

**UNIVERSIDAD DE ALCALÁ  
Y  
UNIVERSIDAD REY JUAN CARLOS**



**MÁSTER OFICIAL EN HIDROLOGÍA  
Y GESTION DE RECURSOS HÍDRICOS**

**PROYECTO DE FIN DE MÁSTER**

**Detección de cambios espaciales y temporales mediante  
técnicas de teledetección en la cobertura  
del glaciar Sierra Velluda,  
región del Biobío, Chile**

Detection of spatial and temporal changes  
using remote sensing techniques  
in the coverage of the Sierra Velluda glacier,  
Biobío región, Chile

**AUTOR:**

**Rafael Esteban Pérez Rodríguez**

**DIRECTORES:**

**Francisco Carreño Conde**

**Javier Lillo Ramos**

Alcalá de Henares, 7 de febrero de 2022

**¿Has estado en los depósitos  
donde guardo la nieve y el granizo?  
Job 38.22 – Biblia traducción en lenguaje actual**

## ÍNDICE

<b>Resumen.....</b>	<b>5</b>
<b>1. Introducción.....</b>	<b>7</b>
<b>2. Objetivos.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Metodología.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1. Zona de estudio.....</b>	<b>11</b>
<b>3.2. Materiales y métodos.....</b>	<b>17</b>
<b>4. Resultados y Discusión.....</b>	<b>17</b>
<b>5. Conclusiones.....</b>	<b>28</b>
<b>6. Recomendaciones y trabajos futuros.....</b>	<b>28</b>
<b>7. Bibliografía.....</b>	<b>31</b>
<b>8. Anexo.....</b>	<b>33</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Banda espectral correspondiente a cada sensor .....	13
<b>Tabla 2.</b> Fechas de imágenes, Satélite y Sensor, .....	14

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Localización de la zona de estudio.....	11
<b>Figura 2.</b> Puntos de control Laguna 1 y 2, con imagen Sentinel 2 .....	17
<b>Figura 3.</b> Variación área del glaciar desde el año 1984 al 2020.....	18
<b>Figura 4.</b> Variación de área de glaciar Sierra Velluda desde el año 1984 al 2020.....	19
<b>Figura 5.</b> Vista a cara noreste del glaciar Sierra Velluda, 18 de marzo 2014.....	19
<b>Figura 6.</b> Vista a cara noreste del glaciar Sierra Velluda, 20 de marzo 2021.....	20
<b>Figura 7.</b> Glaciar Sierra Velluda para el año 2014 y 2021.....	20
<b>Figura 8.</b> Vista a cara noroeste del glaciar Sierra Velluda, 13 de junio 2014.....	21
<b>Figura 9.</b> Vista a cara noroeste del glaciar Sierra Velluda, 9 de abril 2021.....	21
<b>Figura 10.</b> Localización de las estaciones cercanas a la zona de estudio.....	22
<b>Figura 11.</b> Curva de desviación acumulada y variación de área glaciar, Quilaco.....	23
<b>Figura 12.</b> Curva de desviación acumulada y variación de área glaciar, Trupán.....	23
<b>Figura 13.</b> Curva de desviación acumulada y variación de área glaciar, San Lorenzo....	24
<b>Figura 14.</b> Temperaturas mínimas (a), máximas (b) y medias (c) desde el año 2010.....	25
<b>Figura 15.</b> Temperaturas máximas desde el año 2003, datos CFSR mes de enero (a) y febrero (b).....	26
<b>Figura 16.</b> La estación en el glaciar, código BNA 08320002-2 Sierra Velluda.....	29
<b>Figura 17.</b> La estación en el glaciar, código BNA 08320002-2 Sierra Velluda.....	30

## **TABLA DE ABREVIATURAS**

BNA: Banco Nacional de Aguas.

CFRS: Climate Forecast System Reanalysis dataset

DGA: Dirección General de Aguas.

ERA5: Atmospheric Reanalysis of the Global Climate.

ETM+: Enhanced Thematic Mapper.

GEE: Google Earth Engine.

GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space.

NDSI: Normalized Difference Snow Index.

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index.

MERRA 2: Modern-Era Retrospective analysis for Research and Applications, Version 2

MODIS: Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

MOP: Ministerio de Obras Públicas.

MSS: Multispectral Scanner.

OLI/TIRS: Operational Land Imager/ Thermal Infrared Sensor.

PDI: Procesamiento digital de imágenes.

SR: Surface Reflectance

UTM: Universal Transverse Mercator.

WGS84: World Geodetic System 1984

## RESUMEN

El estrato volcán Sierra Velluda se encuentra en la cordillera de los Andes, actualmente es un volcán inactivo, ubicado en la región del Biobío (Chile), y su principal característica es que posee un glaciar de montaña. El agua almacenada en éste glaciar, constituye un componente clave en la dinámica hidrológica de las subcuencas del río Laja y del río Duqueco, por tanto, es fundamental tener un mayor conocimiento de sus cambios espaciales y temporales para plantear la correcta gestión de los recursos hídricos.

El objetivo de éste trabajo fin de máster consiste en realizar el análisis de ésta masa glaciar determinando la evolución de su extensión mediante técnicas de teledetección, relacionado con la variación de área con el régimen de temperaturas de la zona.

El glaciar fue caracterizado mediante las imágenes satelitales disponibles con un máximo de 5% de cobertura nubosa, obtenidas desde diciembre del año 1973 a enero del año 2021. Y para la comparación fueron utilizados umbrales definidos en  $NDSI > 0,4$  y  $NDSI > 0,52$  para glaciares de montaña, esto es para los sensores ETM, ETM+ y OLI/TIRS. Para el caso del sensor MSS, dada la ausencia de la banda del infrarrojo de onda corta, se determinó la segmentación del área glaciar utilizando mediante el NDVI y falso color de bandas que permite diferenciar el agua del suelo.

Se definió el valor numérico del NDSI para el glaciar Sierra Velluda que permite caracterizar el área superficial con un valor de  $NDSI > 0,87$  para las imágenes con sensor ETM, ETM+ y OLI/TIRS. De esta manera se determinó que, a la fecha actual, existe una disminución del área del glaciar Sierra Velluda del orden del 67% comparada con la máxima área estimada el año 1997 de aproximadamente 20 km<sup>2</sup>.

Se establece una relación directa entre la disminución de las precipitaciones y el área del glaciar, al comparar la curva de desviaciones acumulada con respecto a la media, para los datos registrados en estaciones pluviométricas de la región del Biobío y cercanas al glaciar.

Considerando la información de temperaturas disponibles, se ha establecido la relación directa de la temperatura ambiental con la disminución de la masa glaciar de en la zona de estudio.

## SUMMARY

The Sierra Velluda strato volcano in the Andes mountains, is an inactive volcano, located in the Biobío region (Chile). A singular characteristic of the volcanos is its mountain glacier. The water stored in this glacier constitutes a key component in the hydrological dynamics of the sub-basins of the Laja River and the Duqueco River. Therefore, it is essential to have a better understanding of its spatial and temporal changes to propose the correct management of water resources.

The objective of this master's thesis is the analysis of this glacial mass. Determining the evolution of its extension, through remote sensing techniques and the precipitation regime of the area, have been used to assess the evolution of the glacier's extension.

The coverage of the glacier was characterized using the available satellite images with a maximum of 5% cloud cover, obtained from December 1973 to January 2021. For the comparison, thresholds for mountain glaciers defined in  $NDSI > 0,4$  and  $NDSI > 0,52$  were used for the ETM, ETM+ and OLI/TIRS sensors I given the absence of the short-wave infrared band, the segmentation of the glacier area was determined using the NDVI and false color of bands in the case of the MSS sensor. That allowed to differentiate the water from the soil.

The numerical value of the NDSI was defined for the Sierra Velluda glacier, characterizing the surface area with a value of  $NDSI > 0.87$  for the images with the ETM, ETM+ and OLI/TIRS sensor. On the basis, it was determined that, to the current date there is a 67% decrease in the area of the Sierra Velluda glacier compared to the maximum area estimated in 1997 of approximately ( $\sim 20 \text{ km}^2$ ).

A direct relationship is established between the decrease in rainfall and the area of the glacier, when comparing the curve of accumulated deviations from the mean of the data recorded at weather stations in the Biobío region those stations close to the glacier.

In addition, using available databases and considering the temperature information available since 1958, it has been established the direct relationship between the increase of atmospheric temperature and the decrease in glacier in Sierra Velluda.

## 1. INTRODUCCIÓN

El escenario hidrológico global actual es complejo y en particular la región del Biobío no es la excepción. Predicciones estiman que para la mitad del siglo presente, más de la mitad de la población mundial vivirá en áreas de estrés hídrico, en las cuales se extraen volúmenes insostenibles de agua dulce superficial y subterráneas para suplir esta demanda [Kundu et al., 2002]. Los principales factores que limitan el uso sustentable del agua son el crecimiento de la población y el desarrollo económico, y que junto con el cambio climático que acelera los ciclos hidrológicos, se genera más humedad en áreas más húmedas, sequías más prolongadas en áreas de clima seco [Bucak et al., 2017] y desertificación [Avilés et al., 2017]. Lo anterior, aumenta el riesgo de inundaciones con graves daños a la población, y en épocas secas disminuye la seguridad de agua para satisfacer las demandas agrícolas, hidroeléctricas, industriales y de consumo humano.

La disminución sostenida de las precipitaciones que ha experimentado Chile y en particular la región del Biobío durante la última década ha provocado un déficit hídrico severo y una sequía prolongada (BCN 2020, DGA 2021a). Con esta realidad, el Estado de Chile a través del Ministerio de Obras Públicas (MOP) y la Dirección General de Aguas (DGA), han planteado acciones drásticas para gestionar los escasos recursos hídricos y encontrar nuevas fuentes de agua para poder satisfacer la demanda hídrica. En las zonas de situación crítica ha implementado decretos de escasez, instrumento del Estado de Chile para destinar recursos logísticos y económicos para las zonas bajo esta condición. (DGA 2021b)

La actual realidad hidrológica deja de manifiesto la falta de información, que permita conocer dinámica hidrológica. Esto condiciona la gestión del recurso hídrico, generando incertidumbre sobre los flujos de entrada y salida de las cuencas hidrográficas, e imprecisiones en las estimaciones de oferta y demanda hídrica, limitando la planificación y uso eficiente del agua [Fisher, 2015].

Frente a esta realidad hidrológica, la importancia de los glaciares como indicadores del clima global han sido reconocidos como elementos en la detección del cambio climático [Ariza, 2006]. Este cambio climático a registrado diversas alteraciones en los ecosistemas, en particular en la fusión acelerada de la masa de hielo y nieve, lo que genera diversos riesgos para los asentamientos humanos y conflictos por la disponibilidad de agua [Leal, 2020].



Los glaciares juegan un rol esencial en la dinámica natural del ciclo hidrológico, especialmente en la continuidad del escurrimiento o escorrentía, por lo que influyen en los ciclos ecológicos. Es por esto, que los cuerpos de hielo ofrecen variados servicios ecosistémicos, los cuales toman relevancia por la merma acelerada que las masas los glaciares han sufrido debido a los cambios atmosféricos como lo es el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones líquida y sólida en la última década [Segovia et al. 2017].

Aunque existen variadas definiciones de glaciar, el proyecto GLIMS lo define que, *"Un glaciar está formado por un cuerpo de hielo y nieve que se observa al final de la temporada de deshielo, o, en el caso de los glaciares tropicales, después del derretimiento de la nieve transitoria. Esto incluye, como mínimo, todos los afluentes y alimentadores conectados que contribuyen hielo en el glaciar principal, además de todo el hielo cubierto de escombros. Se excluyen todas las partes de tierra expuesta, incluyendo nunataks. Una plataforma de hielo después de la zona de conexión a tierra de dos o más glaciares que está flotando en el mar se considerará como un glaciar separado"*. Esta definición está basada en criterios de teledetección, por lo tanto no implica el movimiento del hielo [Kargel et al., 2014].

En el marco de la estrategia nacional de glaciares de Chile, entregado por el Ministerio de Obras Públicas y la Dirección General de Aguas, (MOP – DGA, 2009), que propone una definición más operativa, práctica y fácil de aplicar mediante el uso de sensores remotos satelitales: "Glaciar es toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre suelo, que sea visible por períodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0.01 km<sup>2</sup> (una hectárea). O cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o pasado en el subsuelo."

Esta definición puede no incluir algunos glaciares reconocidos como tales por criterios científicos (como los muy pequeños) o puede incluir algunos cuerpos que no corresponderían a glaciares según otras definiciones (como los glaciares de roca inactivos o fósiles), pero estos sesgos son menores. Para efectos de este trabajo, utilizaremos la definición de glaciar entregado por MOP – DGA.

El estrato volcán Sierra Velluda se encuentra en la Cordillera de los Andes, actualmente es un volcán inactivo, ubicado en la región del Biobío, Chile y su principal característica es que posee un glaciar de montaña [Mardones, 2002]. El agua almacenada en éste glaciar, constituye un componente clave en la dinámica hidrológica de las subcuencas del río Laja

y del río Duqueco. Por ello, es fundamental tener un mayor conocimiento de sus cambios espaciales y temporales para plantear la correcta gestión de los recursos hídricos.

Conocer la superficie glaciar es de gran importancia, pues permite realizar una estimación de la cantidad o reservas disponibles de agua, además de ser un indicador válido de la evolución del cambio climático, [Cano et al., 2004]. Es por esto que el monitoreo de glaciares con técnicas de mediciones glaciológicas (trabajo de campo), complementados con información a través de teledetección (imágenes de satélite) es de vital importancia. Dado que existen diversas limitaciones en las mediciones glaciológicas, tales como, accesos a glaciares, calidad y cantidad de datos de campo y otros, la teledetección permite el poder obtener y complementar la información sobre las variaciones del glaciar de manera temporal y espacial, [Loarte et al., 2015]. Lo que es especialmente relevante en zonas de estudio como las del presente trabajo de fin de máster, en donde no se cuenta con datos de campo.

En el contexto de la región del Biobío, durante la última década, la mayor parte de los glaciares han experimentado un importante retroceso, adelgazamiento y pérdida de superficie, debido al aumento de temperatura y la disminución de las precipitaciones [Leal et al., 2020]. En el caso de la zona de estudio, ha experimentado una reducción significativa del área glaciar, [Rivera et al., 2020], esto tiene un efecto negativo en las reservas sólidas de agua afectando directamente los caudales de las subcuencas del río Laja y Duqueco, especialmente en los meses de verano, donde el agua de fusión proviene de los glaciares y que puede representar más del 60% del caudal [Rivera, 2001; Ohlanders et al., 2013].

Actualmente, la única técnica de monitoreo de masas glaciares a periodicidad anual en Chile corresponde a los programas de balance de masas. Pero la zona de estudio no cuenta con este balance de manera periódica y sistemática, de manera que el presente trabajo permite aproximar el balance de masa del glaciar por medio de estimación de la línea de equilibrio desde las imágenes de satélite, contribuyendo de esta manera aportar al desarrollo de modelos empíricos o físicamente basados, que relacionen los cambios espaciales y temporales que han ocurrido con los que ocurrirán en el glaciar Sierra Velluda.

## **2. OBJETIVOS**

El objetivo principal de este trabajo consiste en evaluar los cambios espaciales y temporales que han ocurrido en el glaciar Sierra Velluda en las últimas décadas (1984 – 2020), utilizando técnicas de teledetección.

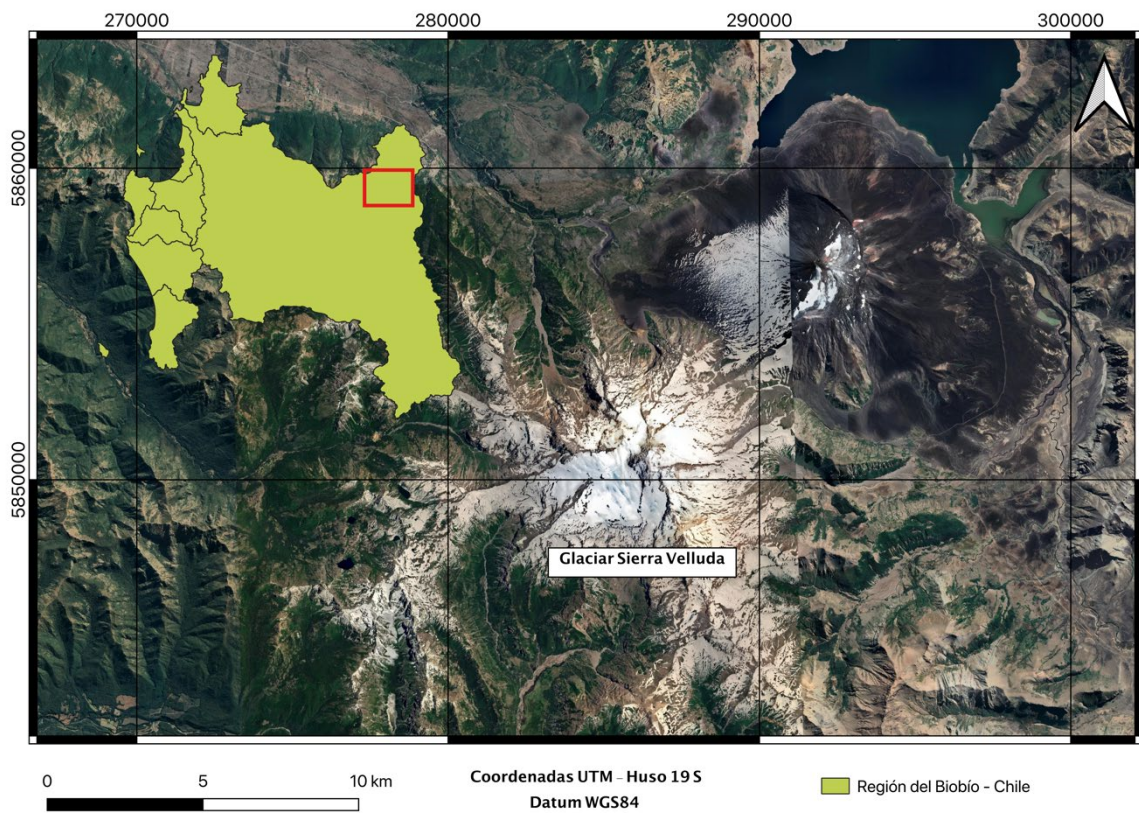
Para la consecución del objetivo principal se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Definir de cambios espaciales y temporales mediante técnicas de teledetección a partir de imágenes satelitales disponibles.
- Definir el valor numérico para el glaciar Sierra Velluda del Índice normalizado de diferencia de Nieve, NDSI por su sigla en inglés, que indique el límite del glaciar.
- Evaluar la relación entre el comportamiento del área glaciar y la evolución de las temperaturas ambientales.

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Zona de Estudio

El glaciar del estrato volcán inactivo de Sierra Velluda (Cordillera de los Andes), se sitúa en la región del Biobío (Chile), más concretamente, en las coordenadas UTM 5.850.703 Norte y 286.444 Sur, Huso 19 sur, Datum WGS84. La zona de estudio se encuentra en la cuenca hidrográfica del río Laja, y con una superficie de 4.667,92 km<sup>2</sup> (Figura 1), y en la cuenca del río Duqueco, con una superficie de 1.710,75 km<sup>2</sup>, donde el uso integrado de la cuenca destaca como principales actividades, la generación eléctrica y la agricultura (Figura 1).



**Figura 1.** Localización de la zona de estudio.

### 3.2. MATERIALES Y MÉTODOS

Para la cartografía y detección de cambios espaciales y temporales del glaciar Sierra Velluda se ha utilizado la información proporcionada por diferentes sensores remotos, en particular Landsat1, Landsat4, Landsat 7, Landsat 8. Para el procesamiento de dichas imágenes, por un lado se ha trabajado con Google Earth Engine (GEE) para el procesamiento digital de imágenes (PDI) y por otro, con el software QGIS de licencia libre y código abierto para la aplicación de técnicas de teledetección en imágenes de satélite (imagen ráster).

Dentro del proceso que permite el trabajo de las imágenes satelitales, la descarga de imágenes desde los servidores donde se alojan estas imágenes (tales como <https://earthexplorer.usgs.gov> y <https://scihub.copernicus.eu>), es quizás uno de los procesos más lentos, cuyo tiempo de descarga depende del ancho de banda disponible del usuario. Igualmente su posterior uso con técnicas de teledetección se ve limitado por la capacidad del hardware disponible en la estación de trabajo.

GEE, es una plataforma que permite el análisis de datos medioambientales capturados por los distintos satélites que rodean la tierra en los distintos anchos de bandas según el sensor que ha sido montado en cada uno de ellos. Actualmente, GEE reúne más de 40 años de imágenes de satélite alrededor del mundo, y permite la utilización de herramientas y recursos computacionales necesarios para analizar y extraer información de esta base de datos espaciales y temporales. [Turpo et al., 2017]

Una de las aplicaciones de GEE y sus herramientas es la detección de cambios en la superficie terrestre [Gorelick Noel et al., 2017], a través de tecnología que permite el procesamiento de datos geoespaciales almacenados en el catálogo de imágenes Landsat y otras [Venturino et al., 2014].

La detección de cambios espaciales y temporales en el glaciar Sierra Velluda, mediante técnicas de teledetección, se realizará mediante la utilización del índice normalizado de nieve (NDSI) y el índice de vegetación normalizado (NDVI), [Macander et al., 2015]. Los índices son operaciones algebraicas, que implican los valores de reflectividad en diferentes bandas espectrales que ya existen programados en GEE, facilitando su implementación y permitiendo incorporar otras variables, tales como la combinación de bandas para el color falso Suelo – Agua (infrarrojo cercano, infrarrojo de onda corta y Rojo).

$$NDSI = \frac{(G-SWIR)}{(G+SWIR)} \quad (1) \qquad NDVI = \frac{(IRC-R)}{(IRC+R)} \quad (2)$$

Dónde, G corresponde a la reflectividad del verde, SWIR es la reflectividad del infrarrojo de onda corta, R es la reflectividad del Rojo y IRC es la reflectividad del infrarrojo cercano.

En cada sensor, la banda que corresponde a cada longitud de onda de los índices específicos es diferente (Tabla 1):

**Tabla 1.** Banda espectral correspondiente a cada sensor.

Satélite	G	R	SWIR	IRC
Landsat 8	Banda 3	Banda 4	Banda 6	Banda 5
Landsat 7	Banda 2	Banda 3	Banda 5	Banda 4
Landsat 5	Banda 2	Banda 3	Banda 5	Banda 4
Landsat 4	Banda 2	Banda 3	Banda 5	Banda 4
Landsat 1	Banda 4	Banda 5	-	Banda 6

Para la detección de cambios espaciales y temporales se utilizaron imágenes de satélite Landsat 1 (MSS), Landsat 4 (ETM), Landsat 5 (ETM), Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI/TIRS), que son las imágenes que a la fecha de la realización del presente trabajo se encuentran disponibles en GEE (tabla 2). Las imágenes utilizadas de Landsat 8, 7 y 5 son SR (*Surface Reflectance*), mientras que las imágenes Landsat 1 (MSS) son números digitales (RS) que representan la radiancia en el sensor, calibrada y escalada.

**Tabla 2.** Fechas de imágenes, Satélite y Sensor, con una cobertura nubosa inferior al 5% para cada imagen detallada en la tabla.

<b>Nº</b>	<b>Fecha de imágenes</b>	<b>Satélite</b>	<b>Sensor</b>
1	31/01/2021	Landsat 8	OLI/TIRS
2	10/01/2020	Landsat 8	OLI/TIRS
3	23/01/2019	Landsat 8	OLI/TIRS
4	21/02/2018	Landsat 8	OLI/TIRS
5	17/01/2017	Landsat 8	OLI/TIRS
6	16/01/2016	Landsat 7	ETM+
7	29/01/2015	Landsat 7	ETM+
8	26/01/2014	Landsat 7	ETM+
9	23/01/2013	Landsat 7	ETM+
10	01/01/2011	Landsat 7	ETM+
11	31/01/2010	Landsat 7	ETM+
12	31/01/2007	Landsat 5	ETM
13	25/01/2005	Landsat 5	ETM
14	27/12/2000	Landsat 5	ETM
15	24/01/1997	Landsat 5	ETM
16	24/01/1990	Landsat 4	ETM
17	21/01/1986	Landsat 5	ETM
18	24/12/1984	Landsat 1	MSS
19	04/03/1973	Landsat 1	MSS

Se debe destacar que, en la selección de imágenes, se seleccionaron aquellas con cobertura nubosa menor al 5%, ya que en el momento de realizar la búsqueda de imágenes en la base de datos de GEE se realizó la programación que seleccionó sólo las imágenes con la cobertura nubosa indicada. Además se seleccionaron imágenes con corrección atmosférica (SR) y se corrigieron aquellas que no contaban con tal corrección.

Los glaciares fueron delimitados utilizando GEE y luego Qgis para realizar vectorización del NDSI, considerando inicialmente el criterio de Macander et al., (2015) que considera  $NDSI > 0,4$  y  $NDSI > 0,56$  para los sensores ETM, ETM+ y OLI/TIRS. En el caso del sensor MSS, dada la ausencia de la banda del infrarrojo de onda corta, se determinó el área glaciar utilizando una clasificación supervisada. El índice NDVI se utilizó para la segmentación de cobertura vegetal que pudiese existir en torno al glaciar, de modo de eliminar vegetación y de esta manera caracterizar la zona del glaciar.

Se realizó una comparación de las variaciones del área superficial del glaciar con la curva de desviación acumulada, para establecer una relación entre las variaciones de área glaciar y los periodos de humedad. De igual manera, se realizó la comparación de las variaciones de la superficie del glaciar con la variación de la temperatura en la zona de estudio.

En el glaciar, durante el periodo estudiado no se disponía de una estación meteorológica que permita realizar un balance de energía considerando parámetros físicos, tales como la radiación neta, temperatura ambiental, velocidad del viento, humedad relativa, etc., lo cual dificulta la cuantificación de los factores que influyen directamente con el retroceso del área glaciar.

Para realizar un análisis de la evolución del glaciar con la variación de la temperatura ambiental, los resultados se han comparado con diferentes bases de datos (ERA5, CFSR, MERRA2, Terra Climate) y considerando los datos de temperaturas máximas y mínimas disponibles desde el año 1958.

En el caso de Terra Climate es un conjunto de datos de alta resolución (4 km) para periodos mensuales sobre un balance hídrico climático para superficies terrestres globales, desde el año 1958, utilizando la interpolación asistida por el clima combinando normales climatológicas en conjunto con datos del WordClim disponibles en <http://climatologylab.org/terraclimate.html>

En el caso de MERRA 2, proporciona datos a partir del año 1980. Es el primer reanálisis global de largo plazo que asimila observaciones de aerosoles desde el espacio y representa sus interacciones con otros procesos físicos en el sistema climático, con una resolución espacial de 50 km disponible en <http://gmao.gsfc.nasa.gov/reanalysis/MERRA-2/>

En el caso de CFSR proporciona datos a partir del año 1979. Se diseñó y ejecutó como un sistema global de alta resolución acoplado atmósfera – océano – superficie terrestre – hielo marino, para proporcionar una mejor aproximación de los estados de los dominios señalados anteriormente, con una resolución espacial de 19,2 km disponible en <https://cfs.ncep.noaa.gov/cfsr/>



En el caso de ERA5 proporciona datos a partir del año 1979. Combina datos del modelo con observaciones de todo el mundo, con datos de más de 30 años. Con una resolución espacial de 24 km disponible en <http://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

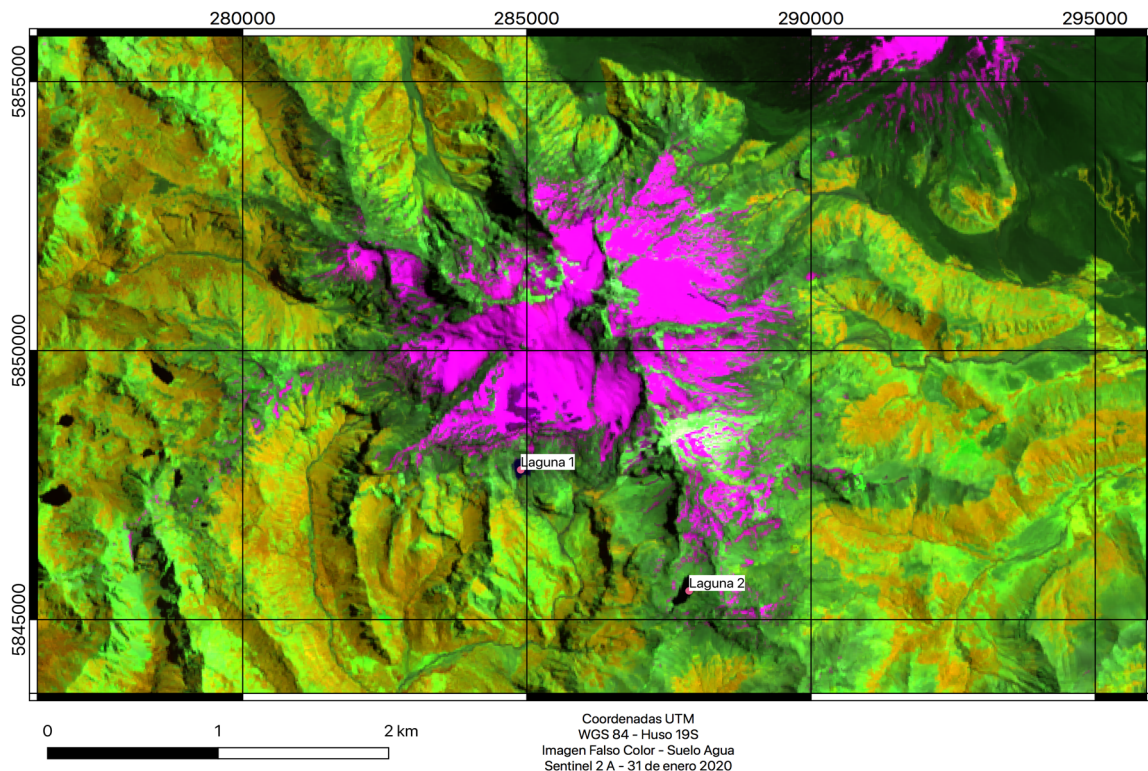
Los métodos de generación estocástica (reanálisis) parten de la concepción de que los datos históricos constituyen una muestra estadística de alguna variable hidrológica en particular, en este caso la variable de precipitación y temperatura ambiental. Estos métodos de generación procuran reproducir secuencias de magnitudes de éstas variables resguardando las características estadísticas de la serie histórica que les dio origen, sin que los valores o secuencia de ellos sean iguales a los observados.

#### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez programados los scripts en GEE, (ver anexo), para la revisión y disponibilidad de imágenes para el mes de enero para el satélite Landsat 1, 4, 5, 7 y 8, con una cobertura nubosa inferior a un 5%, se han seleccionado en forma manual cada una de las imágenes descritas en la tabla 2, y se han programado los scripts que permiten el procesamiento de los índices normalizados, NDSI y NDVI.

Cabe destacar la rapidez en el procesamiento de las imágenes de los distintos sensores a diferencia de otros procedimientos tradicionales, pues ocupa los recursos informáticos de los servidores de la plataforma digital GEE.

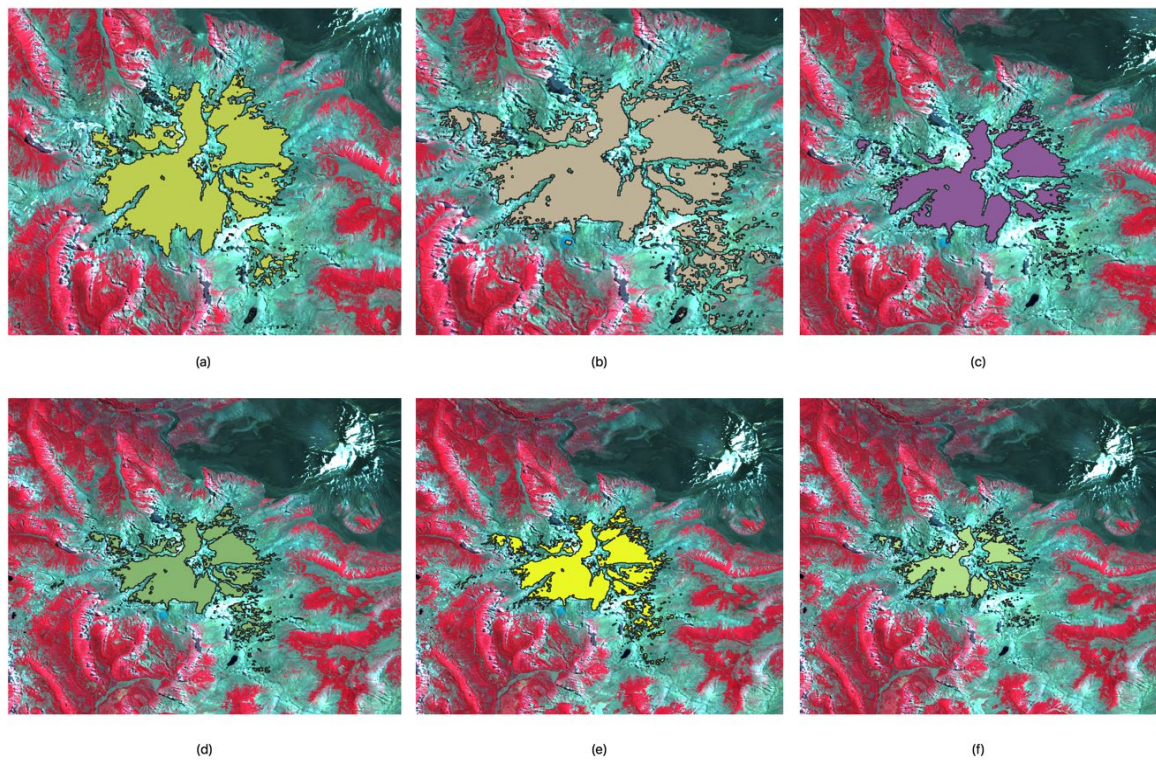
En un comienzo se consideró la segmentación para valores  $NDSI > 0,4$  y  $NDSI > 0,52$  según lo realizado por Silverio et al., (2004), pero, se realizó una revisión pixel a pixel de modo de poder eliminar los cuerpos de agua existentes, de manera que sólo se considerara la superficie de glaciar. Se realizaron puntos de control sobre lagunas identificadas en terreno, como se muestra en la Figura 2:



**Figura 2.** Puntos de control Laguna 1 y 2, con imagen Sentinel 2. (31 de enero de 2020)

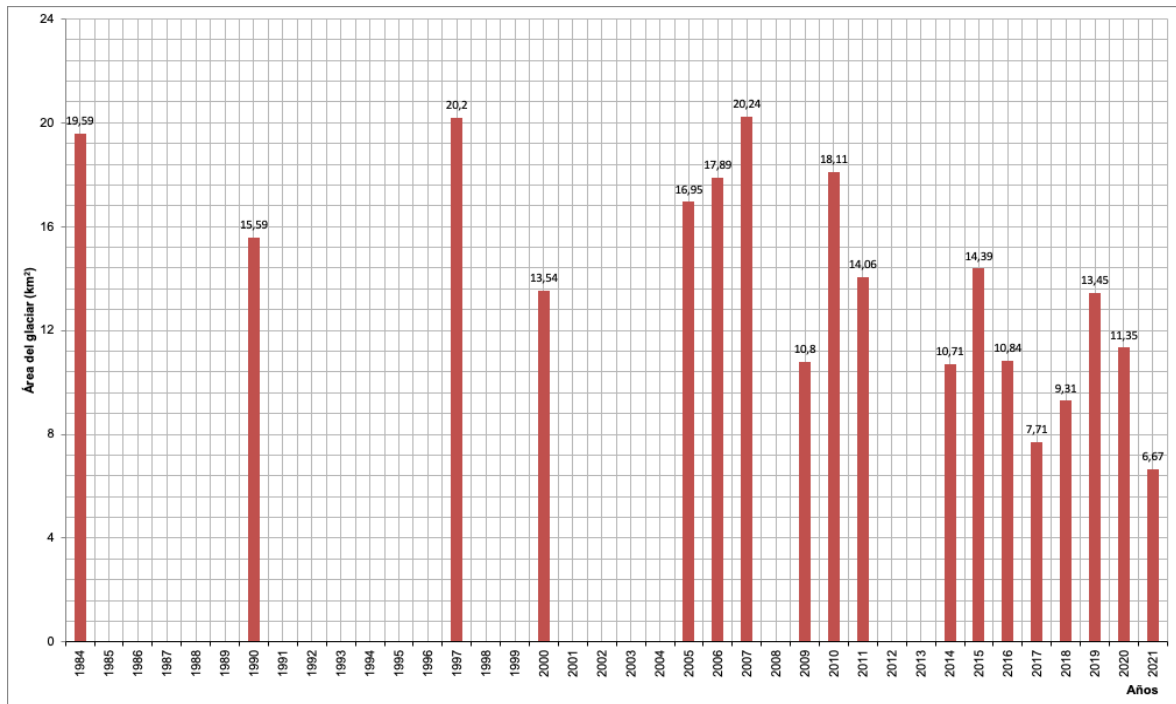
De acuerdo a los valores obtenidos para el índice normalizado de diferenciación de nieve (NDSI), se definió el valor para la segmentación de  $NDSI > 0,87$  para las imágenes con sensor ETM, ETM+ y OLI/TIRS, de manera que para la segmentación y vectorización de imágenes se utilizó este valor. Dicho valor fue verificado en terreno mediante la observación y cartografía generada.

Realizada la caracterización del área glaciaria con el valor para NDSI definido anteriormente, los resultados presentados en la Figura 3 y Figura 4 muestran una disminución en el área superficial del glaciar.



**Figura 3.** Variación área del glaciar desde el año 1984 al 2020, de fondo imagen falso color. (a) 1984, (b) 1997, (c) 2000, (d) 2005, (e) 2010, (f) 2020.





**Figura 4.** variación de área de glaciar Sierra Velluda desde el año 1984 al 2020.

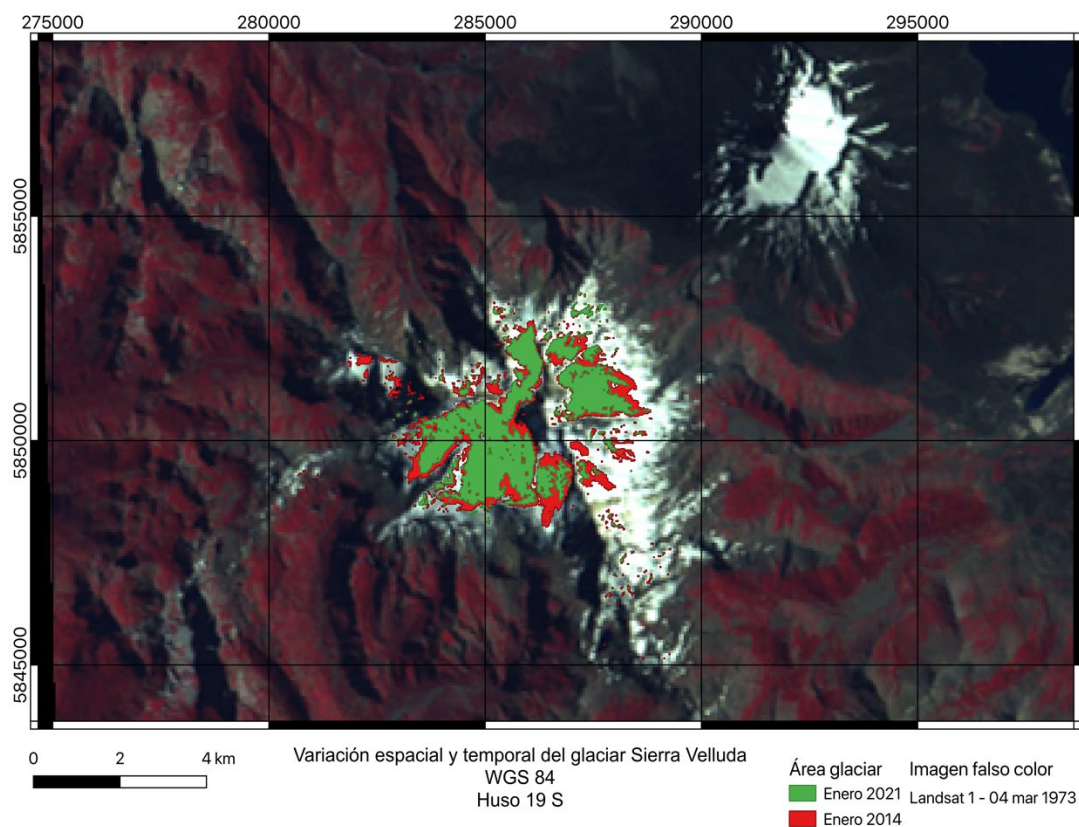
De esta manera se determinó que, a la fecha actual, existe una disminución del área del glaciar Sierra Velluda del orden del 67% comparada con la máxima área estimada el año 1997 de aproximadamente 20 km<sup>2</sup>.



**Figura 5.** Vista a cara noreste del glaciar Sierra Velluda, 18 de marzo 2014.



**Figura 6.** Vista a cara noreste del glaciar Sierra Velluda, 20 de marzo 2021.



**Figura 7.** Glaciar Sierra Velluda para el año 2014 y 2021.





**Figura 8.** Vista a cara noroeste del glaciar Sierra Velluda, 13 de junio 2014.

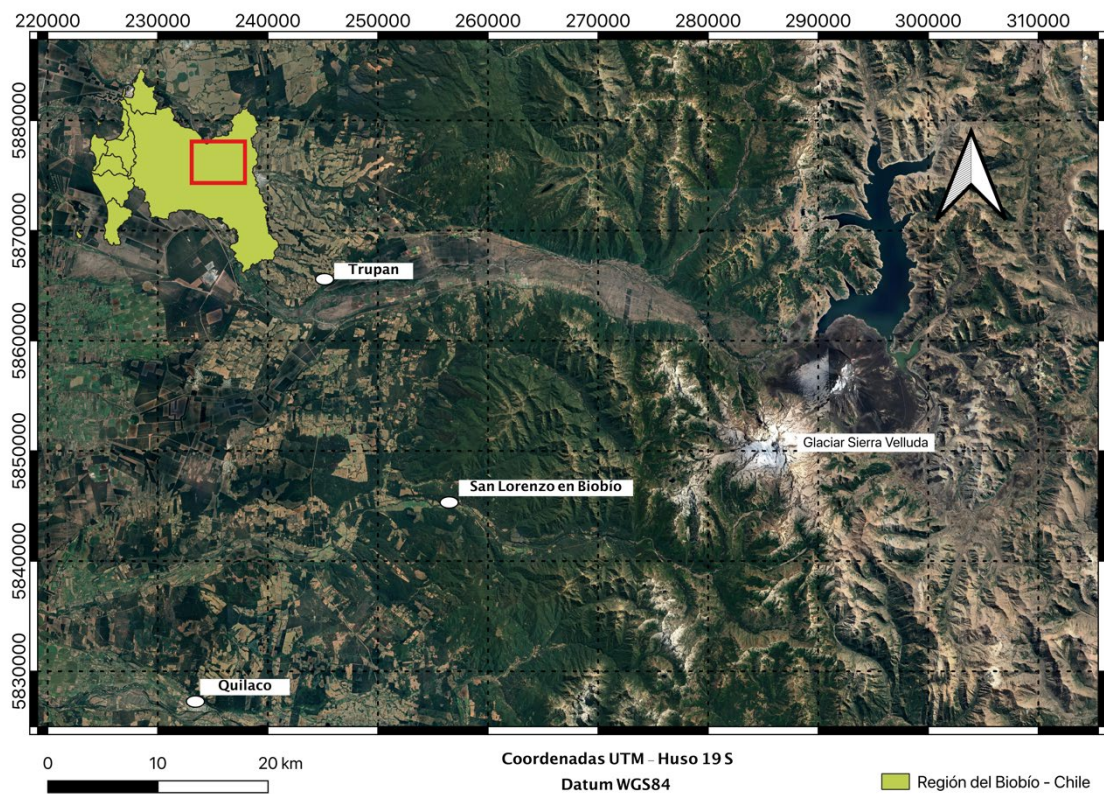


**Figura 9.** Vista a cara noroeste del glaciar Sierra Velluda, 9 de abril 2021.

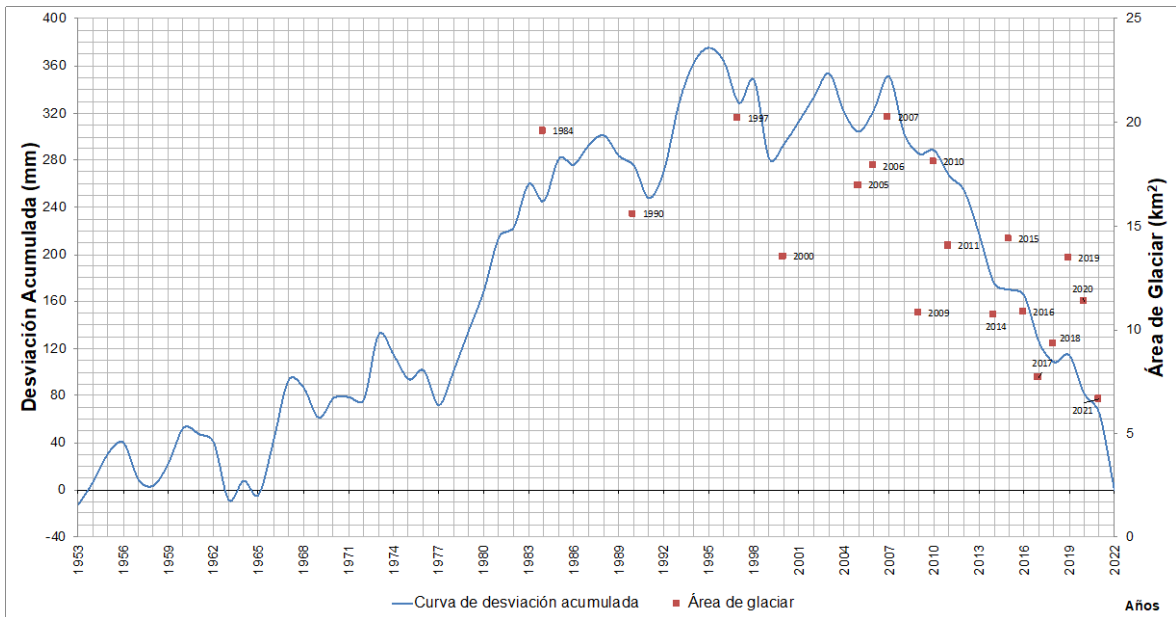


Para el periodo de imágenes evaluadas, se observan periodos cíclicos en donde existe pérdida y recuperación de área glaciar, pero apreciándose desde el año 2010 una disminución sostenida, tal y como se manifiesta al comparar las imágenes de los años 2014 y 2021, Figuras 3 y 7. Los resultados obtenidos a partir del análisis satélite quedan confirmados por el aumento de afloramientos rocosos observados en 2021 (Figuras 6 y 9) con respecto a los observados en 2014 (Figuras 5 y 8).

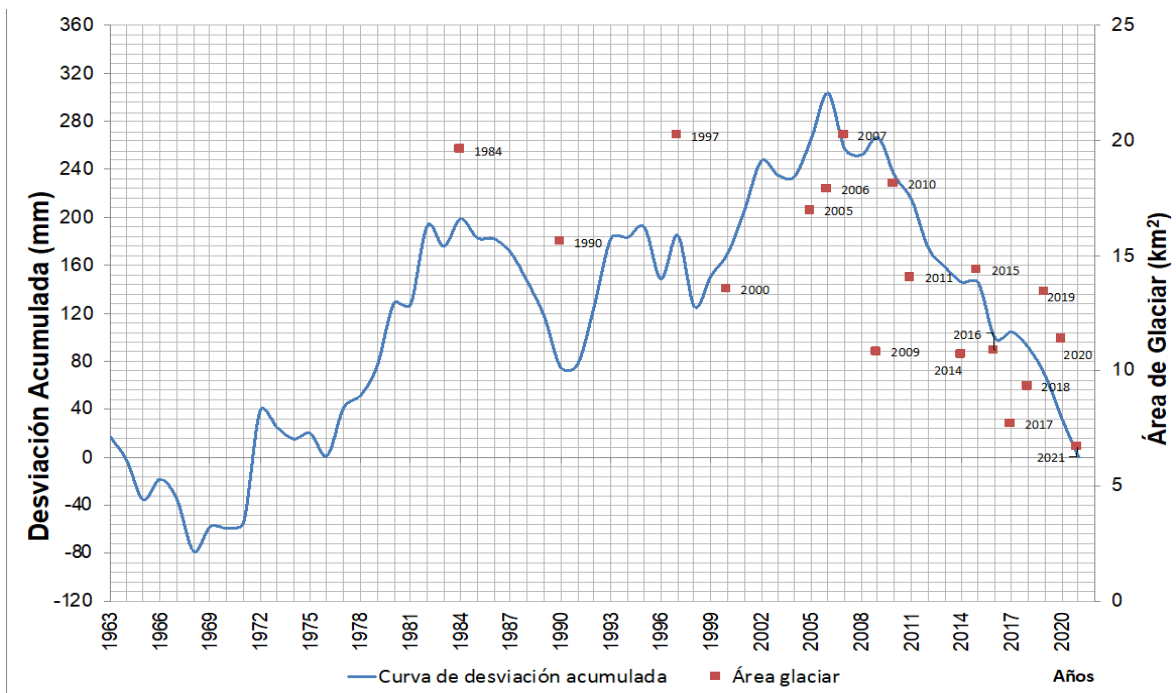
Esta disminución de área glaciar, al ser comparada con la curva de desviaciones acumulada con respecto a la media, para los datos registrados de pluviometría en las estaciones San Lorenzo en Biobío, Quilaco y Trupán cercanas a la zona de estudio, y todas las estaciones pluviométricas de la región del Biobío (Figuras 10, 11 y 12), permite establecer una relación directa entre la disminución de las precipitaciones y la reducción del área del glaciar.



**Figura 10.** Localización de las estaciones cercanas a la zona de estudio.

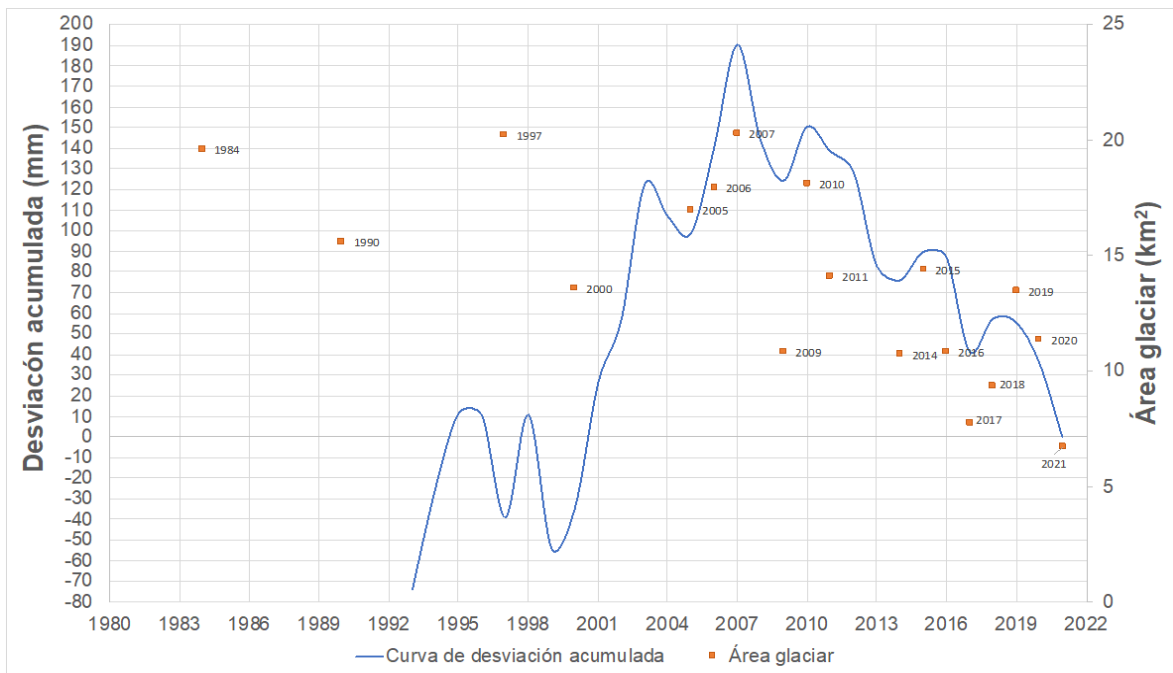


**Figura 11.** Curva de desviación acumulada de precipitación y variación de área glaciar, Quilaco.



**Figura 12.** Curva de desviación acumulada de precipitación y variación de área glaciar, Trupán.

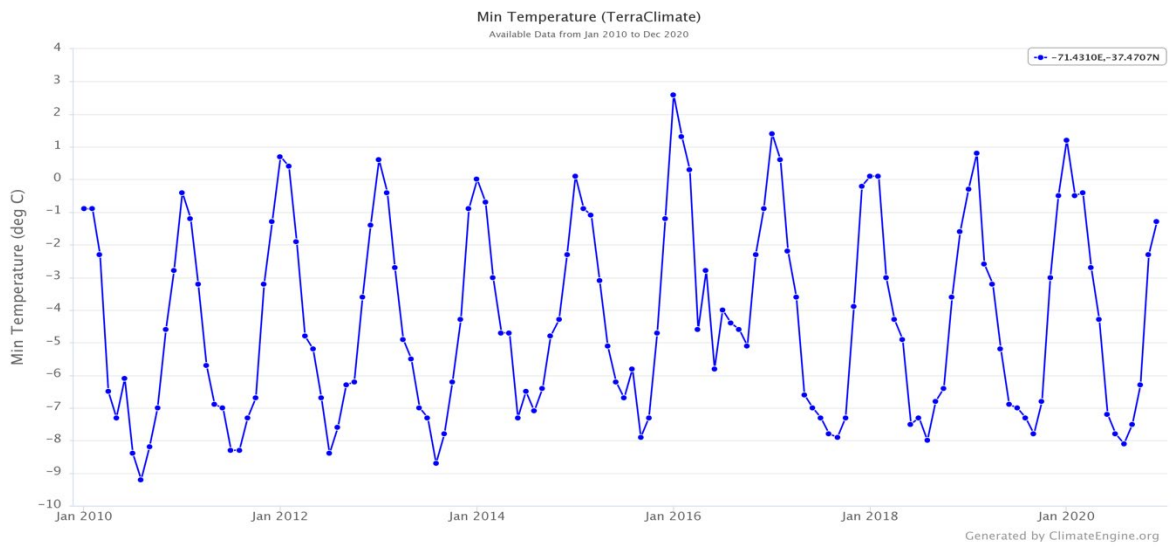




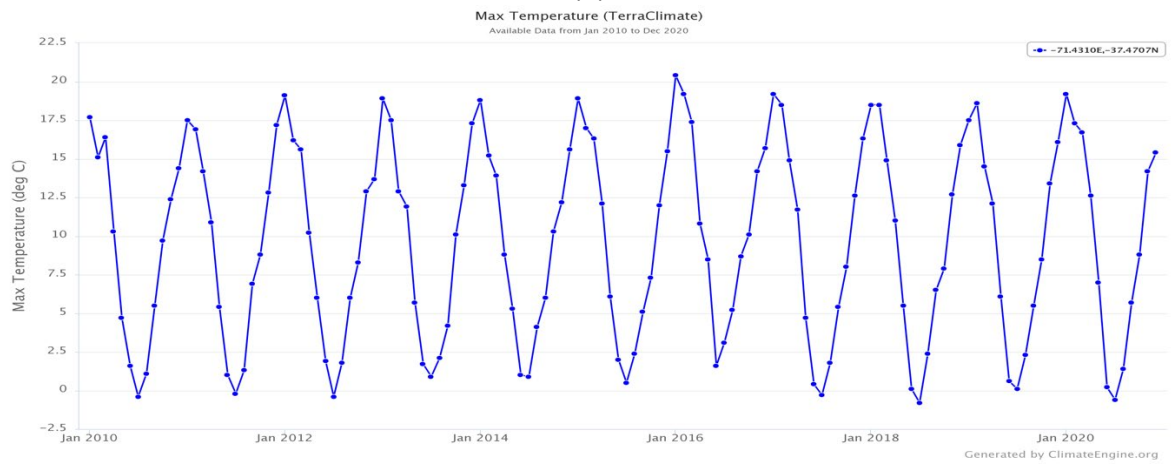
**Figura 13.** Curva de desviación acumulada de precipitación y variación de área glaciar, San Lorenzo.

La curva de desviación acumulada referido al módulo pluviométrico anual medio, permite clasificar periodos húmedos, de precipitaciones moderados y secos para serie de datos de precipitaciones superiores a treinta años. Los tramos en los que la pendiente tiene tendencia positiva corresponden a secuencias húmedas de la serie pluviométrica, siendo el grado de mayor humedad a mayor pendiente del tramo. Los tramos con pendiente negativa corresponden a secuencias secas y el grado de mayor sequía corresponde a la parte de la curva con mayor pendiente.

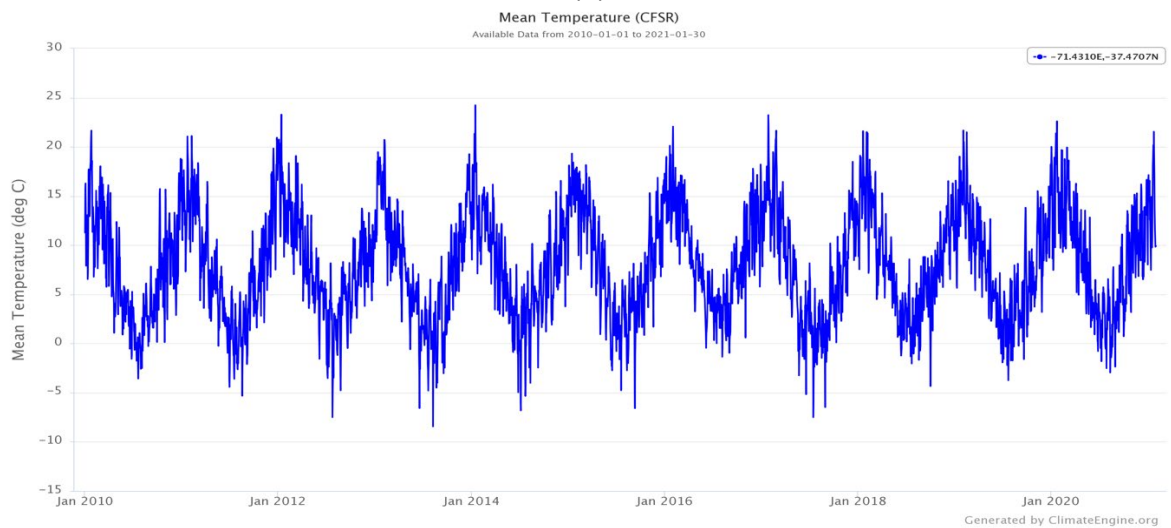
Se ha podido establecer la directa relación de la temperatura ambiental con la disminución del glaciar, en la que se aprecia un aumento de las temperaturas en la última década; se observa, Figura 14, las temperaturas mínimas (a), máximas (b) y medias (c) para los últimos 10 años.



(a)



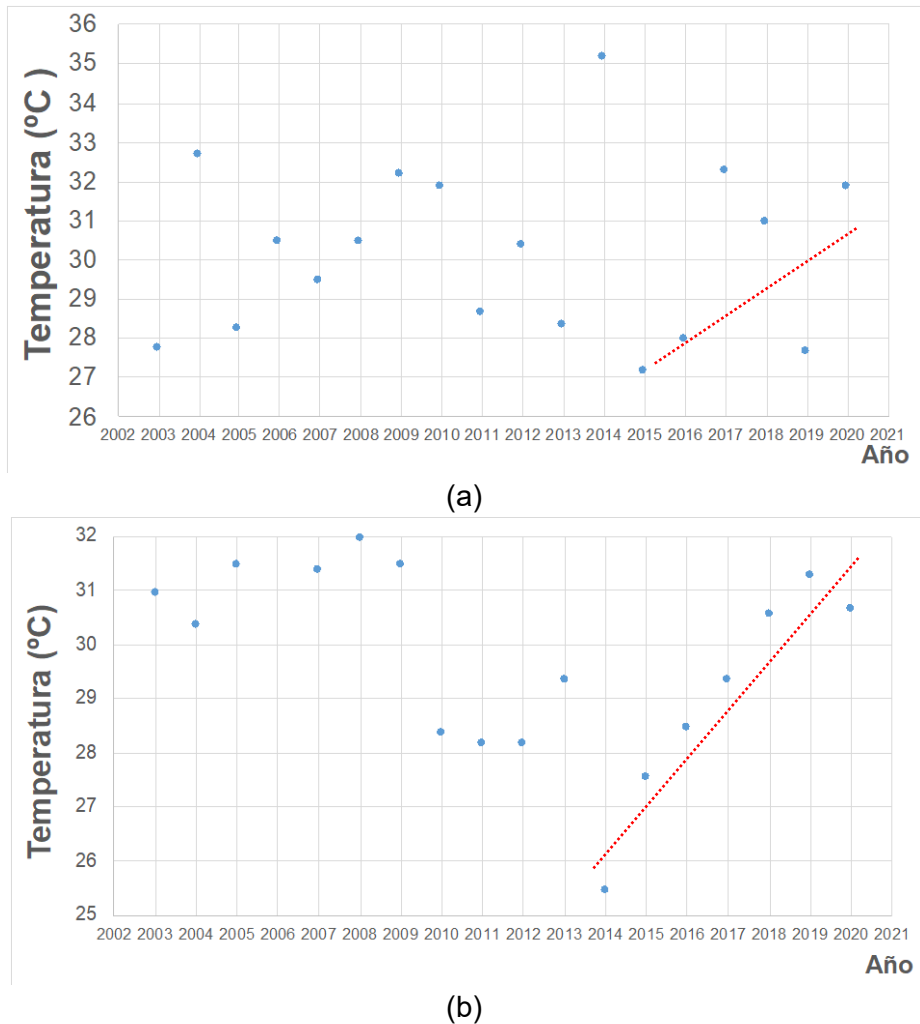
(b)



(c)

**Figura 14.** Temperaturas mínimas (a), máximas (b) y medias (c) desde el año 2010.  
Fuente: <https://app.climateengine.com/climateEngine>

Por otro lado, se observa una tendencia al alza de la temperatura mínima (Figura 14a) y máxima (Figura 14b) para la última década, que coinciden con la disminución del área del glaciar en estudio.



**Figura 15.** Temperaturas máximas desde el año 2003, datos CFSR mes de enero (a) y febrero (b).

De la Figura 15, considerando la última década, se observan dos periodos para las temperaturas máximas, estos comprenden los años 2003 al 2014, primer periodo, donde se observa que la temperatura máxima es superior al tramo comprendido entre los años del 2014 al 2020, segundo periodo. Pero este segundo periodo se observa un fuerte ascenso de las temperaturas máximas, especialmente descrito en el mes de febrero (Figura 15b), tendencia descrita mediante la línea roja en la figura 15 a y b. Estas variaciones de temperatura tiene un efecto en la pérdida de área del glaciar.

Cabe señalar que según A. Lara et al., (2020), en las últimas décadas de la reconstrucción mediante los anillos de árboles (1959-2009) muestran una tendencia al calentamiento que no es excepcional en el contexto de los últimos cinco milenios, destacando que en el registro de temperatura máxima medias reconstruido se identificaron dos períodos cálidos importantes entre 3140 - 2800 a.C. y 70 a.C. - 150 d.C., durante estos períodos cálidos, no se han identificado avances glaciares en el sur de Sudamérica (Aniya, 2013; Kaplan et al., 2016; Strelin et al., 2014). De manera que los periodos cíclicos para la ganancia o pérdida de masa glaciár son parte de la dinámica hidrológica.

## **5. CONCLUSIONES**

GEE es una herramienta para el procesamiento digital de imágenes muy eficiente y que al usuario le permite gestionar de mejor manera las técnicas de teledetección, sin utilizar recursos de hardware local, que muchas veces limitan el procesamiento, utilizando los servidores de GEE.

Se definió el valor para la segmentación de  $NDSI > 0,87$  el cual permite diferenciar el glaciar del resto de la nieve no perenne.

Existe una disminución del área del glaciar Sierra Velluda del orden del 67% comparada con la máxima área estimada el año 1997 de aproximadamente 20 km<sup>2</sup>. La disminución del glaciar es atribuible a la sequía extrema y aumentos de temperatura que ha afectado la región del Biobío en los últimos 13 años.

Se ha podido constatar mediante los resultados la relación entre los datos climáticos y la disminución del glaciar, en la que se aprecia un aumento de las temperaturas en la última década, especialmente el aumento de las temperaturas mínimas y la disminución en las precipitaciones. Ello daría lugar a la pérdida de masa glaciar por dos efectos conjugados; por fusión, por una parte, y por disminución de alimentación o recarga nival, por otra.

## **6. RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

El presente estudio pone de manifiesto que no existen estudios del glaciar Sierra Velluda, más allá de las estrategias que MOP – DGA, (2009) está desarrollado, que permita elaborar un plan de gestión de recursos hídricos para este glaciar.

Uno de los aportes de este estudio, fue la instalación en el mes de noviembre del año 2021, Figura 17 y 18, de la primera estación meteorológica en el glaciar Sierra Velluda, que permitirá en el corto, mediano y largo plazo realizar una caracterización de la dinámica del glaciar y su importancia para la cuenca del río Biobío. La estación instalada en el glaciar, permite la medición de los siguientes parámetros:

- Temperatura ambiental.
- Dirección de viento.
- Velocidad de viento.
- Altura de nieve.

- Presión atmosférica.
- Humedad relativa.
- Radiación solar (LW incidente, reflejada; SW Reflejada, incidente).
- Snow scale (mm equivalente en agua).

Esta información resulta muy valiosa, tal como se señaló en la introducción, en la gestión del recurso Hídrico en la región del Biobío, Chile. Información que se encuentra disponible a todo usuario ingresando a software web que el estado de Chile tiene a disposición, esta información se encuentra en tiempo real sujeta a validaciones posteriores para finalmente ser información oficial del Banco Nacional de Aguas (BNA). Permitiendo de esta manera el disminuir la brecha detectada de falta de información y de esta manera mejorar la gestión del recurso hídrico. La dirección web de acceso a la información es el siguiente, [https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat\\_main/dgasat\\_main.htm](https://snia.mop.gob.cl/dgasat/pages/dgasat_main/dgasat_main.htm)



**Figura 16.** La estación en el glaciar, código BNA 08320002-2 Sierra Velluda.



**Figura 17.** La estación en el glaciar, código BNA 08320002-2 Sierra Velluda.

También sería necesario instalar estaciones de control de caudales, en las cercanías del glaciar Sierra Velluda que permitan cuantificar la interacción del glaciar en la cuenca. Así mismo, la instalación de una estación meteorológica permitiría realizar un balance de energía, que es fundamental para conocer el comportamiento y evolución del glaciar.

Para determinar con mayor precisión la generación de escorrentía, se propone el estudio mediante isótopos estables, para las subcuencas del río Laja y Duqueco, de manera establecer el aporte en caudales del glaciar Sierra Velluda a la escorrentía superficial.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Ariza, A. (2006). Análisis del retroceso de glaciares tropicales en los Andes centrales de Colombia mediante imágenes Landsat. *Revista Politechne*. Vol. 13 N° 1.
- Avilés, P. (2017). Diagnóstico de la desertificación en Chile y sus efectos en el desarrollo sustentable, Santiago de Chile.
- Bijeesh, K. V. (2016). Un análisis comparativo del retroceso glaciar en los Andes Tropicales usando teledetección. *Investig. Geogr. Chile*, 51: 3-36.
- Bucak, T.; Trolle, D.; Andersen, H.E.; Thodsen, H.; Erdoğna, S.; Levi, E.; Filiz, N.; Jeppesen, E. (2017). Future water availability in the largest freshwater Mediterranean lake is at great risk as evidenced from simulations with the SWAT model, *Science of The Total Environment*. 581: 413-425.
- Alonso, C.; Moreno, V. (1996) Análisis multitemporal de imágenes LANDSAT TM en la cartografía de las masas de hielo y nieve aplicada a la modelización hidrológica. *Revista de Teledetección*.
- DGA (2009). Estrategía nacional de glaciares, fundamentos. Ministerio de Obras Públicas. Chile.
- DGA 2021 a. Dirección General de Aguas Boletín Información Pluviométrica, Fluviométrica, Estado de Embalses y Aguas Subterráneas 516 Abril.
- DGA 2021 b. Dirección General de Aguas. Decretos declaración zona de escazes vigentes al mes de abril.
- Fernández, A.; Mark, B. (2016). Modeling modern glacier response to climate changes along the Andes Cordillera: A multiscale review, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 8, 467–495.
- Fisher, A. T. (2015). Groundwater provides and receives hydrologic system services. *Groundwater*, 53(671-672).
- Fuenzalida, S.; Riquelme, R.; Rojas, C. (2009) Inventario de los glaciares de roca del Valle del Huasco, Andes semiáridos del Norte de Chile (29°S). XII Congreso Geológico Chileno Santiago, 22-26 Noviembre.
- Kundu, S.; Deepak, K.; Arun, M. (2017). Individual and combined impacts of future climate and land use changes on the water balance, *Ecological Engineering*, Volume 105, Pages 42 57.
- Loarte, E.; Rabatel, A.; Gomez, J. (2015). Determinación de la variación espacio-temporal de la altura de la línea de equilibrio de los glaciares de la Cordillera Blanca, Perú. *Revista Peruana GEO-ATMOSFÉRICA RPGA* (4), 19-30.



- Macander, M.; Swingley, C.; Kyle, J.; Martha, K. (2015). Landsat-based snow persistence map for northwest Alaska. *Remote Sensing of Environment* 163, 23 – 31.
- Maestro, C.; Recio, J. (2004). “Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat”, *GeoFocus (Artículos)*, no 4, p. 79-92. ISSN: 1578- 5157.
- Manasi, D.; Hiambok, J.; Syiemlieha, M.; Chand, S.; Rajesh, K.; Arindam, C.; Uttam, L. (2018). Glacial lake dynamics and lake surface temperature assessment along the Kangchengayo-Pauhunri Massif, Sikkim Himalaya, 1988–2014, *Remote Sensing Applications: Society and Environment* 9, 26 – 41.
- Mardones, M. (2002). Evolución morfogénica de la hoya del río Laja y su incidencia en la geomorfología de la región del Biobío, Chile. *Revista Geográfica de Chile Terra Australis*, 47:97-127.
- Ohlanders, N., Rodriguez, M. y Mc Phee Torres, J. (2013). Stable water isotope variation in a Central Andean watershed dominated by glacier and snowmelt. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/126393>.
- Pitte, P.; Ferri, L.; Hidalgo, L.; Espizua, E. (2009). Aplicación de sensores remotos al estudio de glaciares en el Cerro Aconcagua. *Anais XIV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Natal, Brasil, 25-30 abril 2009, INPE, p. 1473-1480.
- Rivera, A.; Bown, F.; Napoleoni, C.; Muñoz, M.; (2016) Balance de masa glaciar. Ediciones CECs, Valdivia, Chile.
- Rivera, A.; Casassa, G.; Acuña, C. (2001). Mediciones de espesor en glaciares de Chile centro-sur. *Investigaciones Geográficas Chile*. 35:67-100.
- Schoolmeester, T.; Johansen, K.S.; Alfthan, B.; Baker, E.; Hesping, M.; Verbist, K. (2018). Atlas de Glaciares y Aguas Andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos. UNESCO y GRID-Arendal.
- Segovia, A.; Videla, Y. (2017). Caracterización glaciológica de Chile. *Investigaciones Geográficas Chile*, 53:3-24.
- Silverio, W.; Jaquet, JM. (2005). Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 95 342 – 350.

## 8. ANEXO

A continuación se presenta la programación (scripts) de localización de la zona de estudio:

```
var geometry =
  /* color: #d63000 */
  /* shown: false */
  /* displayProperties: [
    {
      "type": "rectangle"
    }
  ] */
  ee.Geometry.Polygon(
    [[[-71.52028414653763, -37.17420549255453],
      [-71.52028414653763, -37.495226754994],
      [-71.11104342388138, -37.495226754994],
      [-71.11104342388138, -37.17420549255453]]], null, false);
```

A continuación se presenta la programación (scripts) de imágenes disponibles para los distintos sensores, de la zona de estudio:

- **Landsat 8**

```
var IMGLandsat= ee.ImageCollection ('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR')
  .filterDate ('2013-05-01', '2021-02-28')//Mayo 2013 a la fecha
  .filterBounds (geometry)
  .filterMetadata ('CLOUD_COVER', 'Less_Than', 50);
Map.addLayer (IMGLandsat, {
  min: 0.0,
  max: 5000.0,
  gamma: 1.0,
  bands: ['B3','B2','B1']},
  'Imagen Landsat');
print (IMGLandsat);
```

- **Landsat 7**

```
var IMGLandsat= ee.ImageCollection ('LANDSAT/LE07/C01/T1_SR')
  .filterDate ('1999-01-01', '2021-02-28')//Enero 1999 a la fecha
  .filterBounds (geometry)
  .filterMetadata ('CLOUD_COVER', 'Less_Than', 5);
Map.addLayer (IMGLandsat, {
  min: 0.0,
  max: 5000.0,
  gamma: 1.0,
  bands: ['B3','B2','B1']},
  'Imagen Landsat');
print (IMGLandsat);
```

- **Landsat 5**

```
var IMGLandsat= ee.ImageCollection ('LANDSAT/LT05/C01/T1_SR')
  .filterDate ('1984-01-01', '2012-05-05')//'1984-01-01' - '2012-05-05'
  .filterBounds (geometry)
  .filterMetadata ('CLOUD_COVER', 'Less_Than',5);
Map.addLayer (IMGLandsat, {
  min: 0.0,
  max: 5000.0,
  gamma: 1.0,
  bands: ['B3','B2','B1']},
  'Imagen Landsat');
print (IMGLandsat);
```

- **Landsat 4**

```
var IMGLandsat= ee.ImageCollection ("LANDSAT/LT04/C01/T1_SR")
  .filterDate ('1982-02-01', '1993-12-31')//August 1982 - December 1993
  .filterBounds (geometry)
  .filterMetadata ('CLOUD_COVER', 'Less_Than', 5);
Map.addLayer (IMGLandsat, {
  min: 0.0,
  max: 5000.0,
  gamma: 1.0,
  bands: ['B3','B2','B1']},
  'Imagen Landsat');
print (IMGLandsat);
```

- **Landsat 1**

```
var IMGLandsat= ee.ImageCollection ("LANDSAT/LM01/C01/T2")
  .filterDate ('1958-01-01', '1978-01-07')//August 1972 - December 1978
  .filterBounds (geometry)
  .filterMetadata ('CLOUD_COVER', 'Less_Than', 20);
Map.addLayer (IMGLandsat, {
  min: 0.0,
  max: 255.0,
  gamma: 1.0,
  bands: ['B5','B4','B6']},
  'Imagen Landsat');
print (IMGLandsat);
```

A continuación se presenta la programación (scripts) de procesamiento para índices normalizados para los distintos sensores, de la zona de estudio:

- **Landsat 8**

```
var ImagenLandsat8=ee.Image
('LANDSAT/LC08/C01/T1_SR/LC08_233086_20210131');
var Landsat8AOI= ImagenLandsat8.clip (geometry);
//
var NDSI = Landsat8AOI.normalizedDifference (['B3', 'B6']);
//
Map.addLayer(Landsat8AOI, {min: 0.0,max: 3000.0,gamma: 1.4,bands: ['B4','B3','B2']},
'Imagen_Landsat_8');
Export.image.toDrive({image: Landsat8AOI.select("B4", "B3",
"B2","B5","B6"),description: 'Landsat8_30m_',scale: 30,crs: 'EPSG:32719',region:
geometry});
Export.image.toDrive({image: NDSI, description: 'NDSI_', scale: 30,crs: 'EPSG:32719',
region: geometry});
Map.centerObject (Landsat8AOI);
```

- **Landsat 7**

```
Var ImagenLandsat7=ee.Image
('LANDSAT/LE07/C01/T1_SR/LE07_232086_20160116');
var Landsat7AOI = ImagenLandsat7.clip (geometry);

var NDSI = Landsat7AOI.normalizedDifference (['B2', 'B5']);

Map.addLayer (NDSI, {max: 1.0, min: 0, palette: ['#7F0010', '#D99143', '#C04529',
'#E02E20', '#EC6521', '#F6D53B']},'NDSI');
Map.addLayer (Landsat7AOI, {min: 0.0,max: 3000.0,gamma: 1.4,bands: ['B3','B2','B1']},
'Imagen_Landsat_7');
Export.image.toDrive({image: NDSI, description: 'NDSI', scale: 10, region: geometry});
Export.image.toDrive({image: Landsat7AOI.select("B1", "B2", "B3", "B4","B5", "B6",
"B7"),description: 'ImagenLandsat7',scale: 30});
Map.centerObject (Landsat7AOI);
```

- **Landsat 5**

```
var ImagenLandsat5=ee.Image  
('LANDSAT/LT05/C01/T1_SR/LT05_233086_20060916');  
var Landsat5AOI = ImagenLandsat5.clip (geometry);  
  
var NDSI = Landsat5AOI.normalizedDifference (['B2', 'B5']);
```

```
Map.addLayer (NDSI, {max: 1.0, min: 0, palette: ['#7F0010', '#D99143', '#C04529',  
'#E02E20', '#EC6521', '#F6D53B']},'NDSI');  
Export.image.toDrive({image: NDSI, description: 'NDSI', scale: 30,crs: 'EPSG:32719',  
region: geometry});  
Export.image.toDrive({image: Landsat5AOI.select("B1", "B2", "B3",  
"B4","B5"),description: 'ImagenLandsat5',crs: 'EPSG:32719',scale: 30});  
Export.image.toDrive({image: Landsat5AOI.select("B4", "B5", "B3"), description:  
'Suelo_Agua_', scale: 30,crs: 'EPSG:32719', region: geometry});  
Map.centerObject (Landsat5AOI);
```

- **Landsat 4**

```
var ImagenLandsat4= ee.Image  
('LANDSAT/LT04/C01/T1_SR/LT04_233086_19890301');  
var Landsat4AOI = ImagenLandsat4.clip (geometry);  
  
var NDSI = Landsat4AOI.normalizedDifference (['B2', 'B5']);
```

```
Map.addLayer (NDSI, {max: 1.0, min: 0, palette: ['#7F0010', '#D99143', '#C04529',  
'#E02E20', '#EC6521', '#F6D53B']},'NDSI');  
Export.image.toDrive({image: NDSI, description: 'NDSI', scale: 30,crs: 'EPSG:32719',  
region: geometry});  
Export.image.toDrive({image: Landsat4AOI.select("B1", "B2", "B3", "B4","B5", "B6",  
"B7"),description: 'ImagenLandsat4',scale: 30});  
Map.centerObject (Landsat4AOI);
```

- **Landsat 1**

```
var ImagenLandsat1 = ee.Image  
('LANDSAT/LM01/C01/T2/LM01_249086_19730304');  
var Landsat1AOI = ImagenLandsat1.clip (geometry);  
var landsar1AOI_rad = ee.Algorithms.Landsat.calibratedRadiance(Landsat1AOI);  
  
var NDSI = landsar1AOI_rad.normalizedDifference (['B5', 'B7']);  
  
Map.addLayer (NDSI, {max: 1.0, min: 0, palette: ['#7F0010', '#D99143', '#C04529',  
'#E02E20', '#EC6521', '#F6D53B']}, 'NDSI');  
Export.image.toDrive({image: NDSI, description: 'NDSI_', scale: 60, crs: 'EPSG:32719',  
region: geometry});  
Export.image.toDrive({image: landsar1AOI_rad.select("B6", "B5", "B4"), description:  
'ImagenLandsat1', scale: 60, crs: 'EPSG:32719', region: geometry});  
Map.centerObject (landsar1AOI_rad);
```