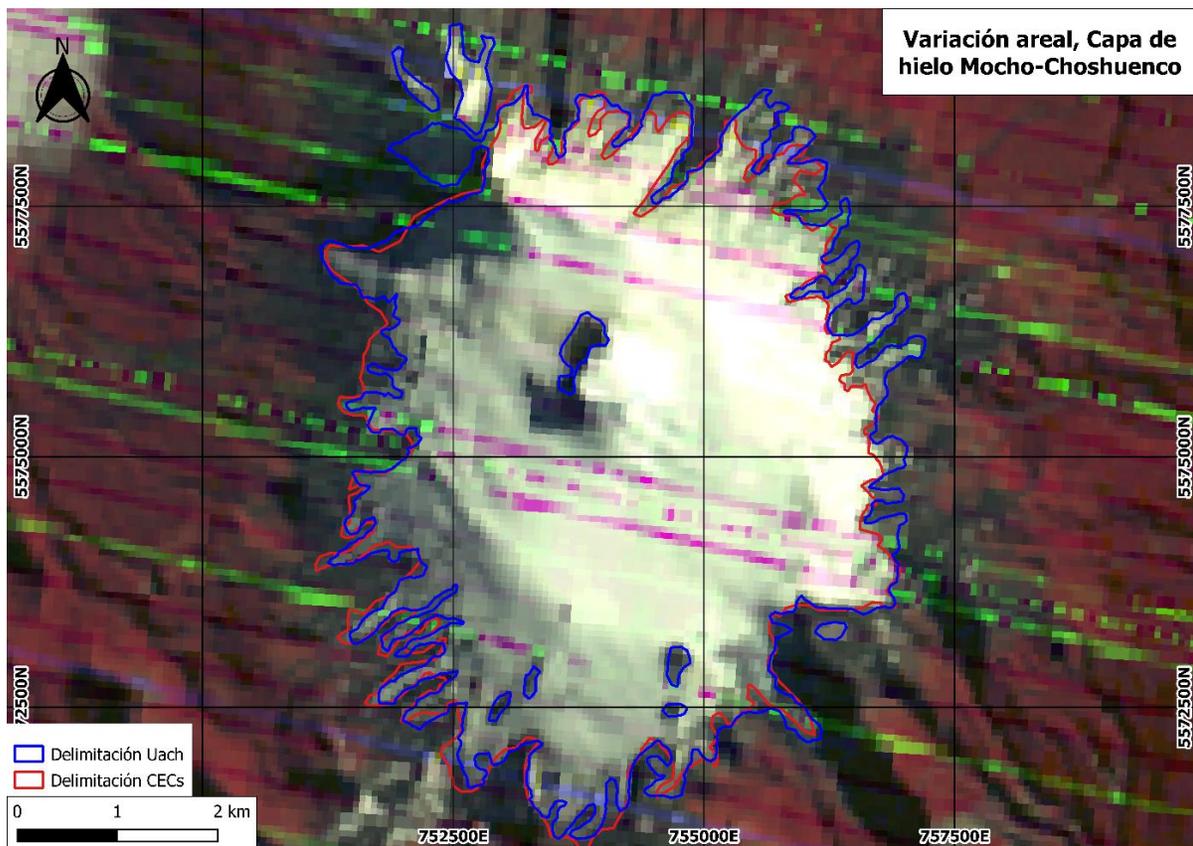


Figura 4.1.9-B. Cartografía de variación areal de 1976 delimitadas por CECs y Uach.

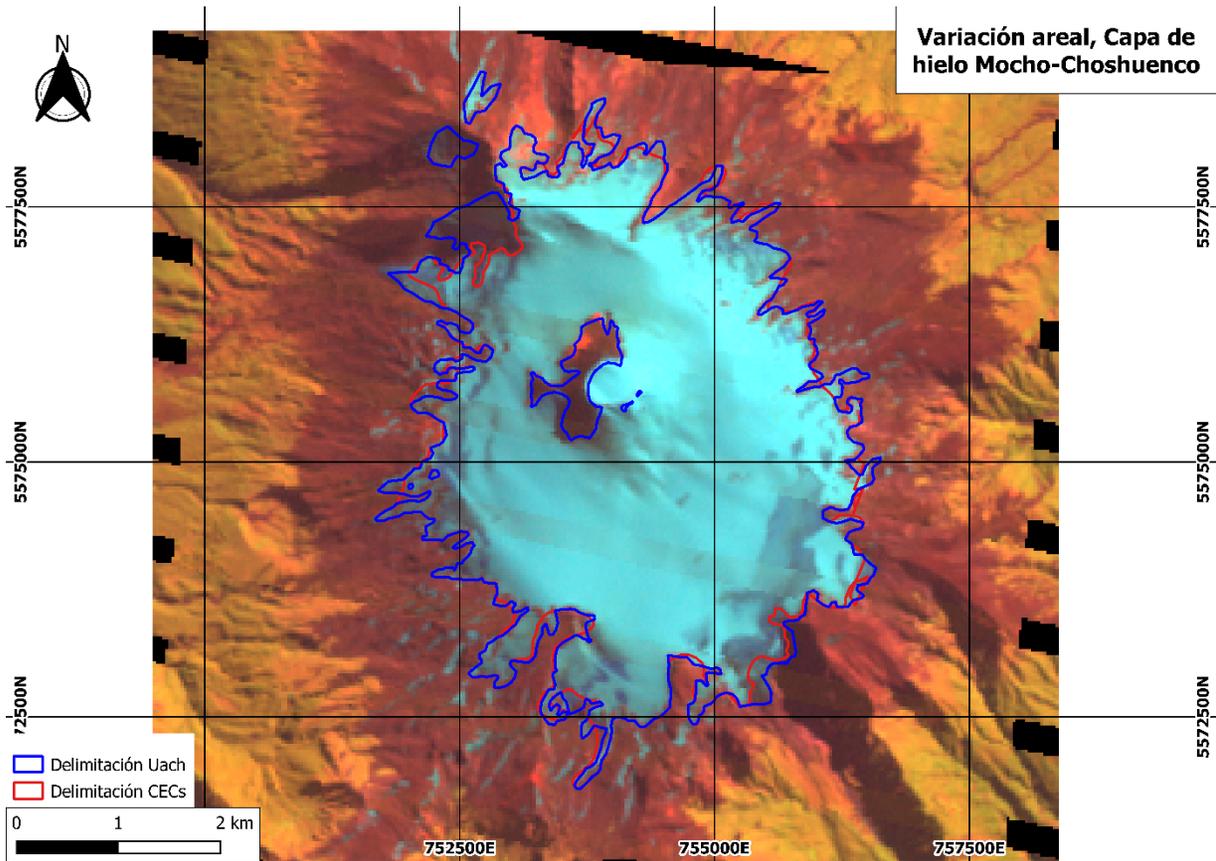


Figura 4.1.9-C. Cartografía de variación areal de 2011 delimitadas por CECs y Uach.

Los resultados de las nuevas variaciones areales (Tabla 4.1.9-B) (Figura 4.1.9-B y Figura 4.1.9-C), muestran una clara tendencia de desglaciación del que se observa por la disminución de la superficie cubierta por la capa de hielo, pasando de un área de 28,81 km² en el año 1976, a 17,92 km² en 2011, presentando un error de interpretación promedio de 1,87 km².

Por último, se pueden encontrar diferencias entre las superficies calculadas por el CECs y las actuales, con un área de 1,41 km² para el año 1976 y de 0,2 km² para el año 2011.

Tabla 4.1.9-B. Variaciones areales 1976-2011 glaciar Mocho.

Año	Resolución (m)	Área (km ²)	Perímetro (km)	Error (km ²)	Área total (km ²)
1976	60	28,81	73,08	3,10	28,81±3,10

Año	Resolución (m)	Área (km²)	Perímetro (km)	Error (km²)	Área total (km²)
1987	30	21,55	47,61	1,00	21,55±1,00
2001	30	18,35	74,06	1,57	18,35±1,57
2011	30	17,92	55,20	1,17	17,92±1,17

Fuente: Elaboración propia.

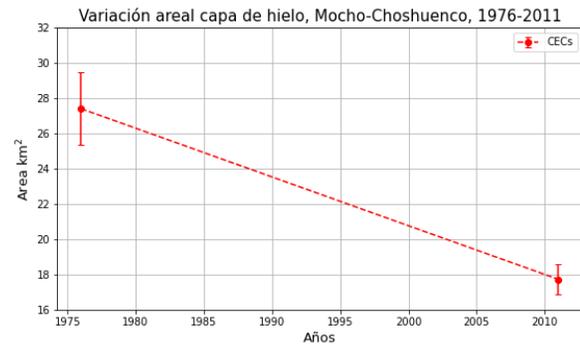


Figura 4.1.9-D. Evolución de la superficie del glaciar Mocho 1976-2011.

4.1.10. Variaciones Areales del Glaciar Sur-Oriental del Volcán Mocho

La variación areal de la cuenca sur-oriental del glaciar Mocho, se determinó para el periodo comprendido desde el año 1976 hasta el año 2021 (Tabla 4.1.10-A). Cabe señalar que los años faltantes en las variaciones históricas, se debe a la acumulación de nieve por precipitaciones estivales, impidiendo una correcta delimitación del glaciar.

Para el año 1976 el glaciar presentaba una superficie de $6,15 \pm 0,57$ km², mientras que en el año 2021 la superficie inventariada fue de $5,10 \pm 0,12$ km², acumulando una disminución areal de 1,05 km², registrándose una tasa de pérdida de 0,023 km² por año.

Tabla 4.1.10-A. Resumen de las variaciones areales históricas del glaciar.

Año	Resolución (m)	Area (km²)	Perímetro (km)	Error (km²)	Área total (km²)
1976	60	6,15	13,40	0,57	6,15 ± 0,57
1987	30	5,91	13,38	0,28	5,91 ± 0,28

Año	Resolución (m)	Area (km²)	Perimetro (km)	Error (km²)	Área total (km²)
2000	30	5,54	11,47	0,24	5,54 ± 0,24
2007	30	5,48	11,21	0,23	5,48 ± 0,23
2011	30	5,42	11,11	0,23	5,42 ± 0,23
2013	30	5,36	11,19	0,23	5,36 ± 0,23
2014	30	5,31	11,31	0,24	5,31 ± 0,24
2015	30	5,26	11,19	0,23	5,26 ± 0,23
2016	30	5,24	11,23	0,23	5,24 ± 0,23
2019	30	5,19	11,40	0,24	5,19 ± 0,24
2020	15	5,14	11,08	0,11	5,14 ± 0,11
2021	15	5,10	11,45	0,12	5,10 ± 0,12

Fuente: Elaboración propia.

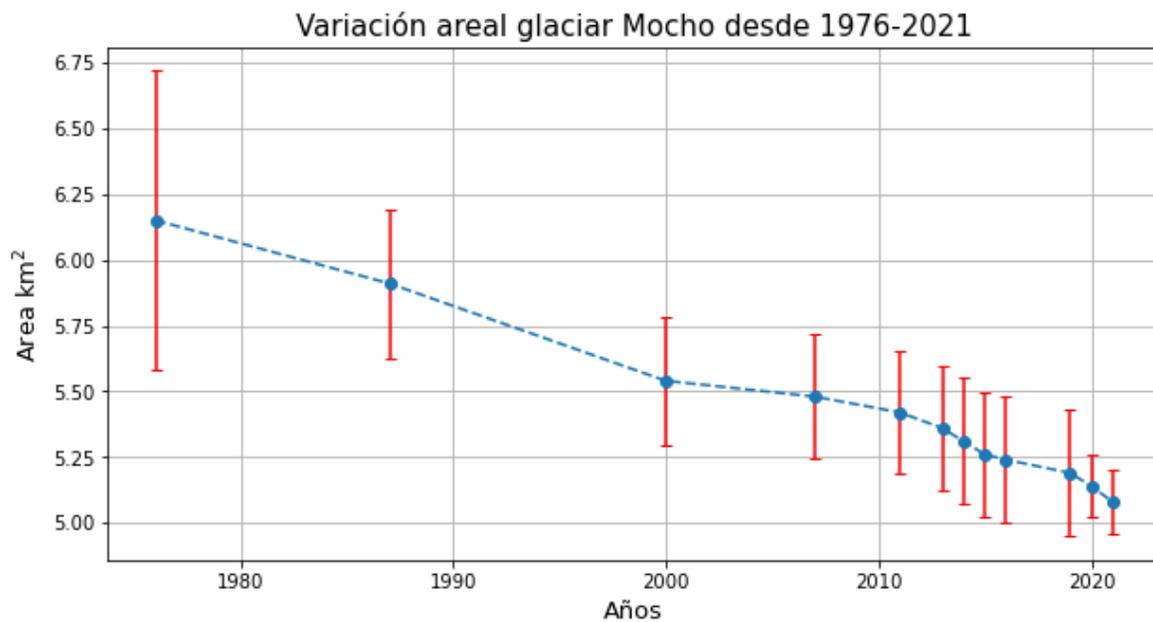


Figura 4.1.10-A. Variación areal desde 1976 hasta 2021, con sus respectivos errores.

En cuanto a la reducción del área del glaciar, destaca las pérdidas de las lenguas frontales, añadiendo que durante el retroceso de la lengua oriental se formó un lago glaciar, que ha estado en constante aumento (Figura 4.1.10-B), además la cumbre del glaciar sufrió

variación, debido a la modificación de la rimaya existente en el borde del cráter del volcán Mocho (Figura 4.1.10-C).

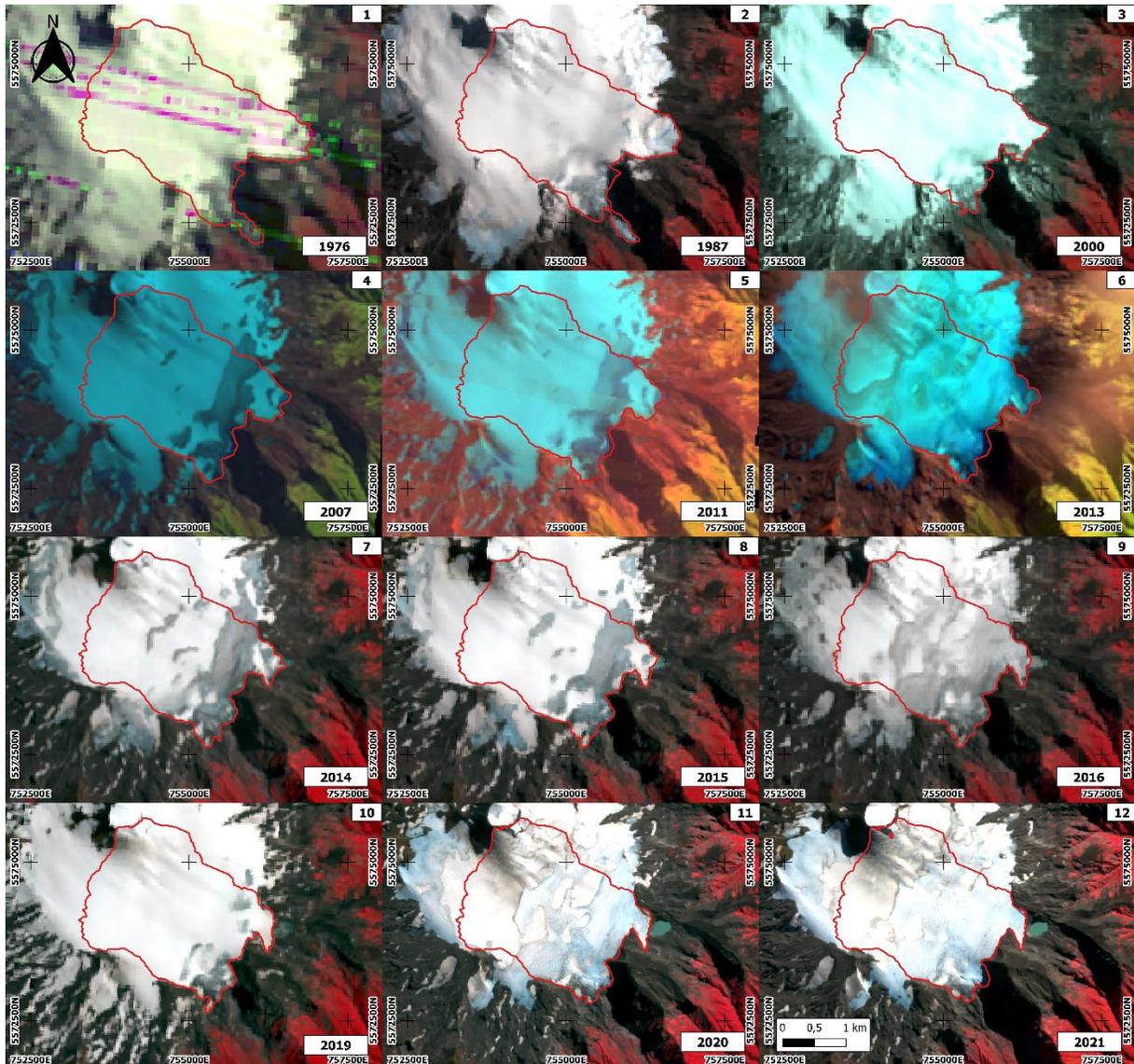


Figura 4.1.10-B. Variación areal desde 1976 hasta 2021.

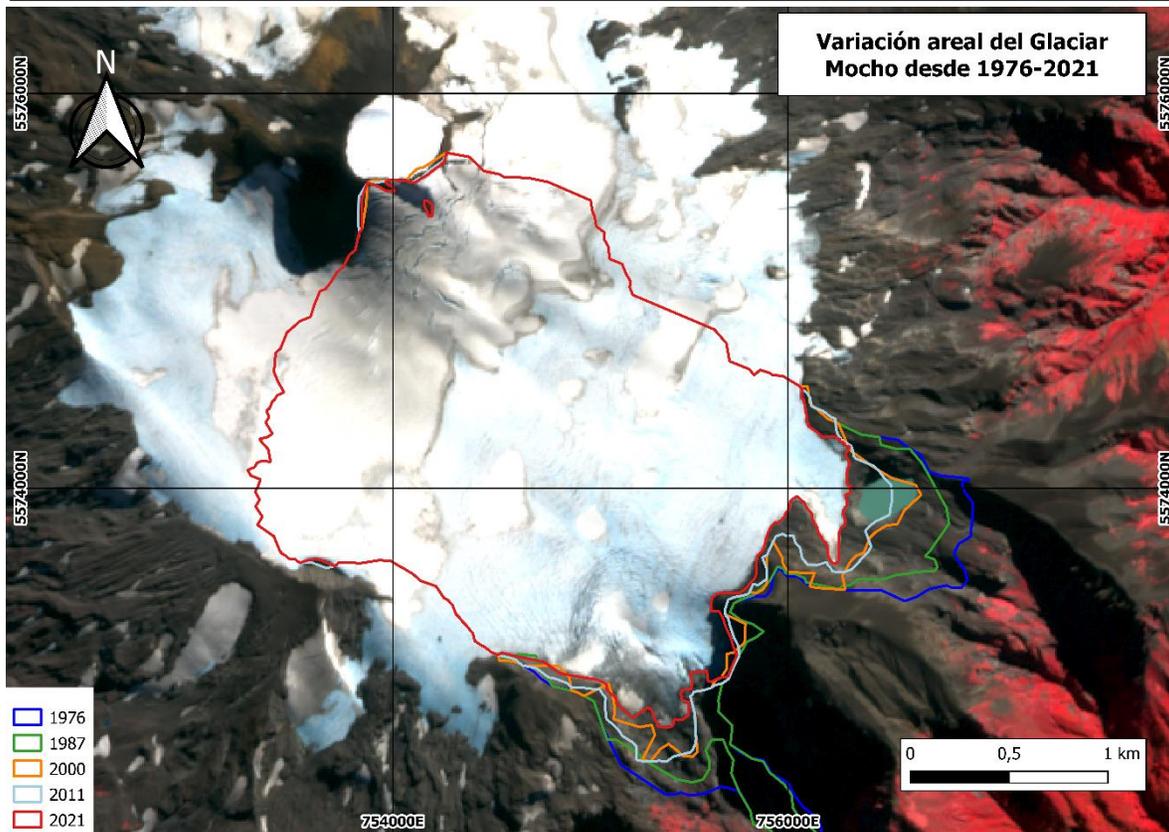


Figura 4.1.10-C. Posición actual del glaciar, con contornos históricos.

4.2. Balance de Masa del Glaciar Mocho (Objetivo 9, objetivo 2, objetivo 5)

4.2.1. Sitios de Medición de Ablación

Los sitios para medición de balizas se muestran en la Figura 4.2.1-A (Tabla 4.2.1-A). La denominación de cada sitio proviene del programa de monitoreo iniciado por el CECs en el año 2003, los cuales se mantienen vigentes a la fecha por el trabajo del equipo científico de la UACH.

Tabla 4.2.1-A. Coordenadas de balizas instaladas en el glaciar SO Mocho.

Baliza	Este (m)	Norte (m)	Altura (msnm)
B10	755652	5573649	1886
B11	756219	5574028	1805
B08	755913	5574050	1892

B15	755506	5574433	1919
B17	755041	5575173	2043
B19	753775	5574446	2025
B18	754656	5574406	1990
B14	754964	5573903	1915
B13	754662	5573426	1917
B12	755251	5573245	1816

Fuente: Elaboración propia.

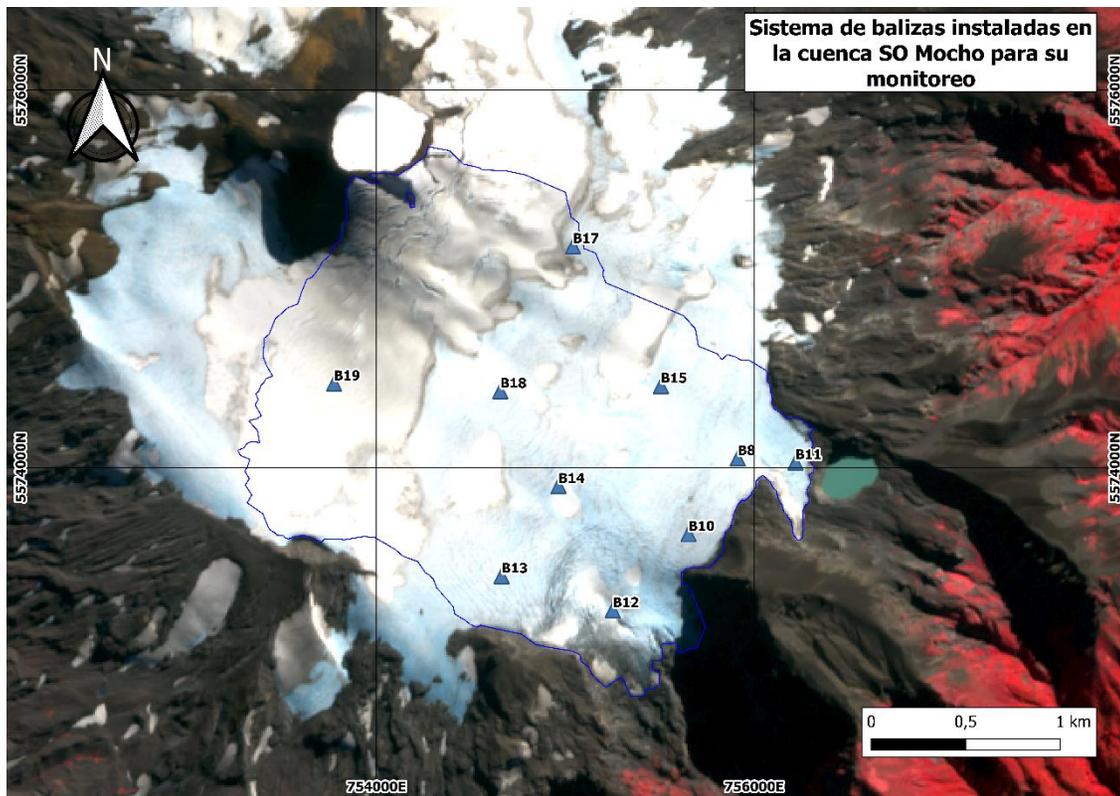


Figura 4.2.1-A. Ubicación de balizas en el glaciar sur-oriental del volcán Mocho.

En cada baliza se midió la posición geográfica por medio de un sistema GNSS con corrección diferencial, simultáneamente se procedió a medir la altura de cada baliza. Posteriormente se estimó la ablación de nieve o hielo según corresponda.

4.2.2. Balance de Masa Método Geodésico

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en el proceso de cálculo del balance de masa geodésico del glaciar sur-oriental del volcán Mocho. En este informe, se presentan dos balances de masa geodésico. El primero corresponde al periodo 1961 (IGM)- 2000 (SRTM) y el segundo corresponde al periodo 2000 (SRTM)- 2021 (LiDAR), este último se levantó con el instrumento y personal de la DGA en abril, abarcando un 90% de la cuenca glaciar.

También se realizó un balance de masa geodésico para la temporada estival, calculado a partir de los datos del levantamiento GNSS cinemático, ejecutado durante la campaña del mes de enero de 2021 (Anexo 1), y los datos LiDAR de abril de 2021.

4.2.2.1 Variación Areal

Para determinar la variación areal, se estimó el contorno del año 1976, debido a que las imágenes del levantamiento de 1961 presentan mucha nieve, no teniendo una delimitación correcta del glaciar, para lo cual se utilizó el contorno del año 1976 donde el glaciar presentaba una superficie de $6,10 \pm 0,61 \text{ km}^2$, mientras que para el año 2000 el área glaciar se redujo hasta $5,54 \pm 0,24 \text{ km}^2$ (Figura 4.2.2.1-A). En la actualidad la superficie del glaciar mocho es de $5,08 \pm 0,12 \text{ km}^2$ (Figura 4.2.2.1-B). En estos 45 años la cuenca SO Mocho perdió $1,02 \text{ km}^2$, presentando una tasa de pérdida anual de $0,023 \text{ km}^2$.

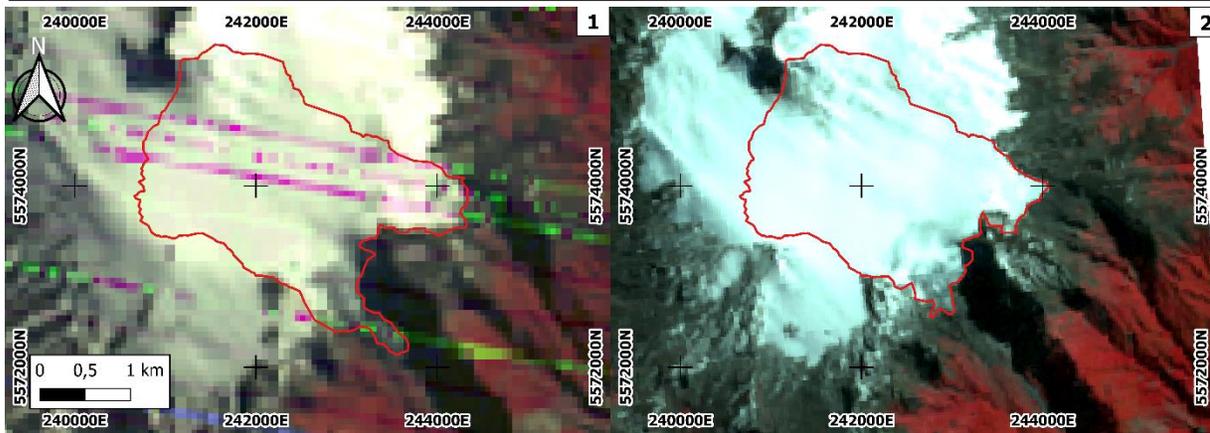


Figura 4.2.2.1-A. Variación areal del glaciar Mocho entre 1976-2000. 1: Corresponde a una imagen satelital Landsat MSS (432 composición de banda) y 2: Corresponde a una imagen satelital Landsat ETM+ (432 composición de banda).

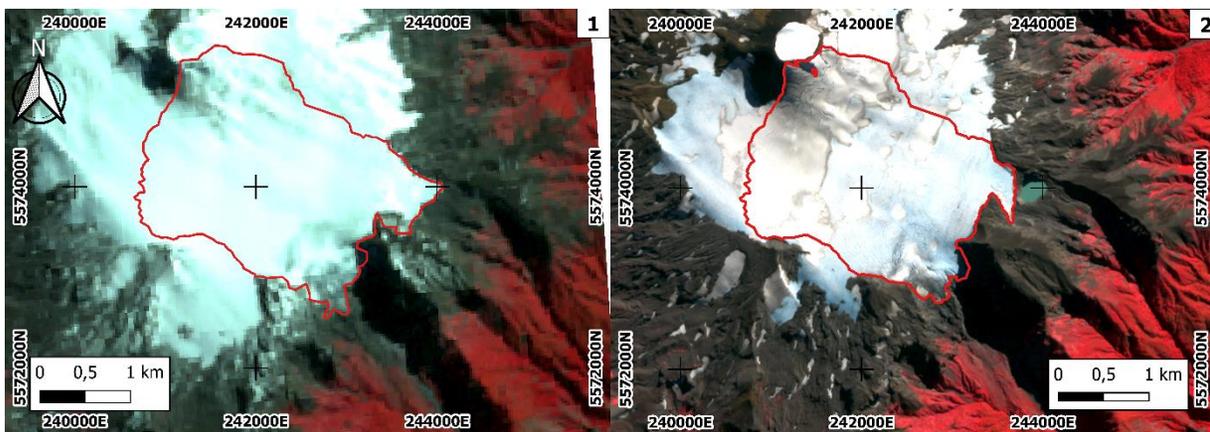


Figura 4.2.2.1-B. Variación areal del glaciar Mocho entre 2000-2021. 1: Corresponde a una imagen satelital Landsat ETM+ (432 composición de banda) y 2: Corresponde a una imagen satelital Sentinel 2 (432 composición de banda).

4.2.2.2 Balance de Masa Geodésico

Para calcular los balances de masa geodésico, se realizó un proceso de co-registro donde se buscaron zonas de control fuera del glaciar, zonas que no presentaron variaciones altimétricas con pendiente inferiores a los 10°, con el fin de disminuir los errores verticales y horizontales, donde el error vertical entre el DEM del 1961-2000 fue de $\pm 0,9$ metros

(Figura 4.2.2.2-A), mientras que el error vertical entre el DEM 2000-2021 fue de $\pm 0,4$ metros (Figura 4.2.2.2-B).

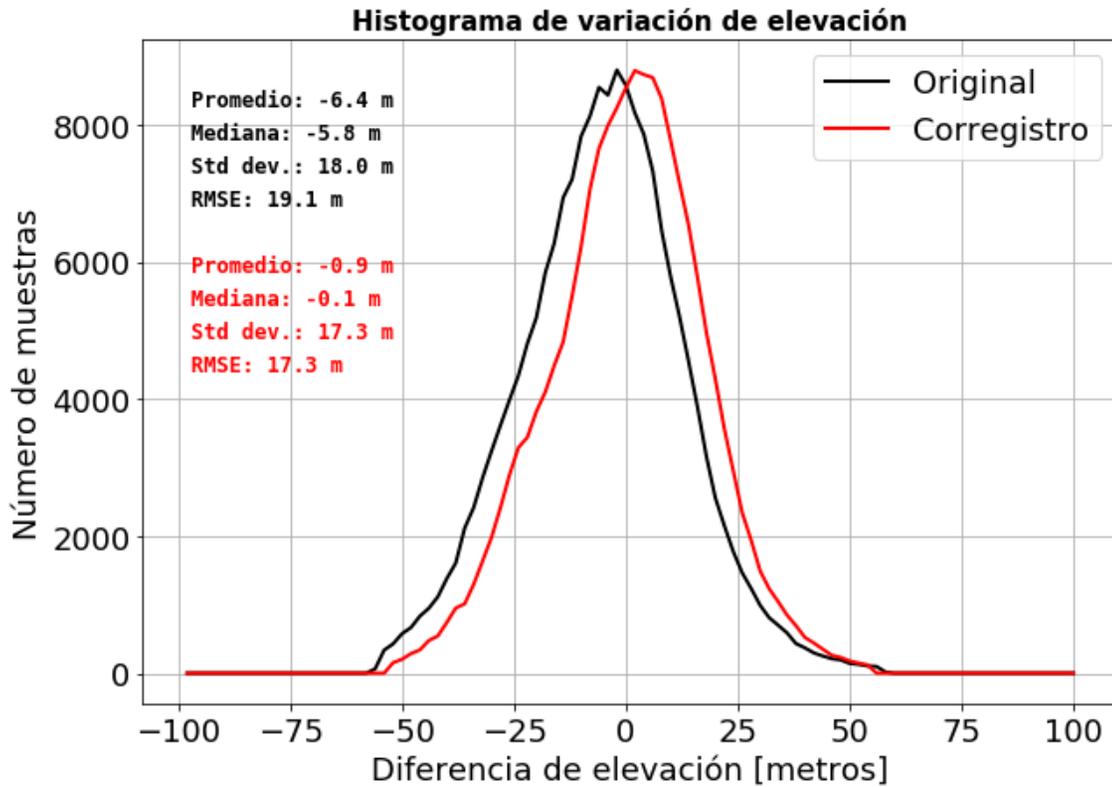


Figura 4.2.2.2-A. Gráfico de dh/dt sin corregido y con corregido para el periodo 1961-2000.

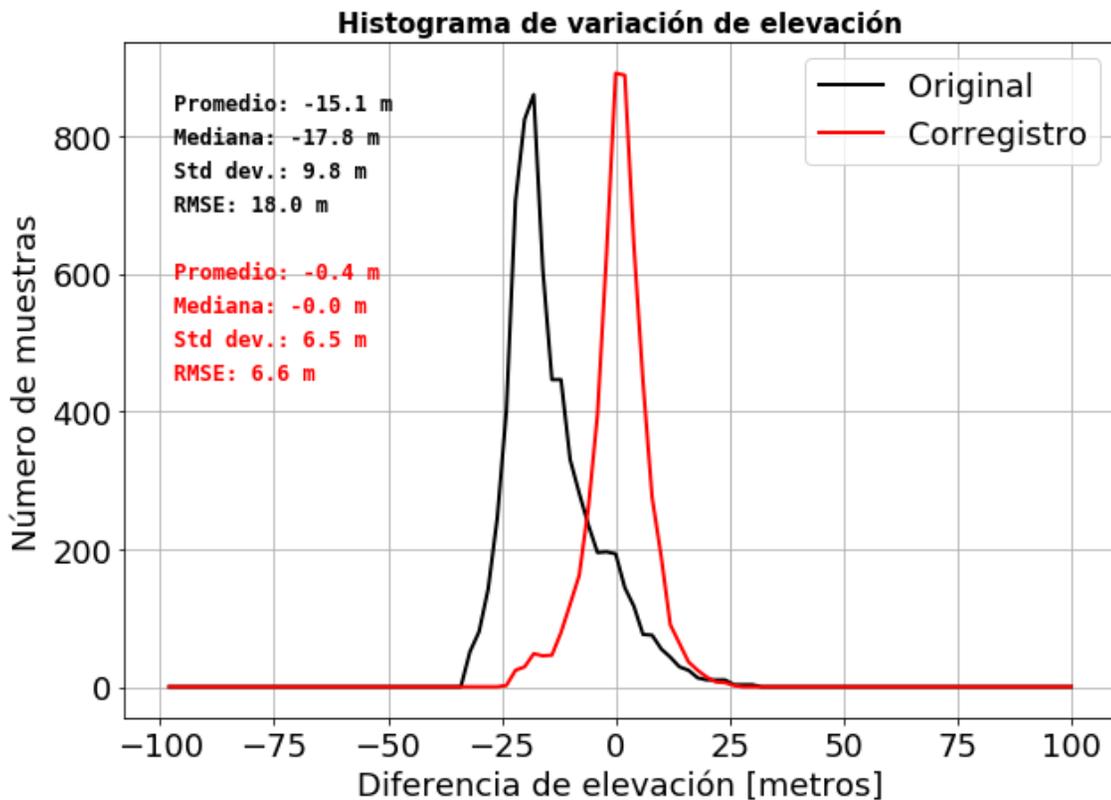


Figura 4.2.2.2-B. Gráfico de dh/dt sin corregido y con corregido para el periodo 2000-2021.

La Figura 4.2.2.2-C, muestra la distribución espacial de los cambios de elevación en función al tiempo para el periodo 1961-2000, con un balance de masa de $27,71 \pm 7,74$ (m eq.a.), y un balance anual de $-0,71 \pm 0,19$ (m eq.a. \cdot a $^{-1}$) (Tabla 4.2.2.2-A). Gran parte del glaciar presentó una variación altimétrica negativa, salvo por una parte en la cumbre del volcán Mocho donde se observa un balance de masa positivo de 4,47 (m eq.a.). Hay que agregar que esta zona está a una altitud de 2400 m.s.n.m. aproximadamente.

La Figura 4.2.2.2-C, muestra la distribución espacial de los cambios de elevación en función del tiempo para el periodo 2000-2021, obteniendo un balance de masa de $-15,9 \pm 4,59$ (m eq.a.), y un balance anual de $-0,76 \pm 0,11$ (m eq.a. \cdot a $^{-1}$). La mayor parte del glaciar presentó una variación altimétrica negativa, salvo en la cumbre del volcán mocho, donde presenta un balance positivo de 23,4 metros, esto se debe probablemente al movimiento de la rimaya y grietas.

Tabla 4.2.2.2-A. Resumen de cambios de volumen y balance de masa geodésico para cada periodo. Obsérvese que se utilizó una densidad de hielo de $850 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ según Huss (2013).

Periodo	Cambio de Volumen (km^3)	Cambio de elevación total (m eq.a.)	Cambio de elevación (m eq.a. $\cdot\text{a}^{-1}$)
1961-2000	0,20	$-28,05 \pm 7,74$	$-0,71 \pm 0,15$
2000-2021	0,10	$-16,2 \pm 4,59$	$-0,77 \pm 0,11$

Fuente: Elaboración propia.

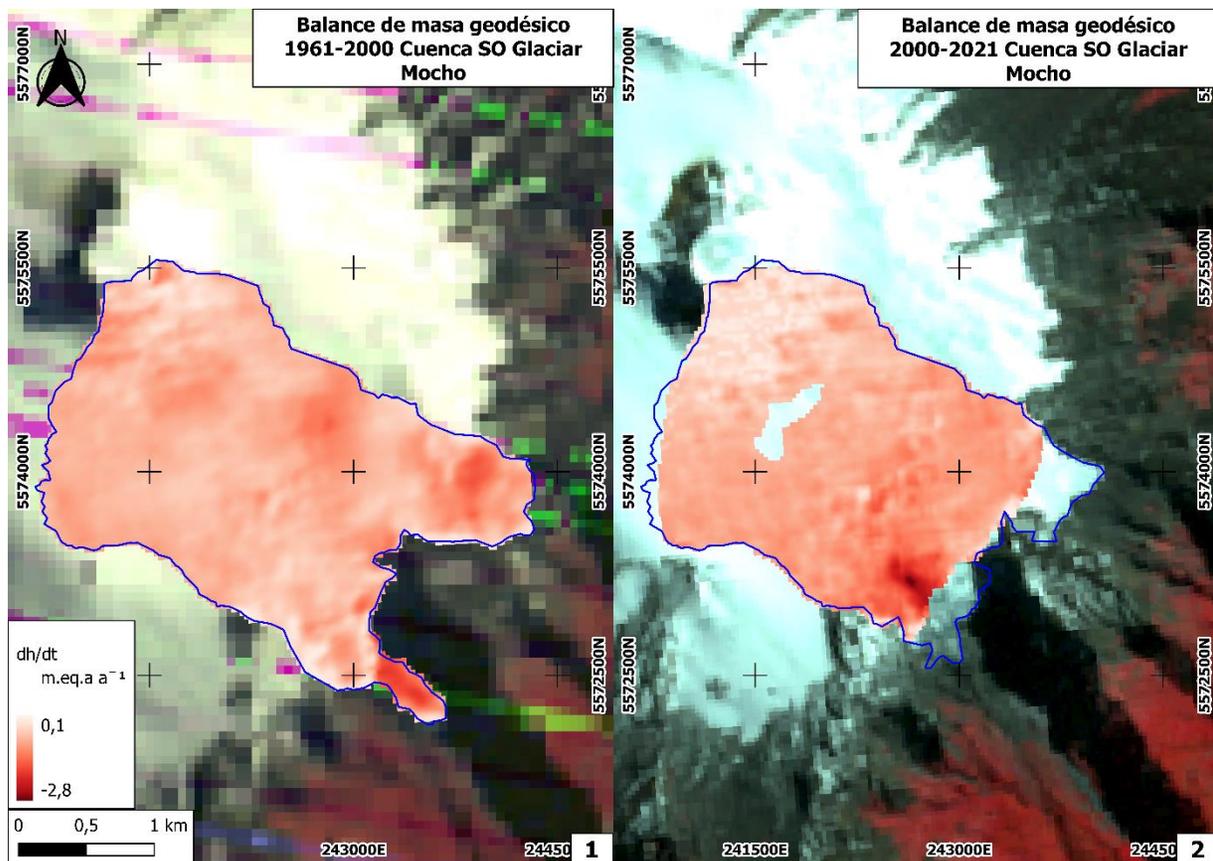


Figura 4.2.2.2-C. Mapa de tasa de cambio de elevación para el glaciar Mocho (dh/dt) entre 1961-2021. 1: Corresponde a la pérdida de masa glaciar 1961-2000 en metros equivalentes en agua por año, 2: Corresponde a la pérdida de masa glaciar 2000-2021 en metros equivalentes en agua por año.

4.2.2.3 Balance de masa GPS-LiDAR

El balance entre los meses de enero (GNSS) y abril (LiDAR), muestra una disminución promedio de -1,89 (m eq.a.) (Figura 4.2.2.3-A) alcanzando pérdida de -5,4 m eq.a. en la B12. En cuanto a la diferencia entre el balance glaciológico y GNSS-LiDAR este presenta un error (RMSE) de -1,62 (m eq.a) (Figura 4.2.2.3-B).

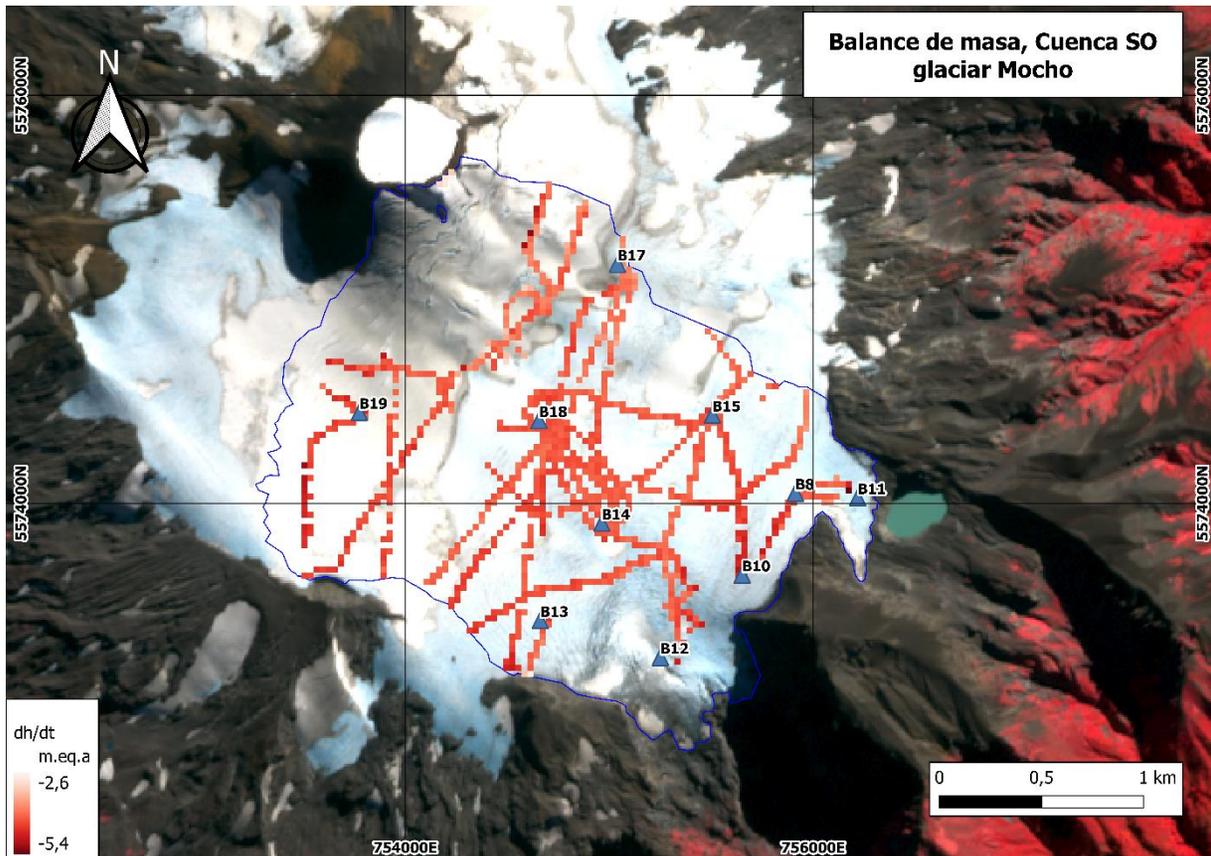


Figura 4.2.2.3-A. Mapa de tasa de cambio de elevación para el glaciar Mocho (dh/dt) entre enero y febrero mediante levantamiento GNSS y LiDAR.

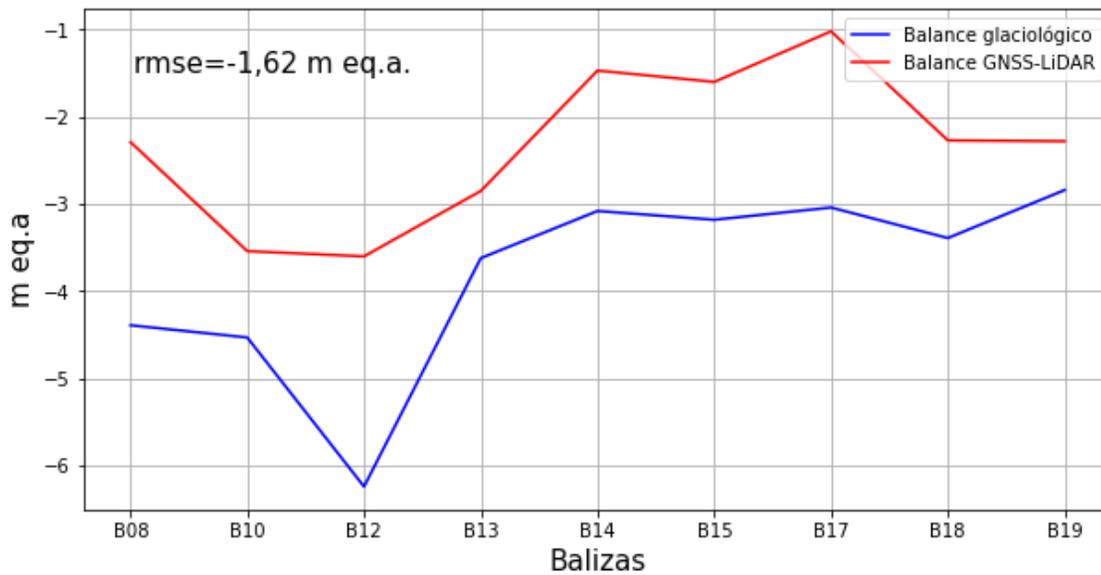


Figura 4.2.2.3-B. Diferencias entre balance glaciológico y balance GNSS-LiDAR, calculadas mediante RMSE.

4.2.3. Balance de Masa Método Glaciológico

Un resumen con los resultados del balance de masa en cada baliza se muestra en la Tabla 4.2.3-A.

Para realizar el balance glaciológico se aplicó una interpolación IDW, ya que esta presentó un menor grado de error (Tabla 4.2.3-B) en las pruebas de validación cruzada. El balance estival de la cuenca SO glaciar Mocho presentó una pérdida promedio de -3,67 m eq.a. desde los meses de enero hasta abril (Figura 4.2.3-B).

Tabla 4.2.3-A. Balance de masa en balizas, temporada estival 2020-2021.

Baliza	Balance de masa m eq.a.				
	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Total
B08		-1,90	-1,80	-0,69	-4,39
B10		-1,89	-1,71	-0,93	-4,53
B11		-2,17	-1,70	-0,78	-4,65
B12		-3,30	-1,88	-1,06	-6,24
B13		-1,74	-1,04	-0,84	-3,62

B14		-1,74	-0,94	-0,40	-3,08
B15		-1,55	-0,86	-0,77	-3,18
B17	-0,56	-1,76	-0,89	-0,39	-3,60
B18	-0,61	-1,67	-1,08	-0,64	-4,00
B19	-0,46	-1,59	-0,87	-0,38	-3,30

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.2.3-B. RMSE (m eq.a.) de interpolaciones para determinar método para realizar balance glaciológico.

Método	Febrero	Marzo	Abril	Estival
RBF	-0,008	-0,008	-0,007	-0,007
IDW	-0,004	-0,004	-0,007	-0,006
Kriging Ordinario	-0,387	-0,056	-0,096	-0,341
Kriging Universal	-0,386	-0,238	-0,130	-0,607

Fuente: Elaboración propia.

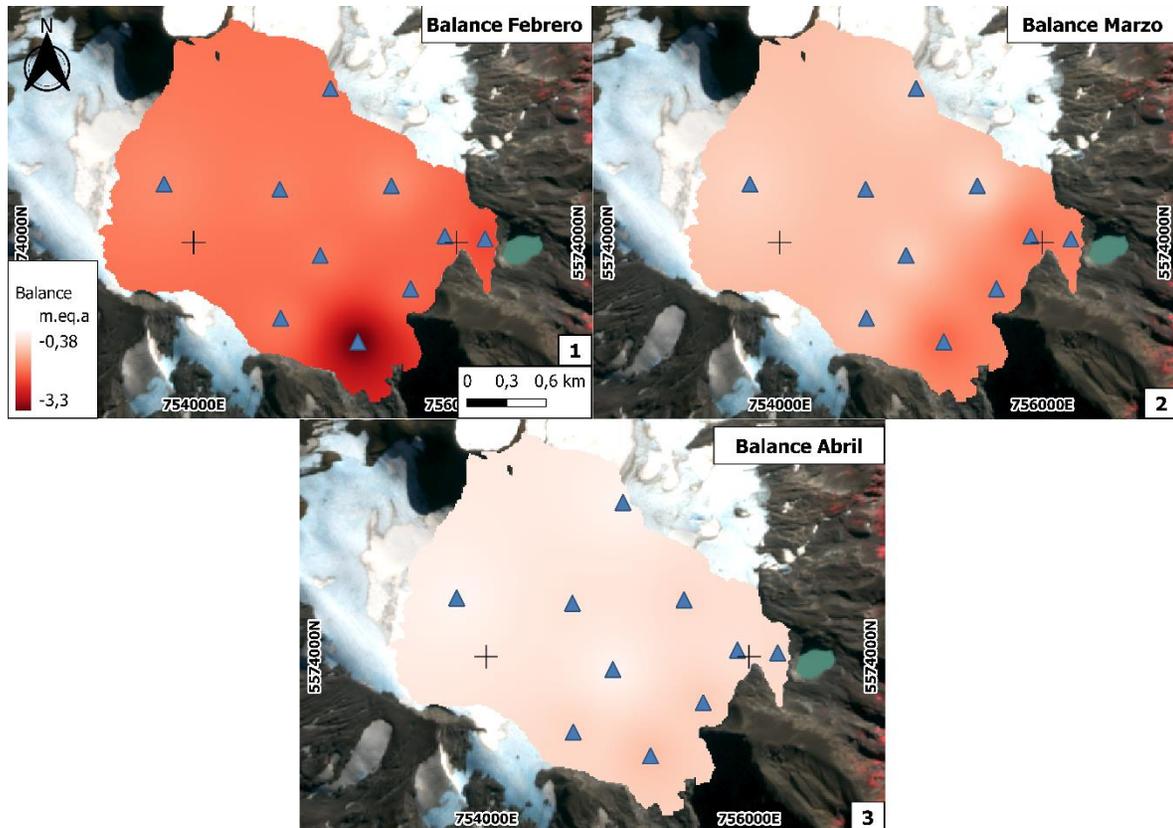


Figura 4.2.3-A. Balance de masa método glaciológico para el periodo estival 2021.

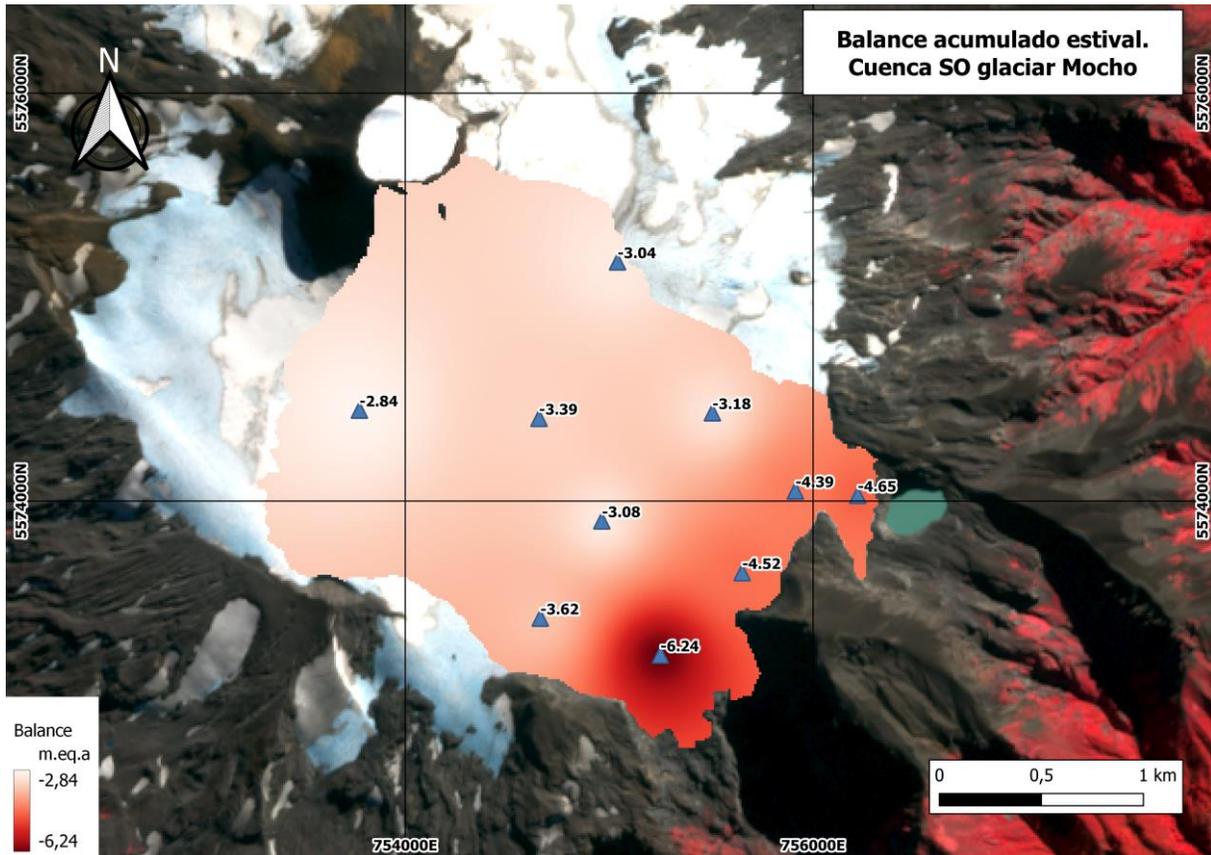


Figura 4.2.3-B. Balance de masa acumulado método glaciológico para el periodo estival 2021.

4.3. Mediciones GNSS & Desplazamiento del Glaciar (Objetivo 6, objetivo 7)

En esta sección presentamos los resultados obtenidos con los datos de los equipos GNSS:

1. La elevación del glaciar durante el mes de enero (Figura 4.3-A). Con estos datos se realizó el balance geodésico GPS-LIDAR (sección 4.2.2.3).
2. Las coordenadas exactas obtenidas para las diferentes balizas en las campañas de enero, marzo y abril. (Tabla 4.3-A).

Debido a la alta precisión de las mediciones, se pudo observar el desplazamiento horizontal de las balizas entre enero y abril, como consecuencia del movimiento del glaciar, (Tabla

4.3-B, Figura 4.3-B) y también su variación vertical, lo cual se debe mayoritariamente a la fusión de nieve y hielo (Tabla 4.3-C).

En comparación con las velocidades reportadas en DGA (2013), se puede apreciar que las velocidades, debido al desplazamiento horizontal, observadas en este estudio, fueron siempre menores. Esto se puede deber a diferentes factores, como por ejemplo, la diferente época del año en la cual se realizaron las observaciones y también a una desaceleración del glaciar por la pérdida de masa.

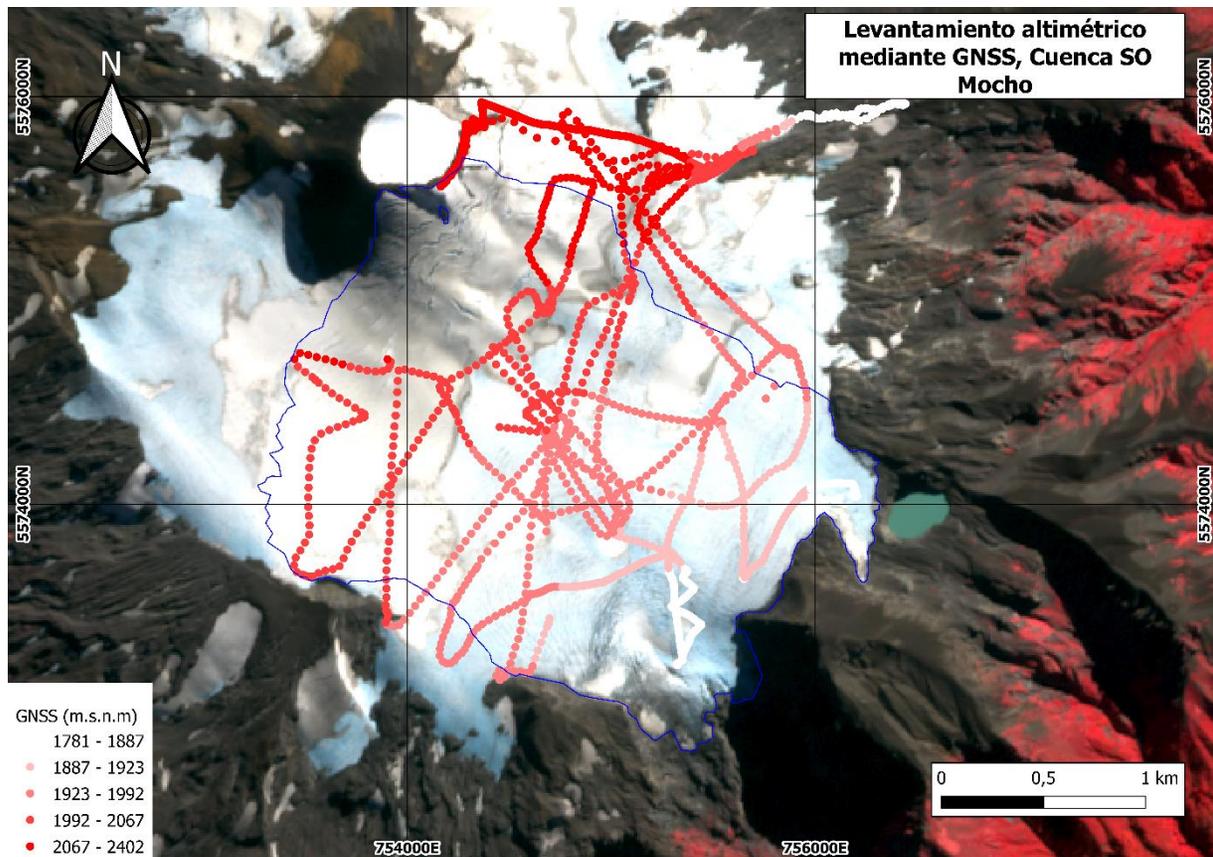


Figura 4.3-A. Datos altimétricos del mes de enero levantado mediante GNSS, cuenca SO Glaciar Mocho.

Tabla 4.3-A. Coordenadas de las balizas obtenidas por las mediciones GNSS.

Mes	Enero	04/01/2021	
Baliza	X (m)	Y (m)	Z (m)
B3	754164,37	5575560,41	2401,35
B8	755927,78	5574037,27	1892,97
B10	755650,56	5573633,55	1886,94
B11	756204,10	5574035,99	1829,58
B12	755322,39	5573210,88	1786,56
B13	754691,62	5573415,69	1921,23
B14	755013,46	5573862,68	1923,68
B15	755540,87	5574384,81	1923,14
B17	755116,47	5575083,74	2041,91
B18	754711,66	5574337,12	1988,82
B19	753786,98	5574436,63	2032,97
Mes	Marzo	29/03/2021	
B3	754165,67	5575559,52	2396,03
B8	755928,37	5574037,30	1888,42
B10	755650,36	5573631,61	1882,15
B11	756204,51	5574036,04	1824,01
B12	755325,83	5573204,91	1782,68
B13	754698,31	5573414,47	1916,12
B14	755016,30	5573858,88	1918,10
B15	755542,05	5574382,83	1919,40
B17	755119,86	5575080,32	2036,96
B18	754713,16	5574334,77	1984,14
B19	753788,39	5574435,03	2027,52
Mes	Abril	24/04/2021	
B3			
B8	755928,55	5574037,17	1887,81
B10	755650,29	5573630,81	1881,36
B11	756204,74	5574035,92	1823,16
B12	755326,66	5573203,08	1782,10
B13	754700,58	5573413,29	1914,99
B14	755017,12	5573857,57	1916,99
B15	755542,22	5574382,47	1918,76
B17	755120,65	5575079,25	2036,12
B18	754713,64	5574334,04	1983,42
B19	753788,66	5574434,55	2026,84

Fuente: Elaboración propia.

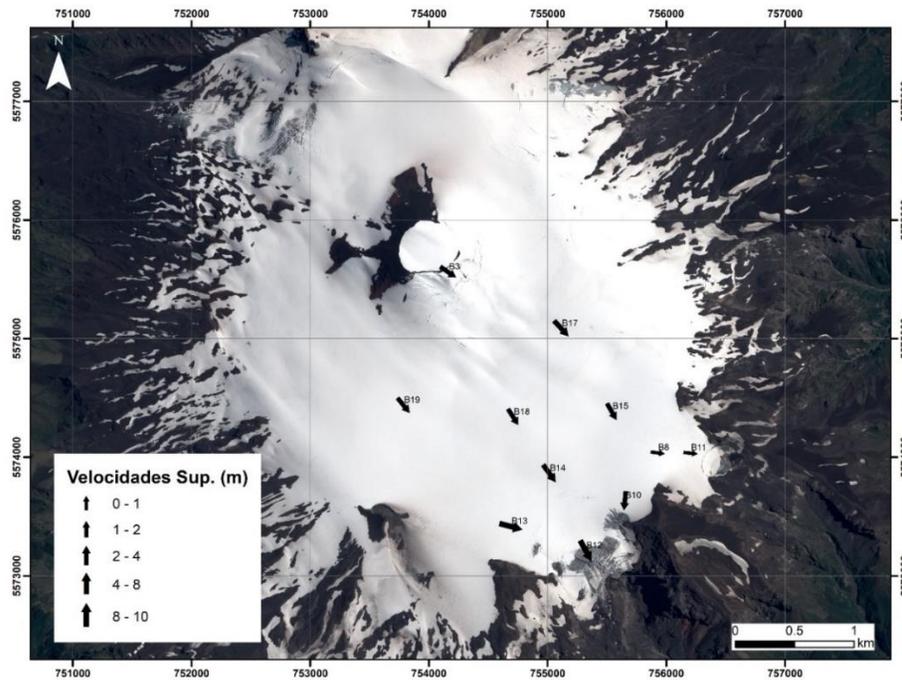


Figura 4.3-B. Desplazamiento horizontal de las balizas observado entre enero y abril 2021.

Tabla 4.3-B. Desplazamiento y velocidades interferidos.

Baliza	Velocidad (m/a) enero-abril 2021	Velocidad (m/a) julio-octubre 2013 (Geoestudios)
B3	6,7	
B8	2,6	22,2
B10	9,1	12,7
B11	2,2	
B12	29,5	60,3
B13	30,8	
B14	20,8	33,8
B15	8,9	19,4
B17	20,3	31,2
B18	12,2	27,2
B19	8,9	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4.3-C. Variación vertical medida con GNSS.

Nombre	Mov. horizontal GPS (m)	Δz GPS (m)	Pend. DEM (%)	Δz por mov. (m)	Δz corregido GPS (m)
Baliza B8	0,77	-5,15	12%	-0,09	-5,06
Baliza B10	2,75	-5,58	10%	-0,28	-5,31
Baliza B11	0,65	-6,42	32%	-0,21	-6,21
Baliza B12	8,89	-4,45	13%	-1,16	-3,29
Baliza B13	9,27	-6,24	9%	-0,83	-5,41
Baliza B14	6,30	-6,69	18%	-1,13	-5,56
Baliza B15	2,69	-4,38	2%	-0,05	-4,33
Baliza B17	6,13	-5,79	14%	-0,86	-4,93
Baliza B18	3,66	-5,4	11%	-0,40	-5,00
Baliza B19	2,67	-6,13	9%	-0,24	-5,89

Fuente: Elaboración propia.

5. PLAN DE CONTINGENCIA Y TRABAJO SEGURO

A continuación, se presenta información respecto de los procedimientos para el desarrollo del trabajo seguro, planes de contingencia por riesgos volcánico, sanitario (COVID-19) y accidentes.

5.1. Antecedentes Generales

Las actividades que se desarrollaron en el glaciar son; instalación y medición de balizas, levantamiento con instrumento GPS diferencial de cada baliza, mediciones de densidad, levantamiento LiDAR terrestre y levantamiento con GPS de a lo menos 50% de la superficie del glaciar. Para esto se deben realizar desplazamientos y estadía por periodos cortos en el terreno, lo cual podría generar una situación de emergencia.

Se entenderá como emergencia producto de las actividades, aquellos sucesos que generen alteración en el normal desplazamiento de las personas involucradas en la ejecución de los estudios o situaciones que puedan ocurrir en el desarrollo de las actividades, tales como:

De origen de variables naturales y climáticas:

- Tormentas
- Avalanchas

De origen Antrópico:

- Caída a grietas
- Congelamiento por exposición
- Lesiones producidas por caídas

Del equipos y equipamiento:

- Accidentes en moto de Nieve
- Desperfectos en equipos e instrumentos

5.2. Objetivos

5.2.1. Objetivo General

Mantener un monitoreo constante de las condiciones adversas y una adecuada coordinación con los organismos técnicos locales e instituciones vinculadas al sector, considerando que se podrían generar incidentes o situaciones de origen natural o antrópico que puedan afectar a las personas y/o que no permitan el normal desarrollo de los trabajos.

5.2.2. Objetivos Específicos

- Reforzar las medidas preventivas que disminuyan la probabilidad de alguna emergencia.
- Reforzar la coordinación con organismos técnicos de rescate.
- Coordinar el mejor uso de los recursos disponibles

5.3. Vigencia del Plan

Tabla 5.3-A. Vigencia del plan de contingencia y trabajo seguro.

Inicio vigencia		Termino vigencia	
Fecha	Hora	Fecha	Hora
03/01/2021	5:00	31/08/2021	18:00

Fuente: Elaboración propia.

La presente prestación de servicios especializados se enmarca dentro de la realización de un trabajo de asistencia a la UGN en el monitoreo de detalle intensivo (nivel 2) en el glaciar sur-oriental del volcán Mocho.

Las características típicas de este macizo volcánico, a pesar de estar situado por debajo de la altitud que definen Alta montaña de Montaña, que está normado desde los 3000 metros sobre el nivel del mar (D.S. N° 594/00 del Ministerio de Salud), cuenta con la mayoría de

los elementos de ésta (hielo, nieve, grietas), lo que implica riesgos asociados al trabajar en estos escenarios.

En atención a lo anterior y al posible aumento de vulnerabilidad asociado a este trabajo, se establece este plan de contingencia para la coordinación interna, como también la coordinación entre los organismos técnicos e instituciones pertinentes en la atención y manejo de emergencias locales.

5.4. Identificación de Escenarios

El sector donde se realizaron las actividades se enmarca en las caras Norte, Nor Este y Sur este del glaciar Mocho así mismo en la cumbre de este complejo volcánico, lo que cuenta con condiciones adversas, tanto topográficas como climáticas, lo que hace necesario un monitoreo constante de estas variables.

5.4.1. Ubicación Geográfica de la Zona

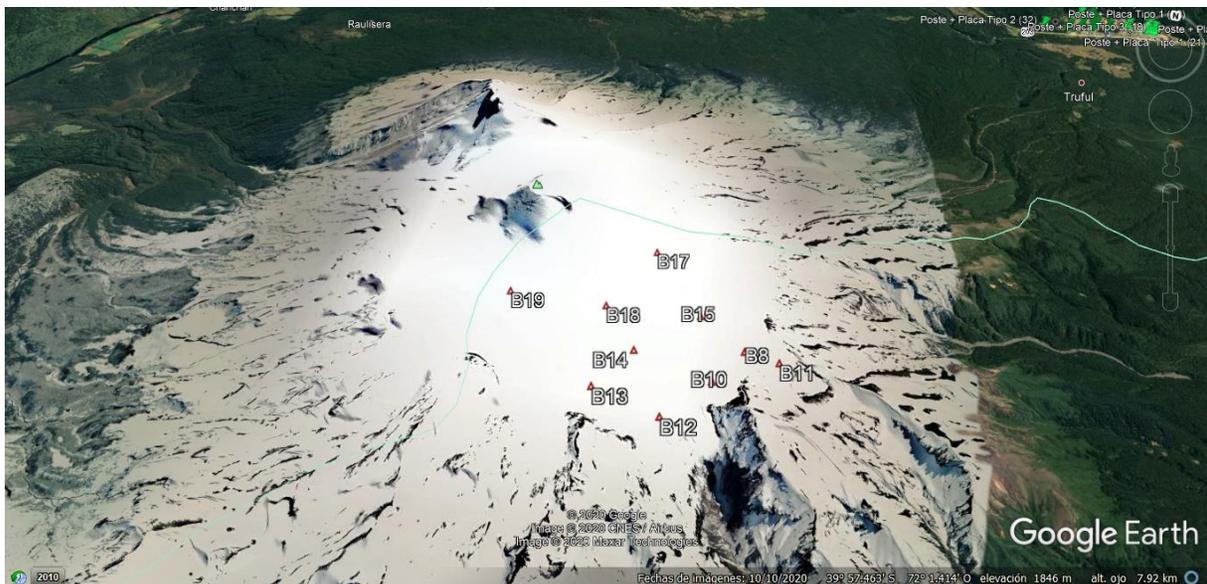


Figura 5.4.1-A. Ubicación del área de trabajo.

5.4.2. Identificación y Descripción de Escenarios posibles

A continuación, se enumeran los escenarios posibles de acuerdo con la situación de peligro y riesgo asociado al trabajo en el glaciar.

Tabla 5.4.2-A. Descripción de Escenarios y Amenazas.

Escenario	Tipo de amenaza	Descripción de la amenaza	Efectos potenciales
1	Natural	Sismo de mayor intensidad	Corte de caminos, avalanchas
2	Natural	Actividad Volcánica	Derrumbe en caminos, lahares, flujo de lavas, colapso de piroclastos
3	Antrópico	Lesiones producidas por caídas	Impedimento del normal desplazamiento
4	Antrópico	Accidente vehicular en nieve	Impedimento del normal desplazamiento y lesiones leves, graves
5	Antrópico	Accidentes en caminos de acceso	Impedimento del normal desplazamiento a lugares de retorno y lesiones leves, graves

Fuente: Elaboración propia.

5.5. Estrategia de Respuesta

5.5.1. Medios de Telecomunicación

Tabla 5.5.1-A. Medios de Telecomunicación.

Medios de Telecomunicación									
Telefonía			Radio Comunicación				Satelital		
Fija	Móvil	Línea Privada	VHF	UHF Tranking	HF ALE	HF VFO	P-25	Telefonía	Internet
x	x							x	x

Fuente: Elaboración propia.

La utilización de distintos equipos y sistemas de comunicación es esencial ya que en eventuales emergencias de magnitud mayor algunos sistemas colapsan.

5.5.2. Evaluación y Respuesta

Ante la salida del grupo de trabajo se tomarán en consideración las siguientes variables antes de efectuar una acción:

- Evaluación de pronóstico meteorológico
- Aviso de salida a los organismos pertinentes de montaña (Socorro andino)
- Revisión de equipamiento y maquinaria
- Evaluación de las condiciones del terreno (Nieve, hielo, grietas)

5.6. Planes Sectoriales

De acuerdo con lo mencionado en escenarios probables, en caso de emergencias relacionadas con sismo/tsunami y erupción volcánica, se aplicarán las planificaciones regionales y comunales vigentes para estas variables.

5.6.1. Plan de Contingencia por Variable Volcánica Mocho

En atención a la actual situación se tomarán las acciones vigentes en este plan.

5.6.2. Plan de Contingencia por Emergencia Sanitaria (COVID-19)

En atención a la actual situación sanitaria se tomarán las acciones vigentes en este plan y en atención a las normas sanitarias del momento.



5.7. Coordinación

Con el fin de realizar coordinaciones ante eventual emergencia se establecerá coordinación con; Departamento de prevención de riesgos UACH, Socorro Andino Región de Los Ríos, Carabineros y empresas locales.

6. CONCLUSIONES

Este proyecto tenía como fin realizar diferentes estudios sobre la capa de hielo Mocho-Choshuenco. Estos estudios consistían en:

- 1 determinación de variaciones areales vía imágenes satelitales e información histórica.
- 2 revisión de la definición de la cuenca "Glaciar Mocho" IPG2020.
- 3 medición de ablación en balizas durante el verano 2021 (balance glaciológico).
- 4 diferenciación de modelos digitales de elevación de diferentes fechas (balance geodésico).
- 5 determinar la dinámica del glaciar mediante mediciones repetidas de la posición de las balizas con receptores GNSS de doble frecuencia y usando el método de posicionamiento diferencial.

Las conclusiones que derivamos de los resultados presentados en la sección 4 son los siguientes:

Desde el año 1976 hasta 2011 el área de la capa de hielo Mocho-Choshuenco cayó desde $28,81 \pm 3,10 \text{ km}^2$ a $17,92 \pm 1,17 \text{ km}^2$ (Figura 4.1.10-A). El área de la cuenca SE de la capa de hielo, la cual es dominada "Glaciar Mocho" y es el objeto principal de estudio en este trabajo, bajó desde los $6,15 \pm 0,57 \text{ km}^2$ a $5,42 \pm 0,23 \text{ km}^2$ y siguió disminuyendo hasta los $5,08 \pm 0,12 \text{ km}^2$ en el año 2021 (Figura 4.1.10-C).

En cuanto a la delimitación de las cuencas del glaciar Mocho se obtuvo una nueva divisoria de aguas, calculada a partir del modelo de elevación digital TanDEM WorldDEM. La cuenca SE de la capa de hielo obtenida, difiere considerablemente del IPG2020 en forma y área (Figura 4.1.8-A y Tabla 4.1.8-A). En consecuencia el área del IPG2020 para 2017 es $7,15 \pm 0,38 \text{ km}^2$ mientras que el área de la cuenca SE en 2017 determinada en este trabajo es de $5,19 \pm 0,23 \text{ km}^2$. Cabe destacar que la determinación de la cuenca SE en este estudio es consistente con todos los estudios científicos sobre el "Glaciar Mocho" (Rivera et al. 2005, Bown et al. 2007, Schaefer et al. 2017) y corresponde a la misma cuenca que es usada por el servicio mundial de monitoreo de glaciares, WGMS (WGMS2020).

La ablación total medida entre el 4 a 6 de enero 2021 y el 24 a 26 de abril en las diferentes balizas instaladas fue entre 4,8 y 6,9 metros que corresponde a una pérdida de masa entre 3,1 y 6,2 metro equivalente de agua (Tabla 4.2.3-A, Figura 4.2.3-B). Los meses con la mayor pérdida de masa fueron enero y febrero (Figura 4.2.3-A). Llama la atención la gran diferencia entre la ablación obtenida por el balance glaciológico y el balance geodésico GPS(enero)-LiDAR(abril), donde el balance glaciológico consistentemente entrega valores de ablación mayor. Al comparar el modelo digital de elevación generado por el LiDAR en abril con los datos de GPS en el mismo terreno, se constata que el modelo generado por el LiDAR entrega elevaciones mayores.

El balance de masa geodésico entre 1961 y 2000 del Glaciar Mocho, derivado de las curvas de nivel de la cartografía IGM y el modelo de elevación digital SRTM, presenta una pérdida de masa total de $-28,1 \pm 7,7$ m eq.a., lo cual nos da una tasa de pérdida anual de $-0,71 \pm 0,15$ m eq.a. $\cdot a^{-1}$, en el periodo comprendido entre el año 1961 y 2000. El balance geodésico entre 2000 y 2021, derivado con el DEM SRTM y el DEM generado por el LiDAR terrestre, dio como resultado una pérdida de masa total de $-16,2 \pm 4,6$ m eq.a., con una tasa anual de $-0,77 \pm 0,11$ m eq.a. $\cdot a^{-1}$ (Tabla 4.2.2.2-A y Figura 4.2.2.2-C).

Las mediciones repetidas de las posiciones de las balizas con receptores GNSS y el método de posicionamiento diferencial, dio como resultado un desplazamiento horizontal entre las balizas desde un metro hasta 10 metros. El desplazamiento vertical, debido al derretimiento de nieve y hielo, el cual se obtuvo del desplazamiento vertical total y restandole el desplazamiento vertical por movimiento (desplazamiento horizontal x pendiente), fue cuantificado entre -3,3 m y -6,2 m, consistente con los valores obtenidos por los registros de derretimiento en las balizas (balance glaciológico).

7. BIBLIOGRAFÍA

1. BOWN, F., RIVERA, A., ACUÑA, C. & CASASSA, G. 2007. Recent glacier mass balance calculation at Volcán Mocho-Choshuenco (40°S), Chilean Lake District. *Global and Planetary Change*, 59,79-86.
2. CHUVIECO, E., SALAS, J. & RIAÑO, D. 2000 Corrección atmosférica y topográfica, Información multitemporal y auxiliar aplicadas a la cartografía de modelos de combustible con imágenes Landsat-TM. *Tecnologías geográficas para el desarrollo sostenible*, 222-234.
3. DELÚQUEZ, C. 2008. Valoración económica del servicio ambiental de provisión de agua del páramo andino ubicado en la zona contigua al bosque protector Cubilan, provincia del Cañar. Universidad de Cuenca, Ecuador.
4. DIRECCION GENERAL DE AGUAS. 2011. Variaciones recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. Realizado por Centro de Estudios Científicos. S.I.T. N°261.
5. DIRECCION GENERAL DE AGUAS. 2013. Implementación nivel 2 estrategia nacional de glaciares: Mediciones glaciológicas terrestres en Chile central, zona Sur y Patagonia. Realizado por Geoestudios. S.I.T. N°327.
6. DIRECCION GENERAL DE AGUAS. 2014. Estimación de volúmenes de hielo mediante sondeos de radar en zonas norte, central y sur. Realizado por Geoestudios. S.I.T. N°338.
7. FARÍAS-BARAHONA, D., VIVERO, S., CASASSA, G., SCHAEFER, M., BURGER, F., SEEHAUS, T., IRIBARREN-ANACONA, P., ESCOBAR, F. & BRAUN, M. 2020. Geodetic mass balance and area changes of Echaurren Norte glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015. *Remote sensing*. 11,260

8. FISCHER, M., HUSS, M., KUMMERT, M. & HOELZLE, M. 2016. Application and validation of long-range terrestrial laser scanning to monitor the mass balance of very small glacier in the Swiss Alps. *The Cryosphere*, 10, 1279-1295.
9. HUSS, M. 2013. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*, 7, 877-887.
10. JOYCE, S., CASASSA, G., RODRÍGUEZ, J.L., BOWN, F. & RIVERA, A. 2010. Mass balance of Mocho-Choshuenco Glacier: a new monitoring in Southern Chile. International Glaciological Conference. Poster 149.
11. NUTH, C. & KAAB. 2011. Co-registration and bias correction of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. *Cryosphere* 5, 271-290
12. RIVERA, A., BOWN, F., CASASSA, G., ACUÑA, C. & CLAVERO, J. 2005. Glacier shrinkage and negative mass balance in the Chilean lake District (40°S). *Hydrological Sciences-journal-des Sciences Hydrologiques*, 50(6).
13. RIVERA, A., BOWN, F., MELLA, R., WENDT, J., CASASSA, G., ACUÑA, C., RIGNOT, E., CLAVER, J. & BROCK, B. 2006. Ice volumetric changes on active volcanoes in southern Chile, *Annals of Glaciology*, 43, 111-122.
14. SCARAMUZZA, P., MICIJEVIC, E. & CHANDER G. 2004. SLC Gap-Fill products phase one methodology. USGS.
15. SCHAEFER, M., RODRÍGUEZ, J.L., SCHEITER, M. & CASASSA, G. 2017. Climate and surface mass balance of Mocho Glacier, Chilean Lake District, 40° S. *Journal of Glaciology*, 1-11.
16. SCHEITER, M., SCHAEFER, M., FLÁNDEZ, E., BOZKURT, D. & Greve, R. 2021. The 21st-century fate of the Mocho-Choshuenco ice cap in southern Chile, *The Cryosphere*, 15, 3637-3654, <https://doi.org/10.5194/tc-15-3637-2021>.

-
17. WILLIAMS, R. S., HALL, J. & CHIEN Y. L. 1997. Comparison of satellite-derived with ground-based measurements of the fluctuations of the margins of Vatnajo küll, Iceland, *Annals of Glaciology*, 24, 72–80.

 18. ZEMP, M., THIBERT, E., HUSS, M., ROLSTAD DENBY, C., NUTH, C. & ANDREASSEN, L. 2013. Reanalyzing glacier mass balance measurement series. *The Cryosphere*, 7, 1227-1245.

ANEXO I

Campañas a Terreno

Se efectuaron cuatro expediciones al glaciar Mocho, durante la época estival, en las cuales se llevaron a cabo las actividades planificadas para el estudio "APOYO PARA EL MONITOREO DE DETALLE INTENSIVO DEL GLACIAR SUR-ORIENTAL DEL VOLCÁN MOCHO, REGIÓN DE LOS RÍOS, MACROZONA SUR, 2020-2021", un resumen de las campañas se muestra en la Tabla A I-A.

Tabla A I-A. Campañas de terreno temporada 2020-2021.

	Fecha	Actividades Realizadas
Campaña N°1	4-6 enero 2021	<ul style="list-style-type: none">• Instalación de 10 balizas de PVC de 7,5 m.• Levantamiento de coordenadas en cada baliza con GNSS.• Levantamiento de coordenadas con GNSS en modo cinemático.• Medición de densidad de nieve en pozo.• Medición de balizas con huincha métrica.
Campaña N°2	22-24 febrero 2021	<ul style="list-style-type: none">• Levantamiento de coordenadas en cada baliza con GNSS.• Levantamiento de coordenadas con GNSS en modo cinemático.• Medición de densidad de nieve en pozo.• Medición de balizas con huincha métrica.
Campaña N°3	29-31 marzo 2021	<ul style="list-style-type: none">• Levantamiento de coordenadas de cada baliza con GNSS.• Levantamiento de coordenadas con GNSS en modo cinemático.• Medición de densidad de nieve en pozo.• Medición de balizas con huincha métrica.
Campaña N°4	24-27 abril 2021	<ul style="list-style-type: none">• Levantamiento del glaciar Sur-oriental del volcán Mocho con LiDAR terrestre realizado por Alejandra Espinoza funcionario de la UGN.

		<ul style="list-style-type: none">• Levantamiento de coordenadas en cada baliza con GNSS.• Levantamiento de coordenadas con GNSS en modo cinemático.• Medición de balizas con huincha métrica.
--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fuente: Elaboración propia.

Las actividades planificadas para realizar durante las campañas a terreno son en líneas generales, la instalación de balizas de ablación, medición de altura de balizas, medición de densidad de nieve, levantamiento GNSS y levantamiento LiDAR terrestre.

Campaña N°1

La campaña N°1 se efectuó entre los días 4 al 6 de enero de 2021. En esta ocasión se instalaron balizas de ablación de PVC en cada punto con taladro Heucke (Figura A I-A y Figura A I-B). También se realizó la medición de cada baliza con huincha métrica (Figura A I-C), la Tabla A I-B contiene el registro de estas mediciones y el tipo de superficie encontrada, definida por la presencia de nieve o hielo en cada una de las balizas instaladas.

Tabla A I-B. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho enero 2021.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B08	PVC	750	-	-	7		nieve	
B10	PVC	750	-	-	53		nieve	
B11	PVC	900	-	-	45		nieve	
B12	PVC	1050	-	-	52		hielo	
B13	PVC	750	-	-	2		nieve	
B14	PVC	750	-	-	50		nieve	
B15	PVC	750	-	-	-7		nieve	
B17	PVC	600	57	162	0	-105	nieve	
B18	PVC	750	-21	95	-12	-116	nieve	
B19	PVC	600	-2	84	22	-86	nieve	

Fuente: Elaboración propia.



Figura A I-C. Medición de baliza de PVC instalada en B15.

Otra tarea planificada para esta campaña fue la medición de densidad de nieve en B18, para lo cual se excavó un pozo de un metro de profundidad donde se realizaron muestras cada 10 cm con cuña metálica de 250 cc. (Figura A I-D). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla A I-C.

Tabla A I-C. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña enero 2021.

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
0-10	144	250	0,576	57,6
10-20	168	250	0,672	67,2
20-30	165	250	0,660	66,0
30-40	168	250	0,672	67,2
40-50	148	250	0,592	59,2
50-60	138	250	0,552	55,2
60-70	153	250	0,612	61,2
70-80	148	250	0,592	59,2
80-90	164	250	0,656	65,6
Promedio			0,620	62

Fuente: Elaboración propia.

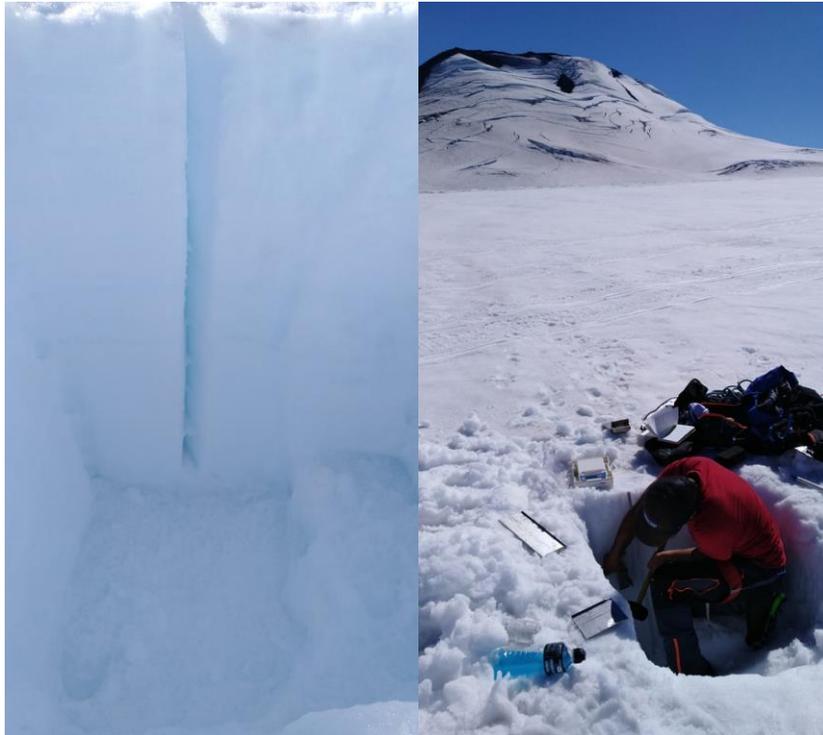


Figura A I-D. Mediciones de densidad en pozo B18.

También se realizó un levantamiento GNSS diferencial, para registrar las coordenadas de cada baliza instalada y en la misma oportunidad se hizo un levantamiento GNSS cinemático, empleando una moto de nieve para efectuar un recorrido sobre el glaciar (Figura A I-E).



Figura A I-E. Levantamiento GNSS. Izq. Medición de baliza. Der. Medición en modo cinemático.

Campaña N°2

La campaña N°2 se desarrolló durante los días 22 al 24 de febrero de 2021. En esta oportunidad se realizaron mediciones de densidad en B18 (Tabla A I-D), Altura de balizas (Tabla A I-E) y un levantamiento GNSS en cada baliza y cinemático en el recorrido por el glaciar.

Tabla A I-D. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña febrero 2021.

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)	Densidad (%)
0-10	140	250	0,560	56,0
10-20	146	250	0,584	58,4
20-30	138	250	0,552	55,2
30-40	136	250	0,544	54,4
40-50	147	250	0,588	58,8

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm³)	Densidad (g/cm³)	Densidad (%)
50-60	136	250	0,544	54,4
60-70	148	250	0,592	59,2
70-80	143	250	0,572	57,2
80-90	149	250	0,596	59,6
90-100	150	250	0,600	60,0
Promedio			0,573	57,3

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A I-E. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho febrero 2021.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B08	PVC	750	7	310	310	-303	hielo	
B10	PVC	750	53	354	354	-301	hielo	
B11	PVC	900	45	391	391	-346	nieve	
B12	PVC	1050	52	417	417	-367	hielo	
B13	PVC	750	2	280	280	-278	nieve	
B14	PVC	750	50	328	328	-278	nieve	
B15	PVC	750	-7	240	240	-247	nieve	
B17	PVC	600	0	280	280	-280	nieve	
B18	PVC	750	-12	255	255	-267	nieve	
B19	PVC	600	22	275	125	-253	nieve	

Fuente: Elaboración propia.

Campaña N°3

La campaña N°3 se desarrolló durante los días 29 al 31 de marzo de 2021. En esta oportunidad se realizaron mediciones de densidad en B18 (Tabla A I-F), Altura de balizas (Tabla A I-G) y un levantamiento GNSS en cada baliza y cinemático en el recorrido por el glaciar.

Tabla A I-F. Medición de densidad de nieve en B18 con muestreador metálico tipo cuña marzo 2021.

Profundidad (cm)	Peso muestra (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (g/cm ³)	Densidad (%)
0-10	165	250	0,660	66,0
10-20	158	250	0,632	63,2
20-30	151	250	0,604	60,4
30-40	139	250	0,556	55,6
40-50	134	250	0,536	53,6
50-60	145	250	0,580	58,0
60-70	134	250	0,536	53,6
Promedio			0,586	58,6

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A I-G. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho marzo 2021.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C) (cm)	Tipo sup.	Comentario
B08	PVC	750	310	507	57	-197	hielo	
B10	PVC	750	354	541	90	-187	hielo	
B11	PVC	900	391	612	13	-221	hielo	
B12	PVC	1050	417	622	16	-205	hielo	
B13	PVC	750	280	462	462	-182	hielo	
B14	PVC	750	328	492	339	-164	nieve	
B15	PVC	750	240	390	90	-150	hielo	
B17	PVC	600	280	436	436	-156	nieve	
B18	PVC	750	255	425	425	-170	hielo	
B19	PVC	450	125	276	276	-151	nieve	

Fuente: Elaboración propia.

Campaña N°4

La campaña N°4 se desarrolló durante los días 24 al 27 de abril de 2021. En esta oportunidad se realizaron mediciones de altura de balizas (Tabla A I-H), un levantamiento GNSS en cada baliza y cinemático en el recorrido por el glaciar.

No fue posible realizar mediciones de densidad, debido a la ausencia de nieve en el glaciar, producto de la escasez de precipitaciones y a la prevalencia de temperaturas cálidas durante la época estival, notablemente extendida durante la temporada 2020-2021.

Tabla A I-H. Medición de altura de balizas del glaciar Mocho abril 2021.

Baliza N°	Tipo baliza	Largo total baliza (cm)	Altura época anterior (B) (cm)	Altura original visita actual (C) (cm)	Altura modificada visita actual (cm)	Diferencia altura (B-C)	Tipo sup.	Comentario
B08	PVC	750	57	132	166	-75	hielo	
B10	PVC	750	90	191	189	-101	hielo	
B11	PVC	900	13	98	246	-85	hielo	
B12	PVC	1050	16	132	132	-116	hielo	
B13	PVC	750	462	554	255	-92	hielo	
B14	PVC	750	339	407	104	-68	nieve	
B15	PVC	750	90	174	174	-84	hielo	
B17	PVC	600	436	502	52	-66	hielo	
B18	PVC	750	425	495	244	-70	hielo	
B19	PVC	450	276	342	233	-66	nieve	

Fuente: Elaboración propia.

Durante esta campaña se realizaron las mediciones con LiDAR (Figura A I-F), la cual fue ejecutada por la Srta. Alejandra Espinoza, funcionaria de la Unidad de Glaciares y Nieves de la DGA. Nuestra misión consistió en dar apoyo logístico para el traslado del instrumental y resguardar la seguridad de las personas involucradas durante el desarrollo del trabajo.

ANEXO II

Anexos digitales

Nombre y estructura de carpetas.

Se hacen entrega de 10 carpetas con diversos archivos ligado a cada objetivo.

Objetivo 1: Objetivo_1

Fotografías Históricas de campañas a terreno

Fotos Aéreas: 4 Imágenes SAF .JPG

IGM: Archivos: 7 archivos .SHP

Imágenes satelitales: 22 carpetas con imágenes .TIFF del sensor Landsat y 3 carpetas con imágenes Sentinel 2 .JPG

Información glaciológica: 3 informes técnicos .PDF y .DOCX, 6 papers .PDF y 1 poster .PDF

información topográfica: 5 DEM .TIFF (Alos Palsar, IGM, LiDAR_2015, SRTM, TANDEM-X)

Objetivo 2: Objetivo_2:

Sistema_Balizas: 1 archivo .SHP con la ubicación de las balizas

Objetivo 3: Objetivo_3

Cuenca Nueva: 2 Archivos .SHP con divisorias de agua

IPG_2020: 4 archivos .SHP con información del IPG_2020 actualizado para el 2020

Objetivo 4: Objetivo_4

CECs: 2 archivos .SHP del área de la capa de hielo mocho-choshuenco delimitados por CECs

Variaciones areales: 7 archivos .SHP del área de la capa de hielo mocho-choshuenco delimitados por UACH

Objetivo 5: Objetivo_5

Balance glaciológico:

Febrero: 1 archivo .TIFF de interpolación IDW "Inverse distance weighting" para calcular balance glaciológico

Marzo: 1 archivo .TIFF de interpolación IDW "Inverse distance weighting" para calcular balance glaciológico

Abril: 1 archivo .TIFF de interpolación IDW "Inverse distance weighting" para calcular balance glaciológico

Estival: 1 archivo .TIFF de interpolación IDW "Inverse distance weighting" para calcular balance glaciológico

Objetivo 6: Objetivo_6

Febrero: 1 archivo .SHP que contiene la medición mediante GNNS sobre las balizas

Marzo: 1 archivo .SHP que contiene la medición mediante GNNS sobre las balizas

Abril: 1 archivo .SHP que contiene la medición mediante GNNS sobre las balizas

Objetivo 7: Objetivo_7

Archivos GNSS formato Rinex .21P, .21O

Archivos GNSS formato Topcon .tps

Objetivo 8: Objetivo_8

Objetivo 9: Objetivo_9

1961_2021: 8 archivos .TIFF que contienen los diversos procesos para llegar al balance geodesico (DEM, DEM_Alineados, DEM_Corregistro y Balance_Geodésico) y un archivo .SHP de zonas de control

2000_2021: 8 archivos .TIFF que contienen los diversos procesos para llegar al balance geodesico (DEM, DEM_Alineados, DEM_Corregistro y Balance_Geodésico) y un archivo .SHP de zonas de control

GMB_GNSS_LiDAR: 3 archivos .TIFF, DEM interpolado de GNNS enero, un archivo de densidad y Balance

Objetivo 10: Objetivo_10: 17 archivos .SHP que contienen la variación areal del glaciar Mocho desde 1976 hasta el 2021