



Universidad de Concepción  
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía  
Departamento de Geografía



# VARIACIONES SUPERFICIALES DE LOS GLACIARES DE LA SIERRA NEVADA ENTRE LOS AÑOS 1973-2020 MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES

---

TESIS PARA OPTAR AL TITULO DE GEÓGRAFO

**Tesista** : Abimelec Amir Jesús Muñoz

**Profesor Guía** : PhD. Alfonso Fernández Rivera

Diciembre

CONCEPCIÓN, CHILE 2020



Universidad de Concepción  
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía  
Departamento de Geografía



Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.





Universidad de Concepción  
Facultad de Arquitectura, Urbanismo y Geografía  
Departamento de Geografía



**- Para mi mamá y papá.**



## **AGRADECIMIENTOS**

Primero que todo quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de poder estudiar y llegar a este punto de mi vida, de ser un profesional.

Quiero agradecer a mi papá y mamá que me apoyaron durante todo este camino de estudios, me motivaban a seguir mis metas, animaban cuando tenía que quedarme a estudiar hasta tarde, cuando llegaba cansado de la U y que gracias a ellos soy la persona que soy hoy en día. También a mi hermana y familiares cercanos que siempre me aconsejaban a seguir adelante.

También agradecer a todos los profesores y profesoras con quien tuve clases a lo largo de mi carrera, que me ayudaron a entender y aprender todo sobre esta linda carrera, a los auxiliares y secretarías por su buena onda y simpatía en todo momento. Sobre todo, a mi profesor guía Alfonso Fernández quien siempre estuvo ahí para ayudarme, corrigiéndome y aconsejándome durante todo el transcurso en que trabajé en mi tesis.

Por último, a todos mis compañeros con quien pude compartir todos estos años a través de trabajos, terrenos, actividades extracurriculares, etc. Sobre todo, a mi grupo de amigos más cercano los “Geopinxes” quienes siempre nos acompañábamos por medio de trabajos, juntas, terrenos, entre otros; y todas las risas y buenos momentos que tuvimos durante este periodo académico, a quienes nunca olvidaré.



## Resumen

Esta tesis investigo la variabilidad superficial de los glaciares de la Sierra Nevada ubicados en la región de la Araucanía, Chile. El objetivo principal de la investigación fue determinar el cambio de la superficie de masa de hielo glaciar en Sierra Nevada, esto se hizo mediante el tratamiento de imágenes satelitales (Landsat y Aster) disponibles, obtenidas entre los años 1973-2020, mediante un proceso de combinación de bandas, co-registro de las imágenes teniendo como modelo referencial la imagen Landsat 8 del año 2020 y delimitación manual de los glaciares. Con los resultados obtenidos se concluyeron que hubo un retroceso de ambos glaciares encontrados en la Sierra Nevada.

El primero Sierra Nevada Norte al año 1973 tenía  $6,35 \text{ km}^2 (\pm \text{km}^2 0,0167)$  y ya para el año 2020 fue de  $2,83 \text{ km}^2 (\pm \text{km}^2 0,0018)$ , representando una pérdida de superficie de alrededor de un 55,43% y Sierra Nevada Sur su superficie al año 1973 fue de  $5,84 \text{ km}^2 (\pm \text{km}^2 0,0167)$  y 2020 fue de  $2,71 \text{ km}^2 (\pm \text{km}^2 0,0018)$ , es decir, el glaciar perdió una superficie aproximada de un 46,4%. En tanto hablando del frente glaciar, Sierra Nevada Norte retrocedió en un 36,73%, mientras que Sierra Nevada Sur lo hizo en un 43,4%. En resumen, ambos glaciares retrocedieron en este periodo de tiempo, siguiendo la tendencia mundial del retroceso glaciar.

Palabras clave: variación superficial glaciar, Sierra Nevada, glaciares, imágenes satelitales, tasa de cambio glaciar, retroceso glaciar.



## Abstract

This thesis investigated the surface variability of the Sierra Nevada glaciers located in the Araucanía region, Chile. The main objective of the research was to determine the change of the surface of the glacier ice mass in the Sierra Nevada, this was done through the treatment of available satellite images (Landsat and Aster), obtained between the years 1973-2020, through a process of combination of bands, co-registration of the images having as a reference model the Landsat 8 image of the year 2020 and manual delimitation of the glaciers. With the results obtained, it was concluded that there was a retreat of both glaciers found in the Sierra Nevada.

The first Sierra Nevada Norte in 1973 had  $6.35 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0.0167$ ) and by 2020 it was  $2.83 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0.0018$ ), representing a loss of surface of about 55.43% and Sierra Nevada Sur its surface in 1973 was  $5.84 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0.0167$ ) and 2020 was  $2.71 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0.0018$ ), that is, the glacier lost an approximate surface of 46.4%. As for the glacier front, the Sierra Nevada Norte retreated by 36.73%, while the Sierra Nevada Sur retreated by 43.4%. In summary, both glaciers retreated in this period of time, following the global trend of glacial retreat.

Keywords: glacier surface variation, Sierra Nevada, glaciers, satellite images, glacier change rate, glacier retreat



Resumen .....	v
Abstract .....	vi
1. Introducción .....	1
2. Marco teórico y conceptual .....	3
2.1 . Definición de Glaciar .....	3
2.2. Zonificación teórica de un glaciar .....	4
2.3. Formación del hielo glaciar .....	4
2.4. Tipología de glaciares .....	7
2.5. Clasificación según morfología .....	8
2.6. Clasificación según tipo de cobertura superficial .....	10
2.7. Clasificación según zona de acumulación.....	11
2.8. Clasificación según tipo de frente .....	12
2.9. Clasificación según temperatura .....	12
2.10. Balance de masa glaciar.....	13
2.11. Teledetección del espectro visible en la criósfera.....	15
3. Área de estudio.....	18
4. Hipótesis .....	21
5. Objetivos.....	22
5.1. General .....	22
5.2. Específicos.....	22
6. Materiales y Método.....	23
6.1. Materiales.....	23
6.1.1. Imágenes Landsat .....	23
6.1.2. Imágenes ASTER .....	25
6.2. Obtención de datos .....	27
7. Método .....	30
7.1. Tratamiento de las imágenes.....	31
7.2. Composición de bandas específicas.....	31
7.3. Corrección geométrica.....	33
7.4. Delimitación de glaciares .....	33
7.5. Cálculos .....	36



7.5.1.	Determinación de cambio de superficie de los glaciares.....	36
7.5.2.	Cálculo del cambio frontal del glaciar .....	37
7.5.3.	Tasa de cambio.....	38
7.5.4.	Estimación de Incertidumbre .....	39
8.	Resultados.....	41
8.1.	Tratamiento de imágenes.....	41
8.2.	Co-registro y co-localización .....	42
8.3.	Delimitación de glaciares .....	46
8.4.	Cálculo de superficie glaciar .....	52
8.5.	Cálculo del cambio frontal de los glaciares .....	56
8.6.	Estimación de incertidumbre .....	61
9.	Discusión .....	65
10.	Conclusiones.....	71
11.	Bibliografía.....	74





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Conversión de nieve recién caída en hielo glaciar cristalino y denso .....	5
Figura 2. Esquema de la diagénesis del hielo .....	7
Figura 3. Terminología del balance de masa de un ciclo anual (año de balance) y diferenciación estacional para un glaciar típico de régimen templado o de latitudes medias.....	14
Figura 4. Ubicación del área de estudio .....	20
Figura 5. Esquema Metodológico .....	30
Figura 6. Pasos para seguir para obtener los límites de una cuenca hidrográfica en el programa ArcGis 10.5.....	36
Figura 7. Determinación retroceso o avance ( $\Delta d$ ) de un glaciar entre 2 fechas utilizando un método sencillo. ....	38
Figura 8. Resultado de las imágenes satelitales con su composición de bandas espectrales respectivas .....	42
Figura 9. Puntos de control para co-registro y co-localización .....	45
Figura 10. Límites de la cuenca hidrográfica donde se encuentran Glaciares de la Sierra Nevada .....	47
Figura 11. Variación superficial del Glaciar Sierra Nevada Norte 1973-2020. ....	49
Figura 12. Variación superficial del Glaciar Sierra Nevada Sur 1973-2020.....	51
Figura 13. Diferencia de frente entre el año 1973-1976, Glaciar Sierra Nevada Norte .....	57
Figura 14. Cuadro resumen de resultados entre años 2000-2020 .....	64



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Densidades de nieve caída .....	6
Tabla 2. Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos en la Sierra Nevada .....	19
Tabla 3. Características principales de los satélites Landsat .....	24
Tabla 4. Características principales de imágenes satelitales ASTER .....	26
Tabla 5. Imágenes satelitales disponibles entre los años 1973-2020 para los glaciares de la Sierra Nevada .....	28
Tabla 6. Combinaciones de bandas espectrales para discriminar glaciares en Sierra Nevada .....	32
Tabla 7. Coordenadas de puntos de control en proyección UTM, Huso 18S, Datum WGS84.....	43
Tabla 8. Error RMSE de cada imagen co-registrada.....	44
Tabla 9. Variación del área superficial del Glaciar Sierra Nevada Norte .....	53
Tabla 10. Variación del área superficial del Glaciar Sierra Nevada Sur .....	55
Tabla 11. Cambio frontal del glaciar Sierra Nevada Norte .....	58
Tabla 12. Cambio frontal del glaciar Sierra Nevada Sur .....	60
Tabla 13. Estimación de la incertidumbre UM por imagen satelital individual .....	61
Tabla 14. Estimación incertidumbre total superficie .....	63

## 1. Introducción

En el sistema hidrológico existen diversos estados del H<sub>2</sub>O, flujos hídricos, relaciones energéticas, etc. que interactúan entre sí, una de ellas son los glaciares. Estas formas de agua solidificada consisten en acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar (IPCC, 2001). Los glaciares se han visto afectados por el cambio climático global tanto históricos como el actual. Según observaciones de los expertos sobre cambio climático señalan que el retroceso glaciar que se observa en el mundo es consecuencia inequívoca del calentamiento del sistema climático (Bernex & Tejada, 2010).

La intervención del ser humano en el planeta y todas las transformaciones que ha traído consigo, una parte de los afectados son los glaciares que producen entre otras consecuencias un aumento del nivel del mar generado por la fusión de los glaciares y no solo de montaña (Rivera et al., 2000); entre las poblaciones con un riesgo desproporcionadamente alto de sufrir consecuencias adversas por un calentamiento global de 1,5 °C o mayor se encuentran las poblaciones desfavorecidas y vulnerables, algunos pueblos indígenas y las comunidades locales que dependen de medios de subsistencia agrícolas o propios de las zonas costeras (IPCC, 2018). Debido a la gran extensión de hielo mundial, la pérdida total de masa y la correspondiente contribución al aumento del nivel del mar en el período 2006-2015 es mayor en Alaska, seguida de los Andes meridionales y el Asia de alta montaña (Hock et al., 2019), tal como lo dice Francou (2013): “el retroceso de los glaciares andinos comenzó alrededor de 1730-1750 (AD). Por lo tanto fue antes que la humanidad pudiera tener una influencia significativa sobre el clima (Rabatel et al. 2013). No obstante, la disminución de los glaciares se ha acentuado en la segunda mitad del siglo 20, especialmente después de 1976”.

En Chile, existen estudios de las transformaciones que se han producido en los glaciares. Sobre el avance y retroceso de los glaciares a nivel nacional,

concluyeron que las variaciones recientes de los glaciares de Chile indican que hay un proceso de desglaciación en curso, el cual está afectando todo el país, con mayor énfasis en la Patagonia desde el punto de vista del aporte en volumen equivalente en agua, pero más importante en Chile central por el porcentaje de pérdida de superficie de hielo (Rivera et al., 2000)

Una de las formas para observar y cuantificar el cambio que ocurre en la superficie de hielo glaciar es mediante el uso de imágenes satelitales, a través de un análisis multi-temporal. Este tipo de análisis consiste en determinar los cambios producidos entre dos fechas de referencia, de cara a evaluar la dinámica a largo plazo de un determinado fenómeno (crecimiento urbano, deforestación, expansión agrícola, etc.), las imágenes suelen adquirirse con un cierto lapso temporal (varios años), pero en la misma estación, de cara a minimizar el efecto de factores externos al cambio (Chuvieco, 1998). Teniendo estas imágenes disponibles se corrigen los errores correspondientes que suelen ocurrir dentro de este análisis como por ejemplo la co-localización, la incertidumbre, etc. y así obtener las tasas de cambio que transcurrieron entre los años 1973-2020 en los glaciares de estudio.

En esta investigación se estudia y mide la variación de la superficie glaciar, de los glaciares en la Sierra Nevada, ubicados entre las comunas de Curacautín, Melipeuco y Lonquimay, Región de la Araucanía, Chile. El resultado de este estudio aguarda obtener la variación completa de la superficie estos glaciares entre los años 1973-2020.

## **2. Marco teórico y conceptual**

### **2.1. Definición de Glaciar**

En el planeta Tierra nos encontramos con muchas formas de vida, en diversos estados de la materia ya sea líquido, sólido o gaseoso. La fuente principal de la vida humana es el agua que, en la superficie total de la Tierra, algo más del 70% está ocupado por el agua que forma los océanos y mares (Auge, 2007), la cual está presente en los 3 estados de la materia en nuestro sistema. Alrededor del 97% del agua en el planeta se encuentra en los océanos; del 3% restante, el 2,3% está solidificado en los casquetes polares, el 0,3% se encuentra tan profundamente confinada que su extracción resulta antieconómica y el resto se distribuye en ríos, lagos, riachuelos y subsuelo (Córdoba et al., 2010).

Entre este 3% de agua dulce nos encontramos con el agua solidificada que forma casquetes polares, icebergs, campos de hielo, glaciares, etc. En este último nos vamos a concentrar, un glaciar es definido como una masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes; la topografía del lecho de roca es el factor que ejerce mayor influencia en la dinámica de un glaciar y en la pendiente de su superficie. Un glaciar subsiste merced a la acumulación de nieve a gran altura, que se compensa con la fusión del hielo a baja altura o la descarga en el mar (IPCC, 2001).

En una aproximación más local en Chile la Dirección General de Aguas (DGA) define y considera un glaciar como 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 (DGA, 2009).

## 2.2. Zonificación teórica de un glaciar

Un glaciar se divide en dos zonas principales a lo largo de su perfil altimétrico; una “zona de acumulación” (donde se produce ganancia neta de masa al cabo de un año hidrológico) y una “zona de ablación” (caracterizada por la pérdida de masa al final de ese periodo). La primera de ellas se desarrolla desde las nacientes hasta la “Línea de Equilibrio Altitudinal” (ELA), la cual representa los puntos del glaciar con balance de masa “cero” debido a que los procesos de acumulación y ablación se igualan (Rivera et al., 2016). Esta ELA a menudo se encuentra cercana a la línea de nieve de final de verano (Cuffey & Paterson, 2010).

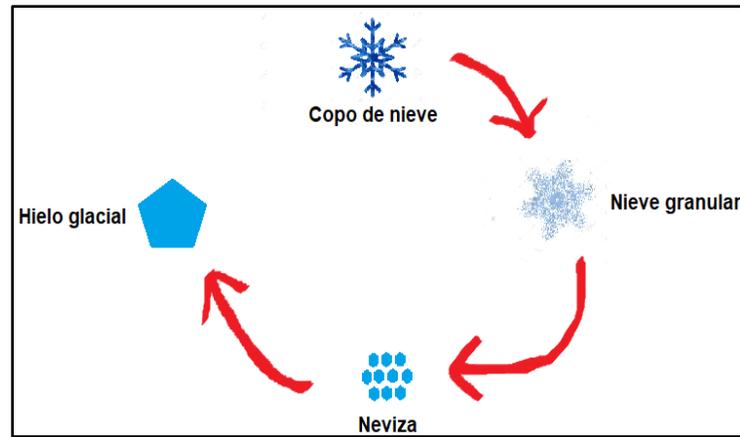
El uso de imágenes satelitales (LANDSAT ETM+, SAR, entre otros) es de gran utilidad, sobre todo cuando el límite inferior del hielo sobreimpuesto y la línea de nieve es fácilmente reconocible (Østrem & Brugman, 1991). La razón entre el área de acumulación y el área total del glaciar, denominada AAR (*Accumulation-Área Ratio*), es otro parámetro importante para considerar en la descripción del balance de masa de un glaciar. (Østrem & Brugman, 1991).

## 2.3. Formación del hielo glaciar

La formación del hielo es un proceso que puede tomar décadas en completarse (Paterson, 1994), comienza a partir de la acumulación de la nieve y sobreimposición continua (mayor presión sobre la nieve más profunda). El tiempo que tarda la nieve en transformarse en hielo depende de la temperatura que afecta a procesos como derretimiento y recongelación (Rivera et al., 2016).

Otra aproximación a la formación del hielo glaciar dice que es consecuencia de la acumulación de nieve, por lo que los glaciares se forman en lugares donde la caída de nieve invernal es mayor que la cantidad derretida en verano (Tarbuck, Lutgens, & Tasa, 2005). Antes de la formación del glaciar, la nieve debe convertirse en hielo glaciar (Figura 1).

**Figura 1. Conversión de nieve recién caída en hielo glaciar cristalino y denso**



**Fuente:** Modificado de Tarbuck, Lutgens, & Tasa (2005)

La nieve es la precipitación sólida sin grandes alteraciones; mientras que la neviza es el material intermedio entre la nieve y el hielo, o bien la nieve húmeda que ha pasado durante la temporada de ablación sin ser transformada en hielo. La neviza también incluye a la nieve alterada en los glaciares polares donde no hay derretimiento. Una forma de diferenciarlos es la densidad de cada uno (Tabla 1) (Rivera et al., 2016)

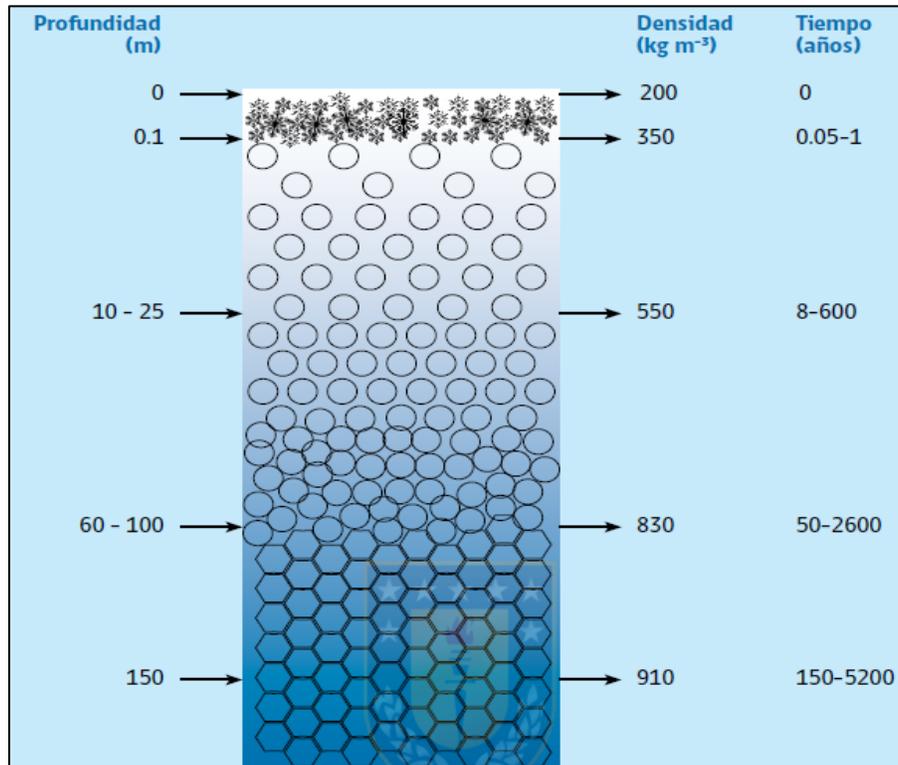
**Tabla 1. Densidades de nieve caída**

<b>Denominación</b>	<b>Densidad (kg m<sup>-3</sup>)</b>
Nieve nueva (caída recientemente)	50-70
Nieve nueva húmeda	100-200
Nieve granular	200-250
Nieve perenne	250-300
Escarcha de profundidad	100-300
Costra de nieve por viento	350-400
Neviza	400-830
Nieve y neviza muy húmeda	700-800
Hielo glacial	830-923

**Fuente:** Modificado de Rivera et al. (2016)

Como menciona Rivera et al. (2016) “la formación del hielo es un proceso que puede tomar décadas en completarse [Paterson, 1994]. Comienza a partir de la acumulación de nieve y sobreimposición continua (mayor presión sobre la nieve más profunda) (Figura 2). El tiempo que tarda la nieve en transformarse en hielo depende de la temperatura (derretimiento y recongelación). Por ejemplo, esta transformación es mucho más rápida en glaciares que experimentan períodos alternados de derretimiento y recongelación, como es el caso de regiones templadas, a diferencia de glaciares localizados en Antártica donde dominan las temperaturas bajo los 0°C. Los mecanismos que controlan la transformación de neviza a hielo varían a lo largo del glaciar, y por lo tanto para este caso es mejor subdividir las partes de un glaciar considerando la temperatura y las características físicas del material cercano a la superficie”, y es así como es que la nieve pasa a convertirse en hielo glacial bajo factores como profundidad, densidad y tiempo.

**Figura 2. Esquema de la diagénesis del hielo**



**Fuente:** (Extraído desde) Rivera et al., (2016)

#### **2.4. Tipología de glaciares**

El tipo de glaciares descritos a continuación corresponde a la clasificación que género la Estrategia Nacional de Glaciares (ENG), el cual consta de cinco niveles de detalles, siendo el inventario de glaciares el que cuenta con información básica para identificar todas las masas glaciares del país (DGA, 2009). La ENG reconoce 5 tipos de clasificaciones: Morfológica primara, según el tipo de zona de acumulación, por su tipo de frentes, por clasificación térmica y clasificación dinámica (CECS, 2009)

## 2.5. Clasificación según morfología

Es la clasificación principal, se diferencian por su naturaleza, tamaño y características. Cada tipo de glaciar representara desafíos particulares para su estudio, el que ha de realizarse con diferentes técnicas y precisiones (Rivera et al., 2016), dentro de esta clasificación existen subtipos de glaciares que serán explicados a continuación.

Tenemos la primera forma glaciar, el **Casquete de hielo continental o Islandis** (*Ice sheets*), el cual es una gran masa de hielo que cubre un continente como Antártica o grandes extensiones como Groenlandia donde la extensión de hielo no está totalmente controlada por la topografía de la corteza que subyace al hielo (Kotlyakov & Komarova, 2007).

Otra forma glaciar son las **Plataformas de hielo flotantes** (*Ice shelves*), el cual es la porción flotante de un glaciar cuyo frente termina en aguas oceánicas profundas, pero que están dinámicamente conectadas (Kotlyakov & Komarova, 2007). Las principales plataformas se encuentran en Antártica (Ross, Ronne-Filcher y Amery), pero también se encuentran en Groenlandia y en el Ártico canadiense, donde el hielo puede alcanzar el punto de flotación en algunos glaciares que presentan dimensiones inferiores a los de la Antártica. (Rivera et al., 2016).

Otra morfología glaciar que tenemos son las **Corrientes de hielo** (*Ice streams*) que corresponden a glaciares (o parte de glaciares) que drenan un casquete de hielo continental mediante altas tasas de flujos con velocidades muy superiores a las del entorno glaciar (Kotlyakov & Komarova, 2007). Estas corrientes de hielo no exhiben una delimitación precisa en todos sus márgenes, sin embargo, algunas zonas son más visibles por grietas laterales que separan las zonas de máximo flujo de aquellas zonas dinámicas (Rivera et al., 2016).

Después tenemos los **Glaciares de Piedemonte** (*Piedmont glaciers*) los cuales son enclavado en la Cordillera, pero cuya alimentación es suficientemente

abundante como para permitir que la lengua penetre el Ante País o Pie de Monte, derramando su caudal de hielo, en forma de abanico divergente (Rivera et al., 2016).

Siguiendo con las formas glaciares tenemos ahora a los **Glaciares de Valle** (*Valley glaciers*) que se refieren a un glaciar que cubre parcial o completamente el valle de una montaña (Kotlyakov & Komarova, 2007). Se caracterizan por tener una o más cuencas de acumulación, ubicadas en subcuencas o circos, las cuales confluyen en un valle, más largo que ancho, el cual permite el flujo de hielo en función de la pendiente (Rivera et al., 2016).

Otra clasificación morfológica están los **Glaciares en Calota** (*Ice caps*) que consisten en cuerpos de hielo que ocupan la cúspide de un centro montañoso (Kotlyakov & Komarova, 2007). Estos glaciares tienen un abombamiento en la parte central tipo “domo”, fruto de la acumulación y la topografía subyacente (Rivera et al., 2016).

Tenemos también los **Campos de hielo** (*Ice fields*) que son grandes superficies de hielo (Kotlyakov & Komarova, 2007), que exhiben una zona de acumulación compleja compuesta por una planicie de altura o *plateau* rodeado por zonas escarpadas. El hielo existentes en estas zonas altas es evacuado por medio de varias lenguas efluentes las cuales son controladas por la topografía subyacente (Rivera et al., 2016).

Existen también los **Glaciares de Cráter** (*Crater glaciers*) que son aquellos que ocupan una depresión topográfica, rodeada de un cordón montañoso, que impide la evacuación superficial del hielo acumulado, el cual fluye hacia el centro de la depresión y pierde masa por ablación superficial y también gracias al calor geotérmico en los conos y cráteres que los contienen (Rivera et al., 2016).

También están los **Glaciares de montaña** (*Mountain glaciers*) definidos como glaciares localizados en las partes altas de la cordillera, con formas variables, y donde la evacuación desde las zonas de acumulación (más anchas que largas),

se da por medio d una lengua glaciari pequeña (en comparación con un glaciari de valle) (Rivera et al., 2016).

Por otro lado, tenemos los **Glaciares de circo** (*Cirque glaciares*) que se refieren a aquellos que ocupan una depresión de carácter semicircular generada por erosión glaciari (circo) la cual es rodeada por flancos montañosos con mucha pendiente que culminan en cumbres o cordones tipo "aretos" (e.g. Kotlyakov & Komarova, 2007).

Mas formas de glaciares tenemos los **Glacieretes** (*Niche, wall-sided, glacierets*) esta categoría corresponde a las más pequeñas masa de hielo, sin existir una definición exacta de sus dimensiones (Rivera et al, 2016). Se pueden encontrar en laderas de montañas, depresiones, sectores en sombras, sectores receptores de avalanchas de nieve o de acumulación por el viento (e.g. Kotlyakov & Komarova, 2007).

Existe también los **Glaciares rocosos** (*Rock glaciers*) que contienen tanto hielo intersticial como núcleos de hielo (Kotlyakov & Komarova, 2007). Estos poseen una geometría en forma de lengua o lóbulo, cuya estructura interna está constituida por una mezcla de hielo (40-60%), roca y sedimentos finos, que se desplazan lentamente ladera o valle abajo, a velocidades que varían entre los 10-150 cm a<sup>-1</sup>(Azocar & Brenning, 2010).

Y por último tenemos los **Glaciares en conos volcánicos** (*Active volcano glaciers*), los cuales corresponden a glaciares ubicados sobre volcanes activos, definidos como aquellos volcanes con registro de erupciones recientes o en tiempos históricos, donde hay una interacción glacio-volcánica que puede generar lahares o flujos rápidos (Rivera et al., 2014), que se producen por el derretimiento de glaciares durante erupciones volcánicas, avalanchas de hielo, abrasión superficial debido a los flujos de lava y derretimiento basal (Thouret et al., 2007).

## 2.6. Clasificación según tipo de cobertura superficial

Según este tipo de clasificación se distinguen tres tipos de cobertura superficial.

La primera son los **glaciares descubiertos** (blancos o limpios), estos son glaciares sin grandes cantidades de materiales sedimentarias superficiales, y son generados por deposición de nieve, a la zona de acumulación o alimentación y una zona de ablación bien delimitada (Rivera et al., 2016)

El segundo tipo son los **glaciares cubiertos** que se presentan como característica principal el hecho de encontrarse parcial o totalmente bajo una capa dendrítica que actúa como aislante (Rivera et al., 2016). Estos glaciares pueden ser considerados como la etapa inicial del proceso de transformación gradual de un glaciar descubierto a uno rocoso (Croce & Milana, 2002).

Y por último tenemos al **glaciar rocoso**, también llamados de escombros (Brenning, 2003), tienen forma de lengua o lóbulo y un escarpe frontal y lateral como resultado del desplazamiento ladera abajo, presentando cordones y surcos en su superficie (Rivera et al., 2016).

## 2.7. Clasificación según zona de acumulación

Esta clasificación según el inventario mundial de glaciares (Müller et al., 1977) se han clasificado a los glaciares según las características de sus zonas de acumulación.

La primera que tenemos es la **cuenca compuesta** que consisten en dos o más cuencas de alimentación que dan origen a lenguas glaciares individuales, las que se unen aguas abajo formando una lengua principal (Kotlyakov & Komarova, 2007).

La segunda es la **cuenca simple** que es una cuenca de alimentación más ancha que larga, que bien delimitada, cuyo hielo es evacuado por una lengua principal (e.g. Glaciar Olivares Beta, Chile)

Por último, tenemos a la zona de acumulación llamada **Plateau** que es un tipo de glaciar complejo posado sobre una superficie relativamente plana (Kotlyakov & Komarova, 2007), cuyas divisorias de aguas son difíciles de mapear a menos que

se cuente con mediciones especializadas en velocidad de hielo, que permitan definir flujos superficiales de hielo divergente (Rivera et al., 2016).

## 2.8. Clasificación según tipo de frente

En general los glaciares pueden tener una gran diversidad de frentes (Rivera et al., 2016), pero puede sintetizarse en cuatro categorías.

Para empezar, tenemos al **de montaña** que son frentes terminales posados en roca, o materiales morrénicos, desde donde nacen cursos de agua de fusión glaciar (Rivera et al., 2016).

Después tenemos los **desprendentes de lagos** (*Freshwater calving front*) que son frentes que se desprenden (producen témpanos) de glaciares que desembocan en lagos (Kotlyakov & Komarova, 2007).

Por otra parte, están los **desprendentes de fiordos** (*Tidewater calving front*) que son frentes que se desprenden en aguas oceánicas sometidas a salinidad variable, mareas y corrientes de diversas intensidades (Kotlyakov & Komarova, 2007).

Y por último, están los **complejos** que consisten en frentes con varios de los tipos anteriores, debido a la existencia de más de una lengua terminal (brazos) o más de un tipo de termino, o frentes confluentes (e.g. Glaciar Pio XI, Campo de Hielo del Sur).

## 2.9. Clasificación según temperatura

La última clasificación de los glaciares se basa en su temperatura, esta es una variable importante para entender los mecanismos de pérdida de masa, y cuando se trata de mediciones de temperatura en testigos de hielo profundo, pueden informar de las condiciones climáticas existentes en el pasado (Thompson et al., 2011).

El primero es el **glaciar frío** cuyo hielo tiene una temperatura por debajo del punto de fusión. Este tipo de glaciares, el flujo de hielo se da principalmente por deformación interna. La temperatura puede variar en profundidad, e incluso acercarse al punto de fusión, la que debido a la presión ejercida por espesores de hielo de miles de metros, puede descender hasta unos pocos grados bajo 0° C, como por ejemplo en Antártica donde se han detectado lagos subglaciares (Vaughan et al., 2007).

El segundo es el **glaciar politermal** que posee zonas templadas y frías. También se les denomina glaciares térmicamente complejos. En general, se trata de glaciares que en su base poseen hielo templado, pero que en superficie tienen hielo frío. En general estos glaciares politermales son fríos en sus márgenes o donde sus espesores son menores o donde en invierno una onda de frío puede penetrar el hielo y permanecer más de una temporada (Rivera et al., 2016).

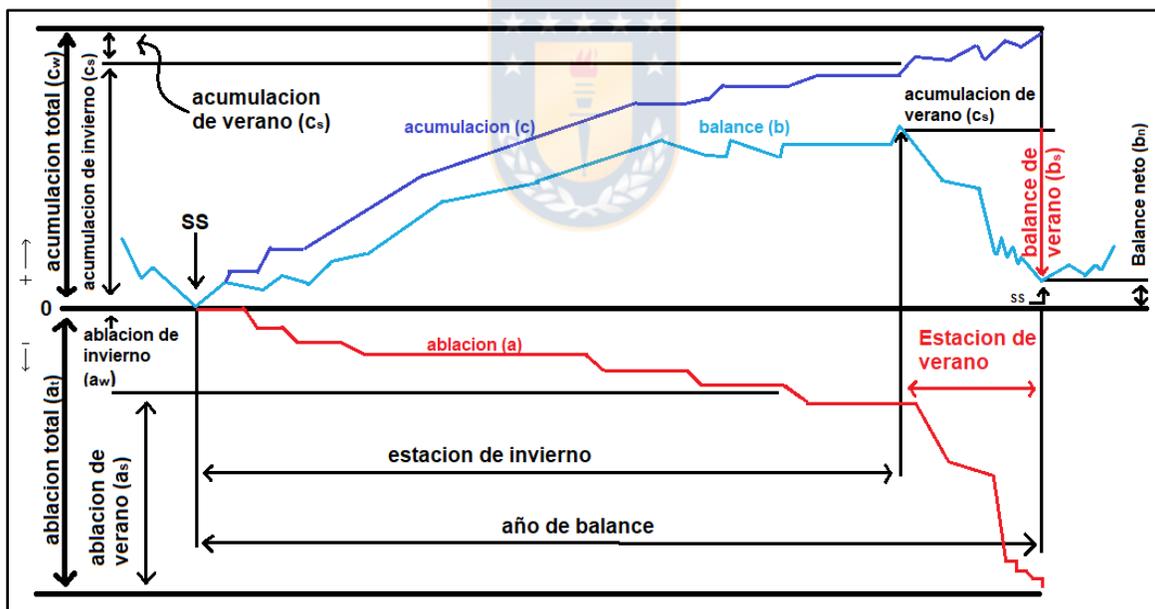
Y el tercero es el **glaciar templado** que consiste en un glaciar que en la mayor parte de su masa tiene la temperatura del punto de fusión. El punto de fusión puede variar por la presión (atmosférica o de acuerdo al espesor del hielo), pero en general esta temperatura se define como 0° C. (Rivera et al., 2016).

## 2.10. Balance de masa glaciar

El balance de masa glaciar consiste en el equivalente en agua de lo que gana y de lo que pierde un glaciar en un tiempo determinado. Este indicador se obtiene a partir de mediciones repetidas, ya sea de manera directa (balance glaciológico) u indirecta (balance hidrológico), además el balance de masa glaciar representa el componente climático de la evolución de un glaciar (Francou & Pouyand, 2008). También Bennett & Glasser (2009) definen que el balance de masa de un glaciar, como el balance entre la acumulación (suministro de la masa constituyente del glaciar, generalmente nieve) y la ablación del glaciar (pérdida de masa, ya sea de

la nieve o hielo). Lo que hace que un glaciar sea muy sensible a cambios en el clima. Existen diversos tipos de ecuaciones para poder calcular y obtener el balance de masa glaciar, en los cuales nos encontramos con: el balance de masa específico, balance de masa específico neto o anual (Figura 3), balance de masa total anual, balance de masa específico promedio.

**Figura 3. Terminología del balance de masa de un ciclo anual (año de balance) y diferenciación estacional para un glaciar típico de régimen templado o de latitudes medias**



Fuente: Modificado de Rivera et al. (2016)

## 2.11. Teledetección del espectro visible en la criósfera

En los estudios del territorio en el ámbito geográfico tenemos el análisis espacial el cual se encarga de observar la realidad territorial, donde encontramos formaciones naturales tales como ríos, montañas, planicies; construcciones tales como edificios, caminos, redes de cable, medios de transporte, maquinarias; también como animales, individuos, etc. (Coraggio, 1991). Una de las tantas herramientas que se usan para analizar el territorio y sus componentes nos encontramos con la teledetección, que es la adquisición de información sobre un objeto a distancia, esto es, sin que exista contacto material entre el objeto o sistema observado y el observador (Sobrino, 2000), otras acepciones más específicas hablan de que la teledetección es el registro de información de un objeto sin entrar en contacto material con él en las regiones del ultravioleta, visible, infrarrojo y microondas, por medio de instrumentos como escáneres y cámaras localizadas en plataformas móviles (un avión o satélite) y el análisis de la información adquirida por medio de técnicas de fotointerpretación, interpretación de imágenes y procesado de las mismas (Sabbins, 1983).

Desde sus inicios los datos satelitales se han utilizado para estudiar los glaciares, a través de los años se han usado para investigar y analizar diversas situaciones referentes a los glaciares, como cita Paul et al. (2013) las imágenes de satélite han “comenzando con el mapeo de diferentes hielos y nevadas usando el ca. 80 m resolución *Landsat Multi Spectral Sensor Scanner* (MSS) en la década de 1970 (Østrem, 1975; Rott, 1976) y el sensor *Landsat Thematic Mapper* (TM) de 30 m una década después (por ejemplo, Hall, Ormsby, Bindschadler y Siddalingaiah, 1987; Williams, Hall y Benson, 1991), la década de 1990 vio el mapeo de la extensión del glaciar y primeros estudios sobre evaluación de cambios con datos de TM (por ejemplo, Aniya, Sato, Naruse, Skvarca y Casassa, 1996; Bayr, Hall y Kovalick, 1994; Jacobs, Simms y Simms, 1997). Se aplicó una amplia gama de métodos en estos y otros estudios para mapear extensiones de glaciares. Se extienden de la digitalización manual completa en pantalla (por ejemplo, Rott y

Markl, 1989; Williams, Hall, Sigurdsson y Chien, 1997), a la segmentación de imágenes de relación (por ejemplo, Bayr et al., 1994; Paul, 2002; Rott, 1994) y varias supervisado (máxima verosimilitud) y sin supervisión (ISODATA agrupación) de algoritmos (por ejemplo, Aniya et al., 1996; Sidjak y Wheate, 1999)". Como se puede notar las imágenes obtenidas desde diversos satélites a lo largo de la historia han podido lograr estudiar los glaciares y sus comportamientos desde diversas formas, técnicas y métodos, lo que hace a la teledetección una de las técnicas más importantes dentro de las investigaciones y estudios en glaciología.

La teledetección ha sido de gran utilidad también para poder contabilizar los glaciares existentes alrededor del mundo, uno de los primeros inventarios que fue hecho es el llamado GLIMS (*Global Land Ice Measurements from Space*) que es un proyecto diseñado para monitorear los glaciares del mundo utilizando principalmente datos de instrumentos de satélite ópticos (GLIMS, n.d.), según cita Paul et al. (2013) "la conversión de los contornos de los glaciares en información de inventario implica digitalmente una intersección con divisiones de drenaje y cálculo de parámetros topográficos (por ejemplo, elevación mínima, media y máxima) para cada entidad glaciar. Pautas prácticas (por ejemplo, Racoviteanu, Paul, Raup, Khalsa, & Armstrong, 2009; Raup y Kahlsa, 2007) y consejos generales (por ejemplo, Paul et al., 2009; Paul, Kääh, Maisch, Kellenberger y Haeberli, 2002) tienen que haber sido preparadas para los analistas que contribuyen a GLIMS permitiendo así un procesamiento de datos más consistente", lo que hace relación a que necesariamente se debe trabajar digitalmente la identificación de glaciares a través de técnicas de teledetección. Así como existe el GLIMS también hay otro inventario disponible para conocer el estado de los glaciares que hay alrededor del mundo, el cual corresponde al RGI (*Randolph Glacier Inventory*) el cual es un inventario global de contornos de glaciares. Es complementario a la iniciativa *Global Land Ice Measurements from Space* (GLIMS) (GLIMS, n.d.), es necesario saber que para este segundo inventario la teledetección es importante también, por ejemplo en su versión 1.0 visualizaron los datos en un sistema de información geográfica superponiendo

esquemas en imágenes satelitales modernas, y evaluaron su calidad en relación con otros productos disponibles (RGI Consortium, 2017), por lo que la teledetección es uno de los pilares principales para la creación de este tipo de inventario en el mundo de la glaciología.

Algunos casos de estudios en glaciares relacionados a la teledetección tenemos, por ejemplo, lo que hicieron Corbera, Calvet & Palá (1996) donde se empleó el uso de fotografías aéreas de la zona e imágenes Landsat MSS y Spot, de distintos años para poder analizar las fluctuaciones del glaciar Bahía Falsa, en la isla Livingston (Antártica), donde concluyeron que si hubo un retroceso y adelgazamiento del glaciar en estudio, otro caso de estudio fue el realizado por Alva & Meléndez (2014) ubicado en la Cordillera Blanca del Perú, donde desde la geomática mediante la teledetección les permitió realizar monitoreos con mayor facilidad, mediante el empleo de imágenes satelitales para determinar el área de deshielo de los glaciares ubicados en su área de estudio. Otro caso de investigación más cercano a nuestro país fue hecho por Aniya et al. (1996) donde su área de trabajo e investigación fue ubicado en Campo de Hielo de la Patagonia Austral, el campo de hielo más grande de América del Sur, donde mediante el uso de mapa topográficos, fotografías aéreas con ayuda de interpretación estereoscópica e imágenes Landsat TM se localizaron divisorias y cuencas de drenajes de 48 glaciares, que pudieron ser inventariados gracias a esta investigación. Tal y como se puede apreciar la teledetección en los estudios e investigaciones en relación a los glaciares alrededor del mundo es muy importante y es uno de los pilares fundamentales dentro de la glaciología.

### 3. Área de estudio

El área de estudio en esta investigación corresponde a la Sierra Nevada (38°35'17.20"S, 71°34'43.97"O) que se ubica entre las comunas de Curacautín, Melipeuco y Lonquimay, entre las provincias de Malleco y Cautín, Región de la Araucanía, Chile (Figura 4). Este macizo contiene dos glaciares principales Sierra Nevada Norte y Sierra Nevada Sur y están emplazados dentro del Parque Nacional Conguillío, cuya extensión abarca 5 comunas: Curacautín, Lonquimay, (Provincia de Malleco), Vilcún, Cunco y Melipeuco (Provincia de Cautín) (CONAF, s.f.).

Con relación a las cuencas según el Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos (Tabla 2), la Sierra Nevada se ubica entre las cuencas Rio Imperial cuenca Rio Toltén y cuenca Biobío. Aquí nacen tres subcuencas Cautín Alto (hasta antes junta R. Quepe), la otra Rio Biobío Alto (Hasta después junta Rio Lamin) y la última Rio Allipén. Por último, tenemos que desde este macizo nacen cuatro subsubcuencas, la primera SubSubcuenca: Rio Cautín Entre Estero Lefuco y Bajo Junta Estero Collico, la segunda SubSubcuenca: Rio Lonquimay, la tercera SubSubcuenca: Rio Trafultraful y la cuarta SubSubcuenca, Rio Cautín Bajo Junta Estero Lefuco.

**Tabla 2. Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos en la Sierra Nevada**

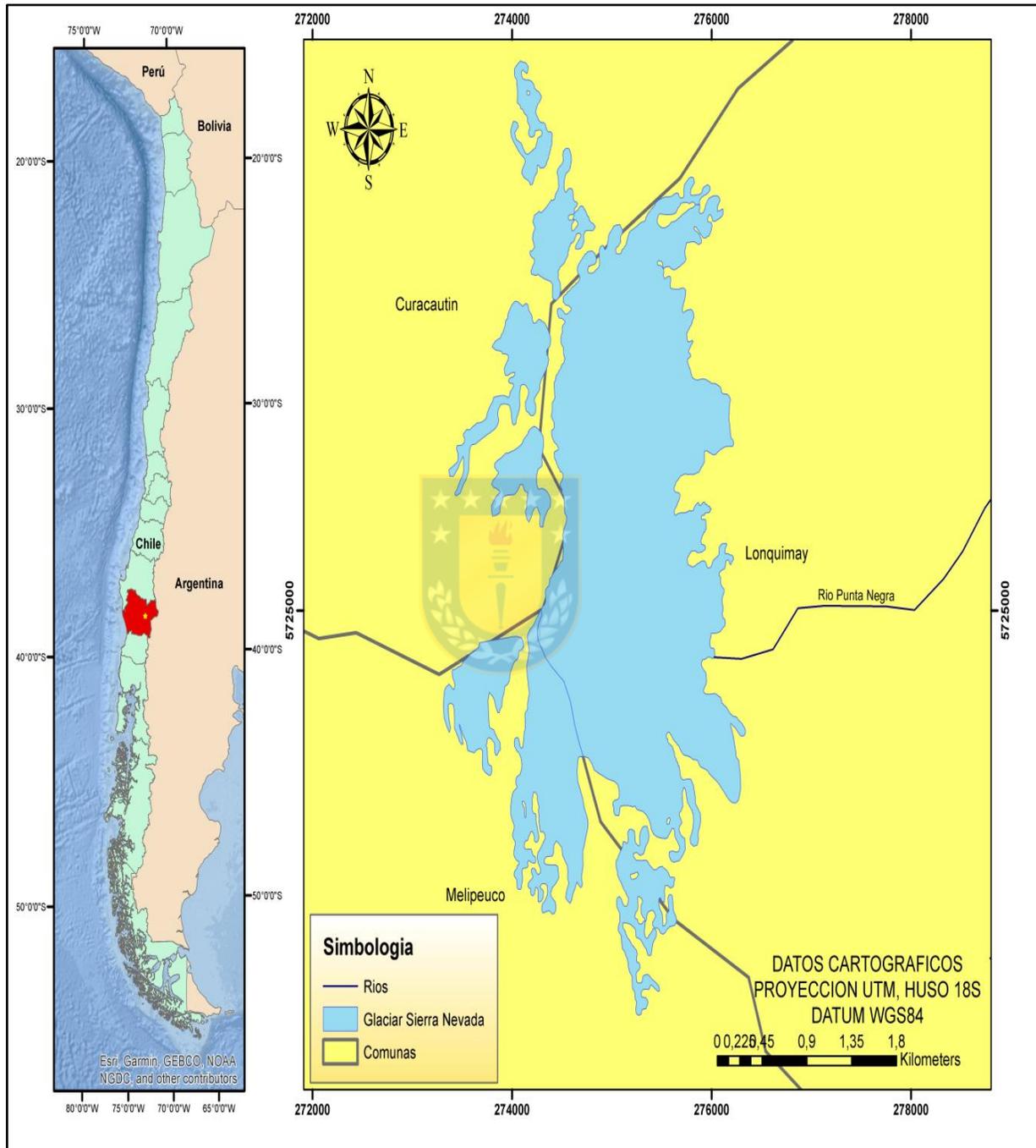
<b>Código Cuenca BNA</b>	<b>Código Subcuenca BNA</b>	<b>Código SubSubcuenca BNA</b>
091	0912	09121
094	0830	08304
083	0940	09400
		09120

**Fuente:** Dirección General de Aguas, 2007

Los glaciares de la Sierra Nevada según la DGA están clasificados como de montaña, cuyo código es RC1M0830401 y código BNA RC1M0830401, el área es de 5,89 km<sup>2</sup> según el inventario 2011 cuya fuente fue una imagen satelital Landsat ETM+ con fecha de captura 09/04/2003 (DGA).



**Figura 4. Ubicación del área de estudio**



**Fuente:** elaboración propia.

#### **4. Hipótesis**

Conforme a las tendencias de retroceso glaciar en el país, la gran mayoría de los glaciares chilenos ha retrocedido y han reducido sus superficies desde los primeros registros históricos hasta nuestros días (CECs, 2011), por lo cual los glaciares de la Sierra Nevada deberían haber retrocedido y perdido área desde el año 1973 hasta la actualidad.



## **5. Objetivos**

### **5.1. General**

1.- Determinar el cambio de la superficie de masa de hielo glaciar en la Sierra Nevada desde 1973 hasta el presente

### **5.2. Específicos**

1.- Determinar el cambio de superficie entre los años 1973-2020.

2. Determinar el cambio frontal (longitud) de masa de hielo de los glaciares entre los años 1973-2020.

3.- Evaluar las tendencias calculadas en relación a cambios recientes de temperatura y precipitación.



## 6. Materiales y Método

### 6.1. Materiales

El material usado para calcular la variación de superficie y longitud de hielo glaciar en Sierra Nevada fueron imágenes satelitales de tipo Landsat y ASTER.

#### 6.1.1. Imágenes Landsat

Landsat 1 llamado originalmente ERTS-1 (*Earth Resources Technology Satellite One*) fue el primer satélite civil de observación terrestre, lanzado en el año 1972 por la NASA (*US National Aeronautics and Space Administration*). Operando exitosamente hasta enero de 1978 (Mather, 2007). Un segundo satélite similar, Landsat 2, fue puesto en órbita en enero de 1975. Luego Landsat 3, 4 y 5 fueron lanzados en 1978, 1972 y 1984 respectivamente. El sexto satélite se perdió durante la etapa de lanzamiento. Landsat 7 fue puesto en órbita el 15 de abril de 1999 (Mather, 2007).

Mientras que Landsat 2 y 3 orbitan de manera similar al Landsat 1, los satélites posteriores utilizan una órbita inferior de 705 km, con una inclinación ligeramente diferente de  $98.2^\circ$  en comparación con la  $99.0^\circ$  de Landsat 1 y 3 (Mather, 2007). Landsat 1 al 5 llevó el escáner multiespectral (MSS), que se describe aquí por razones históricas, ya que ya no están operativos, aunque existan archivos sustanciales de imágenes permanecen disponibles (Mather, 2007).

El último satélite Landsat lanzado fue el número 8, en el año 2013, cuyo objetivo principal de la misión Landsat 8 es extender el registro de Landsat hacia el futuro y mantener la continuidad de las observaciones para que los datos de Landsat 8 sean consistentes y comparables con los de los sistemas Landsat anteriores (Roy et al., 2014).

La Tabla 3 resume todas las características principales de los satélites Landsat que han sido lanzados a lo largo de la historia.

**Tabla 3. Características principales de los satélites Landsat**

Satélite	Sensor	Resolución espectral ( $\mu\text{m}$ ) Banda: intervalo	Resolución espacial (m)	Resolución temporal (días)	Altitud (km)	
Landsat 1 y 2	RBV	(1) 0.48 0.57	80	18	917	
		(2) 0.58 0.68				
		(3) 0.70 0.83				
	MSS	(4) 0.5 0.6	79			
		(5) 0.6 0.7				
		(6) 0.7 0.8				
		(7) 0.8 1.1				
Landsat 3	RBV	(1) 0.5 0.75	40	18	917	
	MSS	(4) 0.5 0.6	79			
		(5) 0.6 0.7				
		(6) 0.7 0.8				
		(7) 0.8 1.1				
		(8) 10.4 12.6	240			
Landsat 4 y 5	MSS	(4) 0.5 0.6	82	16	705	
		(5) 0.6 0.7				
		(6) 0.7 0.8				
		(7) 0.8 1.1				
	TM	(1) 0.45 0.52	30			
		(2) 0.52 0.60				
		(3) 0.63 0.69				
		(4) 0.76 0.9				
		(5) 1.55 1.75				
		(6) 10.4 12.5				120
		(7) 2.08 2.35				30
Landsat 6	Fallos en el sistema					
Landsat	ETM+	(1) 0.45 0.52				

7		(2) 0.53 0.61	30	16	705
		(3) 0.63 0.69			
		(4) 0.78 0.9			
		(5) 1.55 1.75			
		(6) 10.4 12.5	120		
		(7) 2.09 2.35	30		
		PAN 0.5 0.90	15		
Landsat 8	OLI	(1) 0.43 - 0.45	30	16	705
		(2) 0.45 - 0.51			
		(3) 0.53 - 0.59			
		(4) 0.64 - 0.67			
		(5) NIR 0.85 - 0.88			
		(6) 1.57 - 1.65			
		(7) 2.11 - 2.29			
		(8) PAN 0.50 - 0.68	15		
		(9) 1.36 - 1.38	30		
	TIRS	(10) 10.60 - 11.19	100		
	(11) 11.50 - 12.51	100			

**Fuente:** Elaboración propia con datos específicos de Ariza (2013) y García (2010).

\*Las bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a remuestrear a 30 metros (Ariza, 2013), para que sea posible la comparación con las demás bandas espectrales.

### 6.1.2. Imágenes ASTER

Las imágenes ASTER son ópticas de alta resolución geométrica y radiométrica, tomadas corresponden al satélite TERRA de la NASA, puesto en órbita el 18 de diciembre de 1999 (Méndez, 2007), otra de sus características es que el sensor TERRA se opera en una órbita circular, casi polar, a una altitud de 705 km, sincrónica al sol con una hora local de 10:30 a.m. (ERSDAC, 2005).

Las imágenes ASTER están compuesto por 3 subsistemas (Tabla 4); VNIR, SWIR y TIR; cada uno de los cuales presenta características particulares tales como 3 bandas en la región espectral del Visible e Infrarrojo Cercano (VNIR) con una resolución espacial de 15 metros; 6 bandas en la región espectral del Infrarrojo de

Onda Corta (SWIR) con una resolución espacial de 30 metros y 5 bandas en el Infrarrojo Térmico (TIR) con una resolución espacial de 90 metros (ERSDAC, 2005).

**Tabla 4. Características principales de imágenes satelitales ASTER**

Subsistema	N° Banda	Rango espectral ( $\mu\text{m}$ )	Rango espacial (m)	Resolución temporal (días)
VNIR	1	0,52-0,60	15m	16
	2	0,63-0,69		
	3N	0,76-0,86		
	3B	0,76-0,86		
SWIR	4	1,60-1,70	30	
	5	2,145-2,185		
	6	2,185-2,225		
	7	2,235-2,285		
	8	2,295-2,365		
	9	2,360-2,430		
TIR	10	8,125-8,475	90	
	11	8,475-8,825		
	12	8,925-9,275		
	13	10,25-10,95		
	14	10,95-11,65		

**Fuente:** Elaboración propia con datos de ERSDAC (2005)

## 6.2. Obtención de datos

Para la realización y cálculo de la variación de superficie y longitud de los glaciares primero se descargan las imágenes satelitales Landsat y ASTER ocupadas durante esta investigación, que fueron obtenidas desde sitios web tales como *Global Visualization Viewer* (GLOVIS) (<https://glovis.usgs.gov/app> Mayo 02, 2020; ultimo acceso exitoso) que tiene imágenes con datos de detección remota disponibles desde el año 2011 y por otro lado tenemos la página web *United States Geological Survey (USGS Earth Explorer)* (<https://earthexplorer.usgs.gov/> Abril 27, 2020; ultimo acceso exitoso) que proporciona búsqueda en línea, visualización de navegación, exportación de metadatos y descarga de datos de ciencias de la tierra. En esta metodología, se usan imágenes satelitales tanto de Landsat como ASTER (Tabla 5).

Consultadas ambas páginas, se obtuvieron 22 imágenes entre los años 1973-2020, que estaban disponibles y/o calificaban para poder ser trabajadas mediante herramientas SIG, teniendo en consideración ciertos criterios para su selección tales como escenas del final del período de ablación con nieve estacional cerca de un mínimo, una buena coincidencia temporal o al menos condiciones de nieve comparables de las imágenes de alta y baja resolución (Paul et al., 2013) y bajas coberturas de nubosidad (<40%) para una mejor visualización del área de estudio. Además de que al final del período de ablación (cuando la capa de nieve es mínima) y desde una perspectiva de detección remota, la superficie del glaciar está compuesta de hielo desnudo, nieve, tierra/escombros/rocas y agua líquida (Paul et al., 2013), por lo que es más fácil discriminarlo.

**Tabla 5. Imágenes satelitales disponibles entre los años 1973-2020 para los  
glaciares de la Sierra Nevada**

<b>Año</b>	<b>Imagen</b>	<b>Sensor</b>	<b>Fecha de adquisición</b>	<b>Nubosidad (%)</b>	<b>Resolución (m)</b>
1973	Landsat 1	MSS	04 de Marzo	29	60
1976	Landsat 2	MSS	08 de Febrero	0	60
1985	Landsat 5	MSS	10 de Febrero	0	60
1986	Landsat 5	MSS	06 de Febrero	0	60
1987	Landsat 5	MSS	29 de Febrero	2	60
1989	Landsat 4	TM	03 de Enero	38	30
1990	Landsat 4	TM	13 de Marzo	1	30
2000	Aster	VNIR	18 de Mayo	24	15
2003	Aster	VNIR	24 de Marzo	1	15
2004	Aster	VNIR	15 de Enero	1	15
2005	Aster	VNIR	18 de Febrero	4	15
2007	Landsat 5	TM	04 de Marzo	15	30
2008	Landsat 5	TM	26 de Febrero	3	30
2009	Landsat 5	TM	25 de Marzo	1	30
2010	Landsat 5	TM	19 de Marzo	8	30
2014	Landsat 8	OLI/TIRS	19 de Febrero	18	15 PAN/ 30 REF y THER
2015	Landsat 8	OLI/TIRS	10 de Marzo	1	15 PAN/ 30 REF y THER
2016	Landsat 8	OLI/TIRS	03 de Marzo	25	15 PAN/ 30 REF y THER
2017	Landsat 8	OLI/TIRS	22 de Marzo	9	15 PAN/ 30 REF y THER
2018	Landsat 8	OLI/TIRS	21 de Febrero	29	15 PAN/ 30 REF y THER

2019	Landsat 8	OLI/TIR S	24 de Febrero	5	15 PAN/ 30 REF y THER
2020	Landsat 8	OLI/TIR S	27 de febrero	16	15 PAN/ 30 REF y THER

\*PAN: Pancromática; REF: Reflexivo; THER: Térmico.

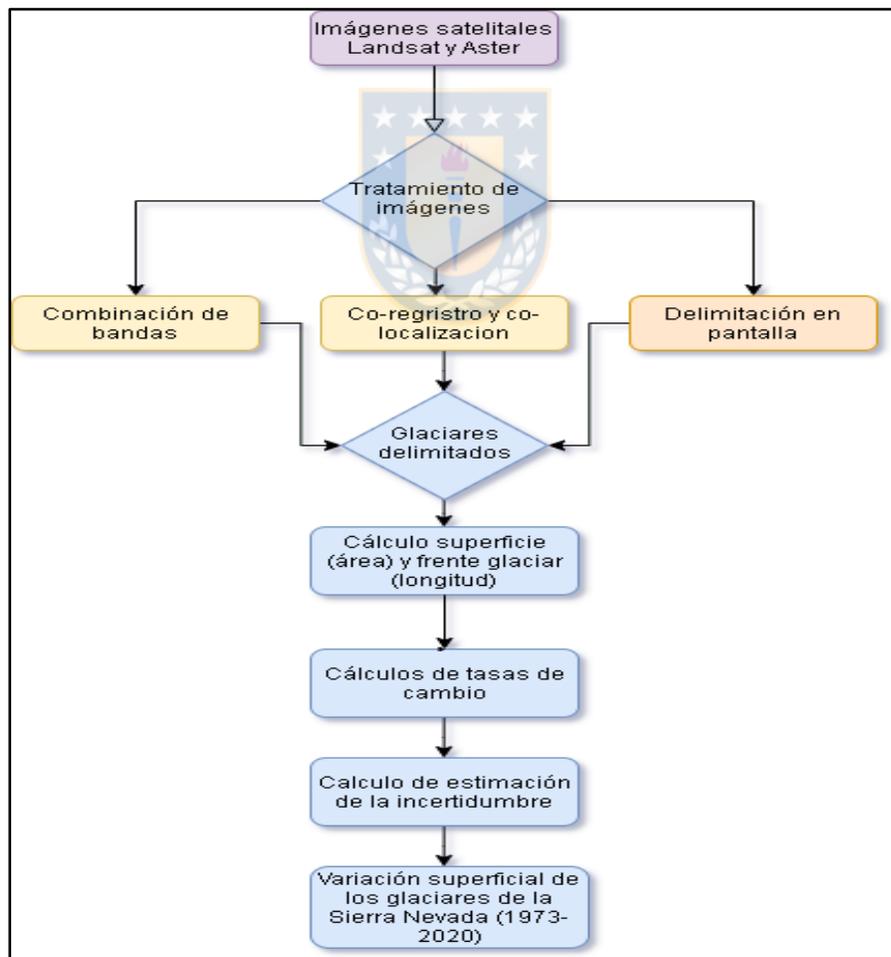
**Fuente:** elaboración propia



## 7. Método

El método que se usó para calcular la variación superficial de glaciares de Sierra Nevada incluyó tratamiento de imágenes satelitales, delimitación manual de glaciares y otros cálculos realizados en SIG, como se resume en la Figura 5.

**Figura 5. Esquema Metodológico**



**Fuente:** elaboración propia

## 7.1. Tratamiento de las imágenes

Las imágenes satelitales disponibles entre los años 1973-2020 deben pasar por un tratamiento para el procesamiento adecuado para ser utilizados en la determinación de fluctuaciones en los glaciares.

## 7.2. Composición de bandas específicas

Para el tratamiento visual de las imágenes satelitales, desde los sistemas electrónicos en la región visible e infrarrojo cercano (VIR, en inglés) se pueden obtener geometrías que dependen de la configuración de sus detectores, las formas más comunes de escanear es todavía *whiskbroom* (escoba) de imágenes, donde los campos de vista instantáneos (IFOV, en inglés) son escaneados perpendicularmente a las plataformas de movimiento por una rotación u oscilación espejo dentro del instrumento, mientras que el escaneo hacia adelante se logra nuevamente a través de plataformas hacia adelante. Este sistema es usado por Instrumentos Landsat nacidos desde el espacio (Gareth, 2006).

El trabajo con estas imágenes de satélite y la obtención de la forma de los glaciares tiene formas para lograrlo mediante la transformación de bandas que hay disponibles. Hay una, donde conociendo que la reflectancia de una capa de nieve profunda es muy alta (encima de 0.9) en la longitud de onda rango 0.5 a 0.6  $\mu\text{m}$ , correspondientes a banda 2 de Landsat sensores TM o ETM+, mientras que la longitud de onda rango 1.55 a 1.75  $\mu\text{m}$  (banda 5) es bajo (menor a 0.2), entonces tenemos que la proporción de la reflectancia desde la banda 2 a la banda 5 se espera que sea alta para superficies cubiertas de nieve, es preferible calcular el Índice de Diferencia Normalizada (en este caso, Índice de Nieve de Diferencia Normalizada, NDSI en inglés)(Gareth, 2006), pero en esta ocasión no se optó por esta técnica.

Otra forma de identificar la geometría de los glaciares mediante imágenes satelitales es mediante el uso del falso color, esta combinación es la más frecuente, una buena parte de los sensores de los satélites de observación de la Tierra relacionados con los recursos naturales disponen de canales sensibles a una parte del espectro visible y del infrarrojo próximo (Landsat-MSS, SPOT-HRV, IRSLISS, DMC) (Martínez & Martin, 2010). Usando a favor la facilidad con la cual hacer combinaciones de bandas y teniendo en cuenta que el glaciar es un elemento fácil de discriminar con lo que lo rodea, se utilizó diferentes combinaciones de bandas (Tabla 6), para lograr diferenciar los glaciares en las distintas imágenes satelitales disponibles dentro de los años 1973-2020.

Con las imágenes con sus respectivas combinaciones de bandas, se guardan en formato GeoTIFF para procesarlas en el siguiente paso.



**Tabla 6. Combinaciones de bandas espectrales para discriminar glaciares en Sierra Nevada**

<b>Satélite</b>	<b>Combinación de bandas</b>	<b>Color del glaciar</b>
Landsat 1	7-6-5	Blanco
Landsat 2	7-6-5	Blanco
Landsat 4	4-3-2	Azul
Landsat 5	4-3-2	Blanco
Landsat 8	7-6-4	Azul
ASTER	S/ combinación	Celeste

**Fuente:** elaboración propia

### **7.3. Corrección geométrica**

En este paso con todas las imágenes satelitales disponibles en formato GeoTIFF, se co-registran. En la actualidad la mayoría de los usuarios opta por métodos de corrección geométrica tradicionales basados en la colocación visual de puntos homólogos para 1) corregir o ajustar geométricamente una imagen respecto a una del mismo sensor que se toma como referencia y que puede estar proyectada o no y, 2) georreferenciar o proyectar la imagen a un sistema de referencia cartográfico de manera que las posiciones de la imagen coincidan con posiciones sobre el terreno (Ameztoy et al., 2009). Teniendo en consideración esto se procedió a tomar puntos de control dentro de la imagen con mejor resolución espacial y más actual, en este caso la imagen Landsat 8 del año 2020, la cual será usada como imagen base, para poder co-registrar las demás imágenes satelitales de años anteriores.

Con alrededor de 10 puntos de control en cada imagen se espera que RMSE (Error Cuadrático Medio Inicial), pueda variar de manera aproximada entre 1) 0.5 y 2 píxeles para las imágenes que no presentan problemas y 2) entre 0.5 y 10 píxeles para las imágenes que presentan algún porcentaje de nubes (Ameztoy et al., 2009). Por lo tanto, se espera que teniendo listo el co-registro la geolocalización de todas las imágenes satelitales sea lo más exacta respecto a otras, para generar así un cálculo más cercano a la realidad.

### **7.4. Delimitación de glaciares**

La delimitación de glaciares es una de las etapas más complejas dentro de la determinación de la superficie del glaciar, ya que existen distintas maneras de delimitar sus márgenes. En este trabajo se optó por la digitalización en pantalla o manual.

El problema que presenta la delimitación del borde de un glaciar es que encontrar la precisión correcta es un verdadero desafío. Aquí se deben considerar dos

cuestiones: (a) aparte de unas pocas regiones sin lagos y glaciares cubiertos de escombros, los contornos de los glaciares derivados automáticamente también suelen corregirse manualmente (por interpretación visual de la imagen de satélite) y (b) el glaciar digitalizado manualmente en sus contornos difieren en cada digitalización (incluso cuando los realiza la misma persona), según el grado de generalización (Paul et al., 2013), por lo tanto, se es necesario delimitarlo de forma manual ya que es más preciso, porque aunque se haga de manera automática la intervención manual se hace igual necesaria.

Esta técnica de delimitar el borde de una glaciar mediante la digitalización en pantalla de forma manual, está justificada como según lo dice Aniya et al. (1996) “con interpretación manual a gran escala, con datos de detección remota, como fotografías aéreas, la tarea de distinguir la superficie cubierta de nieve y la superficie de hielo desnudo se pueden hacer relativamente fácil con un análisis cuidadoso de las condiciones de la superficie del glaciar”, lo que lo hace una de las técnicas más fiables para obtener el límite glaciar adecuado. Esta tarea se puede hacer siguiendo unos pasos específicos tal y como lo explica Paul et al. (2013) se concluye que:

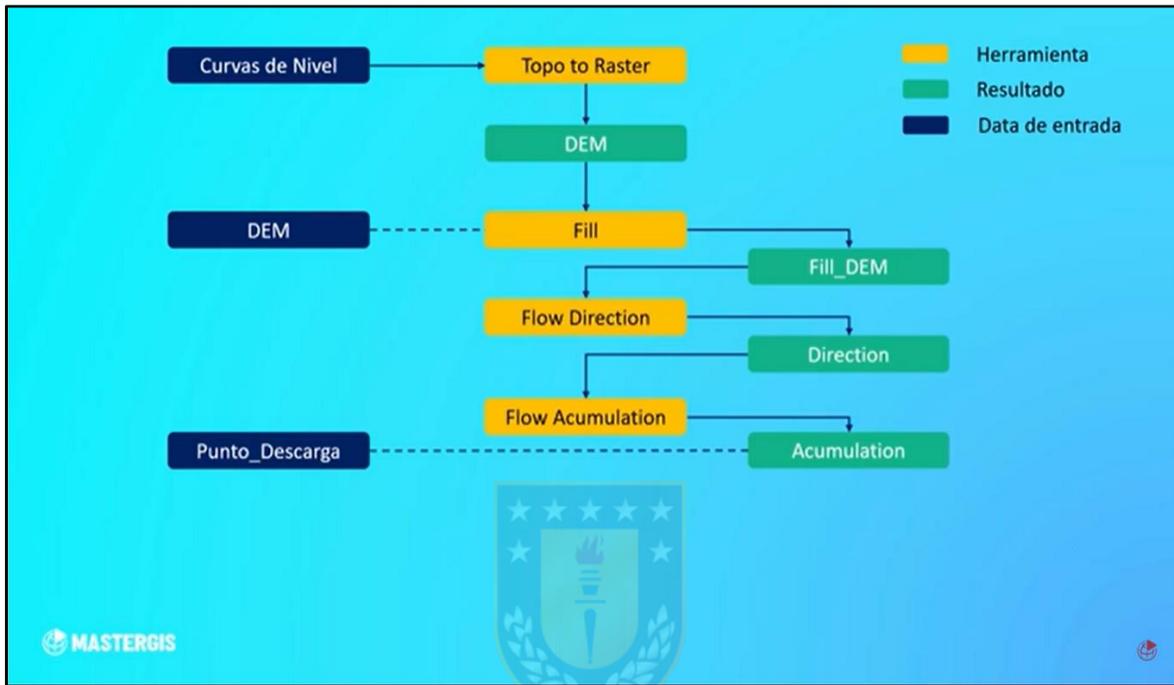
- a) las digitalizaciones múltiples de los datos de alta resolución proporcionan un valor medio para los glaciares respectivos que se pueden usar como referencia
- b) Las digitalizaciones múltiples de los datos de menor resolución proporcionan (i) una medida para la precisión de la digitalización de los analistas (desviación estándar de los valores del área derivada), (ii) un valor medio para comparar con una extensión derivada automáticamente, y (iii) la posibilidad de determinar si la extensión derivada automática o manualmente es más precisa (comparando la diferencia de (ii) a la desviación estándar (STD) de (i))
- c) identificación de regiones con grandes diferencias de interpretación por superposición de contornos.

Para precisar la detección de glaciares, también se hace necesario generar cuencas de drenaje (Aniya et al., 1996) para apoyar el resultado de la digitalización en pantalla de las imágenes satelitales ya georreferenciadas. Con esta técnica se producen alrededor de tres polígonos por cada límite glaciar en cada año de estudio, para obtener una idea promedio del polígono real de los glaciares en Sierra Nevada y encontrar errores de interpretación y corregirlos, para un mejor resultado.

También es necesario generar cuencas de drenaje de los glaciares, ya que también sirven para delimitar el borde de los glaciares (Aniya et al., 1996), esto se realiza automáticamente a través del programa ArcGis 10.5, usando un DEM (Modelo Digital de Elevación) de tipo SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*, en inglés). Mediante la herramienta de hidrología (Figura 6) se obtiene los límites de la cuenca de drenaje que ayudara a delimitar digitalmente de una mejor manera los límites del glaciar.



**Figura 6. Pasos para seguir para obtener los límites de una cuenca hidrográfica en el programa ArcGis 10.5**



**Fuente:** Captura de pantalla archivo de video, MasterGIS (2018)

## 7.5. Cálculos

### 7.5.1. Determinación de cambio de superficie de los glaciares

El cálculo de la superficie del glaciar se realiza en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Una vez teniendo ya los polígonos previamente hechos y delimitados por cada fecha de adquisición, estos polígonos se les debe restar nieve estacional y afloramientos rocosos.

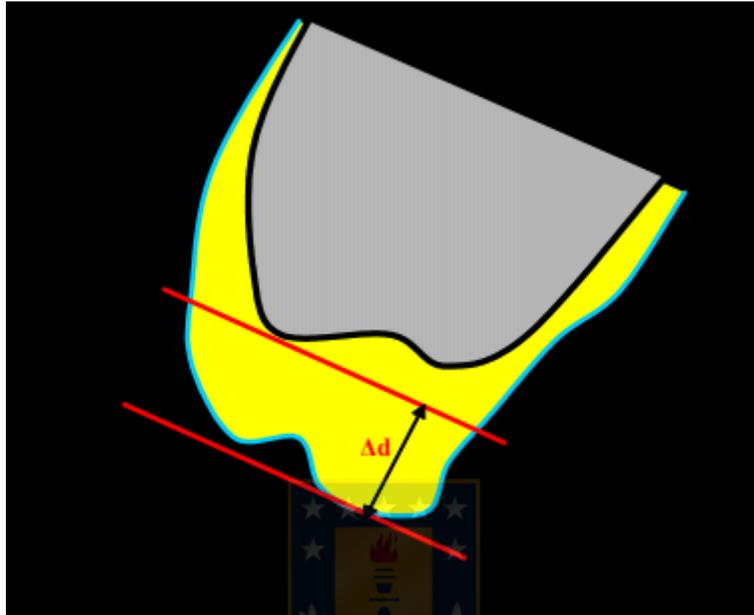
Por lo tanto, restando en esta ocasión áreas no consideradas partes del glaciar, con un cálculo de polígono dentro de herramientas SIG tendremos la superficie real del glaciar presente en Sierra Nevada.

### **7.5.2. Cálculo del cambio frontal del glaciar**

El cálculo de cambio frontal en el glaciar se refiere en términos generales a la longitud del frente. Existen 2 formas de evaluar la fluctuación frontal (Franco & Pouyaud, 2004) tales como:

- a) La más sencilla consiste en comparar las posiciones extremas del frente, lo que equivale a trazar dos segmentos paralelos tocando los puntos extremos del glaciar, de dirección perpendicular al eje principal del glaciar y medir la distancia ( $\Delta d$ ) separando esos segmentos (Figura 7).
- b) La más exacta (y recomendada) consiste en calcular, abajo de una línea definida, las superficies de las zonas frontales de los 2 años de los cuales se quiere cuantificar el movimiento del frente del glaciar. Posteriormente, se convierten las diferencias de superficies en una longitud promedio, que representa el avance o el retroceso del frente entre los 2 años considerados.

**Figura 7. Determinación retroceso o avance ( $\Delta d$ ) de un glaciar entre 2 fechas utilizando un método sencillo.**



**Fuente:** Extraído de Francou & Pouyaud (2004)

Esta investigación usa la primera forma de evaluar el cambio de frente (a), calculando la variación de distancia ( $\Delta d$ ) entre 2 fechas, teniendo ya los polígonos de los límites de los glaciares.

### **7.5.3. Tasa de cambio**

Las tasas de cambio para área y frente glaciar se calculan en  $\text{km}^2/\text{año}$  y  $\text{m}/\text{año}$ , respectivamente. Teniendo en consideración la cantidad de años entre un dato y el cambio total ( $\text{km}^2$  o  $\text{m}$ ) (ecuación 1).

$$\text{Tasa de cambio} = \frac{\text{Cambio total}}{(\text{Año actual} - \text{Año anterior disponible})} \quad (1)$$

**Fuente:** elaboración propia

#### 7.5.4. Estimación de Incertidumbre

En cálculos de límites glaciares siempre hay un margen de error (incertidumbre), según cita Mal et al. (2019) los “límites de los glaciares digitalizado manualmente a partir de imágenes satelitales con diferentes resoluciones espaciales y los errores de co-registro son esenciales para corroborar la importancia de los resultados (Bhambri et al., 2012; Pandey y Venkataraman, 2013; Shukla y Qadir, 2016)”. Para conocer la precisión de las medidas obtenidas en este estudio se utilizó 4 ecuaciones para realizar los cálculos.

La ecuación 2 consiste en el cálculo de la incertidumbre que puede existir para imágenes satelitales multitemporales en relación al frente glaciar (longitud) (UT), donde  $\lambda$  es la resolución original del pixel de cada imagen y  $\varepsilon$  es el error de registro de cada imagen individual (Ye et al., 2006).

$$UT = \sqrt{\sum \lambda^2} + \sqrt{\sum \varepsilon^2} \quad (2)$$

La ecuación 3, tal y como cita Ye et al. (2006) “según Hall y otros (2003), la incertidumbre de la medición en el área de los glaciares (UA) a partir de las imágenes puede obtenerse utilizando”:

$$UA = \frac{2UT}{\sqrt{\lambda^2}} \sum \lambda^2 = 2UT\sqrt{\sum \lambda^2} \quad (3)$$

La ecuación 4 corresponde a la precisión del área (UM) en cualquier imagen digital individual (Ye et al., 2006), que se expresa de la siguiente manera.

$$UM = 2UT\lambda \quad (4)$$

Por último,

la ecuación 5, tiene como finalidad obtener la incertidumbre total de la medición en la zona del glaciar durante los años 1973-2020, donde se deben medir todos los conjuntos de datos espaciales (Ye et al., 2006), como el tamaño del pixel, errores de registros, incertidumbre de frente glaciar, entre otras.

$$UA = 2UT\sqrt{\sum \lambda^2 + \sum \varepsilon^2} \quad (5)$$



## **8. Resultados**

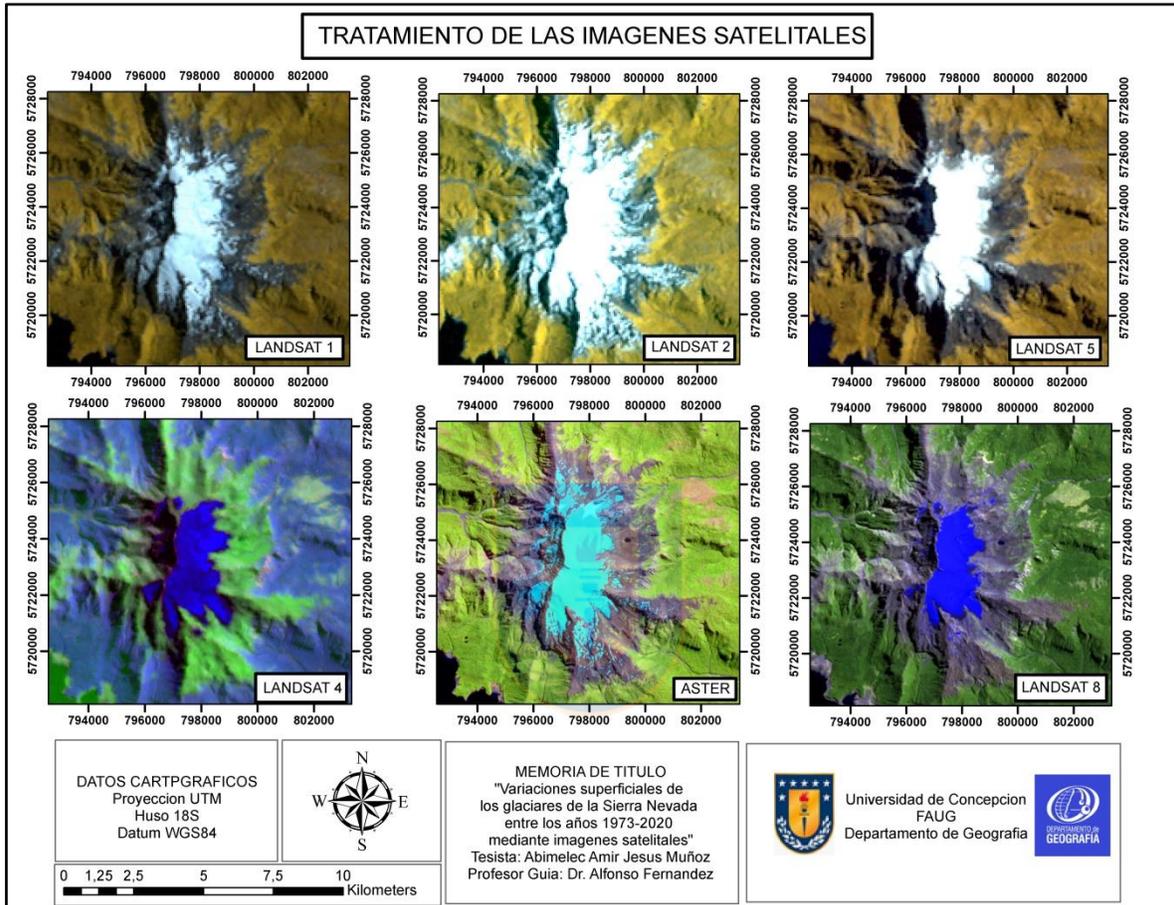
### **8.1. Tratamiento de imágenes**

El proceso de obtención de las variaciones superficiales de los glaciares de la Sierra Nevada entre los años 1973-2020, comenzó con el tratamiento visual de las imágenes satelitales obtenidas durante ese rango de años. Se hizo la combinación de bandas para obtener la visualización del glaciar lo más clara posible para su posterior delimitación digital.

Para ello se usó distintas composiciones de bandas espectrales (Tabla 6) dependiendo del tipo de imagen satelital que se estaba trabajando, para así llegar a un resultado óptimo. Se logró llegar al resultado que se muestra en la Figura 8, donde se aprecian los distintos tipos de colores, en los cuales se puede visualizar el glaciar y así trabajar con tales imágenes.



**Figura 8. Resultado de las imágenes satelitales con su composición de bandas espectrales respectivas**



**Fuente:** elaboración propia

## 8.2. Co-registro y co-localización

En el tratamiento digital de las imágenes satelitales se corrigen los errores de geolocalización que puedan tener entre ellas al ser imágenes de distintas resoluciones espaciales y temporales. Se tomaron 10 puntos de control (Tabla 7) con la imagen más actual (Landsat 8 del año 2020), desde donde se corrigieron

los probables errores de co-registro y co-localización con las demás imágenes satelitales, para así tener el menor error de registro (RMSE) entre el modelo referencial y las demás imágenes satelitales.

**Tabla 7. Coordenadas de puntos de control en proyección UTM, Huso 18S, Datum WGS84**

<b>Nº punto de control</b>	<b>X (ESTE)</b>	<b>Y (NORTE)</b>
Control 1	795781,9632	5726708,349
Control 2	798209,5981	5727853,658
Control 3	799529,424	5726685,633
Control 4	799501,2143	5723944,02
Control 5	800606,8409	5722565,64
Control 6	800253,8388	5720252,372
Control 7	798426,1697	5718569,223
Control 8	794167,1359	5718748,255
Control 9	794428,8542	5723321,135
Control 10	794040,4659	5724883,481

**Fuente:** elaboración propia

Estos puntos de control tomados desde la imagen Landsat 8 del año 2020 (Figura 9), se posicionaron en puntos estratégicos que pudieran notarse entre todas las imágenes satelitales disponibles entre los años 1973-2020, el cual debido a los cambios de resolución espacial fue necesario tener una posición lo más limpia posible, para que haya menos errores de geolocalización entre los puntos de control.

En la Tabla 8 se presentan los RMSE (*Root Mean Square Error*) de cada imagen co-registrada, teniendo como modelo referencial la imagen satelital Landsat 8 del año 2020, aquí se visualiza que a medida que la imagen tiene una mejor

resolución espacial a través de los años de estudio, el error disminuye ya que es más fácil lograr que los 10 puntos de control se geo-localicen lo más correcto posible.

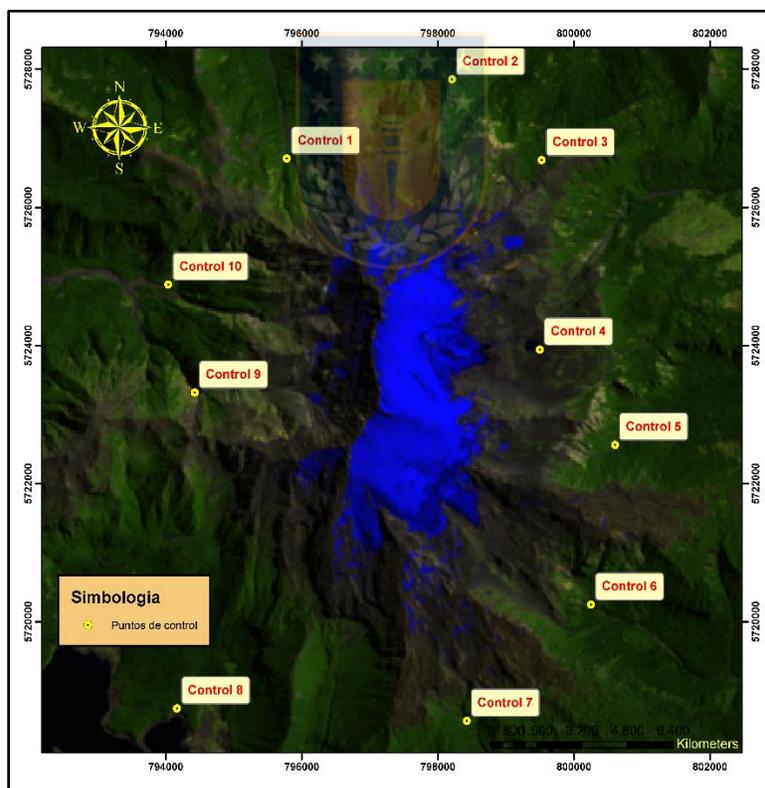
**Tabla 8. Error RMSE de cada imagen co-registrada**

<b>Año</b>	<b>Resolución (m)</b>	<b>Error RMSE</b>
1973	60	10,7553
1976	60	8,1821
1985	60	3,9932
1986	60	11,809
1987	60	7,80293
1989	30	2,48275
1990	30	1,22007
2000	15	1,20691
2003	15	1,02582
2004	15	0,730334
2005	15	0,935862
2007	30	1,00544
2008	30	1,00794
2009	30	0,865146
2010	30	0,981567
2014	15 PAN/ 30 REF y THER	0,951969
2015	15 PAN/ 30 REF y THER	0,585407
2016	15 PAN/ 30 REF y THER	1,07302
2017	15 PAN/ 30 REF y THER	0,957362
2018	15 PAN/ 30 REF y THER	0,987867

2019	15 PAN/ 30 REF y THER	0,994956
2020	15 PAN/ 30 REF y THER	Imagen de referencia

Fuente: elaboración propia

Figura 9. Puntos de control para co-registro y co-localización



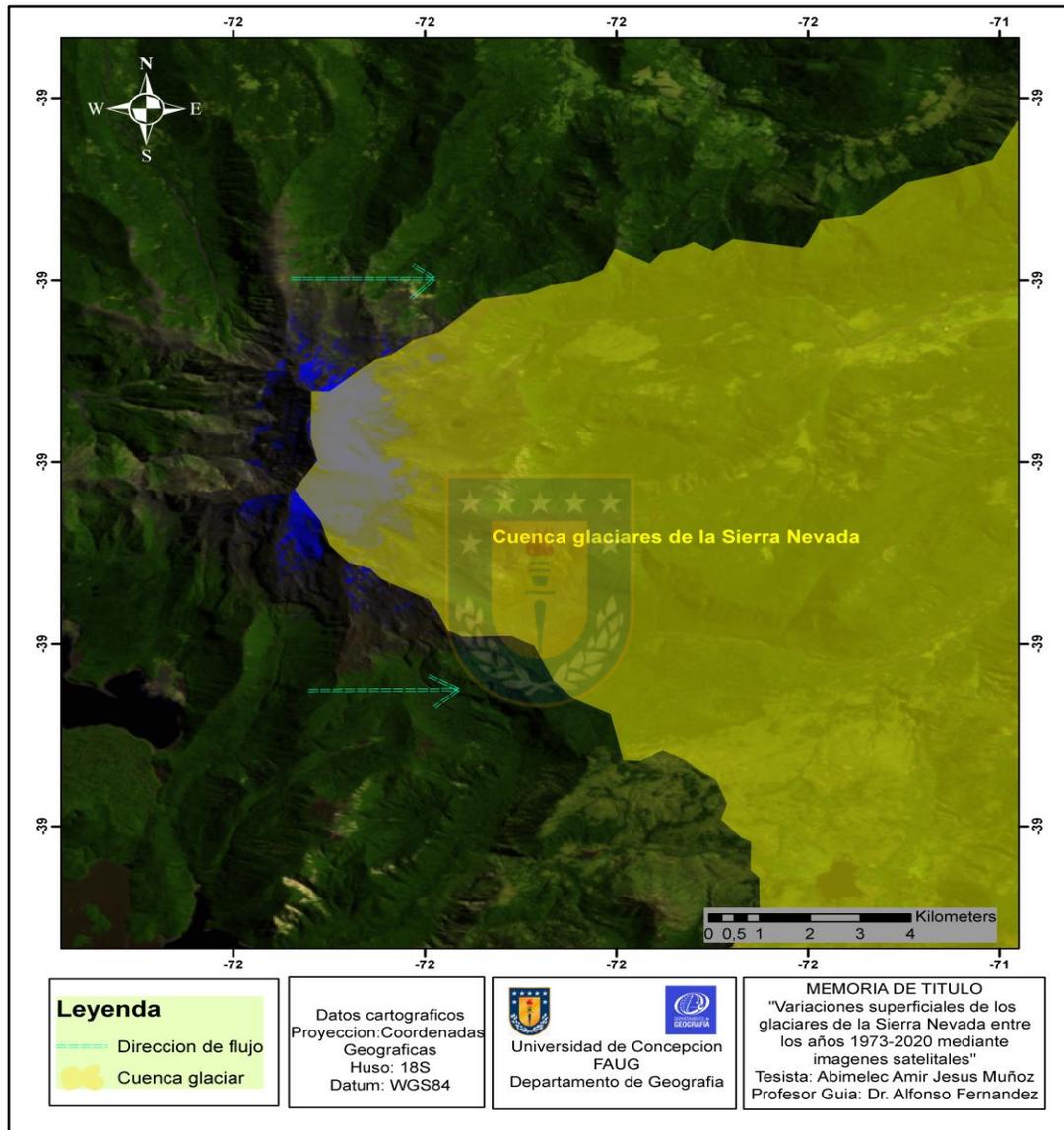
Fuente: elaboración propia

### 8.3. Delimitación de glaciares

Para la corrección de todas las imágenes satelitales disponibles, se procedió a delimitar digitalmente los glaciares. Para hacerlo y tener una noción más clara del terreno y orientación del glaciar con sus límites, se usó un DEM de tipo SRTM de fecha 2000-02-11 y publicada en 2014-09-23 y se trabajó con él para obtener los límites de la cuenca donde se encontraban los glaciares de la Sierra Nevada. Se llevó a cabo mediante el uso del programa ArcGis 10.5 el cual después de seguir los pasos mostrados en la Figura 6, se obtuvo los límites de la cuenca hidrográfica donde se encuentran los glaciares de la Sierra Nevada (Figura 10).



**Figura 10. Límites de la cuenca hidrográfica donde se encuentran Glaciares de la Sierra Nevada**



**Fuente:** elaboración propia.

La delimitación digital del glaciar permitió identificar dos glaciares. El Glaciar Sierra Nevada Norte (Figura 11) y el Glaciar Sierra Nevada Sur (Figura 12). Se delimito sus polígonos con las imágenes satelitales disponibles entre los años 1973-2020,

con el conocimiento de los límites de la cuenca hidrográfica en donde se encontraban como así también siguiendo los pasos de Paul et al. (2013).

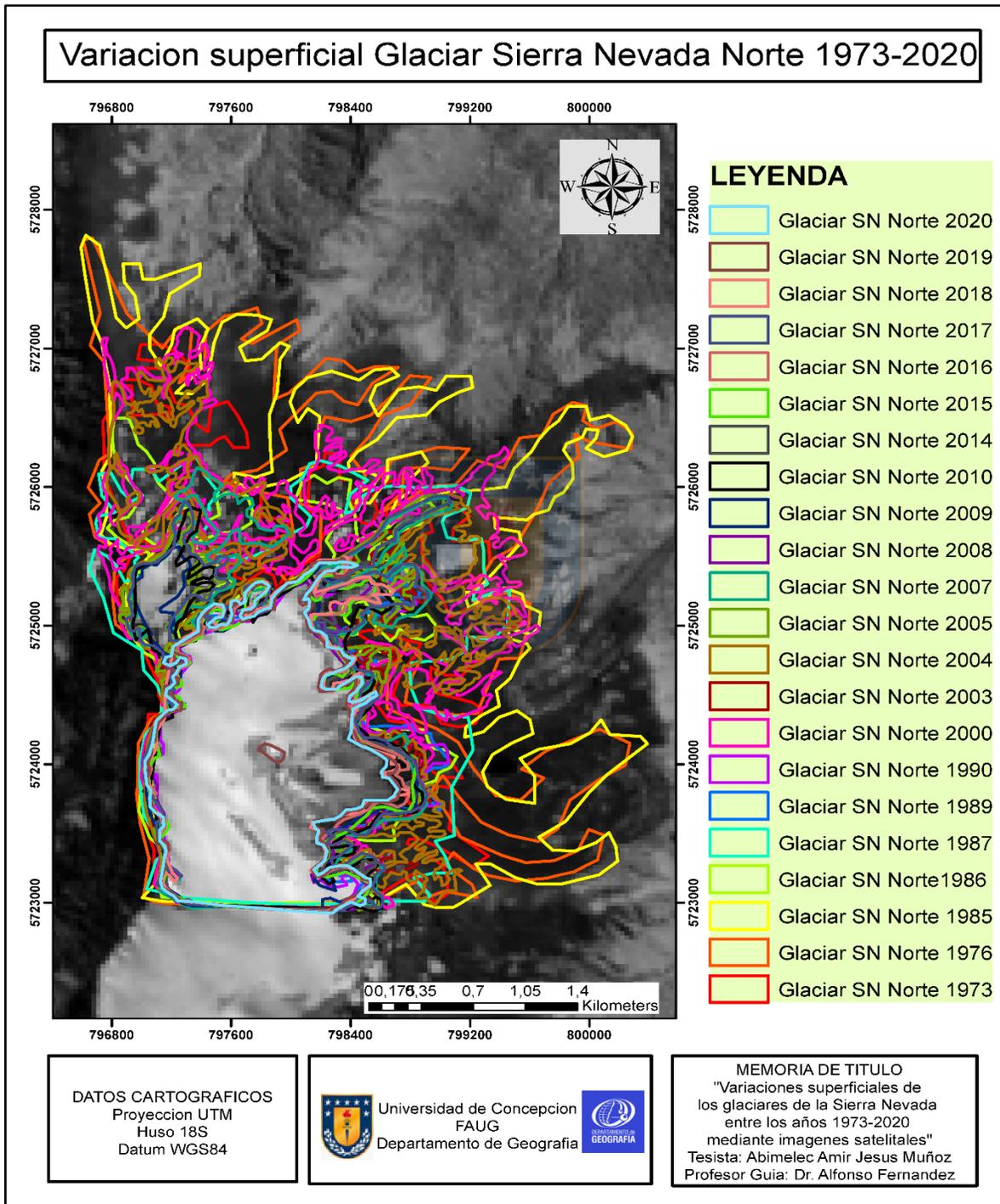
En las Figuras 11 y 12 los límites de los glaciares de la Sierra Nevada Norte y Sur, respectivamente están delimitados, ya que en terreno se puede apreciar como existe una división en la sierra Nevada, donde ambos glaciares están separados uno de otro, estos cambian y se transforman año tras año, modificando tanto su superficie (área km<sup>2</sup>) y longitud (m), las cuales sirven para medir la variación superficial a lo largo de los años entre 1973-2020.

Desde el año 1973 hasta el 2020, ambos glaciares han retrocedido de manera notable, tanto superficialmente como frontalmente en todos sus sentidos.

Para la variación superficial del Glaciar Sierra Nevada Norte hay distintos polígonos que ilustran el área en el mapa. Como lo muestra la Figura 11, existen varios años donde el área cubierta del glaciar es casi homogénea, entre los años 2005-2020, los demás años no son tan homogéneos debido a que tienen extensiones más allá de los límites considerados actuales. Otras de las observaciones son como el glaciar en años como 1973, 1976, 1985, 1986, 1987, 2000 y 2004 se extendió hacia la zona norte del glaciar y en algunos años hacia el noreste-este.

Otra de las tantas particularidades es el fenómeno que se produjo entre los años 2014-2016, donde la superficie glaciar fue prácticamente idéntica, tres años donde el glaciar quizás no tuvo tantos cambios apreciables. Por último, otra singularidad ocurrió en el año 2019, donde se aprecia una hendidura, que se formó en la parte central del glaciar, aunque es apresurado considerarlo así debido a distintos factores en la toma de información espacial.

**Figura 11. Variación superficial del Glaciar Sierra Nevada Norte 1973-2020.**



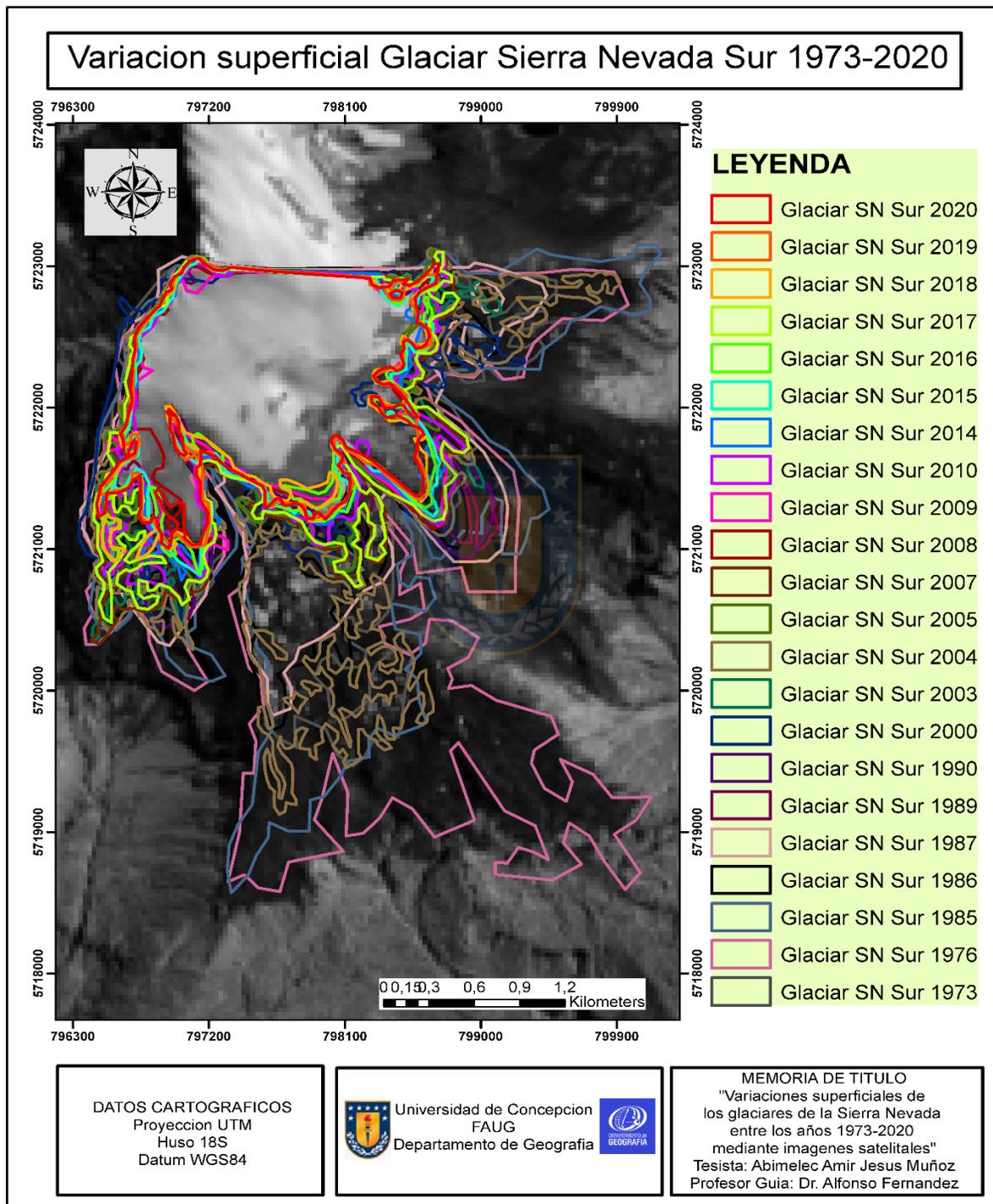
**Fuente:** elaboración propia

Como lo ilustra la Figura 12 de la variación superficial del Glaciar Sierra Nevada Sur, existen diversas formas constituidas durante los años 1973-2020. En el mapa hay una apreciación de como desde el año 2000 en adelante (exceptuando 2004) existe una forma relativamente homogénea, la cual se identifica en el glaciar. Por otro lado, los demás años presentan irregularidades notorias, por ejemplo, el mismo año 2004 tiene una extensión hacia el Sur en la parte central, similares a los años 1973, 1985, 1986 y 1987.

Otra particularidad encontrada es que en el año 1976, ocurrió un aumento de su extensión que fue la más grande registrada en esta investigación, con orientación Sur-Sureste la cual se puede ver claramente en el mapa de la Figura 12, donde se encuentra una forma irregular que se extiende hasta una zona casi paralela en el sur coincidiendo con el año 1985.



**Figura 12. Variación superficial del Glaciar Sierra Nevada Sur 1973-2020**



Fuente: elaboración propia

#### 8.4. Cálculo de superficie glaciar

Para estimar las áreas de los polígonos obtenidos en la delimitación de los Glaciares Sierra Nevada Norte y Sur, se usó el cálculo geométrico de la herramienta del software ArcGis 10.5, con los datos cartográficos de proyección UTM, Huso 18S y Datum WGS84, obteniendo las áreas en kilómetros cuadrados ( $\text{km}^2$ ).

La obtención de las áreas superficiales de cada año, se recogió todos los datos disponibles y se ordenaron (Tabla 9 y Tabla 10) para entender las variaciones que hubo en ese transcurso de años.

Para el Glaciar Sierra Nevada Norte hay distintos procesos de acumulación o ablación dentro de este macizo de hielo, en un comienzo para el año 1973 la superficie era de  $6.35 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0,0167$ ) y al año 2020 es de  $2,83 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0,0018$ ), traduciéndose en una pérdida de alrededor de un 55,43%, lo que corresponde a más de la mitad del glaciar desde hace 47 años.

En la Tabla 9 se observan periodos donde el cambio total ( $\text{km}^2$ ) de superficie oscilaba cercano y/o mayor a los  $1 \text{ km}^2$  entre los años 1973-2008 aproximadamente, del año 2009 en adelante hasta la fecha de hoy el glaciar tuvo tasas de cambio bajo los  $1 \text{ km}^2/\text{año}$ , existiendo rangos de tiempo donde hubo más pérdidas que ganancias.

De los años investigados hay algunos que sobresalen en relación a sus tasas de cambios, en cuanto a mayores ganancias de superficie glaciar están los años 2000, 2004, 1976, 1987 y 2017 en donde el glaciar creció en valores 116%, 60,21%, 48,69%, 45,17% y 30,37% respectivamente, respecto a su año anterior disponible.

En contraparte los años con mayores pérdidas superficiales respecto a valores de los años anteriores disponibles fueron: 1986, 1989, 2003, 2005, 2008 y 2018 con porcentajes de -56,08%, -49,96%, -47,12%, -33,17%, -28,03% y -22,89% respectivamente. Como síntesis en relación a las variaciones porcentuales de la

superficie glaciar de la Sierra Nevada Norte, hubo más años de pérdidas que de ganancias, lo que denota un retroceso del glaciar.

**Tabla 9. Variación del área superficial del Glaciar Sierra Nevada Norte**

<b>Año</b>	<b>Área (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Incertidumbre (± km<sup>2</sup>)</b>	<b>Cambio total (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Tasa de cambio (km<sup>2</sup>/año)</b>	<b>Variación (%)</b>
1973	6,35	0,0167	-	-	-
1976	9,45	0,0159	3,1	1,03	48,69
1985	9,92	0,0165	0,47	0,05	5,06
1986	4,36	0,0168	-5,56	-5,56	-56,08
1987	6,33	0,0101	1,97	1,97	45,17
1989	3,17	0,0038	-3,16	-1,58	-49,96
1990	3,00	0,0024	-0,17	-0,17	-5,11
2000	6,51	0,0010	3,51	0,35	116,85
2003	3,45	0,0010	-3,06	-1,02	-47,12
2004	5,52	0,0010	2,07	2,07	60,21
2005	3,69	0,0023	-1,83	-1,83	-33,17
2007	3,94	0,0037	0,25	0,13	6,88
2008	2,84	0,0037	-1,1	-1,10	-28,03
2009	2,98	0,0037	0,14	0,14	4,89
2010	3,35	0,0037	0,37	0,37	12,41
2014	2,92	0,0037	-0,43	-0,11	-12,71
2015	2,82	0,0037	-0,1	-0,10	-3,58
2016	2,80	0,0037	-0,02	-0,02	-0,46
2017	3,65	0,0037	0,85	0,85	30,37
2018	2,82	0,0037	-0,83	-0,83	-22,89
2019	2,67	0,0037	-0,15	-0,15	-5,27
2020	2,83	0,0018	0,16	0,16	5,99

**Fuente:** elaboración propia

Para la variación superficial del Glaciar Sierra Nevada Sur se observa en la Tabla 10 que también tuvo periodos de tiempo de ganancia y pérdida de superficie.

Como un resultado general, el año 1973 la superficie glaciar era de 5,84 km<sup>2</sup> ( $\pm$  km<sup>2</sup> 0,0167) y en la actualidad, año 2020 es de 2,71 km<sup>2</sup> ( $\pm$  km<sup>2</sup> 0,0018), teniendo una pérdida de alrededor de un 46,40%, alcanzando casi la mitad del glaciar perdido durante estos 47 años transcurridos.

En cuanto a los rangos de tiempo donde hubo mayor oscilación en cuanto a cambio total (km<sup>2</sup>) de área glaciar fue prácticamente durante todo el registro de datos, desde 1973 hasta 2018 salvo excepciones, en tanto el cambio total (km<sup>2</sup>) entre 2019-2020 fue menor respecto a los años anteriores con variaciones menores a los 1 km<sup>2</sup>.

Los cambios totales (km<sup>2</sup>) durante este periodo no estuvieron exentos de grandes variaciones tanto positivas como negativas. Primero los cambios más sobresalientes con mayores ganancias que se tienen como registro respecto a los valores del año anterior disponible, están los años 1976, 2004, 2017 y 1987, con valores de 59,12%, 49,36%, 32,46% y 20,83%, respectivamente.

En tanto en su contraparte, las mayores pérdidas del glaciar durante este periodo se dieron en los años 1989, 1986, 2005 y 2008, con valores de -41,22%, -40,19%, -37,81% y -30,71%, respectivamente, al año anterior disponible.

En síntesis, así como también el Glaciar de la Sierra Nevada Norte retrocedió, hizo lo mismo el Glaciar de la Sierra Nevada Sur durante este mismo transcurso de tiempo, produciéndose más pérdidas que ganancias en la superficie de ambos macizos.

**Tabla 10. Variación del área superficial del Glaciar Sierra Nevada Sur**

Año	Área (km <sup>2</sup> )	Incertidumbre (± km <sup>2</sup> )	Cambio total (km <sup>2</sup> )	Tasa de cambio (km <sup>2</sup> /año)	Variación (%)
1973	5,84	0,0167	-	-	-
1976	9,29	0,0159	3,45	1,15	59,12
1985	7,76	0,0165	-1,53	-0,17	-16,46
1986	4,64	0,0168	-3,12	-3,12	-40,19
1987	5,61	0,0101	0,97	0,97	20,83
1989	3,30	0,0038	-2,31	-1,16	-41,22
1990	3,57	0,0024	0,28	0,28	8,35
2000	3,96	0,0010	0,39	0,04	10,91
2003	3,82	0,0010	-0,14	-0,05	-3,61
2004	5,70	0,0010	1,89	1,89	49,36
2005	3,55	0,0023	-2,16	-2,16	-37,81
2007	3,98	0,0037	0,43	0,21	12,12
2008	2,76	0,0037	-1,22	-1,22	-30,71
2009	2,87	0,0037	0,12	0,12	4,21
2010	3,28	0,0037	0,40	0,40	14,10
2014	3,03	0,0037	-0,25	-0,06	-7,56
2015	2,91	0,0037	-0,12	-0,12	-3,83
2016	2,89	0,0037	-0,02	-0,02	-0,67
2017	3,83	0,0037	0,94	0,94	32,46
2018	2,78	0,0037	-1,05	-1,05	-27,43
2019	2,85	0,0037	0,07	0,07	2,34
2020	2,71	0,0018	-0,13	-0,13	-4,63

**Fuente:** elaboración propia

La incertidumbre del área glaciar se calculó utilizando la ecuación 2, donde fue necesario conocer los valores de la resolución del pixel original de cada imagen satelital y el error de registro de cada imagen individual, en este caso el error RMSE (*Normalized Root Mean Square Error*, en inglés). Con estos datos se obtuvo la incertidumbre de área de cada año disponible en km<sup>2</sup>, como ambos glaciares se trabajaron con las mismas imágenes para todos los años la incertidumbre fue igual tanto para el Glaciar Sierra Nevada Norte y Sur.

## 8.5. Cálculo del cambio frontal de los glaciares

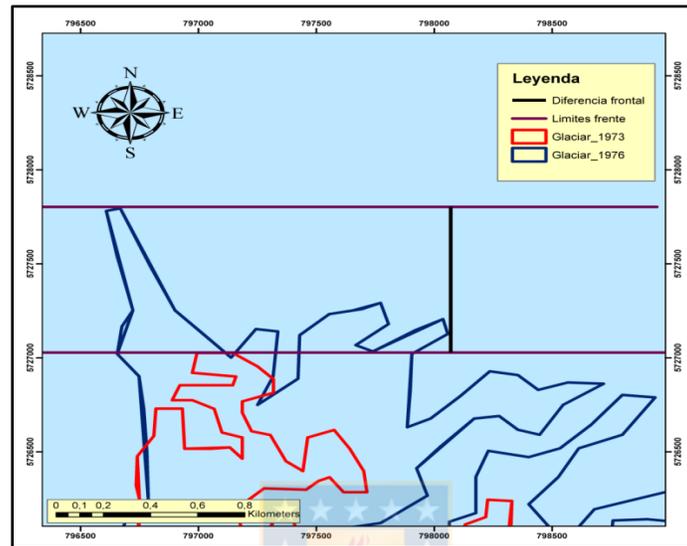
Para medir el cambio frontal de ambos glaciares de la Sierra Nevada, tanto Sur como Norte se utilizaron datos cartográficos tales como la proyección UTM, Datum WGS84 y Huso 18S. Los registros de cada una de las medidas para cada año disponible entre 1973-2020 se hizo mediante la aplicación de la metodología de Francou & Pouyaud (2004), donde se tomó el método sencillo que consistía en comparar las posiciones extremas del frente, lo que equivale a trazar dos segmentos paralelos tocando los puntos extremos del glaciar, de dirección perpendicular al eje principal del glaciar y medir la distancia ( $\Delta d$ ) separando esos segmentos (Francou & Pouyaud, 2004), así obteniendo la longitud de los glaciares.

Las medidas adquiridas de las longitudes de todos los años disponibles entre 1973-2020 (Tablas 11 y 12) de los Glaciares Sierra Nevada Norte y Sur respectivamente, muestran las tasas de cambios (m/años), cambio total (m), la incertidumbre ( $\pm$  m) presente en ella y la variación (%) a través de los años.

Partiendo por el Glaciar Sierra Nevada Norte, la longitud varió mucho durante estos 47 años, en un inicio esta era de 4046,75 m ( $\pm$  98,36m) para el año 1973 y en la actualidad (2020) es de 2560,04 m ( $\pm$  30,00m), lo que se traduce en un retroceso de 1486,71 m durante este periodo de años, es decir, una pérdida de frente glaciar de 36,73%.

Como se midió y obtuvo estas cifras la Figura 13 lo representa, en el cual se ejemplifica entre los años 1973-1976 la manera en que avanzó el glaciar se aprecia como los frentes extremos norte del glaciar se extiende una línea horizontal para cada uno de los polígonos, luego entre ambas líneas paralelas una perpendicular atraviesa desde un punto a otro, con la adquisición de la diferencia ( $\Delta d$ ) entre cada año disponible.

**Figura 13. Diferencia de frente entre el año 1973-1976, Glaciar Sierra Nevada Norte**



**Fuente:** elaboración propia

La Tabla 11 muestra los valores obtenidos para la medición de la longitud del Glaciar Sierra Nevada Norte, se aprecian los grandes cambios que ha tenido durante este ciclo de tiempo, teniendo etapas donde el glaciar ha avanzado positivamente y ha retrocedido.

En relación al crecimiento respecto a la variación (%), los años que más sobresalen fueron el 2000, 2004, 1976 y 2017, con porcentajes de aumento respecto a su año anterior disponible de 42,76%, 31,23%, 16,23% y 15,63% respectivamente, destacándose por su gran desarrollo, pero sobre todo el año 2000, casi doblando su tamaño respecto al año 1990.

Por otro lado, los años que más retrocedieron fueron 2003, 1986, 2008, 1989 y 2005, con valores cercanos a -53,02%, -37,28%, -33,32%, 33,29-% y -32,63%, respectivamente. Teniendo al año 2018 como el más reciente con mayor retroceso registrado en este estudio.

En relación a las tasas de cambios (m/año) registradas, se observan periodos donde más avanzo y/o retrocedió el glaciar. El avance más significativo está en el año 2004, con un crecimiento de 1250,2 m de un año a otro, mientras que el año que más retrocedió fue 1986, con un retroceso cercano a 1318,4 m respecto al año 1985.

**Tabla 11. Cambio frontal del glaciar Sierra Nevada Norte**

<b>Año</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Incertidumbre (<math>\pm</math> m)</b>	<b>Tasa de cambio (m/año)</b>	<b>Cambio total (m)</b>	<b>Variación (%)</b>
1973	4046,75	98,36	-	-	-
1976	4830,82	93,95	261,4	784,07	16,23
1985	4855,13	97,39	2,7	24,31	0,50
1986	3536,73	99,07	-1318,4	-1318,4	-37,28
1987	3226,59	75,27	-310,1	-310,14	-9,61
1989	2420,70	45,19	-402,9	-805,89	-33,29
1990	2410,60	35,25	-10,1	-10,1	-0,42
2000	4211,65	22,79	180,1	1801,05	42,76
2003	2752,43	22,47	-486,4	-1459,22	-53,02
2004	4002,64	22,40	1250,2	1250,21	31,23
2005	3017,82	34,91	-984,8	-984,82	-32,63
2007	3212,53	43,84	97,4	194,71	6,06
2008	2409,74	43,75	-802,8	-802,79	-33,31
2009	2659,54	43,73	249,8	249,8	9,39
2010	2911,90	43,79	252,4	252,36	8,67
2014	2525,52	43,54	-96,6	-386,38	-15,30
2015	2575,33	43,64	49,8	49,81	1,93
2016	2561,22	43,86	-14,1	-14,11	-0,55
2017	3035,83	43,79	474,6	474,61	15,63
2018	2560,31	43,82	-475,5	-475,52	-18,57
2019	2550,60	43,42	-9,7	-9,71	-0,38
2020	2560,04	30,00	9,4	9,44	0,37

**Fuente:** elaboración propia

A partir de las medidas obtenidas respecto a la longitud en el Glaciar Sierra Nevada Sur (Tabla 12) durante el transcurso de los años 1973 hasta el 2020, se aprecia como ha retrocedido de manera paulatina, para el año 1973 la longitud era de 3646,50 m ( $\pm$  98,36m) y hoy año 2020, es de 2067,21 m ( $\pm$  30,00m), interpretándose en un retroceso cercano a un 43,4%, casi la mitad de lo que fue hace 47 años atrás.

Por medio de los diversos registros de la dinámica del glaciar del cambio frontal, hay años donde creció mucho y en otros retrocedió. Teniendo en cuenta los datos de las variaciones del glaciar, hay momentos de gran desarrollo del macizo, en años como 2004, 1976, 2017 y 2007, cuyos valores de crecimiento son del 31,38%, 19,36%, 15,37% y 15,27% respectivamente, al año anterior disponible, destacándose el año 2004 con un avance del frente glaciar cercano a la mitad del año anterior.

En tanto, en contraparte hay años donde más retrocedió el frente glaciar tales como el 2005, 1986, 1989 y 2018, con valores de retroceso de -72,09%, -40,43%, -29,00% y -22,54%, respectivamente, en referencia a su año anterior disponible, se observa como el año 2005 es el que más destaca, debido al gran retroceso cercano a la mitad respecto al año 2004.

En referencias a las tasas de cambios (m/año) más significativas, esta al año 2004, tiempo donde más avanzó el glaciar de un año a otro, a una tasa de 1266,0 m/año, al contrario, está el año que más retrocedió respecto al año anterior, que es precisamente el 2005, cuya tasa de cambio fue de -1690,1 m/año.

**Tabla 12. Cambio frontal del glaciar Sierra Nevada Sur**

Año	Longitud (m)	Incertidumbre ( $\pm$ m)	Tasa de cambio (m/año)	Cambio total (m)	Variación (%)
1973	3646,50	98,36	-	-	-
1976	4522,14	93,95	291,9	875,64	19,36
1985	4635,49	97,39	12,6	113,35	2,45
1986	3300,90	99,07	-1334,6	-1334,59	-40,43
1987	3256,47	75,27	-44,4	-44,43	-1,36
1989	2524,46	45,19	-366,0	-732,01	-29,00
1990	2608,68	35,25	84,2	84,22	3,23
2000	2547,67	22,79	-6,1	-61,01	-2,39
2003	2768,44	22,47	73,6	220,77	7,97
2004	4034,47	22,40	1266,0	1266,03	31,38
2005	2344,34	34,91	-1690,1	-1690,13	-72,09
2007	2766,83	43,84	211,2	422,49	15,27
2008	2264,14	43,75	-502,7	-502,69	-22,20
2009	2194,34	43,73	-69,8	-69,8	-3,18
2010	2378,45	43,79	184,1	184,11	7,74
2014	2234,94	43,54	-35,9	-143,51	-6,42
2015	2251,64	43,64	16,7	16,7	0,74
2016	2248,49	43,86	-3,2	-3,15	-0,14
2017	2656,85	43,79	408,4	408,36	15,37
2018	2168,15	43,82	-488,7	-488,7	-22,54
2019	2071,29	43,42	-96,9	-96,86	-4,68
2020	2067,21	30,00	-4,1	-4,08	-0,20

**Fuente:** elaboración propia

En relación a la incertidumbre del cambio frontal entre los años 1973-2020, se calculó usando la ecuación 2, donde fue necesario conocer la resolución original del pixel de cada imagen y el error de registro de cada imagen individual (Ye et al., 2006), con esos datos se calculó la incertidumbre frontal (UT), que se observan en las Tablas 11 y 12, en ambas tablas la incertidumbre de la longitud para cada año es la misma tanto para el Glaciar de la Sierra Nevada Norte y Sur, debido a que se usó las mismas imágenes satelitales.

## 8.6. Estimación de incertidumbre

La Tabla 13 ilustra la estimación de la incertidumbre UM por imagen satelital individual (Ye et al., 2006), esta se hizo usando la ecuación 4, con valores como la incertidumbre de la longitud de cada año y la resolución original del pixel de cada imagen, donde se obtiene la incertidumbre de área por cada imagen satelital, esto tiene una relación directa con la resolución espacial de las imágenes, a medida que se avanza desde 1973 hasta la actualidad la incertidumbre de  $\pm\text{km}^2$  disminuye.

Este resultado es válido tanto para el área del Glaciar Sierra Nevada Norte y Sur, debido a que se usaron las mismas imágenes satelitales para la delimitación de ambos glaciares.



**Tabla 13. Estimación de la incertidumbre UM por imagen satelital individual**

<b>Año</b>	<b>Tamaño Píxel (m)</b>	<b>UM (km<sup>2</sup>)</b>
1973	60	0,0118
1976	60	0,0113
1985	60	0,0117
1986	60	0,0119
1987	60	0,0090
1989	30	0,0027
1990	30	0,0021
2000	15	0,0007
2003	15	0,0007
2004	15	0,0007

2005	15	0,0010
2007	30	0,0026
2008	30	0,0026
2009	30	0,0026
2010	30	0,0026
2014	30	0,0026
2015	30	0,0026
2016	30	0,0026
2017	30	0,0026
2018	30	0,0026
2019	30	0,0026
2020	30	0,0018

**Fuente:** elaboración propia.

La Tabla 14 proporciona una visión general de la estimación de la incertidumbre total de la superficie entre el año 1973-2020. Este cálculo se hizo ocupando la ecuación 5, donde se era necesario tener la sumatoria de la estimación de incertidumbre de la longitud de todos los años disponibles, la sumatoria de los errores de registro de todos los años disponibles y la raíz de la sumatoria de las resoluciones del píxel de cada imagen satelital (tabla 14), este resultado dio 68799,95 m<sup>2</sup> y transformándolo a km<sup>2</sup>, fue de una incertidumbre total en el periodo de 1973 al 2020 de 0,07km<sup>2</sup>.

**Tabla 14. Estimación incertidumbre total superficie**

UT	195,45
$\sqrt{\sum_x^2}$	174,93
$\sum_{\ell}^2$	421,05
UA m <sup>2</sup>	68799,95
UA km <sup>2</sup>	0,07

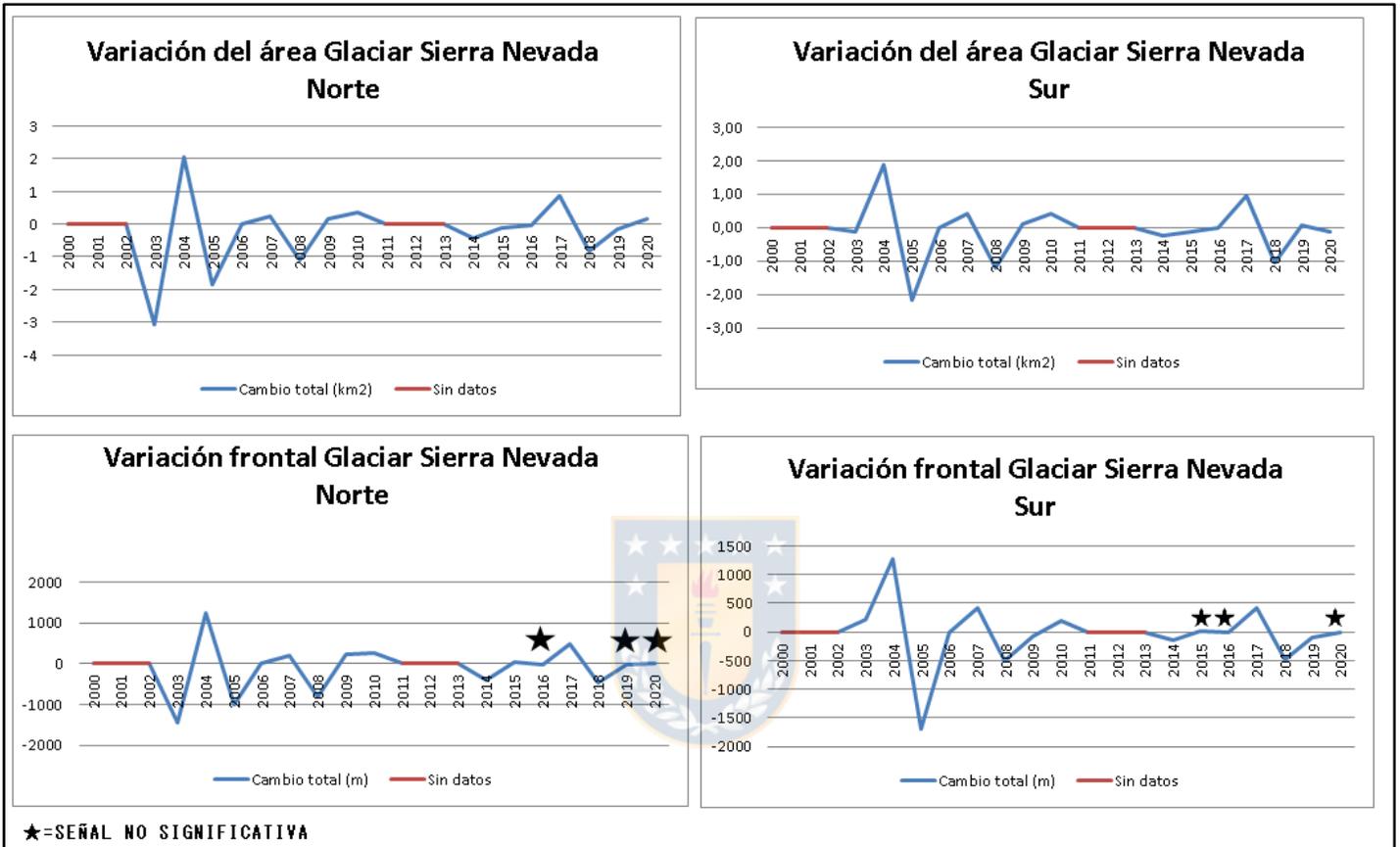
**Fuente:** elaboración propia

En síntesis, están los gráficos lineales (Figura 14), donde ilustra el cambio total, tanto del Glaciar Sierra Nevada Norte y Sierra Nevada Sur, con las variables de área y frente glaciar.

En los gráficos se representa el cambio total a través de los años 2000-2020, debido a que en el lapso entre el año 1973-2000 hay poca información y la representación gráfica es escasa para considerarla en este cuadro resumen, datos que si pueden observarse en las tablas anteriores.

Hay que considerar también que existen “gaps”, que son una ruptura en la continuidad de los datos, donde no se pudo obtener información esencial para hacer los respectivos cálculos. Dentro de las gráficas representadas nos encontramos con un símbolo ilustrado en una estrella negra (★) sobre algunos años, la cual representa los años en la señal (en este caso, cambio total) estadísticamente hablando no es significativa, ya que el cambio total del glaciar es menor que la incertidumbre.

**Figura 14. Cuadro resumen de resultados entre años 2000-2020**



Fuente: elaboración propia

## 9. Discusión

El estudio se propuso estudiar la variabilidad de la superficie glaciar en los glaciares de la Sierra Nevada entre los años 1973-2020, mediante la utilización de imágenes satelitales. Estas imágenes satelitales disponibles entre estos años pasaron por un proceso de tratamiento antes de delimitar los límites de los glaciares, los cuales fueron el filtro de fechas que servían para el estudio que fue a finales del verano en Chile y con poca o nula nubosidad, luego el co-registro de las imágenes teniendo como referencia la imagen más reciente, además de contar con la referencia de la cuenca hidrográfica existente donde se ubican los glaciares en estudio.

Con la delimitación los glaciares de manera manual por cada año disponible y se obtuvo los siguientes resultados. Para el glaciar Sierra Nevada Norte en el año 1973 su extensión superficial era de  $6,35 \text{ km}^2 (\pm 0,0167 \text{ km}^2)$  y para el año 2020 fue de  $2,83 \text{ km}^2 (\pm 0,0018 \text{ km}^2)$ , perdiendo alrededor de un 55,43% y en el caso de la Sierra Nevada Sur para el año 1973 la superficie que tenía era de  $5,84 \text{ km}^2 (\pm 0,0167 \text{ km}^2)$  y en el año 2020 fue de  $2,71 \text{ km}^2 (\pm 0,0018 \text{ km}^2)$  con también una pérdida de alrededor de un 46,40%, observando en ambos glaciares un retroceso evidente durante este periodo de tiempo.

Es interesante también observar los resultados del frente glaciar. Para la Sierra Nevada Norte en el año 1973 está tenía una longitud de 4046,75m ( $\pm 98,36 \text{ m}$ ) y en el año 2020 fue de 2560,04m ( $\pm 30,00 \text{ m}$ ), perdiendo alrededor de un 36,73%; en el caso de la Sierra Nevada Sur su longitud en el año 1973 era de 3646,50m ( $\pm 98,36 \text{ m}$ ) y en el año 2020 ya su longitud retrocedió a 2067,21m ( $\pm 30,00 \text{ m}$ ), representando una pérdida aproximada de un 43,4% durante estos 47 años, por lo cual en ambos glaciares existe un retroceso muy notorio de su frente y superficie glaciar.

A raíz de los resultados obtenidos se aprecia como en ambos glaciares, se produce un fenómeno que se refleja en los datos obtenidos. Se visualiza como en los dos glaciares del año 2000 en adelante hay una menor variabilidad superficial,

produciendo tasas de cambio muy inferiores a lo que se veía en años anteriores, llegando a un momento de estabilidad glacial en que el crecimiento y retroceso cada vez es menor, no como lo que sucedía entre la década de 1970 y 1990, esta situación puede ser explicada en que ambos glaciares están llegando a un límite de variabilidad en que ya el retroceso es muy menor a años anteriores, debido a su tamaño en comparación al inicio de esta investigación o por las condiciones ambientales con las que conviven, teniendo un cambio total más positivo, lo que sugiere una adaptación a una nueva realidad de temperaturas, precipitaciones, entre otros.

Con la consideración de los datos obtenidos posteriores al año 2000 (debido a que desde la década de 1970 al año 2000 figuran pocos registros, pero si indicios de retroceso glacial) ya que existe un mayor registro, estos son considerados significativos, está la relación S/N (señal-ruido) que es la proporción de la media (señal) a la desviación estándar (ruido) (Cruz, Medina & Silva, 2012), en este caso la señal fue el cambio total producido por estos años, calculado dividiendo el cambio total por la incertidumbre en cada año, obteniendo valores significativos para casi la totalidad de la investigación, teniendo algunas excepciones (ruido) (Figura 14).

También es preciso discutir sobre la fiabilidad de los resultados, en algunas imágenes satelitales fue complejo distinguir entre glacial y nieve estacional, debido a la resolución espacial que existía en ella, por lo que en algunos años la diferencia superficial varíe un poco a la realidad de aquellos años. Por ejemplo, en el Glaciar Sierra Nevada Norte en dirección NW está la posibilidad que haya una confusión entre lo que pertenece y no al glaciar en cuestión, por lo que en varios años lo que hay ahí puede que sean pequeños glaciaretes que estaban muy cercanos al macizo y delimitarlos era un tanto complejo. Esto mismo pasó con la delimitación del glaciar Sierra Nevada Sur en dirección S-SE, donde también hay la posibilidad que en años anteriores hayan existido glaciaretes que debido a la resolución espacial no se logró identificar los límites cercanos entre el glaciar principal y ellos.

Los hallazgos de este estudio son consistentes con otros realizados alrededor del mundo con glaciares, la estimación más reciente de los cambios en los glaciares a nivel mundial indica una tasa de pérdida de masa de  $259 \pm 28 \text{ Gt yr}^{-1}$  entre 2003 y 2009, con una escorrentía mundial de los glaciares que supera los  $1.350 \text{ km}^3 \text{ yr}^{-1}$  (Milner et al., 2017), así también estudios bajo la misión del satélite GRACE indican que en conjunto, las 17 regiones del RGI (*Randolph Glacier Inventory*) muestran una pérdida de masa global de  $199 \pm 32 \text{ Gt yr}^{-1}$  durante el período abril de 2002-agosto de 2016 (Wouters et al., 2019).

Hay casos tales como las pérdidas de masa y volumen de los glaciares de los Alpes europeos no sólo son rápidas sino que parecen acelerarse claramente (Haeberli et al., 2007), también existen observaciones que sugieren que la recesión de los glaciares en el Himalaya central puede ser el resultado tanto de una disminución de las precipitaciones como de un aumento de la temperatura (Ren et al., 2006) o la pérdida total de masa de la región de los Andes meridionales ( $30 \pm 11 \text{ Gt yr}^{-1}$ ) es sólo la mitad de la de Alaska, pero en relación con su área de glaciares, esta región muestra la pérdida de masa más pronunciada de todas las regiones consideradas (Wouters et al., 2019). Todo indica que el fenómeno de retroceso glaciar está ocurriendo en todo el mundo, en menores o mayores escalas, pero sin duda es un cambio y proporciona nuevas realidades a los glaciares a lo largo del planeta Tierra.

Estos resultados coinciden con los descubrimientos de otros estudios, en los que también se ha llegado a la misma conclusión. En el caso de los cambios de área glaciar de la Meseta Tibetana donde se estudió distintas cuencas de drenaje con imágenes del satélite Landsat, donde llegaron a resultados tales como que la superficie de los glaciares en la meseta disminuyó de  $44.366 \pm 2827 \text{ km}^2$  (1,7% del área de estudio) en la década de 1970 a  $42.210 \pm 1621 \text{ km}^2$  en 2001 y  $41.137 \pm 1616 \text{ km}^2$  en 2013 (Ye et al., 2017), situación donde claramente existe un retroceso de los glaciares ubicados en esa zona geográfica durante ese período de tiempo, afirmación a la que llegan los autores Ye et al. (2017) donde “el análisis

comparativo de tres mosaicos muestra que la pérdida de área de glaciares en toda la meseta tibetana es inequívoca”.

El análisis de lo acontecido en Noruega, donde se realizó una investigación en relación a los cambios de los glaciares desde la década de los 60's con una visión general de los cambios en el balance de masa, área, longitud y elevación de la superficie, aquí llegaron a varios resultados, uno de ellos fue el cambio de área glaciar ocurrido durante el transcurso de los años investigados, donde el retroceso general de los glaciares desde la década de 1960, la reducción media es de 572 m o  $12 \text{ m a}^{-1}$  en 30 glaciares (Andreassen et al., 2020) eso en relación a su longitud. En cuanto al cambio de área tenemos que la superficie total de todos los glaciares de la muestra geodésica disminuyó de  $817 \text{ km}^2$  en el decenio de 1960 a  $734 \text{ km}^2$  en el decenio de 2010, lo que supone una pérdida de superficie de  $84 \text{ km}^2$  (Andreassen et al., 2020), siguiendo con la tónica de los retrocesos a nivel mundial de los glaciares.

Casos más cercanos para los glaciares de la Sierra Nevada, es un estudio que se hizo acerca del Inventario de glaciares y variaciones recientes de los glaciares en los Andes de Chile, América del Sur, donde se realizó el trabajo de inventariar los glaciares existente en Chile con el fin de determinar la importancia de estos en el ciclo hidrológico, recomendada durante el Decenio Hidrológico Internacional (1965-74) patrocinado por la UNESCO, que promovió la creación del Inventario Mundial de Glaciares (WGI, en inglés) (Barcaza et al., 2017). Estos estudios fueron los primeros en tener un registro de todos los glaciares y glaciares rocosos existentes en Chile entre los años 2001-2003, donde llegaron a resultados tales como que durante el periodo de estudio 2000/03-2015 la pérdida total de superficie de 77 glaciares fue de  $\sim -92.3 \pm 4.6 \text{ km}^2$  (Barcaza et al., 2017).

También una investigación a tener en cuenta es la que se hizo en el glaciar Sierra Velluda ubicado en la parte superior de la cuenca del río Biobío, dentro del Parque Nacional Laguna del Laja, donde por medio de fuentes bibliográficas e imágenes de satélites se usaron para medir los cambios en la superficie glaciar y posición frontal, llegando al resultado que el Glaciar Sierra Velluda ha perdido el 43,8% de

su superficie entre 1961 y 2007 (Fernández et al., 2011). Tras revisar la evidencia científica disponible hasta la fecha, hay grandes relaciones a nivel global de los cambios que han tenido la gran mayoría de los glaciares alrededor del mundo, como muestran los resultados, sus retrocesos tanto en área como frente, precisando en ambos glaciares de la Sierra Nevada tanto el Norte como el Sur reflejan retrocesos de 55,43% y 46,40% superficialmente y de 36,73% y 43,4% longitudinalmente, respectivamente. Siguiendo la tendencia de los glaciares anteriormente mencionados como los que se encuentra en la Meseta Tibetana, los glaciares noruegos, el inventario de glaciares y variaciones reciente en los Andes de Chile y por último el caso del glaciar Sierra Velluda, todos estos coinciden en que sus últimos años han perdido tanto masa, superficie y longitud, tornándose un episodio de carácter a escala global y no local.

Una explicación tentativa para estos resultados podrían ser las tendencias climáticas que ocurren alrededor del mundo en estos momentos. Aunque las causas de esta alteración atmosférica se hayan hecho presentes hace casi dos siglos, durante los últimos 30 años su efecto se ha hecho cada vez más evidente (Cerdeña, 2014), así pues, también los cambios inducidos por el retroceso de los glaciares tropicales que constituyen un caso temprano de la necesidad de adaptación y del tipo y la magnitud de los efectos económicos y sociales conexos causados por el cambio climático (Vergara et al., 2007). También parte de la actividad más afectada por el cambio climático como los agricultores son conscientes de la variabilidad climática y expresan sus experiencias de cambios en la temperatura, las precipitaciones, los ciclones tropicales y el aumento del nivel del mar (TIDEE, 2017).

Los macizos de hielo de la Sierra Nevada en Chile no están exentos a cambios debido a este fenómeno climático, donde se ubican entre al sur del río Itata (36° S), la elevación de la cordillera de los Andes disminuye bruscamente y prevalece un clima más húmedo en el distrito de los Lagos, donde se pueden encontrar volcanes aislados cubiertos de hielo hasta la cuenca del Petrohué (41° S) (Barcaza et al., 2017). En la zona geográfica donde están los glaciares de la Sierra

Nevada, cercano en la cuenca del río Cautín, tributario principal del río Imperial, se realizó una generación de escenarios de cambio climático, indicando que se cumple el aumento de temperaturas en 0.7 [°C] promedio, además de la disminución de las precipitaciones hasta en un 15% respecto a los valores de la línea base (Cerdeira, 2014), esto indica un cambio en el clima en el área geográfica donde están los glaciares, lo indica que esto viene sucediendo hace muchos años atrás y es una probable causa del retroceso de los glaciares este último tiempo.

Cabe indicar que la sensibilidad de un glaciar al cambio climático depende del entorno actual del glaciar, en concreto, del control ambiental de los equilibrios de calor y masa de los glaciares (Sakai & Fujita, 2017), así como también las distintas sensibilidades de los glaciares a los regímenes climáticos, las condiciones locales son importantes para explicar la respuesta actual de los glaciares, porque algunos de los grandes glaciares en formación de la Patagonia y Tierra del Fuego se han mantenido estables en los últimos años (Barcaza et al., 2017), por lo tanto cabe precisar que aunque es cierto que los glaciares de la Sierra Nevada han perdido tanto superficie como longitud, no se deben hacer comparaciones con otros glaciares cercanos a ella, porque depende mucho del tamaño y entorno en que estén las masas de hielo.

Por lo tanto, es necesario seguir trabajando en identificar cuáles pueden ser los factores que influyen en las variaciones existentes en ambos glaciares de la Sierra Nevada, aunque si bien las tendencias climáticas puedan indicar que estas influyeron en el retroceso glaciar, aún es temprano para sacar conclusiones, por lo tanto, una investigación a mayor profundidad puede saldar esas dudas que quedan pendientes.

## 10. Conclusiones

Resumiendo, el contenido expuesto en esta memoria de título, el resultado en ambos glaciares de la Sierra Nevada tanto Norte como Sur, es que están retrocediendo con el pasar de los años, teniendo una variación tanto superficial como longitudinal muy clara, al menos con lo registrado desde el año 1973 hasta el año 2020. Primero el glaciar Sierra Nevada Norte en referencia a su variación superficial, al año 1973 tenía  $6,35 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0,0167$ ) y ya para el año 2020 fue de  $2,83 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0,0018$ ), representando una pérdida de superficie de alrededor de un 55,43%, en tanto para su longitud para el año 1973 era de  $4046,75\text{m}$  ( $\pm 98,36 \text{ m}$ ) y ya para el año 2020 fue de  $2560,04\text{m}$  ( $\pm 30,00 \text{ m}$ ), retrocediendo 36,73%.

En relación al glaciar de la Sierra Nevada Sur, existe un pérdida también durante el periodo entre los años 1973-2020, con una superficie de  $5,84 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0,0167$ ) y  $2,71 \text{ km}^2$  ( $\pm \text{km}^2 0,0018$ ) respectivamente, el glaciar perdió una superficie aproximada de un 46,40% y en relación a su frente glaciar este retrocedió de igual forma, para el año 1973 este tenía una longitud de  $3646,50\text{m}$  ( $\pm 98,36 \text{ m}$ ) y al año 2020 fue de  $2067,21\text{m}$  ( $\pm 30,00 \text{ m}$ ), representando un retroceso respecto a este periodo de tiempo alrededor de un 43,4%. Los datos obtenidos conllevan una gran fiabilidad debido a la gran cantidad de datos significativos estadísticamente hablando, en relación a la proporción señal-ruido, donde si hubo excepciones, pero estas fueron escasas, ya que la gran mayoría de los resultados investigados son concordantes a las conclusiones que se llegaron en esta investigación, teniendo en consideración los años posteriores al 2000 donde hubo mayor registro y continuidad de datos.

Se concluye, a partir de los datos, que este par de glaciares ubicados en la Región de la Araucanía (Chile) ha presentado una pérdida de superficie y longitud durante estos 47 años de investigación. Los nuevos resultados se suman al creciente cuerpo de literatura sobre los efectos que está trayendo consigo el cambio climático a nivel mundial, en específico como lo trata esta investigación, sobre los glaciares y como han afectado a estos en su permanencia, dinámica y

sobrevivencia en el mundo actual, también como los cambios de temperatura y precipitaciones dentro de la zona, han contribuido a una probable alteración en el desarrollo normal de los glaciares.

Esta investigación entrego preguntas que la comunidad científica debe resolver si pretende entender de mejor forma como la variabilidad superficial y longitudinal ha actuado durante este periodo de tiempo. Como se observa en esta memoria de título hubieron años (25) en que la información necesaria para trabajar no estaba disponible para el uso de este estudio, por lo cual sería interesante tener un registro más completo de como los glaciares de la Sierra Nevada se comportaron en medio de estos años inexplorados, quizás mediante una revisión bibliográfica, fotos aéreas públicas o privadas, entre otros.

Otras áreas atrayentes para investigar son la variabilidad del volumen glaciar en ambos macizos, tomando como transcurso de tiempo uno similar a este estudio, el cual ayudaría a enriquecer el conocimiento acerca de estos glaciares. Es recomendable que futuras investigaciones abordasen las últimas tendencias climáticas en el área de estudio y ver cómo estas se correlacionan o no con los cambios que sufrieron estos glaciares, así también sería de gran ayuda tener una exploración de la variabilidad superficial y longitudinal de glaciares cercanos a los de la Sierra Nevada y poder tener comparaciones en la medida de lo posible y así obtener una tendencia glaciar regional, que pueda servir para futuras proyecciones en distintas investigaciones.

Estos hallazgos sugieren varios cursos de acción para la protección de los glaciares alrededor del mundo, con políticas públicas que protejan estos cuerpos de agua a través de manejos de cuencas hidrográficas que tengan en consideración la dinámica de los glaciares y la importancia de estos a los ecosistemas cercanos, así como también factores sociales y económicos que pueden contribuir en los cambios en que estos puedan verse afectados.

A modo de síntesis las investigaciones relacionadas a los glaciares traen consigo muchas reflexiones en torno a ello, a una preocupación constante que se debe tener por la protección y preservación de estos cuerpos de agua para el futuro de

la humanidad y como la sociedad en general debe tratarlos y cuidarlos, frente a todos estos cambios que están ocurriendo alrededor del mundo.



## 11. Bibliografía

- ❖ Alva Huayaney, M., & Meléndez de la Cruz, J. (2014). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca. *Investigaciones Sociales*, 13(22), 71 - 83.  
<https://doi.org/10.15381/is.v13i22.7216>
- ❖ Ameztoy I., Bustamante J., Díaz-Delgado R. & Aragonés D. (2009). Evaluación de métodos manuales, automáticos o semiautomáticos para la georreferenciación de imágenes de satélite. Abril 29, 2020, de Asociación Española de Teledetección Sitio web:  
<http://www.aet.org.es/congresos/xiii/cal140.pdf>
- ❖ Andreassen LM, Elvehøy H, Kjølmoen B & Belart JMC. (2020). Glacier change in Norway since the 1960s – an overview of mass balance, area, length and surface elevation changes. Octubre 18, 2020, de Cambridge Sitio web: [https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/9C7A2D6BAD7F7BE48AC13C53F3A1DE6B/S0022143020000106a.pdf/glacier\\_change\\_in\\_norway\\_since\\_the\\_1960s\\_an\\_overview\\_of\\_mass\\_balance\\_area\\_length\\_and\\_surface\\_elevation\\_changes.pdf](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/9C7A2D6BAD7F7BE48AC13C53F3A1DE6B/S0022143020000106a.pdf/glacier_change_in_norway_since_the_1960s_an_overview_of_mass_balance_area_length_and_surface_elevation_changes.pdf)
- ❖ Aniya M., Sato H., Naruse R., Skvarca P. & Cassasa G. (1996). The Use of Satellite and Airborne Imagery to Inventory Outlet Glaciers of the Southern Patagonia Icefield, South America. *PE&RS*, 62, 1p.

- ❖ Ariza A. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). Abril 8, 2020, de Instituto Geográfico Agustín Codazzi Sitio web: <http://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
- ❖ Auge M. (2007). Agua Fuente de vida. Noviembre 18, 2019, de Universidad de Buenos Aires Sitio web: <https://agua.org.mx/wp-content/uploads/2017/05/Agua-fuente-de-vida.pdf>
- ❖ Azócar G., and A. Brenning (2010), Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°S), Permafrost and Periglacial Processes, 21(1), 42–53.
- ❖ Barcaza G., Nussbaumer S., Tapia G., Valdés J., García J., Videla Y., Albornoz A. & Arias V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. Octubre 18, 2020, de Cambridge Sitio web: [https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/4D3A0B23A9A02CB80DDFF1E251BEF1D7/S0260305517000283a.pdf/glacier\\_inventory\\_and\\_recent\\_glacier\\_variations\\_in\\_the\\_andes\\_of\\_chile\\_south\\_america.pdf](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/4D3A0B23A9A02CB80DDFF1E251BEF1D7/S0260305517000283a.pdf/glacier_inventory_and_recent_glacier_variations_in_the_andes_of_chile_south_america.pdf)
- ❖ Bennett, M. & Glasser, N. (2009). Glacial geology: ice sheets and landforms (2nd ed., pp. 42-44). West Sussex: Wiley-Blackwell.
- ❖ Bernex N & Tejada M. (2010). Cambio climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos. Abril 26, 2020, de Keneamazon Sitio web:

<http://www.keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas-Montanas/4.pdf>

- ❖ Brenning, A. (2003), La Importancia de los Glaciares de Escombros en los Sistemas Geomorfológico e Hidrológico de la Cordillera de Santiago: Fundamentos y Primeros Resultados, Revista de Geografía Norte Grande, 30, 7–22.
- ❖ Cerda R. (2014). Respuesta hidrológica del río Cautín en la IX Región de la Araucanía, Chile, ante escenarios de cambio global. Disponible en <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/117073>
- ❖ Coraggio J. (1991). Notas sobre problemas del análisis espacial. Diciembre 19, 2019, de Revistas académicas Universidad Nacional de Costa Rica Sitio web: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/3102/2964>
- ❖ Corbera J., Calvet J. & Palá V. (1996). Estudio por teledetección de la dinámica del glaciar Bahía Falsa Isla Livingston (Antártica). Abril 29, 2020, de Researchgate Sitio web: [https://www.researchgate.net/profile/Vicenc\\_Pala/publication/39195317\\_Estudio\\_por\\_teledeteccion\\_de\\_la\\_dinamica\\_del\\_glaciar\\_de\\_Bahia\\_Falsa\\_Isla\\_Livingston\\_Antartida/links/0046351b09ed60ba44000000.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Vicenc_Pala/publication/39195317_Estudio_por_teledeteccion_de_la_dinamica_del_glaciar_de_Bahia_Falsa_Isla_Livingston_Antartida/links/0046351b09ed60ba44000000.pdf)
- ❖ CECS, C. (2009). Estrategia Nacional de Glaciares (1st ed., p. 12). Santiago. Retrieved from <http://www.sad.dga.cl>

- ❖ CECS. (2011). Variaciones Recientes de glaciares en Chile, según principales zonas glaciológicas. Noviembre 16, 2020, de Ministerio de Obras Publicas Sitio web: <https://snia.mop.gob.cl/sad/GLA5360.pdf>
- ❖ Chuvieco, E. (1998). El factor temporal en teledetección: evolución fenomenológica y análisis de cambios. Revista de teledetección, 10(1-9).
- ❖ Córdoba M., Del Coco V. & Basualdo J. (2010). Agua y salud humana. Noviembre 18, 2019, de Universidad de Buenos Aires Sitio web: <https://www.redalyc.org/pdf/863/86315692002.pdf>
- ❖ CONAF. (n.d.). Parque Nacional Conguillío. Noviembre 21, 2019, de CONAF Sitio web: <https://www.conaf.cl/parques/parque-nacional-conguillio/>
- ❖ Croce, F., and J. Milana (2002), Internal structure and behaviour of a rock glacier in the arid Andes of Argentina, Permafrost and Periglacial Processes, 13, 289–299.
- ❖ Cruz E., Medina P. & Silva C. (2012). Una revisión crítica de la razón señal ruido usada por Taguchi. Diciembre 04, 2020, de Redalyc Sitio web: <https://www.redalyc.org/pdf/849/84923878009.pdf>
- ❖ Cuffey, K. & Paterson, W. (2010). The Physics of Glaciers (4th ed., p. 13, 28). Saint Louis: Elsevier Science
- ❖ DGA (2009), Estrategia Nacional de Glaciares. Fundamentos. Realizado por Centro de Estudios Científicos, S.I.T. 205, DGA, Santiago, Chile.
- ❖ Dirección General de Aguas. (n.d.). Inventario Público de Cuencas Hidrográficas y Lagos. Retrieved from

[http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/inventario\\_cuencas\\_lagos/Paginas/default.asp](http://www.dga.cl/administracionrecursoshidricos/inventario_cuencas_lagos/Paginas/default.asp)

- ❖ ERSDAC (2005). ASTER User's Guide . Abril 28, 2020, de Aster Science Project Sitio web:  
[http://www.aster.jspacesystems.or.jp/en/documnts/users\\_guide/part1/pdf/Part1\\_4E.pdf](http://www.aster.jspacesystems.or.jp/en/documnts/users_guide/part1/pdf/Part1_4E.pdf)
- ❖ Fernández A., Santana A., Jaque E., Martínez C. & Sáez R. (2011). Glacier changes on Sierra Velluda massif, Chile (37° S): mountain glaciers of an intensively-used mid-latitude landscape. Octubre 18, 2020, de Copernicus Sitio web:  
<https://tc.copernicus.org/preprints/5/685/2011/tcd-5-685-2011.pdf>
- ❖ Francou B. & Pouyaud B. (2004). Metodos de observacion de glaciares en los Andes Tropicales. Abril 20, 2020, de World Glacier Monitoring Service Sitio web: <https://wgms.ch/downloads/FrancouPouyaud2004.pdf>
- ❖ Francou, Bernard y Pouyaud, Bernard. Glaciares: ¿Cómo y dónde estudiarlos? *Revista Virtual REDESMA [online]*. (2008), vol.2, n.3 [citado 2019-12-30], pp. 9-18. Disponible en:  
<[http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1995-10782008000300003&lng=es&nrm=iso](http://www.revistasbolivianas.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1995-10782008000300003&lng=es&nrm=iso)>. ISSN 1995-1078
- ❖ Francou, Bernard. (2013). El rápido retroceso de los glaciares en los Andes tropicales: Un desafío para el estudio de la dinámica de los ecosistemas de alta montaña. *Ecología en Bolivia*, 48(2), 69-71.  
Recuperado en 24 de noviembre de 2020, de

[http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1605-25282013000200001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1605-25282013000200001&lng=es&tlng=es).

- ❖ García A. (2010). Landsat. Abril 8, 2020, de Slideshare Sitio web: <https://es.slideshare.net/jesuscf/landsat>
- ❖ Gareth W. (2006). Remote Sensing of Snow and Ice. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis Group.
- ❖ GLIMS. (n.d.). GLIMS: Global Land Ice Measurements from Space Monitoring the World's Changing Glaciers. Abril 28, 2020, de GLIMS Sitio web: <https://www.glims.org/>
- ❖ GLIMS. (n.d.). Randolph Glacier Inventory 6.0. Abril 28, 2020, de GLIMS Sitio web: <https://www.glims.org/RGI/>
- ❖ Haeberli W., Hoelzle M., Paul F. & Zemp M. (2007). Integrated monitoring of mountain glaciers as key indicators of global climate change: the European Alps. Octubre 17, 2020, de Cambridge Sitio web: [https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/C9848CCE2786F04521150290022F2CC9/S0260305500254049a.pdf/integrated\\_monitoring\\_of\\_mountain\\_glaciers\\_as\\_key\\_indicators\\_of\\_global\\_climate\\_change\\_the\\_european\\_alps.pdf](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/C9848CCE2786F04521150290022F2CC9/S0260305500254049a.pdf/integrated_monitoring_of_mountain_glaciers_as_key_indicators_of_global_climate_change_the_european_alps.pdf)
- ❖ Hock R., G. Rasul, C. Adler, B. Cáceres, S. Gruber, Y. Hirabayashi, M. Jackson, A. Kääb, S. Kang, S. Kutuzov, A. Milner, U. Molau, S. Morin, B. Orlove, and H. Steltzer (2019): High Mountain Areas. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E.

Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)].

- ❖ IPCC (2001), Glossary, in CLIMATE CHANGE 2001: Impacts, adaptation and vulnerability, edited by J. McCarthy, O. Canziani, N. Leary, D. Dokken, and K. White, pp. 365–388, Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- ❖ IPCC (2018) Resumen para responsables de políticas. En: Calentamiento global de 1,5 °C, Informe especial del IPCC sobre los impactos del calentamiento global de 1,5 °C con respecto a los niveles preindustriales y las trayectorias correspondientes que deberían seguir las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, en el contexto del reforzamiento de la respuesta mundial a la amenaza del cambio climático, el desarrollo sostenible y los esfuerzos por erradicar la pobreza [Masson-Delmotte V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor y T. Waterfield (eds.)].
- ❖ Kotlyakov V. & Komarova A. (2007), Elsevier's Dictionary of Geography, 1st ed., Elsevier, Amsterdam, The Neatherlands.
- ❖ Mal S., Mehta M., Singh R.B., Schickhoff U. & Bisht M.P.S. . (2019). Recession and Morphological Changes of the Debris-Covered Milam Glacier in Glori Ganga Valley, Central Himalaya, India, Derived From Satellite Data. Abril 30, 2020, de Semantic Scholar Sitio web:

<https://pdfs.semanticscholar.org/4dd9/ff8fef34ae1aa068cfd5c460a1e195db10f.pdf>

- ❖ MasterGIS (MasterGIS)(2018, Noviembre 11) Delimitar una cuenca hidrográfica en ArcGIS [Archivo de video] Recuperado de <https://www.youtube.com/watch?v=cYcXFCN6PT8&t=570s>
- ❖ Martínez J. & Martín M. (2010). Guía Didáctica de Teledetección y Medio Ambiente. Abril 29, 2020, de Asociación Española de Teledetección Sitio web: [http://www.aet.org.es/files/guia\\_teledeteccion\\_medio-ambiente\\_papel.pdf](http://www.aet.org.es/files/guia_teledeteccion_medio-ambiente_papel.pdf)
- ❖ Mather P. (2007). Computer Processing of Remotely-Sensed Images. Nottingham: Wiley.
- ❖ Méndez M., Agüero B. & Pérez E. (2007). Procesamiento de Imágenes del Satélite ASTER para la Actualización de la Red Vial a escala 1:100 000 con fines de Control de Flota. Abril 28, 2020, de Biblioteca Virtual en Salud Honduras Sitio web: <http://www.bvs.hn/cu-2007/ponencias/GEO/GEO-083.pdf>
- ❖ Milner A., Khamis K., Battin T., Brittain J., Barrand N., Füreder L., Cauvy-Frauni S., Már Gíslason G., Jacobsen J., Hannah D., Hodson A., Hood E., Lencioni V., Ólafsson J., Robinson C., Tranter M. & Brown L.. (2017). Glacier shrinkage driving global changes in downstream systems. Octubre 17, 2020, de Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America Sitio web: <https://www.pnas.org/content/pnas/114/37/9770.full.pdf>

- ❖ Müller, F., T. Caflisch, and G. Müller (1977), Instructions for a compilation and assemblage of data for a World Glacier Inventory, Zurich, Switzerland.
- ❖ Østrem G & Brugman M. (1991). Glacier Mass-Balance Measurements .  
 Noviembre 20, 2019, de World Glacier Monitoring Service Sitio web:  
[https://wgms.ch/downloads/Oestrem\\_Brugman\\_GlacierMassBalanceMeasurements\\_1991.pdf](https://wgms.ch/downloads/Oestrem_Brugman_GlacierMassBalanceMeasurements_1991.pdf)
- ❖ Paul F., Bolch T., Kääb A., Nagler T., Nuth C., Scharrer K., Shepherd A., Strozzi T., Ticconi F, Bhambri R., Berthier E., Bevan S., Gourmelen N., Heid T., Jeong S., Kunz M., Rune Lauknes T., Luckman A., Merryman Boncori J.P., Moholdt G., Muir A., Neelmeijer J., Rankl M., VanLooy J. & Van Niel T. (2013, Julio 08). Remote Sensing of Environment. *Elsevier*, 1, 2-3pp
- ❖ Paul F., Barrant N., Baumann S., Berthier E., Bolch T., Casey K., Frey H., Joshi S.P., Konovalov V., LE BRIS R., Molg N., Nosenko G., Nuth C., Pope A., Racoviteanu A., Raster P., Raup B., Scharrer K., Steffen S. & Winsvold S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. Abril 29, 2020, de GLIMS Sitio web:  
[https://www.glims.org/glacierdata/data/lit\\_ref\\_files/paul2013.pdf](https://www.glims.org/glacierdata/data/lit_ref_files/paul2013.pdf)
- ❖ Ren J., Jing Z., Pu J. & Qin X. (2006). Glacier variations and climate change in the central Himalaya over the past few decades. 2020, de Cambridge Sitio web: <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/C4193AEBBAC5AC02BFC0B9C10216B995/S026030>

[5500261983a.pdf/glacier\\_variations\\_and\\_climate\\_change\\_in\\_the\\_centra  
l\\_himalaya\\_over\\_the\\_past\\_few\\_decades.pdf](#)

- ❖ Rivera A., Cassasa G., Acuña C. & Lange H. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. Noviembre 14, 2020, de Universidad de Chile Sitio web:  
<https://investigacionesgeograficas.uchile.cl/index.php/IG/article/view/27709/29391>
- ❖ Rivera, A., R. Zamora, J. Uribe, A. Wendt, J. Oberreuter, S. Cisternas, F. Gimeno, and J. Clavero (2014), Recent changes in total ice volume on Volcán Villarrica, Southern Chile, *Natural Hazards*, 75(1), 33–55.
- ❖ Roy D.P. et al. (2014). Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Elsevier Science*, 1, 156.
- ❖ RGI Consortium. (2017). Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 6.0. Abril 28, 2020, de GLIMS Sitio web:  
[https://www.glims.org/RGI/00\\_rgi60\\_TechnicalNote.pdf](https://www.glims.org/RGI/00_rgi60_TechnicalNote.pdf)
- ❖ Sabins, F.F. (1986): *Remote Sensing: Principles and Interpretation*, 2nd Ed., San Francisco, Freeman (primera edición de 1978).
- ❖ Sakai A. & Fujita K. (2017). Contrasting glacier responses to recent climate change in high-mountain Asia. Octubre 19, 2020, de Nature Sitio web: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-14256-5>
- ❖ Sobrino J. (2000). *Teledetección*. Universitat de València: Asociación Española de Teledetección.

- ❖ Tarbuck, E., Lutgens, F., & Tasa, D. (2005). Ciencias de la tierra (1st ed., p. 510). Madrid: Pearson Educación. Araneda, A., Torrejón, F., Aguayo, M., Alvial, I.,
- ❖ Thouret, J. C., F. Lavigne, H. Suwa, B. Sukatja, and Surono (2007), Volcanic hazards at Mount Semeru, East Java (Indonesia), with emphasis on lahars, *Bulletin of Volcanology*, 70(2), 221–244.
- ❖ Thompson, L., E. Mosley-Thompson, M. Davis, and H. Brecher (2011), Tropical glacier, records and indicator of climate change, are disappearing globally, *Annals of Glaciology*, 52(59), 23–34.
- ❖ TIDEE. (2017). Climate Change: Impact, Adaptation, and Vulnerability. Octubre 20, 2020, de Indian Journals Sitio web:  
<http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:tidee&volume=16&issue=2&article=025>
- ❖ Vaughan D., Rivera A., Woodward J., Corr H., Wendt J. & Zamora R. (2007), Topographic and hydrological control on Subglacial Lake Ellsworth, West Antarctica, *Geophysical research Letters*, 34 (18), doi:10.1029/2007GL030769
- ❖ Vergara W., Deeb A., Valencia A., Bradley R., Francou B., Zarzar A., Grunwaldt A. & Haeussling S. (2007). Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes. Octubre 20, 2020, de Revistas AGU Sitio web:  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2007EO250001>

- ❖ Wouters B., Gardner A. & Moholdt H. (2019). Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002-2016). Octubre 17, 2020, de Frontiers in a Earth Space Sitio web:  
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2019.00096/full>
- ❖ Ye Q., Kang S., Cheng F & Wang J. (2006). Monitoring glacier variations on Geladandong mountain, central Tibetan Plateau, from 1969 to 2002 using remote-sensing and GIS technologies. Septiembre 03, 2020, de Cambridge University Press Sitio web:  
[https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/971AC8D20C172A78AB239BF80D486045/S0022143000209283a.pdf/monitoring\\_glacier\\_variations\\_on\\_geladandong\\_mountain\\_central\\_tibetan\\_plateau\\_from\\_1969\\_to\\_2002\\_using\\_remotesensing\\_and\\_gis\\_technologies.pdf](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/971AC8D20C172A78AB239BF80D486045/S0022143000209283a.pdf/monitoring_glacier_variations_on_geladandong_mountain_central_tibetan_plateau_from_1969_to_2002_using_remotesensing_and_gis_technologies.pdf)
- ❖ Ye Q., Zong J., Tian L., Graham Cogley J., Song C. & Guo W. (2017). Glacier changes on the Tibetan Plateau derived from Landsat imagery: mid-1970s – 2000–13. Octubre 18, 2020, de Cambridge Sitio web:  
[https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/FC55CA42158AEF53078733BC9102CC1F/S0022143016001374a.pdf/glacier\\_changes\\_on\\_the\\_tibetan\\_plateau\\_derived\\_from\\_landsat\\_imagery\\_mid1970s\\_200013.pdf](https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/FC55CA42158AEF53078733BC9102CC1F/S0022143016001374a.pdf/glacier_changes_on_the_tibetan_plateau_derived_from_landsat_imagery_mid1970s_200013.pdf)