



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de arquitectura y urbanismo
Escuela de pregrado Carrera de Geografía

“Descifrando las condiciones meteorológicas asociadas a GLOFs en Patagonia”

Memoria para optar a título de Geógrafa

por:

CATALINA V. ACEVEDO CARO

Profesor guía:

Pablo Sarricolea Espinoza

Profesor co-guía:

Pablo Iribarren Anacona

Santiago, Chile
(2021)

Esta tesis se enmarca en el proyecto FONDECYT N° 11190389 “Glaciers lakes in Chile: evolution and outburst flood hazard assessment”.

Agradecimientos

Se me viene a la mente una serie de personas a las cuales quiero agradecer, pero primero que todo, me gustaría estar agradecida por el simple hecho de ser una mujer con estudios universitarios, los cuales, me generan no solo orgullo y alegría, sino también, porque significa un logro importante entre las mujeres de mi familia, las cuales me han apoyado paso a paso para poder lograr esto, y sin ellas, esto no hubiera sido posible.

En este mismo sentido, agradecer a mi abuela María, que desde sus ejemplos me enseñó muchos más de lo que ella pensó, también a mi Mamá, por siempre estar ahí, sobretodo en este proceso y este año que fue duro, y también por estar en cada paso de mi educación, lo cual lo considero como una de las enseñanzas mas importantes de ella.

También agradecer a todas las mujeres de mi familia, no sólo a mis antecesoras, como son mis tías, sino también a mis hermanas, primas y a mi sobrina, a las cuales admiro y amo mucho. De igual manera agradecer a mi familia completa, hermanos, tíos, primos, los cuales, sin todos ellos, la vida no sería divertida e interesante.

Mención honrosa a mi papá, por los años de sacrificios y constante aprendizaje mutuo, por estar ahí pese cualquier cosa, y por amarme incondicionalmente. Tampoco no puede falta a mis amigas del alma, mujeres invaluable, Antonia, Carla y Bárbara. Gracias por enseñarme tanto en los últimos 11 años de amistad. También a mis amigos de la universidad, que, sin ellos, este proceso hubiera sido sin sentido, y muy poco interesante. Gracias por alegrarme día a día por 5 años. Mención honrosa a la Ingrid, por siempre apoyarte y quererme tal como soy.

Por último, agradecer a los profesores Joselyn Arriagada, Alexis Segovia, Francisco Ferrando, Pablo Sarricolea y sobre todo al Pablo Iribarren, por su sentido de vocación a su trabajo.

Resumen

El derretimiento generalizado de los glaciares en todas las zonas montañosas del mundo ha provocado el incremento del número y superficie de lagos glaciares represados por morrenas poco estables. Esta situación ha generado el aumento de vaciamiento súbito de lagos glaciares denominado GLOFs, la cual es considerada la amenaza más importante asociado al derretimiento glaciar. Factores como el aumento de las temperaturas, el deshielo y las precipitaciones corresponden a las desencadenantes de mayor influencia dentro de esta amenaza, por lo que, en este trabajo se analizó las precipitaciones y temperatura de cuatros GLOF ocurridos entre 1989 y 2018 en la Patagonia. Lo anterior se realizó con el fin de caracterizar los condicionantes meteorológicas de GLOFs mediante datos satelitales de precipitación y temperatura, además de otras fuentes que complementaron el análisis, tales como imágenes MODIS y el modelo digital de elevación SRTM. Con esta información se llevó un análisis estadístico de datos meteorológicos analizando la ocurrencia de eventos extremos que dan cuenta de las condiciones de precipitación y temperatura días previos a cada uno de los GLOFs estudiados. De esto se desprende que el factor de temperaturas influye de manera importante en la generación de los eventos de GLOF, dado que en tres de los cuatros eventos se pudo observar alguna condición extrema (por encima del P90) de temperatura en sus días previos. Esto, sumado a las predicciones a futuro en la Patagonia, tales como el aumento inminente de las temperaturas y el descenso de las precipitaciones, generan un escenario de alerta hacia futuros eventos de GLOF que potencialmente puedan ocurrir en esta zona de Chile.

Palabras claves: Derretimiento glaciar, Patagonia, amenazas, GLOFs, lagos glaciares, precipitación, temperatura.

Abstract

The generalized melting of glaciers in all mountainous areas of the world has led to an increase in the number and surface area of glacial lakes dammed by unstable moraines. This situation has led to an increase in the sudden emptying of glacial lakes called GLOFs, which is considered the most important threat associated with glacial melting. Factors such as increased temperatures, melting and precipitation correspond to the most influential triggers within this threat, so in this work we analyzed the precipitation and temperature of four GLOFs that occurred between 1989 and 2018 in Patagonia. This was done in order to characterize the meteorological conditions of GLOFs through satellite data of precipitation and temperature, in addition to other sources that complemented the analysis, such as MODIS images and the SRTM digital elevation model. With this information, a statistical analysis of meteorological data was carried out, analyzing the occurrence of extreme events that account for the precipitation and temperature conditions days prior to each of the GLOFs studied. It can be seen that the temperature factor has an important influence on the generation of GLOF events, given that in three of the four events some extreme temperature conditions (above P90) were observed on the days prior to the GLOFs. This, added to future predictions in Patagonia, such as the imminent increase in temperatures and the decrease in precipitation, generate a warning scenario for future GLOF events that could potentially occur in this area of Chile.

Key words: Glacial melting, Patagonia, hazards, GLOFs, glacial lakes, precipitation, temperature.

Índice de contenido

Capítulo 1: Presentación	7
1.1 <i>Introducción</i>	7
1.2 <i>Planteamiento del problema</i>	8
1.3 <i>Área de estudio</i>	10
1.3.1. <i>Caracterización geomorfológica Glaciar</i>	11
1.3.2. <i>Caracterización Climática</i>	12
1.3.3. <i>Caracterización Hidrológica</i>	13
1.4. <i>Objetivos</i>	14
1.4.1. <i>Objetivo general</i>	14
1.4.2. <i>Objetivos específicos</i>	14
Capítulo 2: Estado del asunto	14
2.1. <i>Cambio climático y su efecto en los glaciares</i>	14
2.1.1. <i>Derretimiento de los glaciares en Chile</i>	15
2.1.2. <i>GLOF en el contexto de cambio climático</i>	16
2.3. <i>Factores gatillantes de GLOFs</i>	17
2.3.1. <i>Principales mecanismos de desencadenamiento de GLOF</i>	17
2.3.2. <i>Gatillantes climáticos de GLOF</i>	18
2.3.3. <i>Relación entre precipitación y eventos GLOF</i>	19
2.3.4. <i>Relación entre temperatura y eventos GLOF</i>	19
2.3 <i>Clasificación de lagos glaciares</i>	20
2.4. <i>Comportamiento de la descarga de flujos</i>	21
2.4.1. <i>Comportamiento de descarga de flujos en lagos represados por morrena</i>	21
2.4.2. <i>Comportamiento de descarga de flujos en lagos sub-glaciares represados por hielo</i>	22
2.4.3. <i>Comportamiento de descarga de flujos en lagos glaciares represados por hielo</i>	22
2.5. <i>Evaluación de la Amenaza de GLOF</i>	22
2.5.1. <i>Experiencias de amenaza de GLOF en el mundo</i>	22
2.5.2. <i>Experiencia de amenaza de GLOF en Chile</i>	22
2.5.3. <i>Metodologías de estudio de amenaza de GLOF</i>	23
Capítulo 3: Planteamiento metodológico	25
3.1. <i>Catastrar GLOFs ocurridos en Patagonia mediante caracterización geomorfológica e identificación de disturbios en vegetación ripariana</i>	25
3.1.1. <i>Identificación de rastro erosivo de GLOFs</i>	25
3.1.2. <i>Cálculo de índice NDVI</i>	26
3.2. <i>Caracterizar patrones de precipitación y temperatura asociados a GLOFs en Patagonia</i>	27
3.2.1. <i>Caracterización de patrones de precipitación</i>	27
3.2.2. <i>Caracterización de patrones de temperatura</i>	29
3.3. <i>Comprender las implicancias del cambio global en la ocurrencia de GLOFs en Patagonia</i> .31	
3.3.1. <i>Descarga de modelos de elevación digital</i>	31
3.3.2. <i>Descarga de imágenes de reflectancia superficial</i>	32
3.3.3. <i>Consulta bibliográfica de cambios globales en Patagonia</i>	33
Capítulo 4: Resultados.....	33
4.1. <i>Catastro de GLOFs ocurridos en Patagonia mediante caracterización geomorfológica e identificación de disturbios en vegetación ripariana</i>	33

4.1.1.	Caracterización geomorfológica e identificación de disturbios en vegetación ripariana	33
4.2.	Caracterización de patrones de precipitación y temperatura asociados a GLOFs en Patagonia.....	37
4.2.1.	Caracterización de precipitaciones.....	37
a.	GLOF Glaciar Ventisquero Negro.....	38
b.	GLOF Laguna Espontánea	39
c.	GLOF Laguna el Triángulo	40
d.	GLOF Cerro Largo.....	41
4.2.2.	Caracterización de temperatura.....	43
a.	GLOF Glaciar Ventisquero Negro.....	43
b.	GLOF Laguna Espontánea	44
c.	GLOF Laguna el Triángulo	45
d.	GLOF Cerro Largo.....	47
4.3.	Comprender las implicancias del cambio global en la ocurrencia de GLOFs en Patagonia	48
4.3.1.	Análisis del contexto geomorfológico	48
a.	GLOF Glaciar Ventisquero Negro.....	48
b.	GLOF Laguna Espontánea	50
c.	GLOF Laguna el Triángulo	52
d.	GLOF Cerro Largo.....	54
4.3.2.	Proyecciones de cambio global en Patagonia	55
Capítulo 5: Discusión y conclusiones.....		57
5.1.	Discusión.....	58
5.2.	Conclusiones generales	62
Bibliografía		64
Anexos		71
Índice de Figuras		
Figura 1:	Mapa de localización de eventos GLOFs	11
Tabla 1:	Selección de GLOFs finales	11
Figura 2:	Mecanismos de falla de morrena.....	17
Figura 3:	Esquema de amenazas en lagos glaciares represados por morrenas. Se destacan potenciales desencadenantes, factores condicionantes, y fases claves en un evento de GLOF.....	18
Figura 4:	Tipos de lagos glaciares según tipo de represa.....	21
Figura 5:	Ecuación de índice NDVI.....	26
Figura 6:	Diagrama resumen metodológico – Objetivo específico n° 1.....	27
Figura 7:	Visión general del proceso y validación de CHIRPS.....	28
Tabla 2:	Caracterización de eventos extremos de precipitación (pp).....	29
Tabla 3:	Caracterización de eventos extremos de temperatura (t°).....	30
Figura 8:	Diagrama resumen metodológico - Objetivo específico n° 2.....	31
Figura 9:	La geometría del interferómetro SRTM.....	33
Figura 10:	Diagrama resumen metodológico - Objetivo específico n° 3.....	33
Tabla 4:	Catastro de eventos de GLOFs en Patagonia.....	34
Figura 11:	Serie de tiempo de NDVI en corredores fluviales afectados por GLOFs.....	35
Figura 12:	Serie de tiempo NDVI de Corredores fluviales afectados por GLOFs.....	37
Figura 13:	Gráficos de precipitación - GLOF Glaciar Ventisquero Negro.....	39

Figura 14: Gráficos de precipitación - GLOF Laguna Espontánea	40
Figura 15: Gráficos de precipitación – GLOF Laguna el Triángulo	41
Figura 16: Gráficos de precipitación - GLOF Cerro Largo.....	42
Figura 17: Gráficos de temperatura - GLOF Glaciar Ventisquero Negro.....	44
Figura 18: Gráficos de temperatura - GLOF Laguna Espontánea	45
Figura 19: Gráficos de temperatura - GLOF Laguna el Triángulo.....	46
Figura 20: Gráficos de temperatura - GLOF Cerro Largo.....	48
Figura 21: Comparación pre y post GLOF del lago pro-glaciar Ventisquero Negro	50
Figura 22: Caracterización geomorfológica - GLOF Gl. Ventisquero Negro	50
Figura 23: Comparación pre y post GLOF Laguna Espontánea.....	51
Figura 24: Caracterización geomorfológica - GLOF Laguna Espontánea	52
Figura 25: Comparación pre y post GLOF Laguna el Triángulo.....	53
Figura 26: Caracterización geomorfológica - GLOF Laguna el Triángulo	53
Figura 27: Caracterización geomorfológica - GLOF Cerro Largo.....	55
Tabla 5: Proyección de cambio de temperaturas y precipitaciones de comunas en Región de Aysén y Magallanes.....	56
Figura 28: Factores claves en eventos de GLOF influenciados por el aumento de las temperaturas.....	60
Tabla 6: Precipitación asociada a GLOFs en Patagonia. Basado en datos satelitales de precipitación CHIRPS	61
Tabla 7: Temperatura media diaria asociada a GLOFs en Patagonia. Basado en datos satelitales de temperatura NOAA/CFSV2/FOR6H.....	62
Tabla 8: Temperatura máxima diaria asociada a GLOFs en Patagonia. Basado en datos satelitales de temperatura NOAA/CFSV2/FOR6H.....	62

Índice de Anexos

Anexo n° 1: Tabla de eventos de GLOF	71
<i>Anexo 2.a: Tabla de eventos de GLOFs en Patagonia identificados por Irribarren et al., (2015)..</i>	<i>71</i>
<i>Anexo 1.b: Tabla de eventos de GLOFs en Patagonia identificados por Wilson et al., (2018)</i>	<i>72</i>
<i>Anexo 1.c: Tabla de Eventos de GLOFs en Patagonia identificados por Irribarren.....</i>	<i>72</i>
Anexo n° 2: Descarga de imágenes satelitales para análisis geomorfológico	72
Anexo n°3: Códigos utilizados en Google earth engine (GEE).....	73
<i>Anexo 3.a: Código ocupado para descarga de imágenes Landsat 5 y 8 (gee).....</i>	<i>73</i>
<i>Anexo 3.b: Código ocupado para descarga de archivos CSV con datos de índice NDVI.....</i>	<i>74</i>
Anexo n° 4: Códigos ocupado par objetivo n° 2	74
<i>Anexo 4.a: Código ocupado para descarga de archivos CHIRPS con datos de precipitación.....</i>	<i>75</i>
<i>Anexo 4.b: Código ocupado para procesamiento de “raster sampling” con datos de precipitación</i>	<i>76</i>
<i>Anexo 4.c: Código ocupado para la realización de gráficos de histograma.....</i>	<i>77</i>
Anexo 5: Series de tiempo de NDVI en corredores fluviales producto de GLOFS.....	78

Capítulo 1: Presentación

1.1 Introducción

La Patagonia se considera una de las zonas montañosas más importantes del mundo, puesto que en esta región no solo existe gran cantidad de glaciares, sino que además, dos grandes campos de hielo, correspondientes a los campos hielo continentales más grandes del mundo, sin contar las zonas polares (Mouginot & Rignot, 2015). No obstante, esto ha desarrollado que esta región del mundo sea particularmente vulnerable y sensible ante el actual escenario de cambio climático, con una tendencia general a pérdidas de balance de masa en los últimos 40 años, lo que ha conllevado a un aumento de la ocurrencia de amenazas naturales y riesgos para los asentamientos presentes en la zona (Burton *et al.*, 2020).

Una de estas amenazas ha sido el rápido incremento de los lagos glaciares no sólo en la Patagonia, sino en diferentes regiones montañosas, lo que, a su vez, ha conllevado al aumento de la velocidad de derretimiento de los frentes glaciares. El desprendimiento repentino del lago glaciar (GLOF en sus siglas en inglés), corresponde una amenaza importante no solo para la infraestructura hidráulica, vial, entre otras, sino también, como un riesgo para las vidas humanas presentes (Bajracharya & Mool, 2009; Shugar *et al.*, 2020).

Los GLOF corresponden a la descarga súbita de aguas provenientes de sistemas o lagos glaciares, pudiendo ser represadas por morrenas o por hielo. Esta amenaza genera especial preocupación en zonas montañosas como Perú, Bolivia, Nepal, India, entre otras (Quincey & Carrivick, 2018).

Los Himalayas corresponde a una de las regiones más afectadas por la amenaza de GLOFs, de hecho, según Bajracharya *et al.*, 2008, citado por Bajracharya & Mool, 2009, un evento de GLOF ocurre cada 3 a 10 años en esta región. Los autores señalan que las consecuencias se deben principalmente al aumento de temperaturas e inestabilidad climática de la zona que se ha venido observando en las últimas décadas, puesto que las tendencias climáticas no solo muestran un aumento en la cantidad de días cálidos durante el verano, sino también durante el invierno (Burton *et al.*, 2020).

Es por esto que, en este presente estudio, se llevará a cabo un análisis estadístico de las condiciones climáticas en cuatro GLOFs ocurridos entre 1989 y 2018 en la Patagonia chilena, a través de una revisión de las condiciones de precipitación y temperatura existentes días antes de los eventos, para así atribuir a la teoría que relaciona el aumento de temperatura/lluvias intensas y su efecto desencadenante en los eventos de GLOFs.

Lo anterior se realizará mediante dos principales fuentes, el *Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station (CHIRPS)*, el cual corresponde a una serie de imágenes satelitales con información de precipitaciones alrededor del mundo (Funk *et al.*, 2015), y una base de datos del *Climate forecast system (CFS)*, el cual recolecta datos de presión atmosférica,

temperatura a diferentes alturas sobre el suelo, entre otras cosas, eligiendo específicamente para este trabajo, la temperatura a nivel del suelo (2m) (Saha *et al.*, 2011).

Esta información será visualizada mediante dos formas principales, una con la información de las condiciones de una semana antes de los eventos, y otra con un histograma de la información de un periodo de 40 años aproximadamente, con el fin de observar el comportamiento general de la precipitación y temperatura de cada una de las zonas de los GLOFs.

Por último, se realizará un mapa con el contexto geomorfológico de cada evento de GLOF, para así contemplar en una cartografía la ruta de cada uno de los GLOFs y su fuente glaciar, como así también, el tamaño del lago glaciar presente en cada uno de ellos.

1.2. Planteamiento del problema

La criosfera se posiciona como un sistema altamente amenazado por el actual escenario de cambio climático, generando un aumento de temperaturas a nivel global y un incremento en el nivel del mar (Cassasa *et al.*, 2007). El IPCC (2019) en su “Informe especial sobre los océanos y la criosfera en un clima cambiante”, menciona cómo los glaciares a nivel mundial se han ido derritiendo a tasas muy elevadas, un ejemplo de estas son las áreas montañosas (excluyendo Groenlandia y la Antártica), en donde la tasa promedio de pérdida de masa entre los años 2006 y 2015 ha sido de $220 \pm 30 \text{ Gt año}^{-1}$ (equivalente a $0.61 \pm 0.08 \text{ mm año}^{-1}$ en el aumento del nivel del mar).

Las principales consecuencias que presenta el retroceso y derretimiento de los glaciares han sido su aporte al incremento de nivel del mar, según el IPCC (2001) citado por Casassa *et al.*, (2007), los glaciares de todo el mundo contienen 68,8 m del nivel del mar global y corresponden al 70% del agua fresca en la Tierra.

El riesgo relacionado al retroceso glaciar ha comenzado a elevarse dado al mayor número de personas que se encuentran expuestas a estas, ya sea por el aumento del turismo en zonas de alta montaña, como el desarrollo económico que se ha ido posicionando en estos lugares (Huggel *et al.*, 2003; IPCC, 2019).

Por consiguiente, el retroceso de los glaciares influye de igual manera en el incremento de amenazas hacia el sistema social como al ecosistémico, principalmente amenazados por lahares, inundaciones glaciares, avalanchas de roca y hielo y flujo de detritos (Bolch, 2011). Esto mismo, es mencionado por Iribarren *et al.*, (2015)a, quienes indican que el cambio climático ha generado transformaciones en el sistema geomorfológico, originando la aceleración de procesos catastróficos. Produciendo así, (1) la desestabilización de laderas alpinas debido al contracción de glaciares (Holm y otros, 2004, citado por Iribarren *et al.*, 2015)a, (2) la generación de crecidas repentinas y flujo de detritos (Costa y Schuster, 1991, citado por Iribarren *et al.*, 2015)a, y (3), movimientos en masa producto de la degradación del permafrost (Gruber y Haeberli, 2007, citado por Iribarren *et al.*, 2015).

Breien (2008), por otro lado, expone que uno de los mecanismos más comunes para el desencadenamiento del flujo de detritos corresponde al flujo de agua, generados por el exceso de lluvia o deshielo, combinado con materiales erosionables de valles escarpados. Una de las formas que puede conllevar a lo descrito anteriormente son la descarga de lagos glaciares que provocan inundaciones repentinas en estas zonas, lo que representa un gran peligro para los asentamientos humanos e infraestructura cercanos a estos eventos.

Cabe destacar, que en consecuencia del derretimiento y retroceso generalizado de los glaciares alrededor del mundo, los lagos glaciares se han ido incrementando, posicionándose en su mayoría detrás de morreras inestables y aumentando el potencial riesgo de inundación por descarga del volumen de agua denominado GLOF (Mir *et al*, 2018). En un estudio sobre la evolución de los lagos glaciares en el campo de hielo Norte (NPI) realizado por Loriaux y Casassa (2012), demuestran que entre 1945 y 2011 la superficie de lagos glaciares en NPI aumentó un $0,98 \text{ km}^2/\text{año}$.

En las zonas glaciares del mundo, las inundaciones por la descarga de lagos glaciares (GLOF) se han ido estudiando cada vez más debido al incremento de estos en los últimos 40 años, asociado al derretimiento de los glaciares y los efectos del cambio climático (Iribarren *et al* 2015)b. La ocurrencia de estos eventos puede ser muchas veces catalogados como catastróficos, dado que por lo general presentan descargas de volumen mucho más alto que las de una inundación hidrometeorológica (Emmer & Cochachin, 2013) alcanzando flujos de 2 a 6 veces al caudal promedio del curso de agua (Marin *et al*, 2013). En Patagonia al menos 16 lagos con morrenas se han desmoronado en un tiempo histórico, y uno de ellos corresponde al GLOF con mayor volumen de inundación visto en el planeta (Iribarren *et al* 2015)b, localizado en la Laguna del Cerro Largo, descargando $229 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua (Hauser, 1993, citado por Clague & Evans, 2000). Es por esto, que el estudio de estos eventos en el pasado sería de gran ayuda para la generación de instrumentos de apoyo hacia la gestión y manejo del riesgo.

La Patagonia Chilena¹ se caracteriza por poseer una vasta cantidad de glaciares, llegando a disponer del 88% de la superficie glaciaria de Chile, correspondiente a 21.535 km^2 , según la actualización del catastro nacional de glaciares realizado para el 2014 por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA² (Segovia y Videla, 2017). Además, esta macrozona del país se distingue por elevadas cantidades de precipitación que poseen cada año en comparación con el resto de Chile, desde lo descrito por Iribarren *et al* (2015)a, al sur de la latitud 40° , las precipitaciones comienzan a aumentar drásticamente, alcanzado los 6000 a 8000 mm por año en el Campo de Hielo Sur (CHS) (Escobar *et al.*, 1992, citado por Iribarren *et al*, 2015b), no obstante, Garreud & Rojas (2013) concluyen que, entre el periodo de tiempo de 1981 y 2001, existe una tendencia de disminución en las precipitaciones anuales a lo largo de toda la

¹ Zona Austral: Desde la cuenca del Río Baker hasta el extremo Sur del país.

² Dirección General de Aguas de Chile, Ministerio de Obras Públicas (MOP).

Patagonia, llegando a disminuir entre 300 a 800 mm por década en Patagonia Norte, y entre 200 y 300 mm por década al sur de los 50°S.

Por otra parte, Mardones *et al* (2018), menciona que el retroceso generalizado de los glaciares en Patagonia responde principalmente a parámetros climáticos, existiendo durante todo el siglo XX grandes fluctuaciones de parámetros de temperatura y precipitación en la zona, favoreciendo y/o incrementando la ablación de los glaciares, algunos mayores que otros. Sin embargo, desde 1972 existe una tendencia sostenida a la disminución de precipitaciones, y un aumento de temperatura tanto en invierno como en verano. El ritmo de retroceso se eleva desde la década del siglo pasado, terminando en el colapso de la mayoría de los frentes glaciares para la década de los 90'.

Es por esto, que la mayoría de los glaciares chilenos ha experimentado una pérdida de masa, lo que ha expuesto a gran cantidad de laderas empinadas, provocando morfologías propicias para la formación de lagos glaciares, sobre todo en Patagonia (Iribarren *et al*, 2015a).

Un ejemplo de desbordamiento de lagos glaciares en Chile fue el Lago Arco, el cual Tanaka (1980) describe que entre los años 1920 y 1958, cada verano se desencadenaba un evento de GLOF (Iribarren *et al* 2015a). De modo similar, en 1985 se da lugar el evento de aluvión del Río Manflas, el cual se desencadena por una falla violenta de las paredes del lago subglacial, debido a un aumento de presión en su base, dando a entender la creciente necesidad de vigilancia a glaciares de alta montaña, sobre todo en áreas en las que existe proyecciones de infraestructura hidráulica (Peña & Escobar, 1985).

De todas formas, Wilson *et al* (2019), hace referencia a la baja relevancia que se le ha dado a la creciente amenaza de GLOF en Chile en comparación a otras zonas del mundo (Perú, Himalaya, entre otras). En Chile desde el año 1941 han ocurrido 17 eventos de GLOF, y en sólo 3 de ellos se ha reportado o se ha tenido conocimiento de su factor gatillante, lo que avala lo dicho por Carrión (2010), quien acusa un bajo nivel de investigación acerca de este tipo de amenaza en Chile.

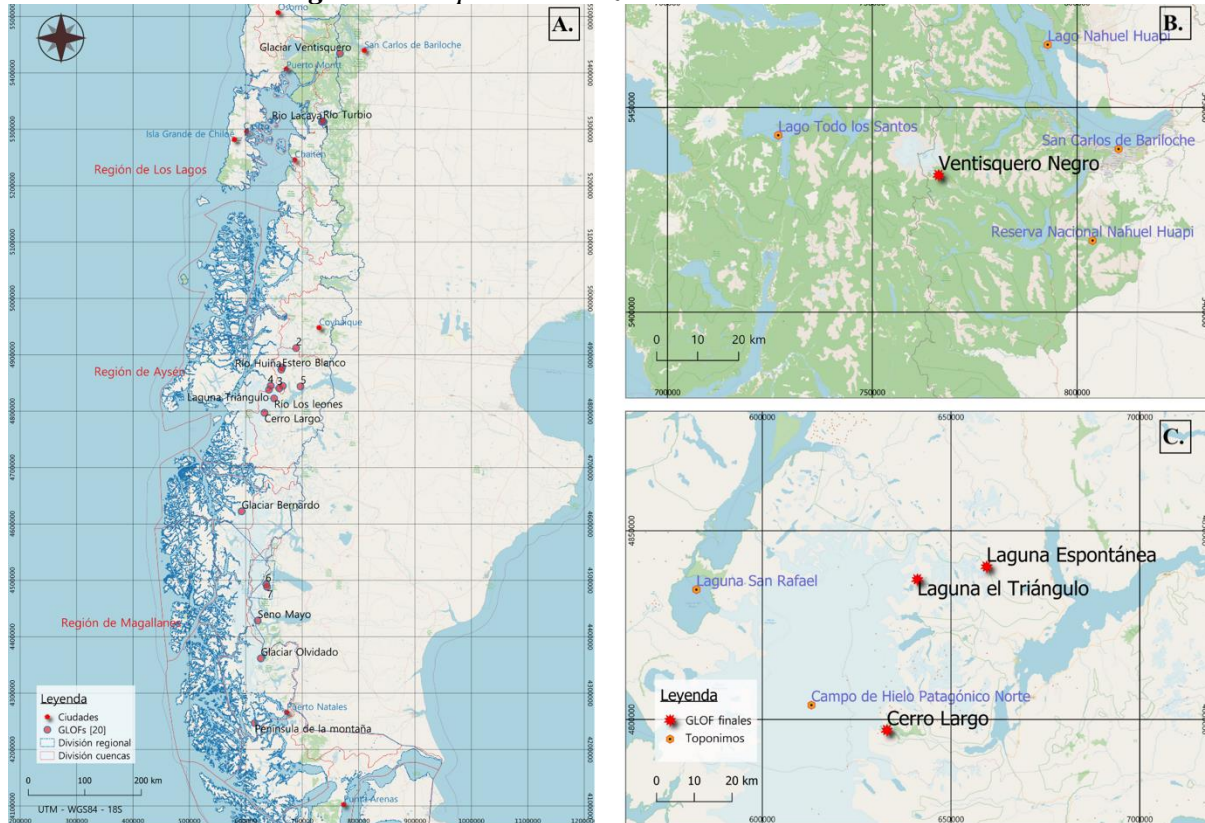
En conclusión, en consecuencia al bajo nivel de conocimiento acerca de los factores gatillantes en los eventos de GLOF en Patagonia durante el siglo XX y XXI, sumado al aumento del número y superficie de lagos glaciares en esta región, es que se visibiliza la necesidad de caracterizar los patrones de las condiciones meteorológicas que gatillaron los eventos de GLOF pasados. Todo esto, con el fin de poder apoyar a la gestión del riesgo de amenazas de GLOF futuras.

1.3. Área de estudio

El área de estudio se sitúa en la Patagonia chilena, región ubicada en la zona Austral del Chile, entre las regiones de Los Lagos y la Región de Magallanes, específicamente entre las latitudes 40°S y 55°S aproximadamente (Gut, 2009). Dentro de esta área, se analizaron un total de 20

GLOFs identificados por Iribarren *et al* (2015) a, Wilson *et al* (2018) y eventos de GLOF recientes identificados por informes de prensa e Iribarren *et al* (2019) – ver figura n° 1-. Sin embargo, fueron seleccionados cuatro eventos de GLOF – ver tabla n° 1-.

Figura 1: Mapa de localización de eventos GLOFs



Fuente: Elaboración propia, (2020). (A) Localización de 20 GLOF identificados, (B) localización de GLOF ocurrido en Glaciar Ventisquero Negro, (C) localización de GLOFs de Lagoana Espontánea, Lagoana el Triángulo y Cerro Largo.

Tabla 1: Selección de GLOFs finales

Nombre	Lat	Long	Fecha de ocurrencia
Glaciar Ventisquero negro	-41,1	-71,81	21 de mayo, 2009
Lagoana espontánea	-46,56	-72,91	27 de octubre, 2018
Lagoana Triángulo	-46,59	-73,15	17 de abril, 2018
Cerro Largo	-46,95	-73,25	16 de marzo, 1989

Fuente: Elaboración propia (2020).

1.3.1. Caracterización geomorfológica Glaciar

A partir del Inventario Nacional de Glaciares, Chile posee el 80,5% de la superficie glaciar de Sudamérica, posicionándose como el país con más glaciares en Sudamérica. Estos se pueden encontrar dentro de todo el territorio nacional, no obstante, la cantidad y superficie de la masa glaciar va variando de acuerdo con el aumento en la latitud (Segovia & Videla, 2017).

La zona patagónica concentra los dos campos de hielo existentes en Chile, correspondientes a un total de 17 mil km² entre el Campo de Hielo Norte (CHN) y Campo de Hielo Sur. Esta alta concentración de glaciares ha conformado morfologías tales como morrenas, circos, canales de agua de deshielo, entre otros (Glasser & Jansson, 2008).

Entre estas morfologías se pueden encontrar rastros de eventos producidos por crecidas (GLOFs) que ha ocurrido en las últimas décadas. La identificación de estas morfologías en imágenes satelitales se puede observar como acumulaciones de tierra o de detritos, comúnmente ubicadas en canales empinadas, o como, zonas de pérdida de vegetación significativa en comparación a la vegetación de sus alrededores (Glasser & Jansson, 2008).

En este mismo sentido, Dusallant *et al.*, (2012), da cuenta de los cambios geomorfológicos que se han evidenciado en las últimas décadas en la zona patagónica, en consecuencia, del aumento del cambio en los fenómenos meteorológicos. Huggel *et al* (2010), da cuenta del incremento de la temperatura del aire, el cual afecta directamente a la estabilidad de las laderas y la degradación del permafrost, generando a su vez, avalanchas de hielo y caída de rocas, entre otros procesos gravitacionales.

1.3.2. Caracterización Climática

Cabe destacar la presencia de una fuerte variante de humedad en dirección O-E, el cual es caracterizado por grandes cantidades de precipitación en la zona oeste de la Patagonia, y una disminución importante hacia la zona este de la misma, conllevando a condiciones mucho más secas (Dussallant *et al*, 2012; Bravo *et al*, 2019). Dusallant *et al* (2012), menciona que dentro de la cuenca Río Baker, la costa del Lago General Carrera al oeste, concentra 3 veces más precipitación que Chile Chico en el este.

En específico, la Patagonia chilena concentra grandes cantidades de precipitación anuales, llegando de 3000 a 4000 mm por año aproximadamente en las zonas costeras y por sobre los 7000 mm anuales hacia las zonas interiores, en consecuencia, del efecto orográfico provocado por la Cordillera (León-Muñoz *et al*, 2018)

Las condiciones climáticas dentro del CHS se encuentra altamente influenciada por la formación de ciclones en latitudes medias en el Pacífico Sur. El régimen de precipitación anual se caracteriza por distribuirse de manera prácticamente equitativa durante todo el año, exceptuando algunos máximos durante los meses de marzo y abril (Dussallant *et al*, 2012).

A una escala interanual, el régimen de precipitaciones responde a condiciones a escala del hemisferio, asociados a las condiciones del modo anual del sur (*SAM*³, en sus siglas en inglés)

³ South Anular Mode

y la oscilación del niño del sur (*ENSO*⁴, en sus siglas en inglés), responsables de la variabilidad año tras año (Garreud *et al*, 2012; Bravo *et al*, 2019; Masiokas *et al*, 2019). Estas condiciones explican los cambios en la intensidad de los vientos del oeste, en conjunto con los cambios en la presión al nivel del mar (León-Muñoz *et al*, 2018).

El modo anular del sur (SAM), corresponde a patrones de variabilidad climática en el hemisferio Sur, el cual explica anomalías de los flujos atmosféricos no asociadas a los ciclos anuales. Este se caracteriza por presentar condiciones de presión bajo el promedio en regiones polares y cambios en los vientos del oeste en latitudes cercanas a los 50-60°S. En un estudio de la relación entre las precipitaciones durante el SAM, se obtuvo que, durante la fase positiva del SAM, existe una intensificación de la anomalía del aumento del nivel del anticiclón (Silvestri & Vera, 2003), asociado a un debilitamiento de la convergencia de humedad y disminución de las precipitaciones en Sudamérica (Reboita *et al*, 2009).

Asimismo, León – Muñoz *et al* (2018) mencionan que ha existido una tendencia positiva del SAM en los últimos 40 a 30 años en la zona Austral de Chile, lo que ha significado una intensificación de los vientos del oeste hacia la periferia antártica y un debilitamiento de estas hacia la latitud 40°S, disminuyendo las precipitaciones.

En términos de tendencia en temperaturas, Bravo *et al* (2019), concluye en su estudio, que entre las latitudes 43° y 49°S ha existido un calentamiento en la temperatura superficial, correspondiente a 0,78°C por década entre los años 2001 y 2016, lugar en el cual se ubican las lagunas Espontáneas y Triángulo, junto al Cerro Largo. Mientras que, en la Patagonia Sur, este fue cercano a los 0,5°C en los últimos 40 años.

De este mismo modo, debido a la variante O-E existente en la Patagonia, la variabilidad interanual es de mayor magnitud en la ladera oeste en ambos campos de hielo, como también, la mayor cantidad de precipitación de tipo aguanieve, debido a la mayor concentración de humedad en la zona oeste (Bravo *et al*, 2019).

En términos generales, dentro de la zona patagónica norte, ubicación del Glaciar Ventisquero Negro, no existe una tendencia marcada dentro de los últimos 100 años de registros. Sin embargo, existen periodos significativamente más húmedos o más secos. Los dos periodos registrados como más húmedos corresponden a los años 1944 -1951 y 1964 - 1971, y los periodos más secos entre los años 1981 – 1989 y 2010 - 2015, no obstante, en los últimos años se ha observado condiciones que da cuenta de los años más secos que se han registrado (Bravo *et al*, 2019).

1.3.3. Caracterización Hidrológica

⁴ Niño-Southern Oscillation

En la zona patagónica central oeste, los caudales de las cuencas Cisnes, Senguerr y Aysén, muestran un comportamiento mono-caudal, con valores máximos durante la primavera causado por el derretimiento de la nieve. Por otro lado, el comportamiento de los caudales en las cuencas Futaleufú y Palena (más al norte) se caracteriza por presentar valores máximos en invierno, en respuesta a condiciones climáticas menos acentuadas y de menor altitud en comparación a las anteriores, concentrando precipitación mayoritariamente de tipo líquida (Masiokas *et al.*, 2019).

Dusaillant *et al.* (2012), en un estudio del comportamiento hidrológico de la cuenca del Río Baker, menciona que en esta zona de Chile ha existido un aumento en las amenazas naturales asociadas a cambios en clima, siendo estas reguladoras del comportamiento hidrogeomorfológico, uno de ellos, los GLOFs.

Asimismo, se ha observado una tendencia no significativa en la media móvil, relacionado con el retroceso los glaciares en el CHN en la década de los 90', además, es destacable que desde el año 2008, las temperaturas han sido notoriamente altas (Dusaillant *et al.*, 2012).

Por último, se ha de tener en cuenta que, en el lado occidental de la zona patagónica, el fenómeno de GLOFs ha sido clave en los cambios del régimen hidrológico y geomorfológicos, observándose un nuevo ciclo de estos eventos desde el año 2008 (Dusaillant *et al.* (2012).

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Comprender las condiciones meteorológicas que gatillan la ocurrencia de GLOFs en Patagonia.

1.4.2. Objetivos específicos

1. Catastrar GLOFs ocurridos en Patagonia mediante caracterización geomorfológico e identificación de disturbios en vegetación ripariana
2. Caracterizar patrones de precipitación y temperatura asociados a GLOFs en Patagonia.
3. Comprender las implicancias del cambio global en la ocurrencia de GLOFs en Patagonia

Capítulo 2: Estado del asunto

2.1. Cambio climático y su efecto en los glaciares

Los glaciares se posicionan como una de las morfologías más vulnerables dentro del escenario de cambio climático, causado principalmente por la acumulación de gases de efecto invernadero y el adelgazamiento de la capa de ozono, provocando el aumento de la temperatura

a nivel mundial. El IPCC (2018) ha proyectado a nivel global un aumento promedio cerca del 1,5 °C entre los años 2030 y 2052.

Todo lo anterior ha generado un derretimiento generalizado y sostenido de los glaciares en las últimas décadas en todas las regiones glaciares del mundo. *The World Glacier Monitoring Service (WGMS)*, ha sido el encargado de recolectar a través de diferentes metodologías e instrumentos, la medición de los glaciares, el cual en un reporte preliminar de los años 2015/16 ha dado como resultado un balance de masa promedio anual mundial de -0,90 mm w.e.⁵, lo cual corresponde a un 20% menos que el promedio anual de la primera década del siglo 21 (WGMS, 2017).

Una de las regiones más afectadas corresponde al Himalaya, el cual presenta un total de 116.180 km² de hielo glaciar, en donde el incremento de las temperaturas en altitudes altas ha aumentado 3 veces el promedio mundial. Esto ha generado fluctuaciones significativas en el derretimiento del hielo y de la nieve, produciendo periodos escorrentía excesivas e insuficientes a largo plazo (Xu *et al*, 2009).

Sin embargo, la frecuencia de la medición y las diferentes metodologías de monitoreo de los glaciares aún sigue siendo muy precaria en muchas regiones del mundo, y excesivamente precarias en otras, como el ártico ruso, en donde se hizo imposible estimar el balance de masa del país, debido a un número muy bajo de observaciones glaciológicas y geodésicas (WGMS, 2017).

2.1.1. Derretimiento de los glaciares en Chile

La WGMS (2017) informa que, en la región de los Andes del Sur, la mayoría de los glaciares llegaron al máximo de la pequeña edad de hielo (*LIA*, en sus siglas en inglés)⁶ entre finales del siglo XVII y principios del siglo XIX, desde el cual, la gran mayoría de los glaciares han demostrado un retroceso generalizado, con algunos re-avances en la década de los 80's del siglo XX.

Las mediciones de balances de masa muestran un pequeño retroceso entre las décadas de los 70's, 80's y 2000's, y una disminución importante de -680 mm w.e. por año en los 90's. No obstante, el record de medición se encuentra entre los reportes de los balances de masa entre 2013/14 y 2014/15 con -952 mm w.e. y -1.539 w.e. respectivamente (WGMS, 2017).

Por otro lado, Barcaza *et al* (2017), indica que entre los años 2000/03 y 2015, los glaciares más afectados en Chile corresponden a los glaciares blancos (glaciares sin cobertura de detritos), dado que, 77 glaciares dentro de esta categoría perdieron aproximadamente $-92,3 \pm 4,6$ km² en promedio, en cambio, 21 glaciares rocosos y cubiertos no presentaron cambios en su área.

⁵ Water equivalence (equivalencia en agua)

⁶ Little Ice Age (pequeña edad de hielo)

En una observación sectorial, se indica que en la zona Norte de Chile el glaciar más afectado dentro del mismo periodo de tiempo corresponde al Volcán Parinacota, con un total de $-0,9 \text{ km}^2$ de retroceso, como también, algunas zonas entre el Glaciar Estrecho y el Cerro Volcán presentaron tasas de retroceso más moderados, cercanos a los $-0,5 \text{ km}^2$ (Barcaza *et al*, 2017).

En la zona Central de los Andes, se observaron cambios más importantes en los glaciares Olivares y Universidad, con retrocesos de $-0,36 \text{ km}^2$ y $-0,17 \text{ km}^2$ respectivamente. Mientras que en las áreas glaciares Cipreses, Cortaderal y el Palomo, el cambio fue menor a $0,4 \text{ km}^2$ (Barcaza *et al*, 2017).

En la zona sur de Chile, cerca de las regiones de los Ríos y los Lagos, en el glaciar en el Volcán Villarrica fueron observados cambios de $-0,56 \text{ km}^2$, mientras que en el Volcán Mocho-Choshuenco se midió un retroceso de $0,02 \text{ km}^2$. Más al sur, se encuentran glaciares con retrocesos importantes como al norte de la lengua del complejo del Quelat, en donde se calculó un retroceso total de $-0,9 \text{ km}^2$ (Barcaza *et al*, 2017).

Cabe destacar, que en la Región Patagónica y de Tierra del fuego corresponde a la zona con los mayores cambios superficiales de los Andes chilenos, ya sea por el gran tamaño que muchos glaciares poseen y las dinámicas de calving que se encuentran presentes en estos cuerpos de hielo (Barcaza *et al*, 2017).

2.1.2. GLOF en el contexto de cambio climático

El derretimiento de los glaciares en el mundo y en Chile ha provocado el incremento de amenazas asociadas a este fenómeno, tales como, expansión de lagos y fiordos, desprendimiento de hielo y aumento del desbordamiento repentino de lagos glaciares (GLOF) (Wang, Yang & Tao, 2011; Harrison *et al*, 2018; Bown *et al*, 2019).

Estas amenazas han estado caracterizadas por las nuevas dinámicas de hielo vistas en la Patagonia chilena, como el aumento de las velocidades de flujo, estiramiento longitudinal y adelgazamiento de la masa de hielo en la zona de ablación. Cabe destacar, que en esta región se ha observado altas tasas de adelgazamiento y derretimiento de los glaciares, y una disminución de elevación en la zona de plateau, causado por estas nuevas dinámicas en el hielo (Mouginot & Rignot, 2015).

Lo anterior, ha provocado un aumento importante en el desarrollo de lagos glaciares y su potencial vaciamiento repentino, en efecto, Osti & Egashira (2009) consideran que, en términos de daño potencial, los GLOF son la amenaza más importante causada por el retroceso glaciar (Worni *et al*, 2012).

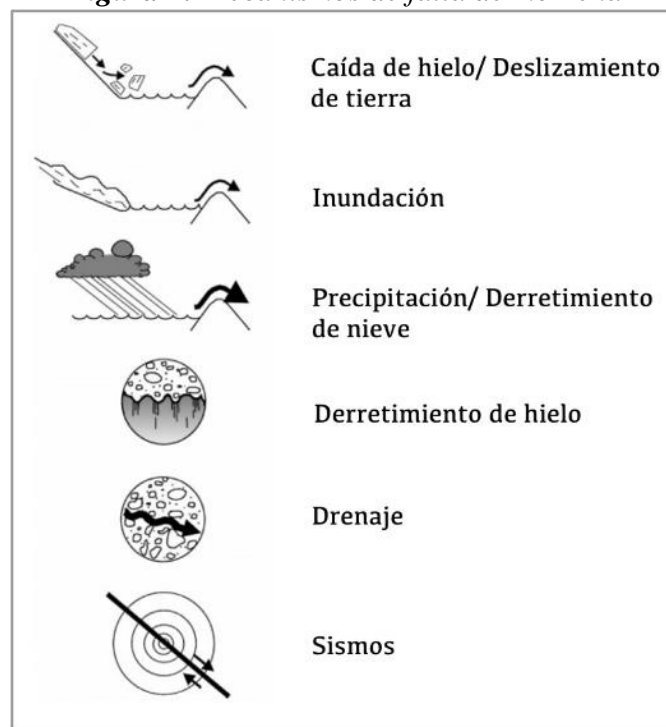
2.3. Factores gatillantes de GLOFs

2.3.1. Principales mecanismos de desencadenamiento de GLOF

Liu *et al* (2013) en un estudio sobre 20 eventos de GLOF ocurridos en los últimos 80 años en el Tibet, asevera que se presentan 2 principales mecanismos de desencadenamiento. El primero y mayoritario, corresponde al desbordamiento, el cual es generado desde una ola provocada por caída de nieve, rocas, partes de glaciár, entre otras, que generan una incisión en la morrena, ocasionando su colapso. La segunda, denominada “*piping*” se efectúa mediante la infiltración de agua dentro de la morrena, disminuyendo su estabilidad, hasta llegar a un punto límite de contención de agua.

En cambio, Clague & Evans (2000) indica 6 diferentes mecanismos de desencadenamiento de GLOFs -ver figura n° 2-, correspondientes a (1) caída de nieve o derrumbes, (2) desbordamiento, (3) lluvias intensas o derretimiento de nieve, (4) derretimiento de hielo, (5) “*piping*”, y (6) actividad sísmica.

Figura 2: Mecanismos de falla de morrena

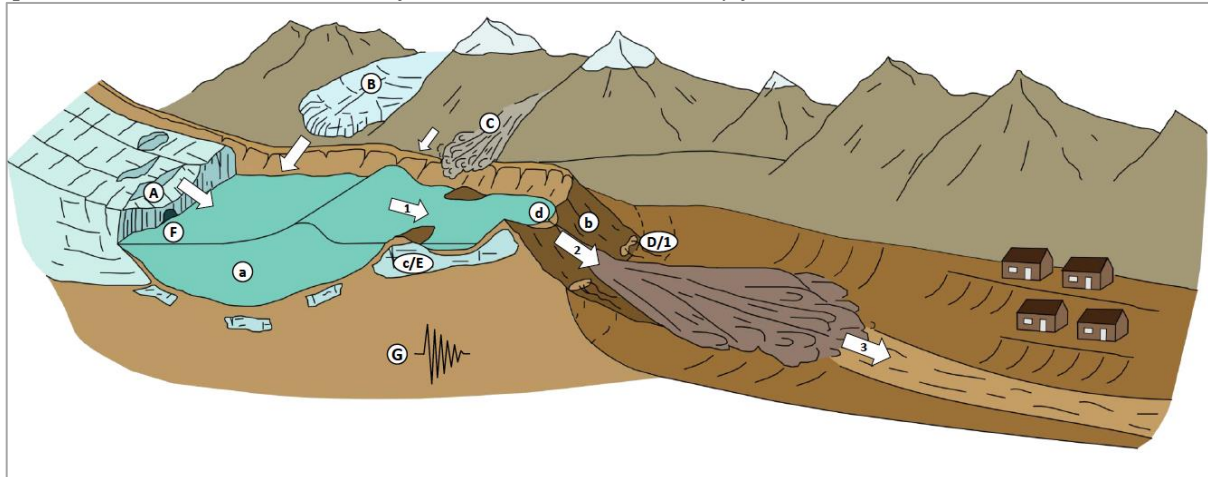


Fuente: Clague & Evans (2000), traducidos por la autora de esta memoria

Por otro lado, Westoby *et al.*, (2018) ilustra de manera más esquemática diferentes tipos de amenazas en lagos glaciares que pueden inducir a la generación de eventos de GLOF, clasificándolo en 3 principales categorías -ver figura n° 4-. La primera de ellas siendo, (1) los potenciales desencadenantes, los cuales coinciden de manera casi idéntica con los mencionados por Clague & Evans (2000), de igual manera, los autores mencionan los (2) factores condicionantes presentes pre-evento de GLOF, como el alto volumen de los lagos, la geometría

de la represa, especialmente cuando estos son de dimensiones más anchas en relación con su altura, entre otras cosas. Igualmente, estos autores identifican las (3) fases claves presentes durante un evento de GLOF, como lo son, la propagación de onda de desplazamiento, iniciación y formación de la ruptura, y la propagación de ondas resultantes. Este esquema da cuenta de la complejidad en la formación de eventos de GLOF, puesto que, existen diferentes procesos que pueden ocurrir simultáneamente durante el desencadenamiento de un evento de GLOF.

Figura 3: Esquema de amenazas en lagos glaciares represados por morrenas. Se destacan potenciales desencadenantes, factores condicionantes, y fases claves en un evento de GLOF



Fuente: Westoby *et al.*, 2017. Traducido por la autora de esta memoria. Los potenciales desencadenantes incluidos son: (A) procesos de "calving"; (B) caída de rocas por glaciares entrantes; (C) Avalanchas de hielo/roca/nieve; (D) Inestabilidad de la morrena y formación de canales en ella; (E) inestabilidad del núcleo de hielo en la morrena; (F) entrada rápida de agua al lago desde fuentes supraglaciares, proglaciares y subglaciares; (G) sismicidad; Los factores condicionantes por falla de represa incluidos son: (a) lagos con alto volumen; (b) baja relación ancho-altura de la morrena; (c) degradación del hielo enterrado en la estructura de la morrena; (d) francobordo⁷ de la represa limitada. Fases clave de un evento GLOF: (1) Propagación de onda de desplazamiento o *seiche* en el lago y/o formación de túneles dentro de la represa; (2) Iniciación y formación de la ruptura; (3) propagación de las ondas resultantes de la inundación aguas abajo.

2.3.2. Gatillantes climáticos de GLOF

Mecanismos de desencadenamiento como lluvias intensas o deshielo asociado a altas temperaturas, corresponde a los factores más influyentes en los eventos de GLOFs (Clague & Evans, 2000; O'Connor *et al.*, 2001; Worni *et al.*, 2012, citado por Allen *et al.*, 2015). Un ejemplo de esto se observa en los numerosos movimientos de masa en Kedarnath, India, causando por la temprana llegada de la lluvia monzónica al sector para junio del 2013, los que generaron la muerte de aproximadamente 6000 personas, y la destrucción de varias villas aguas abajo. Si bien, los eventos de GLOFs son recurrentes durante el *peak* de los meses monzónicos, siguen existiendo vacíos en la documentación de estos hechos (Allen *et al.*, 2015).

⁷ El francobordo corresponde al límite entre el nivel del lago y la morrena (Bahamontes, 2020).

Al efectuarse el desbordamiento del lago glaciar, las ondas de crecida pueden llegar a modificarse hacia otros tipos de flujos, generando que la crecida sea altamente erosiva y con una capacidad de transporte elevada (Emmer, 2017).

No obstante, no existe un proceso único de la ocurrencia de un desbordamiento, dado que, a largo plazo, factores como el derretimiento del glaciar, el impacto de la presión hidrostática y el paso del tiempo, provocan la falla de la represa, induciendo de forma dinámica y entrelazada, una degradación y variación en la pendiente de la morrena, cambios en su estructura interna, entre otras cosas (Emmer & Cochachin, 2013).

2.3.3. Relación entre precipitación y eventos GLOF

Factores como la precipitación o temperatura presentan un rol importante en las dinámicas glaciares, posicionando a la precipitación como factor responsable de diversos procesos en la zona oeste de la Patagonia. En una comparación de diferentes periodos secos y húmedos, indican que existe una tendencia al aumento de GLOFs de mayor magnitud en años con valores de precipitación altos (Vanderkerhove *et al*, 2020).

Asimismo, lo indica Walder & Driegder (1995), quienes en un estudio sobre la frecuencia de GLOFs en el Glaciar Tahoma Sur en Estados Unidos, concluyeron que la ocurrencia de estos eventos se encuentra relacionado a condiciones atípicas de clima. Un ejemplo de esto fue el GLOF ocurrido el 16 de octubre de 1988, el cual se generó durante un record de lluvias intensas entre el periodo 1986 y 1992, concluyendo que este suceso haya sido el gatillante de este evento.

2.3.4. Relación entre temperatura y eventos GLOF

De este mismo modo, se menciona que todos los eventos de GLOFs ocurridos en el Glaciar Tahoma Sur, fueron durante finales de verano y principios de otoño, relacionado así las condiciones de temperaturas más altas del año (Walder & Driegder, 1995).

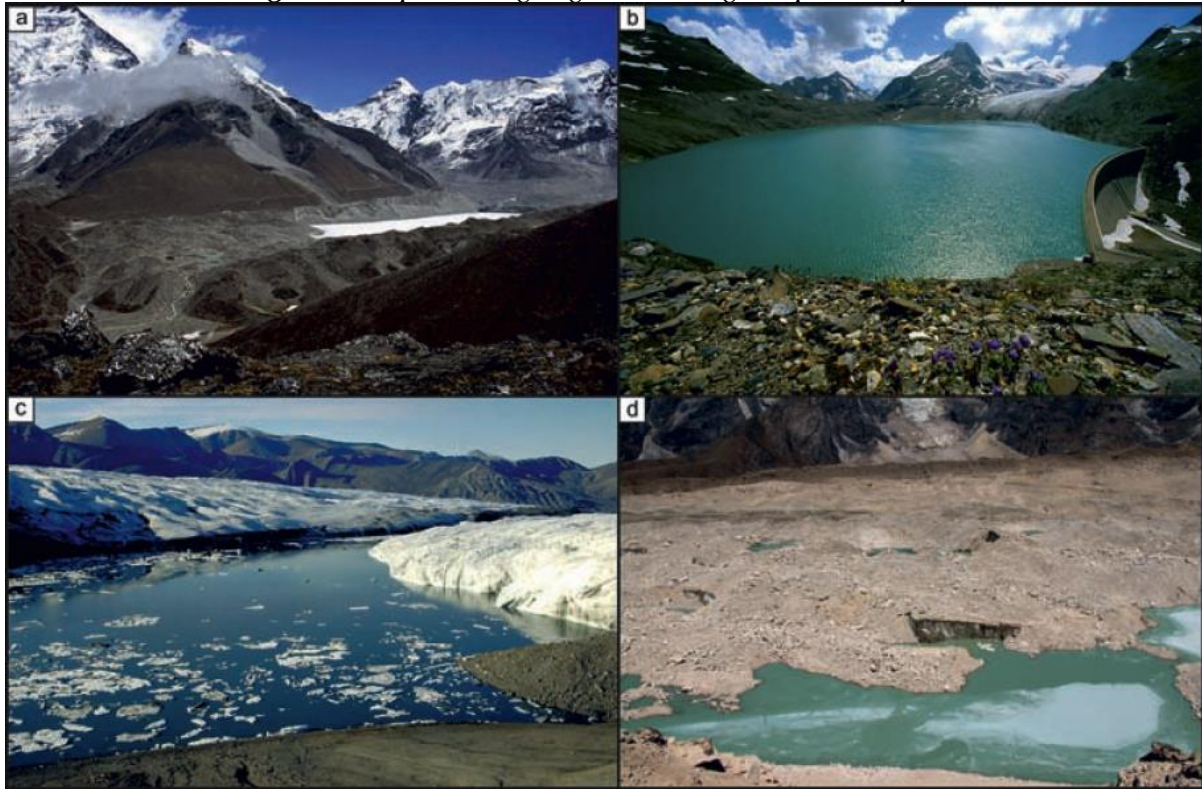
Otro ejemplo de la relación entre aumento de temperaturas y los eventos de GLOFs corresponde a los ocurridos en el Glaciar Kyagar en la cuenca del río Yarkant en el Karakoram chino, en el cual se han presentado decenas de GLOFs entre el periodo de 1880 y 2020. Es destacable que, desde la década de 1960, la frecuencia de GLOFs en este glaciar se ha incrementado, con un total de 6 vaciamientos absolutos del lago glaciar, en consecuencia del aumento de la temperatura del aire. En julio del 2018, se presentó un aumento constante de las temperaturas durante todo el mes, lo que provocó la falla de la represa por hielo el 10 de agosto del mismo año, generando la descarga súbita del agua contenida (Yin *et al*, 2018). Esto mismo lo indica Round *et al* (2017), en un estudio sobre este mismo glaciar, mencionando que existen factores meteorológicos como la temperatura, que pueden influir en el peak de la descarga.

2.3 Clasificación de lagos glaciares

Si bien, el fenómeno de GLOF se abarca como un proceso complejo, un aspecto a considerar a la hora de analizar estos eventos corresponde a la clasificación según el represamiento que presenten los lagos -ver figura nº 2- . Wilson *et al* (2018), distingue tres, (1) por morrenas terminales constituidas en el Máximo de la pequeña edad de hielo, (2) por barreras de roca y (3) por glaciares (hielo). Los lagos glaciares represados por morrenas pueden constituirse por una o más morrenas, que por lo general presentan lados escarpados, con una mala selección granulométrica y muy poco estables, incluso en algunas morrenas el 80% de material depositado son bloques y rocas de gran magnitud (Clague & Evans, 2000). Además, este tipo de represamiento se posiciona como la más inestable entre las tres, lo que la hace potencialmente más propensa al desbordamiento (Grabs & J. Hanisch, 1992), esta inestabilidad corresponde a la degradación gradual del permafrost en la masa morrénica, la infiltración de agua a través de los sedimentos y el rebasamiento influenciado por un derrumbe del glaciar (Quiney & Carrivick, 2018).

La formación de estos lagos derivado del derretimiento glaciar y de una intensa precipitación puede ser clasificado en cuatro categorías principales, como (1) lagos proglaciares, los cuales se encuentran por delante de la masa glaciar, (2) lagos supraglaciares, quienes se posicionan por encima del glaciar, los (3) lagos subglaciares, ubicados debajo del glaciar, entremedio de la roca y el hielo, y por último, los (4) lagos marginales, como su nombre dice, se encuentran por el borde del glaciar y comúnmente son represados por el mismo hielo (Quiney & Carrivick, 2018). Algunos ejemplos alrededor del mundo pueden verse a continuación -ver figura nº 4-.

Figura 4: Tipos de lagos glaciares según tipo de represa



Fuente: Quiney & Carrivick (2018); (a) Imja Tsho (Nepal), lago supraglacial que ha crecido desde una serie de pequeñas lagunas en la década de los 60', hasta llegar a un largo de >2km para la fecha. (b) Griessee, ocupa la extensión del LIA del Griegletsche, y ahora es una represa utilizada por la producción de energía hidro-eléctrica.

(c) un lago efímero represado por hielo atrapado entre los glaciares Thompson y el Blanco en la isla de Axel Heiberg en el Ártico Canadiense. (d) una pequeña laguna supraglacial sobre el glaciar Khumbu que actualmente ocupa una zona topográfica suprimida, y es muy probable que se expanda en los próximos años. Fuentes: (a) fotografiado por M. J. Hambrey, (b) fotografiado por J. Alean, (c) fotografiado por J. Alean, (d) fotografiado por D.J. Quincey.

2.4. Comportamiento de la descarga de flujos

La descarga de los flujos en los eventos de GLOFs dependen de (1) la hipometría inicial del lago y su volumen, (2) geometría de la represa, (3) la causa del mecanismo de falla, (4) la topografía del curso de agua, y (5) la disponibilidad de sedimentos (Quiney & Carrivick, 2018).

2.4.1. Comportamiento de descarga de flujos en lagos represados por morrena

Las descargas de flujos en lagos represados por morrena se caracterizan por presentar dos fases principales. La primera de ellas liderada por un aumento exponencial de la descarga de agua, asociada a una rápida y auto realizada incisión hasta llegar al máximo de la descarga total, el cual se concentra en un corto periodo de tiempo, seguida por una la fase final de decrecimiento gradual (Quiney & Carrivick, 2018).

La descarga en este tipo de represas frecuentemente descarga de manera más rápida debido a una mayor proporción en ancho que en alto, en conjunto a una composición no cohesiva de los sedimentos (Quiney & Carrivick, 2018).

2.4.2. Comportamiento de descarga de flujos en lagos sub-glaciares represados por hielo

Las descargas de lagos sub-glaciares represados por hielo se caracterizan por presentar una primera fase mucho más gradual en comparación a las descargas en represas por morrenas, llegando a presentar un mayor tiempo entre el comienzo de la descarga hasta el punto máximo de esta. Esta comienza de manera gradual dentro de las dos primeras semanas aproximadamente, hasta llegar a su valor máximo, en donde decrece relativamente rápido. Esto se debe a la geometría del canal de flujo por medio del hielo, el cual crece a medida que el agua genera el derretimiento de sus paredes y el cierre, debido al flujo constante de agua (Quiney & Carrivick, 2018).

2.4.3. Comportamiento de descarga de flujos en lagos glaciares represados por hielo

Por último, las descargas de flujos en lagos glaciares represados por hielo presentan una similitud importante con la descarga de lagos represados por morrena, debido a que presenta un aumento exponencial rápido hasta llegar al punto máximo. Estos lagos por lo general concentran grandes cantidades de agua, lo que generan un potencial riesgo hacia zonas aguas abajo (Quiney & Carrivick, 2018).

2.5. Evaluación de la Amenaza de GLOF

2.5.1. Experiencias de amenaza de GLOF en el mundo

El estudio y monitoreo de este tipo de amenaza ha sido de manera más abundante en regiones como Norte de Canadá, Himalaya o Norte de Europa (Huggel *et al.*, 2002). Una de las zonas especialmente afectada por la amenaza de GLOF corresponde a los Himalaya, en donde en sólo las últimas cinco décadas se han formado la mayoría de los lagos glaciares que existen actualmente, los cuales se posicionan detrás de morrenas con material glaciar poco consolidado, generando barreras inestables. El primer evento de GLOF reportado en los Himalaya de India remonta a 1926, quien dejó gigantescas destrucciones en la villa de Abudan, recorriendo 400 km desde la fuente del desbordamiento. Este último es uno de los centenares de ejemplos de este tipo de amenaza que existe en esta zona del mundo, en la que se han reportado más de 8000 lagos glaciares en la Región de Hindu Kush Himalayan (HKR), los cuales 209 son potenciales amenazas de GLOF, evidenciando la importancia del monitoreo y estudio de estos lagos (Mir *et al.*, 2018).

2.5.2. Experiencia de amenaza de GLOF en Chile

La condición montañosa de Chile, sumado a la presencia de dos campos de hielo en la zona Austral del país, ha significado el interés por el riesgo que pueda provocar el desbordamiento de lagos glaciares, en consecuencia, de la disminución de la masa de hielo que se ha venido produciendo en los últimos 100 años (Carrión, 2007). Si bien el análisis de GLOF no se ha desarrollado de manera idónea en las últimas décadas en el país, debido a la baja densidad poblacional presente en las áreas potencialmente amenazadas, ha aumentado el interés y la acción por la comprensión de este tipo de amenazas (Carrión, 2010).

Sumado a esto, Iribarren *et al* (2015) identificó a los GLOFs como amenazas existentes dentro de los Andes chilenos y argentinos, puesto que estos han ido incrementándose desde el máximo de la pequeña edad de hielo y su posterior derretimiento generalizado de los glaciares, lo que ha generado el aumento de lagos glaciares represados por morrena o por hielo. En este estudio se identificaron un total de 15 GLOFs originados en lagos represados por hielo que datan de 1788 en el Glaciar Grande del Nevado del Plomo, hasta la fecha de la publicación y 16 eventos de GLOFs originados por lagos represados por morrena, siendo el más antiguo el GLOF ocurrido en el Glaciar Piedras Blancas el 16 de diciembre de 1913.

Luego de esto, Wilson *et al* (2018) identificó 22 eventos de GLOF en los Andes, con fechas estimadas de ocurrencia amplias, con alrededor de 10 a 15 años de estimación de ocurrencia, e incluso más. Estos datan de 1952, ubicado en la latitud 42,43°S y 72°O, hasta el año 2016.

Además, se identificó el vaciamiento repentino de la Laguna el Triángulo en abril del año 2018, ubicado en el Valle los Exploradores. Esta laguna desde el año 1987 ha aumentado su tamaño en un 300%, y para la ocurrencia de este GLOF descargó un total de $20 \times 10^6 \text{ km}^3$ de agua (Iribarren *et al*, 2019b).

2.5.3. Metodologías de estudio de amenaza de GLOF

Se debe tener en cuenta que uno de los principales topes metodológicos por el cual el análisis de este tipo de amenaza es difícil de desarrollar, fue la alta dificultad que conlleva la accesibilidad a los puntos geográficos en los cuales ocurren los GLOFs. Sin embargo, el manejo de imágenes satelitales mediante plataformas SIG, y otras tecnologías, ha generado un acercamiento relevante hacia un monitoreo y estudio adecuado (Bolch, 2011).

De igual manera, en los últimos años, la modelación de estos eventos ha ido tomando fuerzas dentro del conocimiento académico. Schneider *et al* (2013), en un análisis de eventos en Carhuaz, Perú, ocupa fuentes como imágenes satelitales SPOT, modelos de elevación digital, y mediciones en terreno de la batimetría del Lago 513. Este análisis presenta como resultado 3 diferentes escenarios (“*small, medium and large*”), los cuales concentran avalanchas con volúmenes de 450.000, 1.000.000 y 3.000.000 de m^3 respectivamente, generando el desborde del lago. Los autores afirman que, si bien, este tipo de estudios son de ayuda para la toma de decisiones dentro de la gestión del riesgo, es necesario seguir aumentando la evidencia para poder concretar escenarios bien definidos. Existen varios ejemplos de este tipo de análisis

dentro de la literatura académica, Wang *et al* (2012), compara los modelos de elevación digital ASTER GDEM y SRTM, en el lago glaciar Longli Co, ubicado en el sureste del Tíbet, con el propósito de modelar los eventos de GLOF en este lago glaciar. Por otra parte, Carrión (2010), modela el posible vaciamiento del lago glaciar Greve en Patagonia chilena, utilizando fuentes como imágenes satelitales LANDSAT 5 y ASTER, y modelos de elevación digital SRTM.

Otro ejemplo en Chile ha sido la reconstrucción del GLOF ocurrido en el Río Engaño, ubicado en la cuenca del mismo nombre, el cual afectó a la Bahía Murta en marzo de 1977. Esta bahía se encuentra localizada al norte de la costa del Lago General Carrera, el cual, para la fecha concentraba un total 130 habitantes. La reconstrucción de este evento se realizó mediante tres fuentes principales. La primera a través de encuestas semiestructuradas a habitantes que vivieron el evento, la segunda por imágenes satelitales (Landsat MSS e imágenes de Google Earth) y fotografías aéreas, y, por último, modelando el GLOF mediante programas con capacidades 2d con fuentes de modelos de elevación digital (ASTER GDEM2 y el STRM DEM) (Iribarren *et al.*, 2015b).

Otra modelación realizada fue en el GLOF ocurrido en 1985 en la cuenca del Manflas, ubicado en la zona norte de los Andes, cercano al desierto de Atacama. Este GLOF fue originado en el Río Seco del Glaciar Tronquitos, caracterizado por un clima árido y de condiciones extremas. Las fuentes utilizadas fueron fotografías aéreas e información topográfica, además de información meteorológica de medidores de temperatura termistor impermeable, como también la medición de la temperatura del aire y humedad relativa con sensores ubicados a 1,8m sobre la superficie del glaciar. Se mapeó el GLOF sobre imágenes satelitales de Landsat MT, tomada 3 días después del evento, complementándolo con estudios de campo realizado por otros investigadores (Iribarren *et al.* 2018).

La modelación del GLOF fue construido por dos modelos empíricos y uno físico, con el fin de observar el rastro, la velocidad y la profundidad del GLOF. Las fuentes SRTM v4 y ASTER GDEM fueron utilizados para simular el evento, a los cuales se le hizo una comparación con la información provista de Peña y Escobar (1987). Esta modelación fue mediante los modelos RAMMS, LAHARZ y MSF (Iribarren *et al.*, 2018).

En síntesis, al evidenciar el creciente riesgo existente ante la amenaza de GLOF en Chile, ya sea en consecuencia de la disminución de los glaciares, o del aumento de exposición para infraestructuras o personas que desarrollan actividades recreativas, concluyen una necesidad por entender cada uno de los aspectos climáticas que puedan llegar a desencadenar un evento de crecida, debido a que el factor más influyente a la ocurrencia de GLOF es efectivamente las lluvias intensas y el derretimiento de nieve (Allen, 2016).

Capítulo 3: Planteamiento metodológico

El desarrollo metodológico de este estudio se llevó a cabo mediante los tres objetivos específicos descritos en el apartado de objetivos. La realización de estos fue principalmente a través de sistemas de información geográfica tales como Qgis, programas de procesamiento de códigos tales como Google Earth Engine y Anaconda (Jupyter), y programa de hoja de cálculo para el desarrollo analítico, tales como Excel. El resumen de las metodologías ocupadas se encuentra disponible en la figura n° 6, 8 y 10 de este informe.

3.1. Catastrar GLOFs ocurridos en Patagonia mediante caracterización geomorfológica e identificación de disturbios en vegetación ripariana

3.1.1. Identificación de rastro erosivo de GLOFs

Autores tales como Iribarren *et al.*, (2015)a, Wilson *et al.*, (2018), Iribarren *et al.*, (2019)a, Iribarren *et al.*, (2019)b, han inventariado más de 20 eventos GLOFs de lagos represados por morrena en la Patagonia. No obstante, la identificación de las fechas de ocurrencia de estos eventos ha sido imprecisa y muchas veces con rangos de tiempo muy amplios. Autores como Leinss *et al.* (2020) han datado estos eventos mediante el análisis geomorfológico de sus depósitos con imágenes satelitales, los cuales utilizan índices espectrales de vegetación para datar o registrar impacto de los eventos de GLOF en la vegetación ripariana.

En una primera instancia, se delimitaron las rutas de los eventos de GLOFs a través de la fotointerpretación e identificación de zonas con pérdida de vegetación o depósito de materiales producto de la crecida. Las fuentes utilizadas fueron los satelitales de Landsat 5 y Landsat 8, dependiendo si las fechas estimadas –ver anexo n° 1, 2 y 3- de ocurrencia de cada evento era pre o post 2013, año que los satélites cambian.

Lo anterior se realizó mediante el programa *Google Earth Engine* –ver anexo 5a-, en donde se llevó a cabo la descarga de imágenes satelitales por cada uno de los eventos GLOFs, eligiendo la imagen más cercana a las fechas estimadas -ver anexo n° 4.

Cabe destacar que las imágenes utilizadas fueron extraídas desde las colecciones Landsat 5 del USGS, denominada “LANDSAT/LT05/C01/T1_SR”, el cual corresponde a imágenes satelitales de reflectancia superficial con corrección atmosférica del sensor ETM, del nivel 1, el cual presenta un total de 9 bandas espectrales y una resolución espacial de 30m. Esta colección ha recolectado imágenes desde 1984 hasta el 2012 (Google Developers, 2012).

Por otra parte, se ocuparon imágenes de la colección de Landsat 8 del USGS (“LANDSAT/LC08/C01/T1_SR”), correspondiente a imágenes de reflectancia superficial con corrección atmosférica de los sensores OLI/TIRS. Esta colección presenta un total de 12 bandas espectrales y una resolución espacial de 30m, el cual ha recopilado imágenes desde el 2013 hasta la fecha (Google Developers, 2013).

Una vez ya descargada las imágenes para cada uno de los GLOF catastrados en bibliografía, en el programa Qgis 3.14 se delimitaron mediante fotointerpretación cada uno de los rastros de los eventos GLOFs, generando así un shapefile de polígonos.

3.1.2. Cálculo de índice NDVI

Con el fin de identificar disturbios ocurridos en la vegetación ripariana de cada uno de los GLOFs, lo cual podría dar cuenta de la ocurrencia de estos eventos debido al alto poder erosivo que presentan, se analizó la presencia de masa de vegetación mediante el cálculo de NDVI.

En primer lugar, mediante el programa *Google Earth Engine*, se utilizó nuevamente el archivo shapefile creado en la fotointerpretación del rastro erosivo de los GLOF, con el fin de calcular el índice NDVI promedio del polígono –ver anexo n° 5b-. Cabe recalcar que, el índice de vegetación NDVI está compuesto por la banda roja e infrarrojo cercano, las cuales miden biomasa fotosintéticamente activa, abundancia de la clorofila y la absorción energética (Tucker *et al*, 2013), calculadas por la siguiente ecuación -ver figura n° 5-:

Figura 5: Ecuación de índice NDVI

$$NDVI = \frac{(\text{infrarrojo cercano} - \text{rojo})}{(\text{infrarrojo cercano} + \text{rojo})}$$

Fuente: Tucker *et al* (2013)

El cálculo del índice NDVI fue realizado en base a la colección de imágenes MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), los cuales son instrumentos claves dentro de los satélites Terra y Aqua de la NASA. Estos se encuentran cronometrados para pasar a través de toda la superficie terrestre, presentando una frecuencia temporal de 1 a 2 días. Posee una resolución espectral de 36 bandas, y obtiene datos en 3 resoluciones espaciales, 250m, 500m y 1000m. Este tipo de imagen satelital da como resultado una vasta lista de productos, ya sea de la tierra, océano, atmósfera, criosfera, entre otros (NASA, 2006).

La colección de MODIS utilizada en específico fue “MODIS/006/MOD09GQ”, la cual corresponde a imágenes satelitales de reflectancia de la superficie terrestre en su versión número 6, presentando un total de 2 bandas espectrales de 250m de resolución espacial, además de una resolución temporal diaria.

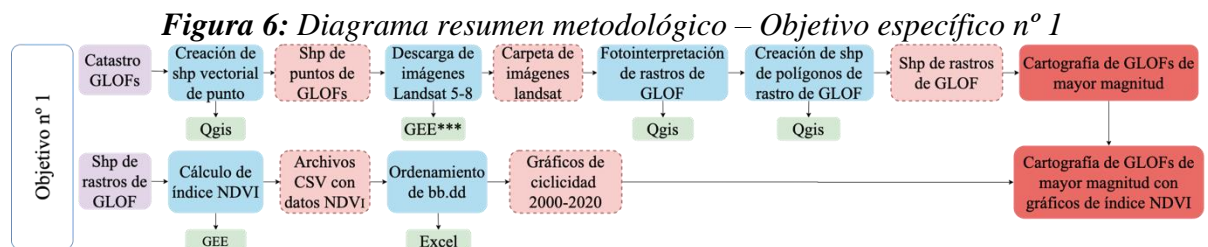
Esta colección de imágenes satelitales al no presentar la banda NDVI como otras colecciones, fue necesario calcularla y crearla para cada una de las imágenes dentro de la colección, como se puede observar en el anexo n° 5b. Este cálculo se realizó mediante la fórmula de la figura n° 5, en donde, la banda de infrarrojo cercano corresponde a la banda n° 2 de la colección, y la banda roja corresponde a la banda n° 1 de la colección.

Una vez ya realizado esto, se seleccionó esta nueva banda creada y se calculó para cada uno de los GLOFs en el periodo del año 2000 (específicamente 24-01-2001) hasta el presente (específicamente 14-11-2020).

La creación del gráfico en la consola de *Google Earth Engine*, permitió la descarga de base de dato en formato CSV, las cuales fueron ordenadas y procesadas en el programa Excel. Este ordenamiento de la base de datos se llevó a cabo debido a la ausencia de algunas fechas aleatorias (mínimas) dentro de la base de datos.

Una vez ordenada la base de datos, se llevó a cabo la realización de gráficos, dándose cuenta de la estacionalidad del cálculo de índice NDVI para cada uno de los 20 GLOFs.

La delimitación de rastros de GLOFs en conjunto a la generación de gráficos en Excel, conformaron cartografías realizadas en Qgis 3.14, con el fin de poder visualizar de manera gráfica y comparativa, el cálculo de NDVI -ver figura nº 6.



Fuente: Elaboración propia (2021)

3.2. Caracterizar patrones de precipitación y temperatura asociados a GLOFs en Patagonia.

Con el objetivo de divisar las condiciones de precipitación y temperatura en cada uno de los GLOFs con fechas ya identificadas, se generaron diversos gráficos como resultados de métodos que serán descritos a continuación.

3.2.1. Caracterización de patrones de precipitación

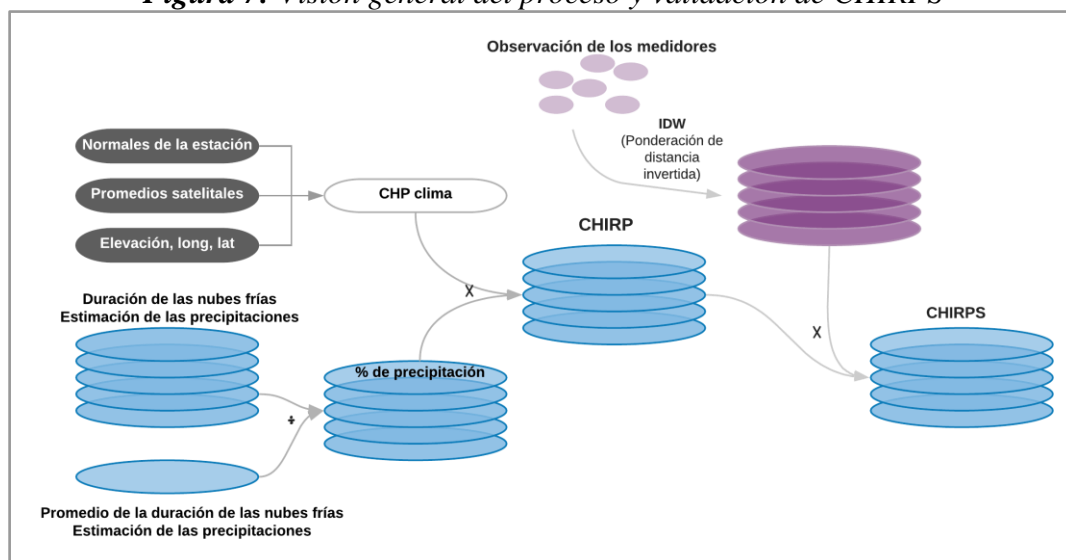
La caracterización de precipitaciones se llevó a cabo principalmente desde fuentes de imágenes satelitales como CHIRPS, y programas como Jupyter Notebook, Qgis y Excel, dando como resultados gráficos que dan cuenta de las condiciones una semana previa a los eventos de GLOFs, como también histogramas.

En primer lugar, se creó de un archivo shapefile vectorial de polígonos, el cual abarca toda la zona del GLOF. Seguido a esto, se llevó a cabo la extracción de vértices a través del programa Qgis 3.14, para así obtener un shapefile vectorial de puntos. Una vez obtenido el shapefile de puntos, mediante el programa Anaconda en su versión 2020.07, y la aplicación Juyter Lab

2.1.5, se llevó a cabo la descarga de imágenes CHIRPS dentro del periodo 1981 hasta la fecha -ver anexo 4a-.

Las imágenes satelitales CHIRPS (*Climate Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data*), ha recopilado desde el año 1981 datos de precipitación en casi todo el mundo a nivel diario, específicamente entre las latitudes 50°N y 50°S, a través de todas las longitudes. Este presenta una resolución espacial de 0,05° (5,6 km aproximadamente) y se basa en una técnica de interpolación inteligente, al mismo tiempo, contrasta y combina con los datos obtenidos de estaciones meteorológicas de alrededor del mundo. Este database -ver figura n° 7- corrige y valida los datos a través del procesamiento de inputs de CHPclim y porcentajes de precipitación, en conjunto a una interpolación IDW (*inverse distance weighting*), dando como resultado una grilla de series de tiempo de precipitación denominada CHIRPS (Funk *et al*, 2015; Rivera, Marianetti, Hinrichs, 2018). La colección utilizada en específico fue “UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY”, el cual presenta una banda llamada “precipitación”, en unidad de mm por día.

Figura 7: Visión general del proceso y validación de CHIRPS



Fuente: Funk *et al*, 2015. Traducido por la autora de esta memoria.

Ya obtenida la carpeta con cada una de las imágenes del periodo, mediante el programa OSGeo y Jupyter notebook, el cual permite el procesamiento de proyectos GIS, se realizó la extracción de valores de precipitación “*raster sampling*”, en un punto aleatorio dentro del área afectada por cada GLOF, para cada una de las imágenes de la carpeta CHIRPS –ver anexo n°4b-. Como resultado, se obtuvo un dataframe con datos de precipitación desde 1981 hasta la fecha, el cual fue descargado en formato CSV, para así ser procesado en el programa Excel.

Con la finalidad de conocer si las precipitaciones asociadas a eventos de GLOFs en Patagonia corresponden a eventos extremos, se calculó el percentil 90 (P90), el cual es un valor sugerido por el IPCC para identificar eventos meteorológicos extremos (IPCC, 2018). Además, en base a lo visto por Alfaro (2014), se calcularon los percentiles 70 y 80 de todo el periodo, con el fin

de caracterizar las lluvias extremas dentro de categorías cualitativas, categorizándolas desde extremadamente lluvioso por sobre el P90 a lluvias usuales bajo el P70 -ver tabla n° 2-.

Tabla 2: Caracterización de eventos extremos de precipitación (pp).

<i>Umbrales de precipitación</i>	<i>Caracterización de lluvias extremas</i>
pp/día \geq P90	Extremadamente lluvioso
P90 > pp/día \geq P80	Muy lluvioso
P80 > pp/día \geq P70	Lluvioso
P70 > pp/día	Lluvia usual

Fuente: Elaboración propia (2021), en base a Alfaro (2014).

Por último, desde los archivos CSV, se graficó el histograma de cada uno de los GLOFs en la plataforma de Anaconda -ver anexo n° 4c-, con el fin de observar en comportamiento de los datos de precipitación.

3.2.2. Caracterización de patrones de temperatura

Uno de los fenómenos asociados a la ocurrencia de GLOF corresponde al deshielo asociado al aumento de temperaturas en zonas glaciares, lo que resulta en el aumento del nivel del lago, generación de avalanchas, entre otras (Westoby *et al.*, 2017; Yin *et al.*, 2018). Es por esto, que se analizaron los datos de temperatura en los 4 GLOF durante el periodo de 1979 al 2020, con el propósito de analizar los patrones de temperatura presentes durante los eventos de GLOF.

Como se puede observar en el resumen metodológico -ver figura n° 8-, el archivo shapefile de puntos de vértices, también fue utilizado para el cálculo de patrones de temperatura. Con este shapefile ya obtenido, se descargaron las imágenes de la colección “NOAA/CFSV2/FOR6H”, la cual corresponde a datos obtenidos del Centro Nacional de la Predicción Medioambiental (NCPE, *en sus siglas en inglés*), en su versión número 2, con una frecuencia temporal de 6 horas. Para la descarga de esta colección, fue utilizado el mismo código que para la descarga de archivos CHIRPS en Anaconda y Jupyter Lab, sólo diferenciándose por el cambio de colección de imágenes y selección de banda. Esta colección presenta un total de 22 bandas, entre las cuales se encuentra, presión de la superficie, altura geopotencial, entre otras. La seleccionada para este estudio fue la temperatura a altura sobre el suelo, específicamente a 2 metros del suelo, y con unidad de medida en grados Kelvin.

El database CFSv2 (Sistema de pronóstico del clima o *Climate forecast system* en inglés, en su versión n° 2), corresponde a una modelo global de la interacción de los océanos, la tierra y la atmósfera, guiado por científicos del Centro Nacional de la Predicción Ambiental (NCEP). El sistema de pronóstico climático fue utilizado por primera vez con el CFSv1, en agosto del 2004, el cual fue un modelo casi global del acoplamiento de la tierra, océano y atmósfera, sin embargo, este fue reemplazado por su versión n° 2 para el año 2011. Esta versión trajo

innovaciones como un modelo de suelo de 4 niveles, un modelo de interacción hielo-mar de 3 capas y las concentraciones de CO₂, incluyendo una de sus funciones más importante, el reanálisis del acoplamiento de tierra, océano y atmósfera de 1979 al 2011, con el propósito de definir pronósticos retrospectivos, resultando el CFSR (Re análisis del Sistema de pronóstico del clima) (Saha *et al*, 2011). Para este trabajo en específico, con el fin de analizar la temperatura de cada uno de los eventos de GLOF, se ocupará el producto de pronóstico de 6 horas (0000, 0600, 1200, 1800 UTC).

Una vez ya obtenido la carpeta con los archivos CFSv2, se efectuó la extracción de valores mediante el mismo código utilizado para los archivos CHIRPS –ver anexo n° 4b-, a través de OSGeo y Jupyter Notebook. En ese programa se descargó el dataframe creado, en formato CSV, para así poder ser procesado mediante el programa Excel.

Dentro del programa Excel, se calculó el percentil 90 de todo el periodo con el fin de identificar eventos extremos de precipitación (IPCC, 2018), agregando el cálculo de P70 y P80, para así, obtener rangos de eventos de temperatura, categorizando cada uno en categorías que van desde el extremadamente cálido por sobre el P90 y a temperaturas inferiores por debajo del P70 -ver tabla n° 3-. Con esto se generaron gráficos de la semana anterior a la ocurrencia del GLOF, con el fin de obtener datos en detalle en días previos al evento.

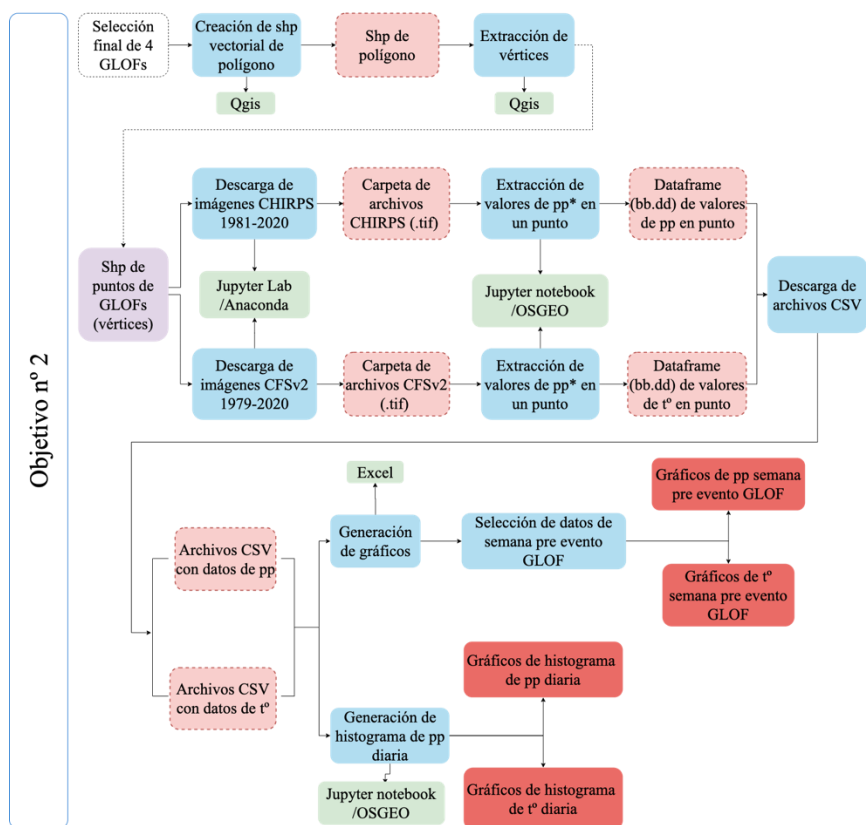
Para finalizar, en la plataforma Anaconda -ver anexo n° 4c-, se graficaron los histogramas de cada uno de los GLOFs, con el fin de observar en comportamiento de los datos de temperatura.

Tabla 3: Caracterización de eventos extremos de temperatura (t°)

Umbral de temperatura	Caracterización de temperaturas extremas
$t^{\circ} \geq P90$	Extremadamente cálido
$P90 > t^{\circ} \geq P80$	Muy cálido
$P80 > t^{\circ} \geq P70$	Cálido
$P70 > t^{\circ}$	Inferior

Fuente: Elaboración propia (2021), en base a Alfaro (2014).

Figura 8: Diagrama resumen metodológico - Objetivo específico n° 2



Fuente: Elaboración propia (2021)

3.3. Comprender las implicancias del cambio global en la ocurrencia de GLOFs en Patagonia

3.3.1. Descarga de modelos de elevación digital

El análisis y caracterización de la impronta geomorfológica de los eventos de GLOF seleccionados, se llevó a cabo mediante la utilización de modelos de elevación digital, en complemento con subproductos derivados de él y una fotointerpretación de imágenes satelitales compuesta en color verdadero (RGB) y el cálculo de NVDI.

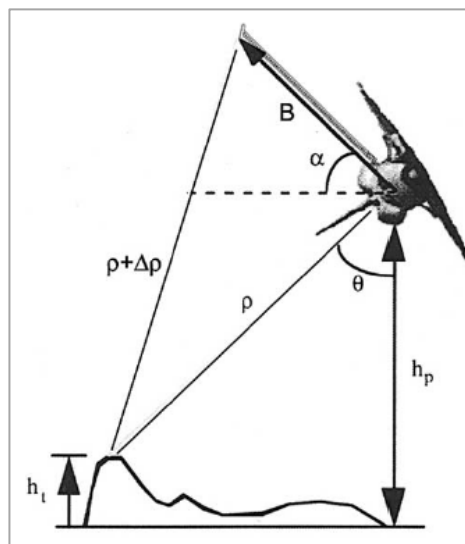
En primer lugar, se llevó a cabo la descarga de un modelo de elevación digital correspondiente al *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de la NASA, el cual presenta una resolución espacial de 30m aproximadamente. Este fue lanzado en febrero del 2000, en una colaboración de la NASA, *The National intelligence agency* y la *DLR* (Agencia espacial alemana). El objetivo de esta misión fue obtener datos cuasi globales de elevación (topografía) de la superficie terrestre, específicamente entre las latitudes 60°N y 56°S, el cual abarca aproximadamente el 80% de la superficie planetaria (Farr *et al*, 2007).

En términos operacionales, el SRTM ocupa dos aperturas de radar sintéticas, siendo el sistema de banda C y el sistema de banda X (existe un tercer sistema “L”, pero este no fue utilizado). La banda C fue llevada a cabo por *NASA’s jet Propulsion Laboratory (JLP)*, mientras que la banda X fue encargado al DLR. La ejecución de estas bandas generó mapas contiguos a diferentes resoluciones para casi toda la superficie terrestre, dado que la Banda X presenta una resolución ligeramente mejor que la banda C, generando así, mapas topográficos contiguos (Farr *et al*, 2007).

Los radares son instrumentos que miden una dimensión (en su definición más básica), sin embargo, en conjunto con un instrumento móvil, esta captura información en dos dimensiones -ver figura nº 9-. Para obtener una tercera dimensión, los radares ocupan el principio de interferometría, el cual, mediante la utilización de dos radares desde una misma antena, pueden medir simultáneamente hacia dos puntos diferentes, generándose así, un triángulo denominados “triángulo interferométrico”, el cual mide con precisión la altura de un punto dado (Farr *et al*, 2007).

Se llevó la descarga de dos imágenes SRTM, una para el GLOF del Glaciar Ventisquero Negro, y otra para los otros 3 GLOFs, dado que se encuentran cercanos unos del otros. Esta descarga fue mediante la plataforma de “Explorer” de *Google Earth Engine*, específicamente la colección denominada “CGIAR/SRTM90_V4”, con un tamaño de píxel de 90 m y una única banda de elevación. Este DEM derivó dos subproductos necesarios para la identificación de geoformas, siendo la generación del *Hillshade* y curvas de nivel.

Figura 9: La geometría del interferómetro SRTM



Fuente: Farr *et al*, 2007

3.3.2. Descarga de imágenes de reflectancia superficial

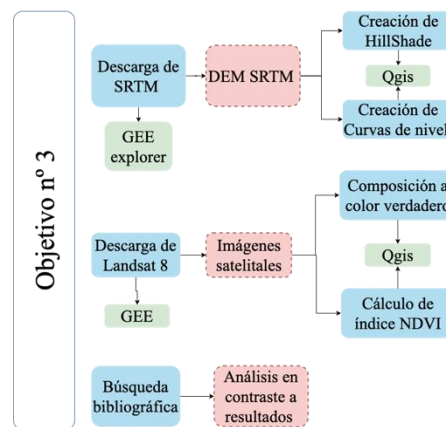
Además de esto, fue utilizado imágenes Landsat 8 de la colección “LANDSAT/LC08/C01/T1_SR”, con una resolución de 30 m, descargando las bandas 2, 3, 4

y 5 (RGB e infrarrojo cercano). Esta descarga fue mediante la plataforma de editor de código de *Google Earth Engine*, y al igual que la descarga del SRTM, solo se llevó a cabo la descarga de dos imágenes. Con estas imágenes, se compuso el color verdadero y el cálculo de NDVI con el fin de observar la abundancia de vegetación, importante de identificar en eventos de crecida como los GLOFs (Google Developers, 2013).

3.3.3. Consulta bibliográfica de cambios globales en Patagonia

Este objetivo se realizó mediante la búsqueda bibliográfica atinentes a las modelaciones y proyecciones realizadas en Patagonia en un futuro cercano (2050). Fuentes bibliográficas como el Ministerio del Medio Ambiente (MMA) de Chile, quien en los últimos ha realizado una serie de estrategias y planes nacionales, con el fin de establecer protocolar en pos a la disminución de gases de efecto invernadero, en el cual Chile ha firmado un compromiso (MMA, 2017). Otra de las fuentes utilizadas fue el (CR)², institución de la Universidad de Chile, quien tiene como propósito generar ciencia relacionada al clima y la resiliencia ((CR)², 2013).

Figura 10: Diagrama resumen metodológico - Objetivo específico n° 3



Fuente: Elaboración propia (2021)

Capítulo 4: Resultados

4.1. Catastro de GLOFs ocurridos en Patagonia mediante caracterización geomorfológica e identificación de disturbios en vegetación ripariana

4.1.1. Caracterización geomorfológica e identificación de disturbios en vegetación ripariana

La caracterización de la impronta geomorfológica de los GLOFs en Patagonia se llevó a cabo mediante la descarga de imágenes satelitales y la delimitación de la zona erosiva, producto de la crecida del evento. Se seleccionaron un total de 20 GLOFs, los cuales 19 de ellos fueron posterior al 2000, siendo Cerro Largo el único previo a esta fecha (1989) -ver tabla n° 4-.

Tabla 4: Catastro de eventos de GLOFs en Patagonia⁸

1. Estero el Blanco	2. Río Los Leones	3. Seno Mayo
4. Glaciar Olvidado	5. Península las Montañas	6. Glaciar Ventisquero Negro
7. Río Lacaya	8. Río Huiña	9. Glaciar Bernardo
10. Río Turbio	11. Cerro Largo	12. Laguna Espontánea
13. Laguna el Triángulo	14. #1	15. #2
16. #3	17. #4	18. #5
19. #6	20. #7	

Fuente: Elaboración propia (2021)

En la figura n° 8 se puede observar el GLOF del Río Lacaya con un total de 62.6 há de zona erosionada afectada y un total de 15.9 há de superficie lacustre. Este evento tiene una fecha de ocurrencia estimada entre los años 2000 y 2001 –ver anexo n° 1a-, realizándose su fotointerpretación en una imagen Landsat 5 con fecha del 31 de diciembre del 2009.

Este presentó una tendencia estacional de los valores de NDVI durante todo el periodo medido, aumentando a los meses de verano y parte de otoño, llegando a sus máximos entre los meses de enero y mayo, y decayendo entre los meses de junio y agosto, donde se muestran los valores mínimos anuales. Se observan dos valores atípicos importantes durante el periodo estudiado, correspondientes a mediados del año 2004, y principios del año 2014, sin embargo, no corresponden a una tendencia del cual pueda significar un cambio relevante en la vegetación.

Por otro lado, en esta misma figura -n° 11- se puede observar el GLOF correspondiente al Glaciar Olvidado, el cual presenta una fecha de ocurrencia estimada para el año 2003 –ver anexo n° 1a-, realizándose una fotointerpretación en una imagen Landsat 8 del 3 de marzo del 2019. Este presenta una superficie erosionada de 73.8 há, y un área lacustre total de 120.4 há.

Al igual que lo observado en el GLOF anterior, este presenta una tendencia estacional en los valores de NDVI durante todo el periodo. En términos de comportamiento anual, los valores máximos se observaron durante los meses de enero y abril (verano y principios de otoño), presentando valores mínimos entre los meses de marzo y septiembre, intensificándose en los meses de julio y agosto.

De este mismo modo, se encuentra el GLOF del Glaciar Ventisquero Negro, el cual tiene una fecha de ocurrencia para el 21 de mayo del 2009, la fotointerpretación de este GLOF fue realizado en una imagen Landsat 5 con fecha del 6 de diciembre del 2009. Este GLOF presenta un total de 50 há de área erosionada, además de 60 há de superficie lacustre.

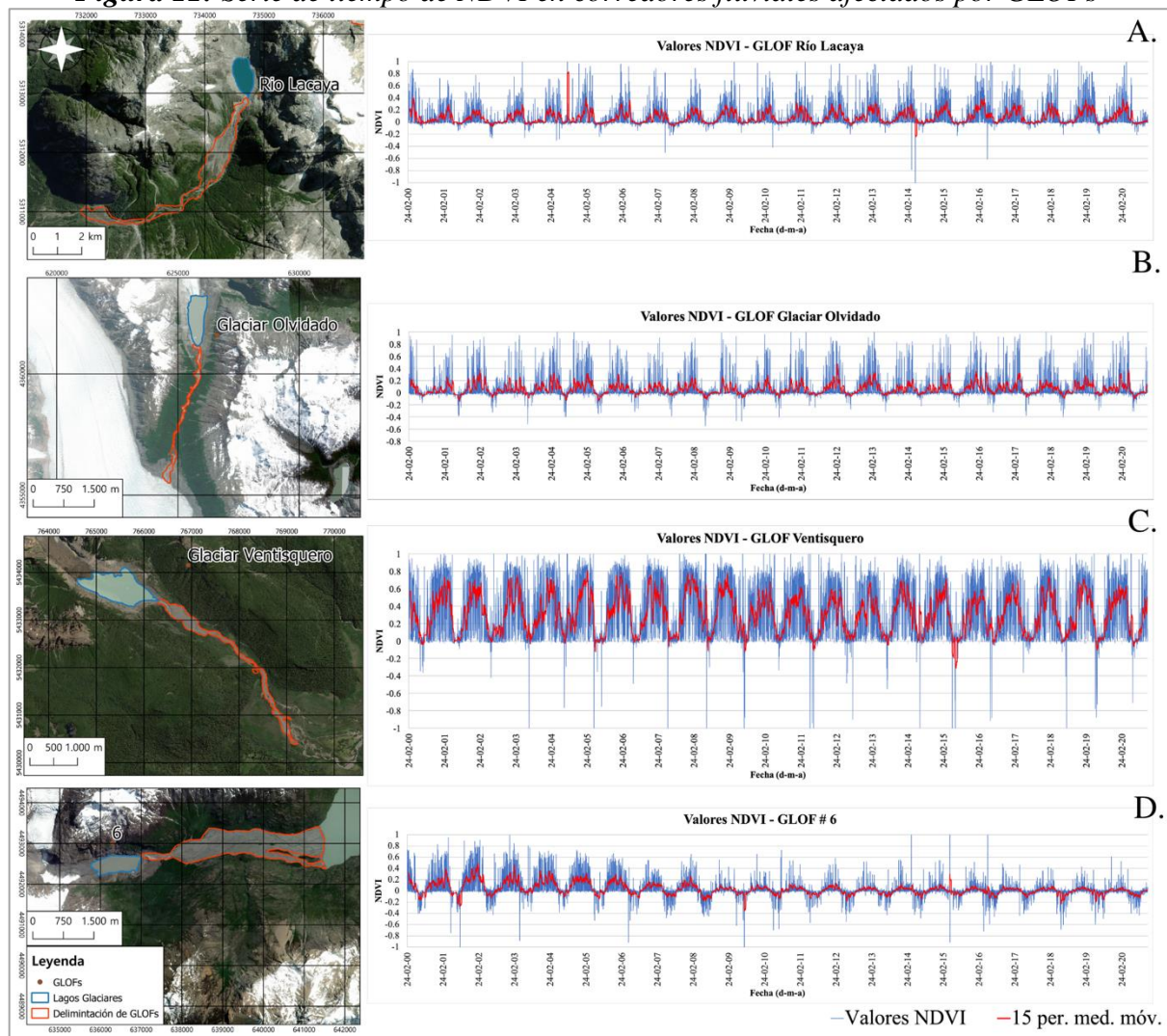
En cuanto al comportamiento de la vegetación visto mediante el índice NDVI, presenta una tendencia estacional durante todo el periodo medido, no obstante, presenta valores mas altos en la temporada de verano en comparación a los otros eventos mencionados. Este presenta

⁸ Los GLOF denominados con número corresponden a eventos que no se encuentran cercanos a topónimos identificativos

valores mínimos durante los meses de julio y agosto, mientras que se mantiene parejo durante el resto del año. Sólo se observa una decaída para mediados del año 2015, sin embargo, no representa una tendencia en los valores del índice.

Para finalizar, se encuentra el GLOF denominado como “6” –ver anexo n° 1b-, el cual presenta una fecha estimada de ocurrencia entre el 16 de junio del 2001 y 22 de octubre del 2014, realizándose la delimitación de la zona erosiva y del lago glaciar sobre una imagen Landsat 8 con fecha del 4 de febrero del 2017. El área erosionada de este GLOF contiene un total de 220,2 há, siendo el mayor entre los 4 GLOFs de la figura n° 11, y con una superficie lacustre de 42.3 há.

Figura 11: Serie de tiempo de NDVI en corredores fluviales afectados por GLOFs



Fuente: Elaboración propia (2020). (A) Serie de tiempo de NDVI en corredor fluvial en Glaciar Río Lacaya ocurrido entre los años 2000 y 2001, (B) serie de tiempo de NDVI en Glaciar Olvidado con fecha de ocurrencia para el año 2003, (C) serie de tiempo de NDVI en Glaciar Ventisquero Negro ocurrido el 21 de mayo del 2009, (D) serie de tiempo de NDVI en GLOF #6 con fecha de ocurrencia entre el 12/03/2001 y 22/10/2014.

El comportamiento del índice NDVI en este GLOF se observa desigual a los eventos anteriores, puesto que en este es posible divisar una tendencia a la baja significativa desde el año 2008,

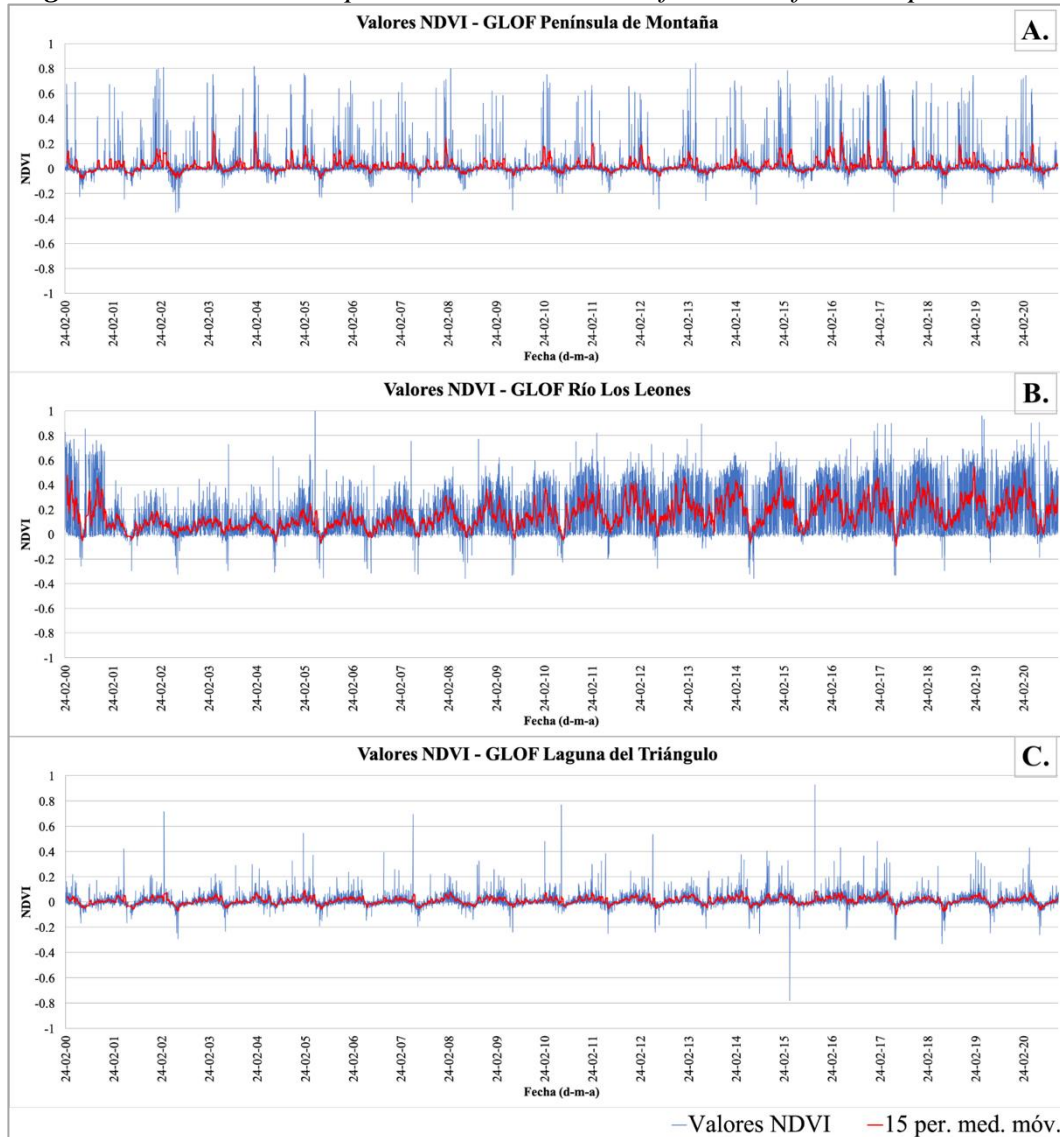
aunque, esta se observa desde el año 2003 de manera menos pronunciada. No obstante, es posible observar un patrón estacional anual, puesto que al igual que los GLOF anteriores, los valores máximos se encuentran en los meses de verano, y los mínimos en los meses de invierno, aun cuando, para los años posteriores al 2009, los cambios de estacionalidad son bajos.

En cuanto a otros GLOFs –ver figura n° 12-, se puede observar la continuidad de una tendencia estacional en cada uno de ellos, presentándose tanto en el GLOF del Triángulo como la península de montaña, sin variación abrupta de tendencia durante todo el periodo estudiado. Por el contrario, el GLOF correspondiente al río los Leones, se observa una baja entre el año 2001 y 2002, continuando la tendencia hasta aproximadamente el año 2005/06, en donde los valores del índice vuelven a comportarse de igual manera en comparación a los años 2000/01.

Es destacable que para el evento de GLOF de la Laguna el Triángulo, el cambio anual de los valores es poco acentuada, en comparación a otros GLOFs vistos, por lo general, estos valores no suben de 0.4-0.5 aproximadamente.

En términos generales, no fue posible identificar las fechas de ocurrencia de ninguno de los eventos de GLOF que presentaban fechas estimadas, puesto que, en ninguna se marco la interrupción de los valores de NDVI de manera clara, por lo que, se trabajó con cuatro GLOF con fechas ya identificadas.

Figura 12: Series de tiempo NDVI de Corredores fluviales afectados por GLOFs



Fuente: Elaboración propia (2020). (A) Serie de tiempo de NDVI en corredor fluvial en Península de Montaña, (B) serie de tiempo de NDVI en Río Los Leones, (C) serie de tiempo de NDVI en Laguna del Triángulo.

4.2. Caracterización de patrones de precipitación y temperatura asociados a GLOFs en Patagonia

4.2.1. Caracterización de precipitaciones

La caracterización de precipitaciones se llevó a cabo a través de la generación de gráficos, los cuales informan de las condiciones de precipitación una semana previa a los cuatro eventos de GLOFs estudiados, este dato corresponde a la acumulación de precipitación obtenidas cada día. Además de esto, la base de datos obtenida fue ordenada mediante un histograma, el cual presenta como propósito analizar el comportamiento de los datos, mediante diferentes valores estadísticos.

a. GLOF Glaciar Ventisquero Negro

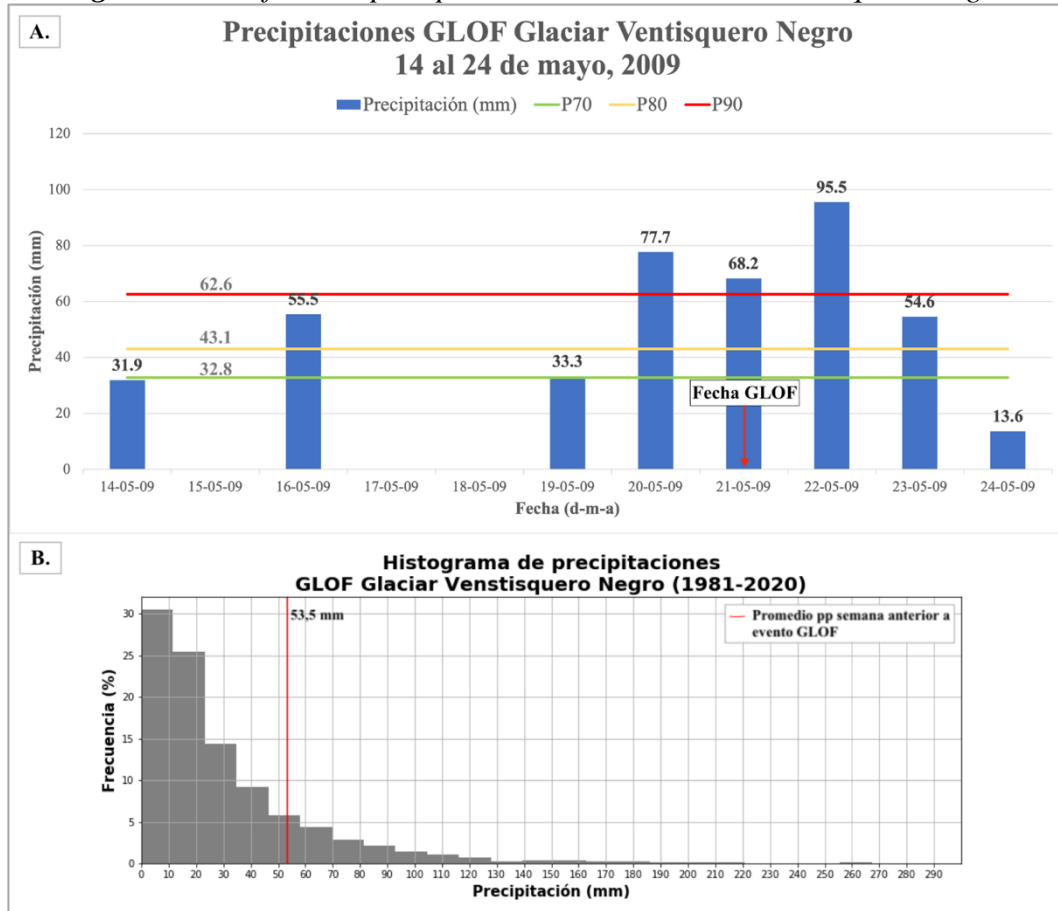
De acuerdo con los resultados de precipitación obtenidos en el GLOF del Glaciar Ventisquero Negro en un periodo de 1981 al 2020, se pueden advertir diferentes situaciones.

En primer lugar, como es posible observar en la sección A de la figura n° 13, se calcularon los P70, 80 y 90 del periodo estudiado, correspondientes a 32,8 mm, 43,1 mm y 62,6 mm respectivamente, categorizando a lluvias usuales por debajo de los 32,8 mm, y lluvias extremas por encima de los 62,6 mm. En este mismo sentido, se puede divisar que 72 horas antes del evento de GLOF -ocurrido el 21 de mayo-, no se presentaron lluvias, sin embargo, 48 horas antes se identificó el día como lluvioso, con un total de 33,3 mm caídos. Por otro lado, el día anterior al evento y el día del evento, se observaron días extremadamente lluviosos, con 77,7 mm y 68,2 mm respectivamente.

Respecto a la sección B de la figura n° 13, este corresponde al histograma de los datos de precipitación, tomándose en cuenta sólo los días en los cuales hubo lluvia. En este histograma se puede observar que existe una concentración de los datos en la parte izquierda de este, lo que significa que el 50% de los días que presentaron lluvia, precipitaron menos de 25 mm en total. De esto se puede deducir que las precipitaciones existentes en la semana del 14 al 21 de mayo del 2009, se presentaron lluvias que se encuentran en la segunda mitad de los datos, lo cual, categoriza a estas precipitaciones como una semana muy lluviosa.

Otra cosa destacable, corresponde a la posición del promedio de las lluvias de la semana anterior al evento, el cual se encuentra por sobre el 75% de los datos. Cabe recalcar que, el promedio de la precipitación de todo el periodo de los días con lluvia corresponde a 31,1 mm, no obstante, dado que el comportamiento de los datos se inclina hacia la izquierda, este valor no corresponde a un dato totalmente confiable, como lo es la mediana (Hernández, Fernández & Baptista, 2010), la cual baja a 19,43 mm.

Figura 13: Gráficos de precipitación - GLOF Glaciar Ventisquero Negro



Fuente: Elaboración propia (2021)

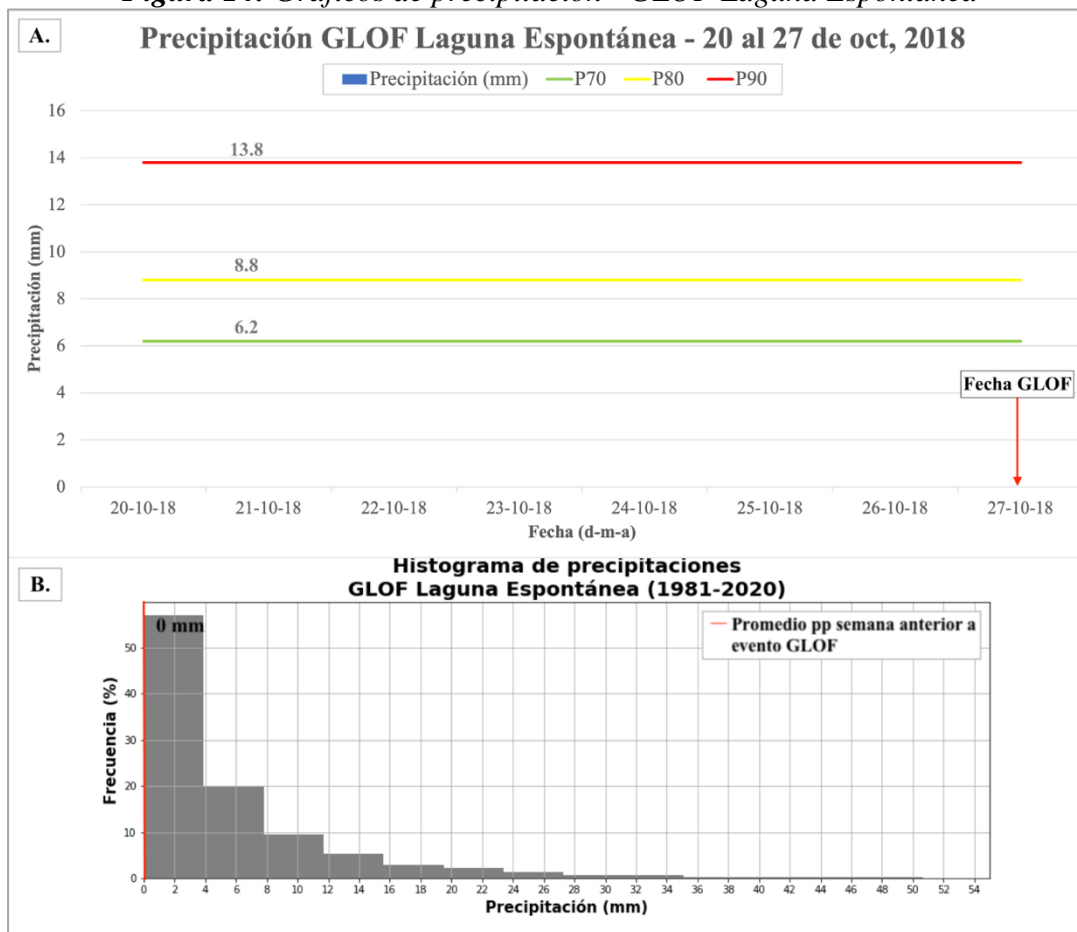
b. GLOF Laguna Espontánea

Los resultados obtenidos de los datos de precipitación en el periodo de 1981 al 2020, cercanos a la Laguna Espontánea fueron los siguientes.

De manera general, es posible observar la ausencia de precipitaciones durante toda la semana anterior al evento de GLOF -ver sección A de figura n° 14-, por lo que, se concluye la poca relevancia que las precipitaciones tienen sobre la ocurrencia de este GLOF. También es posible observar que los P90, 80 y 70 llegaron a 6,2 mm, 8,8 mm y 13,8 mm respectivamente, muy por debajo lo visto en el Glaciar Ventisquero Negro.

En lo que respecta a la sección B de la figura n° 14, este corresponde al histograma de los datos de precipitación de todos los días con lluvia del periodo. En este, al igual que en Glaciar Ventisquero Negro, presenta un comportamiento de datos inclinado hacia la izquierda, por lo que, el 70% de los datos se encuentran por debajo de los 8 mm de lluvia. El promedio del periodo corresponde a sólo 5,54 mm, y su mediana llega a los 2,85 mm, concluyéndose que la mitad de los datos se encuentra por debajo de este valor.

Figura 14: Gráficos de precipitación - GLOF Laguna Espontánea



Fuente: Elaboración propia (2021)

c. GLOF Laguna el Triángulo

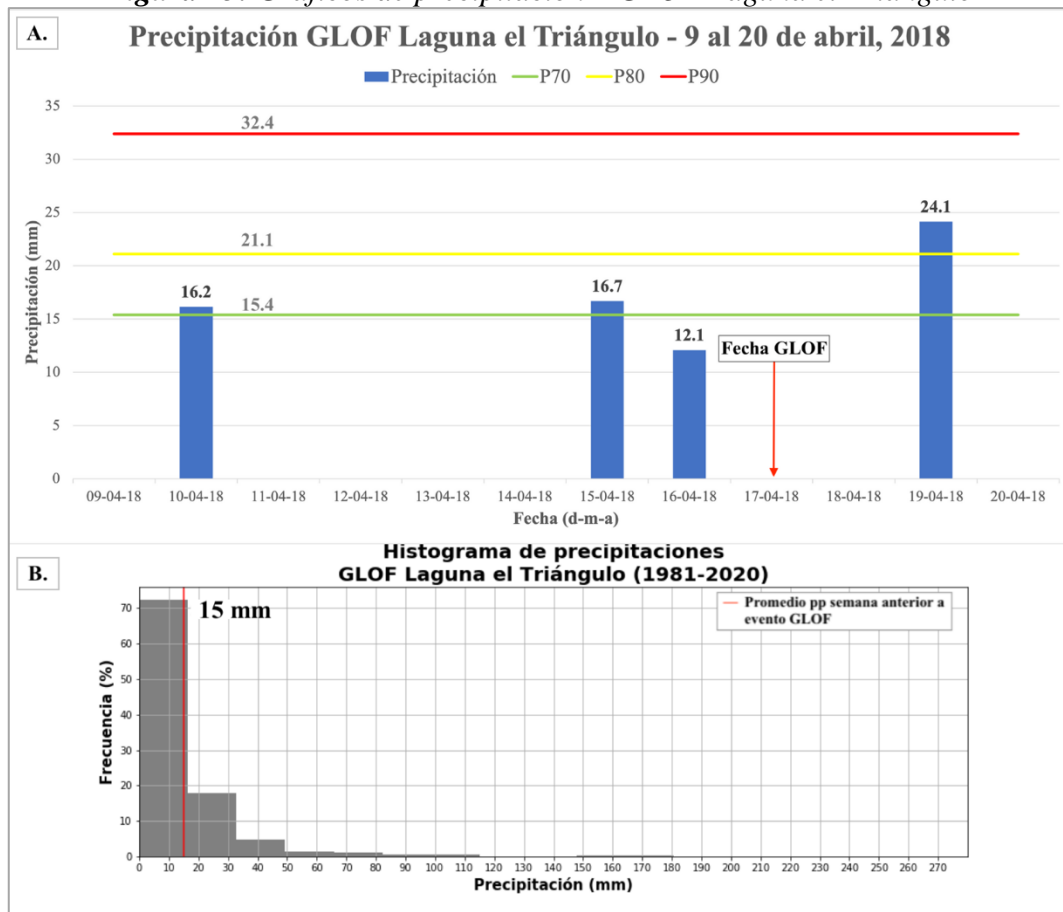
Los datos obtenidos de precipitación en el periodo de 1981 al 2020 en la zona de la Laguna del Triángulo, se subdividieron en dos secciones, la primera muestra el comportamiento de las precipitaciones una semana antes del evento de GLOF, y la segunda, corresponde a un histograma, con el fin de analizar el comportamiento de los datos obtenidos.

En primer lugar, en el gráfico correspondiente a una semana antes del evento de GLOF, ocurrido el 17 de abril del 2018 -ver sección A de figura n° 15-, se puede divisar que el P70 llegó a los 15,4 mm, el P80 a los 21,1 mm y el P90 a los 32,4 mm. En la categorización de los días previos al evento, se puede observar que tanto 3 días antes del evento y el día del evento no se concentraron precipitaciones, sin embargo, 48 horas antes se categorizó como día lluvioso, posicionándose entre el P70 y P80. En cuando al día anterior, este no logró alcanzar ninguno de los percentiles calculados, por lo que corresponde a un día de lluvia usual.

En cuanto al histograma en la sección B de la figura n° 15, se divisa que el promedio de lluvias de la semana anterior fue de 15 mm, el cual se encuentra por encima del 60% de los datos de días de lluvia del periodo, por lo que se categoriza a esta semana como de lluvias usuales en general. En este histograma, al igual que los dos GLOFs anteriores, presenta un

comportamiento inclinado hacia la izquierda, y con una tendencia a muy bajas precipitación en la gran mayoría de días con lluvias registradas. Cabe destacar que este periodo presentó un promedio de 16,2, pero al igual que los histogramas anteriores, este valor es poco representativo, dado que el valor medio (mediana) baja a 8,6 mm, siendo casi la mitad del valor del promedio. En esta base de datos es destacable el alto valor de la desviación estándar⁹, llegando a ser de 29,7 mm, lo cual se puede entender desde los 493,1 mm de máximo que presenta la base de datos.

Figura 15: Gráficos de precipitación – GLOF Laguna el Triángulo



Fuente: Elaboración propia (2021)

d. GLOF Cerro Largo

Los resultados obtenidos de las precipitaciones en el periodo de 1981 al 2020 en Cerro Largo consta de dos partes, la primera, de un gráfico de las precipitaciones pre-evento GLOF, ocurrido el 16 de marzo de 1989, y a segunda, del histograma de la base de datos de las precipitaciones.

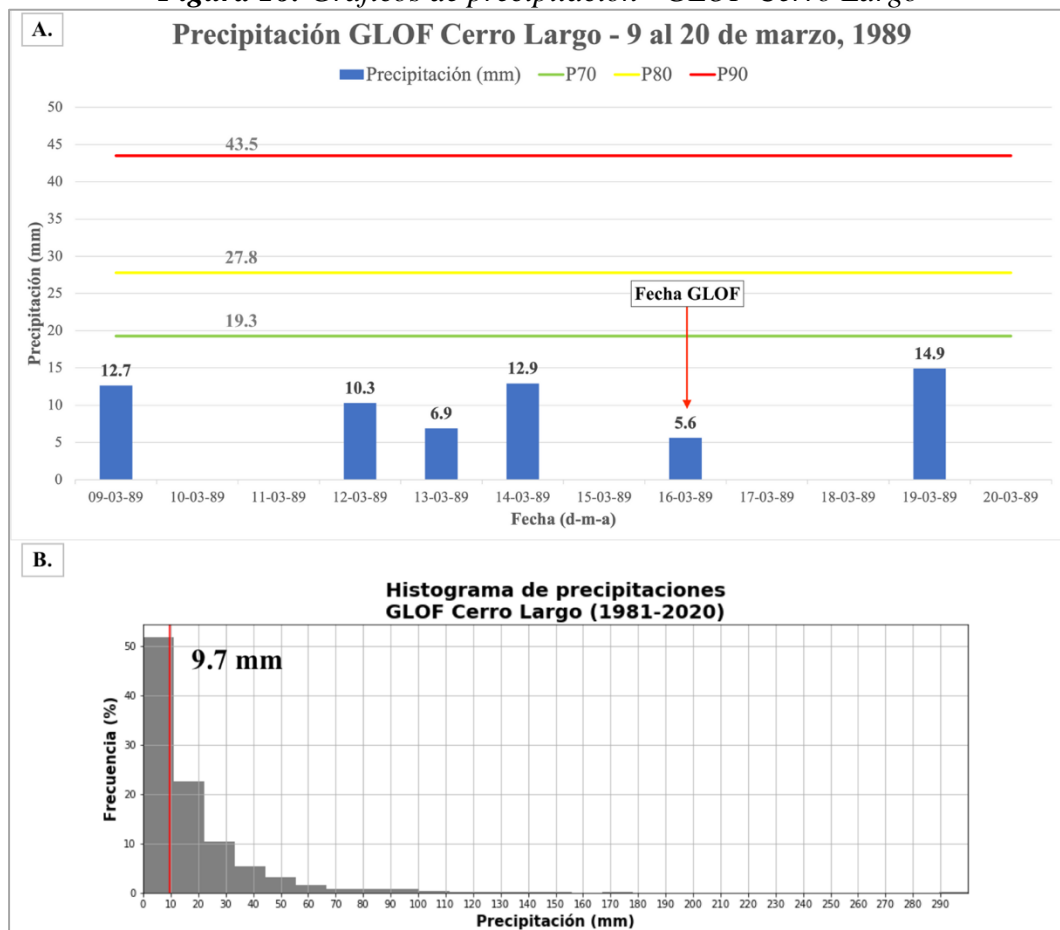
En términos de la precipitación acumulada la semana antes del evento de GLOF -ver sección A de figura nº 16-, es posible distinguir que el cálculo de los P70, 80 y 90 alcanzaron valores de 19,3 mm, 27,8 mm y 43,5 mm, algo similar a los vistos en el Glaciar Ventisquero Negro.

⁹ La desviación estándar corresponde al promedio de desviación de los datos respecto al promedio general.

No obstante, ocurre algo contrario a lo ocurrido en el Glaciar, puesto que ninguno de los días previos al evento de GLOF fueron significativos, categorizándolos como lluvias usuales, además de presentarse 0 mm el día anterior al evento.

En cuenta al histograma en específico, -ver sección B de figura n° 16-, este al igual que el resto de los histogramas anteriores, presenta datos concentrados hacia la izquierda, en donde es posible afirmar, que más del 70% de los datos de la base de datos, se encuentran por debajo de los 20 mm de precipitación. Además, es posible divisar que el promedio de la precipitación de la semana anterior al evento se encuentra dentro de esta primera mitad de los datos (< 50%), con 9,7 mm en promedio, lo que la hace una semana no significativamente lluviosa. Se recalca que el promedio de la base de datos completa corresponde a 19,9 mm, y la mediana llega a 10,6 mm. En esta base de datos ocurre algo similar a lo que ocurre en el GLOF de la laguna del triángulo, dado que, presenta una desviación estándar de 30,82 mm, lo cual advierte de la alta sensibilidad que presenta la media, esto puede ser comprendido desde el alto valor máximo que presenta, correspondiente a 334,1 mm en total.

Figura 16: Gráficos de precipitación - GLOF Cerro Largo



Fuente: Elaboración propia (2021)

4.2.2. Caracterización de temperatura

La caracterización de las temperaturas presentes en la siguiente sección de este informe en el periodo de 1979 a 2020, se realizó en dos estructuras principales. La primera de ellas a través de un gráfico de las condiciones de temperatura una semana previa a la ocurrencia de cada uno de los del evento de GLOFs, y una caracterización de las precipitaciones, los cuales temperatura fueron extraído 4 veces cada día, correspondientes a intervalos de 6 horas (00 hrs, 06 hrs, 12 hrs y 18 hrs). En según lugar se encuentra la generación de un histograma de los datos de temperatura de todo el periodo, con el fin de dar a conocer el comportamiento de esta base de datos, como las temperaturas más comunes, el promedio de temperatura, medianas, entre otros datos estadísticos.

a. GLOF Glaciar Ventisquero Negro

Con el objetivo de caracterizar las condiciones de temperatura previas y durante el evento de GLOF ocurrido en la laguna glaciar del Glaciar Ventisquero Negro el 21 de mayo del 2009, se presentan los siguientes resultados.

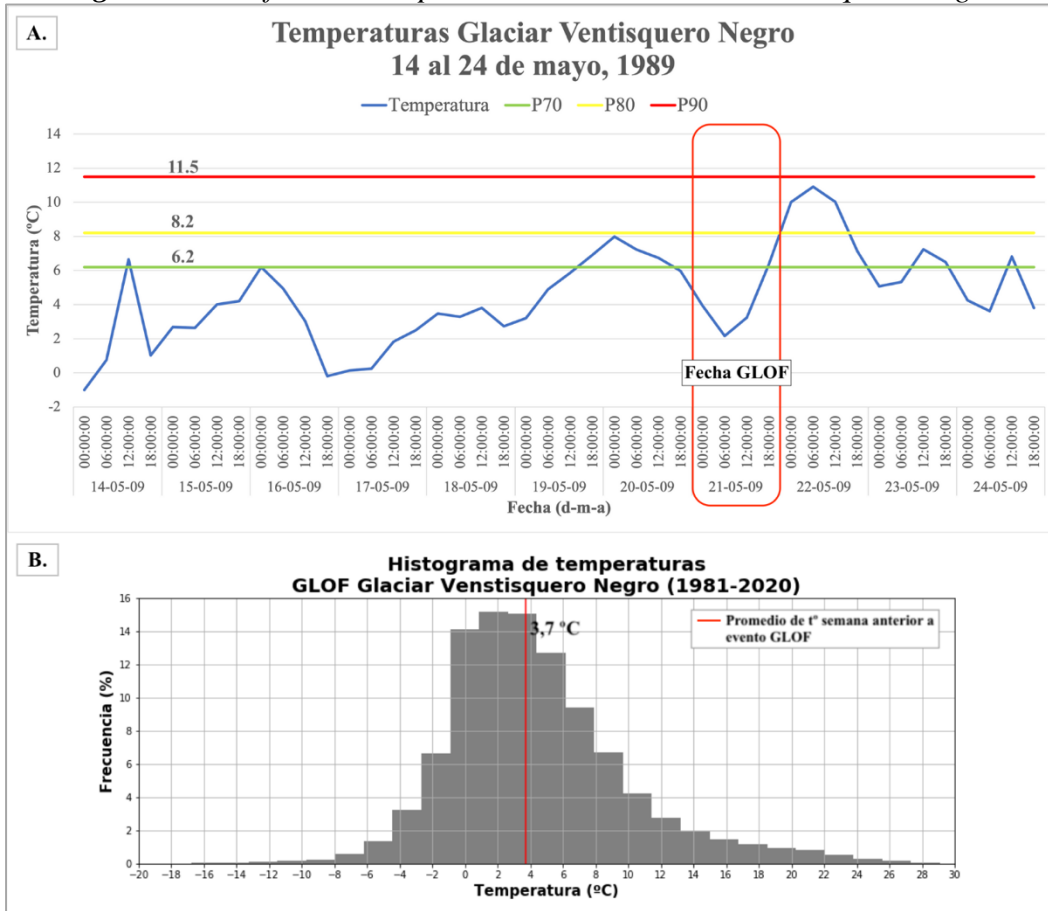
El gráfico de temperaturas una semana antes del evento de GLOF muestra en términos generales -ver sección A de figura n° 17-, que no se presentaron temperaturas muy altas, exceptuando el día anterior al evento, en el cual se marcó un promedio de 8 °C, clasificando a este día como cálido. Sin embargo, 72 horas, 48 horas antes y el día del evento, hubo en promedio 3,3, 5,2, y 3,9 °C respectivamente, los cuales se encuentran por debajo del P70.

Ahora bien, si se observan las temperaturas máximas marcadas cada día, es posible que observar que sólo 3 días antes del evento, la temperatura se encuentra por debajo del P70, no obstante, tanto 48 horas antes, 24 horas antes y el día del evento, estas se enmarcan por sobre el P70, clasificándolas como temperaturas cálidas, con 6,8, 8 y 6,4 °C de máxima.

En cuanto al histograma en la sección B de la figura n° 17, a diferencia del comportamiento de las precipitaciones en la sección anterior, lo datos de temperatura presentan un comportamiento mucho más del tipo normal, el cual se caracteriza por presentar una gran acumulación de datos en la zona central, y una dispersión de estos hacia los extremos. Es posible vislumbrar que las temperaturas más frecuentes dentro del periodo estudiando corresponde al rango entre los 0 °C y los 6 °C aproximadamente, acumulando más del 50% de los datos de temperatura.

Además de esto, el cálculo del promedio para el periodo completo corresponde a 4,4 °C, y dado que el orden de los datos es de tipo normal, la mediana se encuentra cercana a este valor, con 3,6 °C. Este destacable observar, que el promedio de temperaturas de la semana previa al evento (3,7 °C) se encuentra muy cercana a la mediana y por debajo del P70, lo que quiere decir, que esta semana no corresponde a una semana significativamente de altas temperaturas.

Figura 17: Gráficos de temperatura - GLOF Glaciar Ventisquero Negro



Fuente: Elaboración propia (2021)

b. GLOF Laguna Espontánea

Los resultados alcanzados en la caracterización de temperaturas de la semana previa al evento de GLOF en la laguna espontánea ocurrido el 27 de octubre del 2018, fueron los siguientes.

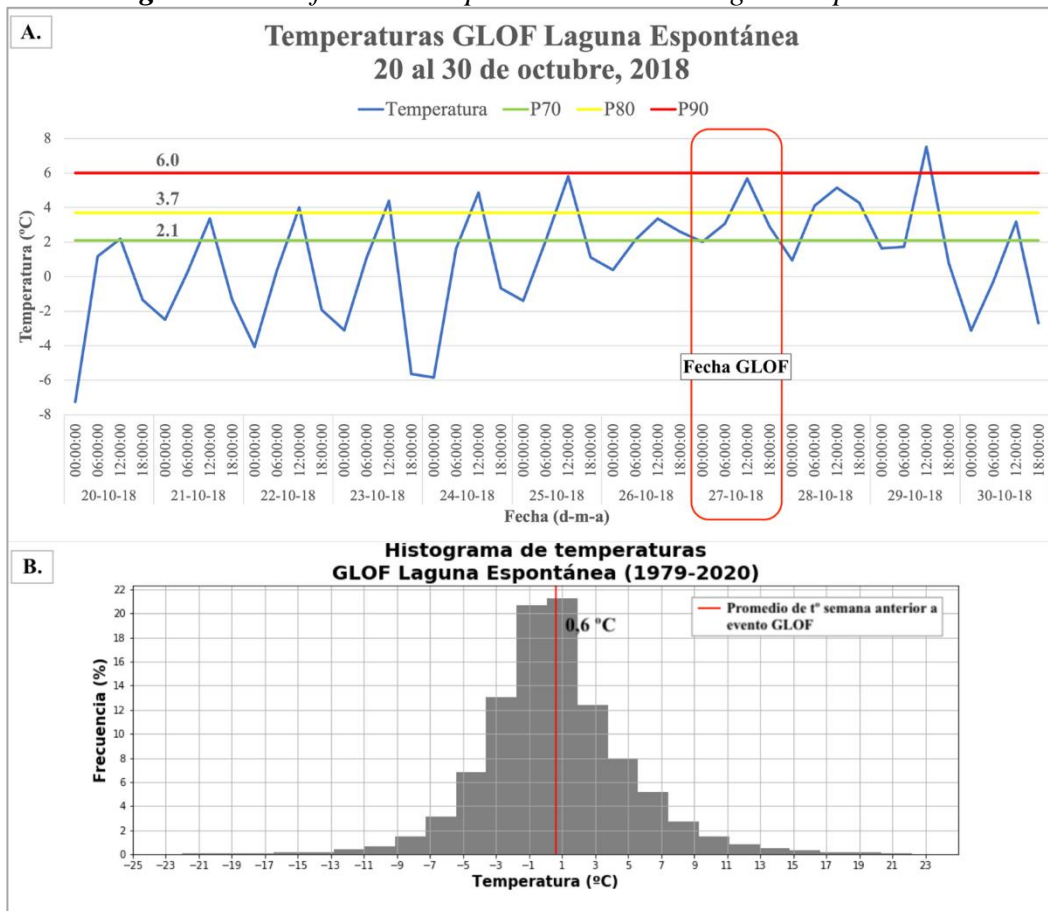
Las temperaturas marcadas la semana anterior al evento de GLOF en la Laguna Espontánea - ver sección A de figura n° 18-, muestran que en general se presentaron días con un mayor delta que lo visto en el Glaciar Ventisquero Negro, lo que quiere decir, que las diferencias entre las t° máximas y mínimas presentan una mayor amplitud, por lo que genera que el promedio de la semana se encuentre por debajo del P70. Si se observa en detalle, tanto 72 horas antes del evento como 48 horas antes, el promedio diario se encuentra por debajo del P70, con 0°C y $1,9^{\circ}\text{C}$ respectivamente, por otro lado, tanto el día antes del evento ($2,1^{\circ}\text{C}$) y el día del evento ($3,4^{\circ}\text{C}$), se encuentra por encima de este percentil y por debajo del P80, lo cual categoriza a estos días como cálidos.

Algo diferente ocurre si se observa a las temperaturas máximas de cada día, en donde, 72 horas antes, 48 horas antes y el día del evento se mostraron máximas por encima del P80 con $4,9^{\circ}\text{C}$, $5,8^{\circ}\text{C}$ y $5,7^{\circ}\text{C}$ respectivamente, y no muy lejano se encuentra lo ocurrido en día anterior, con

una máxima marcada en 3,4 °C, en cual se encuentra por encima del P70, categorizándolo como cálido.

En cuanto al histograma de la sección B de la figura n° 18, se observa que las temperaturas entre los -2 y 2 °C concentran casi el 45% de los datos, y dado que esta base de datos presenta un orden de tipo normal, el promedio de 0,6 °C, es muy similar al de la mediana. Se recalca que, si bien la semana previa al evento de GLOF en promedio no se encuentra muy por encima de la mediana, existen días, como el 26 y 27 de octubre que se escapan de los valores medios, posicionándose como días cálidos para la zona.

Figura 18: Gráficos de temperatura - GLOF Laguna Espontánea



Fuente: Elaboración propia (2021)

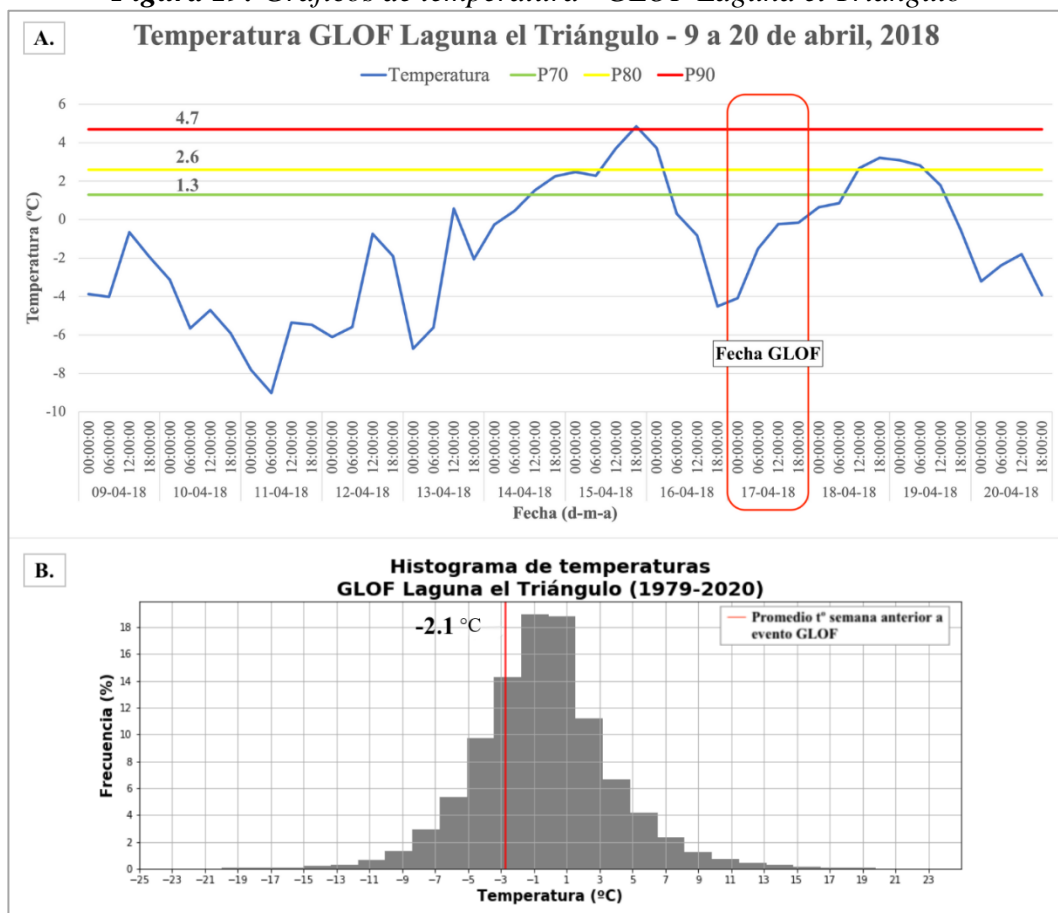
c. GLOF Laguna el Triángulo

Los datos conseguidos de temperatura dentro del periodo de 1979 a 1981 en la Laguna el Triángulo, se dividieron en dos secciones. La primera de ellas correspondientes a la caracterización de las temperaturas una semana previa al evento de GLOF ocurrido el 17 de abril del 2018. Y la segunda, correspondiente a la formación del histograma de la base de datos de temperaturas, con el fin de ver el comportamiento de los datos.

En primer lugar, en lo observado en el gráfico de temperaturas una semana previa al evento, se puede distinguir que sólo 48 horas antes de evento se marcó en promedio diario 3,3 °C, lo que lo posiciona por encima del P80, catalogando a este día como muy cálido. Mientras que, tanto 72 horas antes, 24 horas antes y ese mismo día, se marcaron temperaturas en promedio inferiores al P70 con, 2,3, 4,8 y -0,2 °C respectivamente. No obstante, si se observa las temperaturas máximas de cada día, la situación es diferente, dado que para 3 días antes del evento se marco una máxima de 2,3 °C, lo cual se encuentra por encima del P70, para 2 días antes del evento, se marcó una temperatura de 5,8 °C, lo cual alcanzó a estar por encima del P90, categorizándolo como extremadamente cálido. El día anterior al evento, hubo una máxima de 3,4 °C, llegando a estar por sobre el P80.

En términos del histograma de temperaturas -sección B-, se observa que las temperaturas se concentran entre los -2 y 2 °C aproximadamente, con casi el 40 % de los datos. En este mismo sentido, se percibe que el promedio de temperaturas de la semana previa al evento de GLOF (-2,1 °C) se encuentra por debajo del promedio total de periodo, siendo este de -0,4 °C -la mediana en este caso se encuentra también en los -0,4 °C-. Lo cual quiere decir, que esta semana fue bastante fría en comparación a los valores de tendencia media.

Figura 19: Gráficos de temperatura - GLOF Laguna el Triángulo



Fuente: Elaboración propia (2021)

d. GLOF Cerro Largo

En cuanto a los resultados alcanzados en la caracterización de temperaturas en Cerro Largo, se realizó un gráfico de la semana previa al GLOF ocurrido el 16 de marzo de 1989, y un histograma de la base de datos de temperaturas de esta zona.

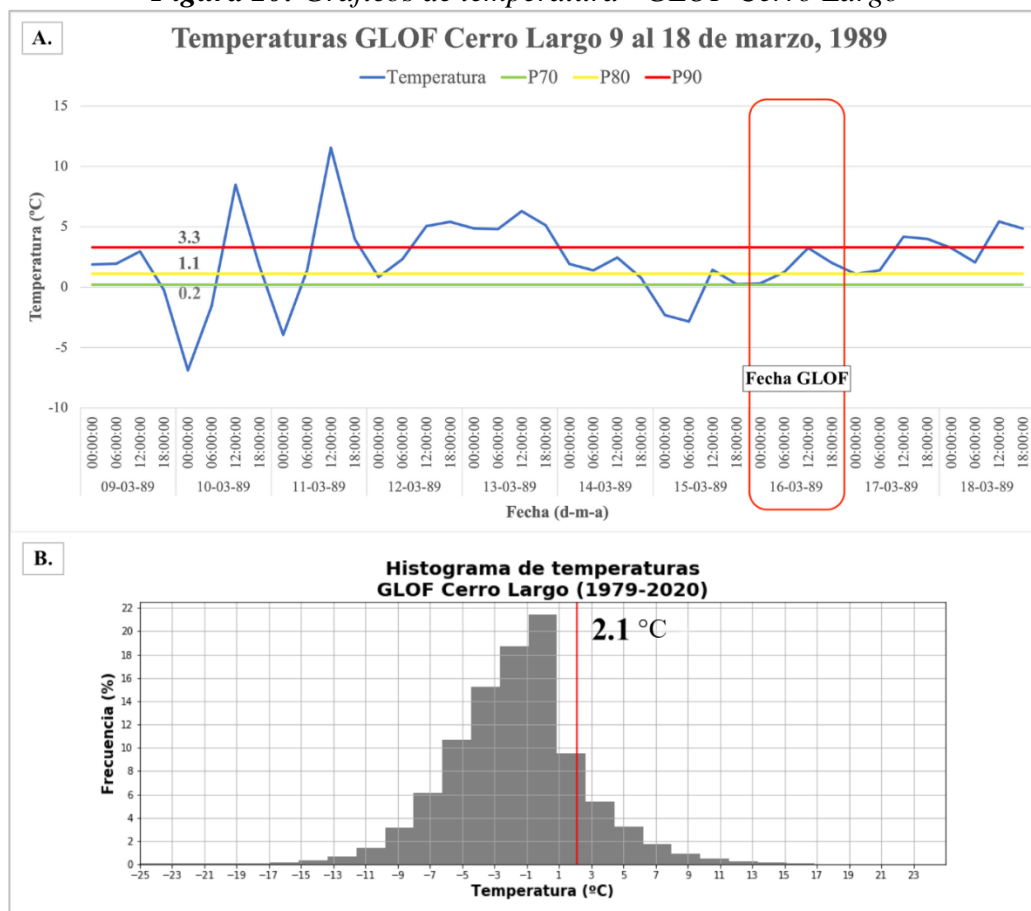
En el gráfico de temperaturas una semana anterior al evento de GLOF -ver sección A de la figura n° 20-, se puede distinguir que los cálculos de percentiles se encuentran cercanos a los 0 °C y muy próximos unos de los otros, con 0,2 °C para el P70, 1,1 °C para el P80 y 3,3 °C para el P90.

En este mismo sentido, se puede ver que, tanto 48 horas antes como el día del GLOF se presentaron días cálidos, con 2,4 y 1,7 °C en promedio, mientras que 72 horas antes, hubo en promedio 5,3 °C, lo cual se encuentra por encima del P90, categorizando a este día como extremadamente cálido. Por el contrario, el día antes el promedio diario de temperaturas llegó solo a -0,9 °C, no alcanzando ninguno de los percentiles calculados.

Si se observa sólo máximas de cada día, tanto 48hrs, 24hrs y el día del evento, superaron el P80, con 2,4, 1,4 y 3,2 °C respectivamente, lo que categoriza a estas temperaturas como muy cálidas, mientras que para 3 días antes del evento (72hrs) se alcanzó una máxima de 6,3 °C, muy por encima del P90, lo que la lleva a ser extremadamente cálido.

Ahora bien, en lo observado en la sección B de la figura n° 20, se observa que al igual que los otros GLOFs vistos, presenta una distribución de tipo normal, en el cual, el promedio y la mediana se encuentra en el centro de la distribución, correspondientes a -1,7 °C y -1,5 °C, coincidiendo que alrededor del 40% de los datos se concentran entre las temperaturas -2 °C y 1 °C. Desde esto, es posible evidenciar que, dado que el promedio de temperaturas de la semana anterior al evento de GLOF fue de 2,1 °C, esta semana corresponde a una semana con mayores temperaturas en comparación a los valores de tendencia central, encontrándose por encima del P80, categoría de muy cálida.

Figura 20: Gráficos de temperatura - GLOF Cerro Largo



Fuente: Elaboración propia (2021)

4.3. Comprender las implicancias del cambio global en la ocurrencia de GLOFs en Patagonia

4.3.1. Análisis del contexto geomorfológico

a. GLOF Glaciar Ventisquero Negro

El Glaciar Ventisquero Negro¹⁰ se encuentra ubicado en la frontera Chile Argentina, específicamente, como uno de los glaciares que alberga el Monte Tronador -ver esquicio de figura n° 22-. Este monte corresponde a la cima más alta del Parque Nacional Nahuel Huapi (Argentina), y contiene glaciares tales como, el Glaciar Frías, Alerce y Castaño Overo, siendo los de mayor envergadura.

Como es posible observar en la figura n° 22, el glaciar ventisquero Negro (77 há) corresponde a un glaciar de tipo cubierto, debido a la gran cantidad de detritos que recibe de una serie de laderas empinadas a su alrededor.

¹⁰ Cabe destacar que este glaciar se le conoce como Glaciar Ventisquero Negro, pero en realidad se llama Glaciar Río Manso.

Este glaciar, al igual que la gran mayoría de los glaciares patagónicos, presentó su último mayor avance durante el máximo del LIA (Masiokas *et al.*, 2010), durante el cual, formó una serie de morrenas laterales y terminales de gran envergadura. Esto último, ha favorecido la formación de un lago proglaciar, que si bien, en la imagen n° 21 se puede observar que para el año 2015 presentaba un área total de 68,2 há, para el año 2009, en una comparación pre y post GLOF (21 de mayo, 2009), el área total del lago paso de 50, 5 há para el 29 de abril, a 38,32 há para el 5 de junio -ver imagen n° 19-.

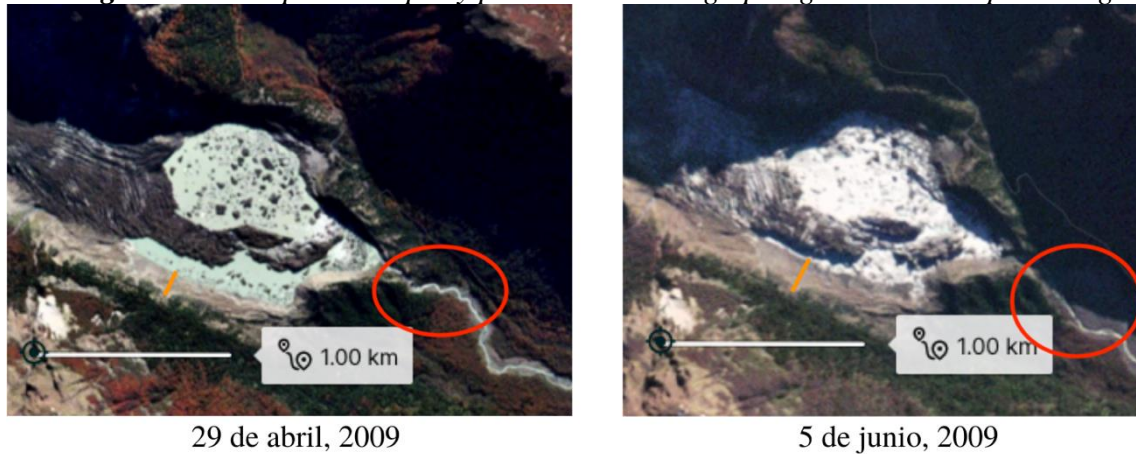
En la figura n° 21, se puede observar una serie de diferencias pre y post GLOF¹¹. La primera de ellas es la baja en el nivel del agua en el lago, el cual es posible divisar de manera notoria gracias a al aumento de visibilidad de la ladera de la morrena, ya sea en la morrena suroeste y en la ladera frontal. Otra de ellas es el cambio en el curso de agua, debido a que, en la imagen del 5 de junio, el curso de agua se volvió mucho recto, en comparación a un canal mucho mas sinuoso, visto el 29 de abril. Por último, se observa la baja existente en la vegetación alrededor del río, evidenciando en gran poder erosivo presente durante un evento de crecida como el GLOF.

Este evento presento una descarga de agua total de $10 \times 10^6 \text{ m}^3$, con un peak de descarga de $4100 \text{ m}^3/\text{s}$ (2 veces mayor al GLOF del Cerro Largo), y un acarreo de detritos aproximado de 250.000 m^3 , a una velocidad de 20 m/s (Worni *et al.*, 2012).

Este evento generó una zona erosionada importante, en la cual se puede observar hasta el año 2015 -ver figura n° 22-, y un curso de agua relativamente recto, hasta que se expande en un valle de ancho mayor, llamada “Pampa Linda” (Argentina). Se divisan dos niveles en el lecho, una de mínima vegetación y, por lo tanto, de mayor erosión, y la otra, denominada como Terraza fluvial, el cual presenta una vegetación mejor consolidada, no obstante, no de gran altura. Por último, sólo se identifico un afluente hacia el curso de agua principal, llamado Río Blanco (Masiokas *et al.*, 2010).

¹¹ Las imágenes fueron extraídas desde *Planet Explorer*, y fueron seleccionadas debido a su buena calidad de visualización (sin nubes o nieve), la cual no necesariamente coincide con el día exacto en el cual ocurrió el evento.

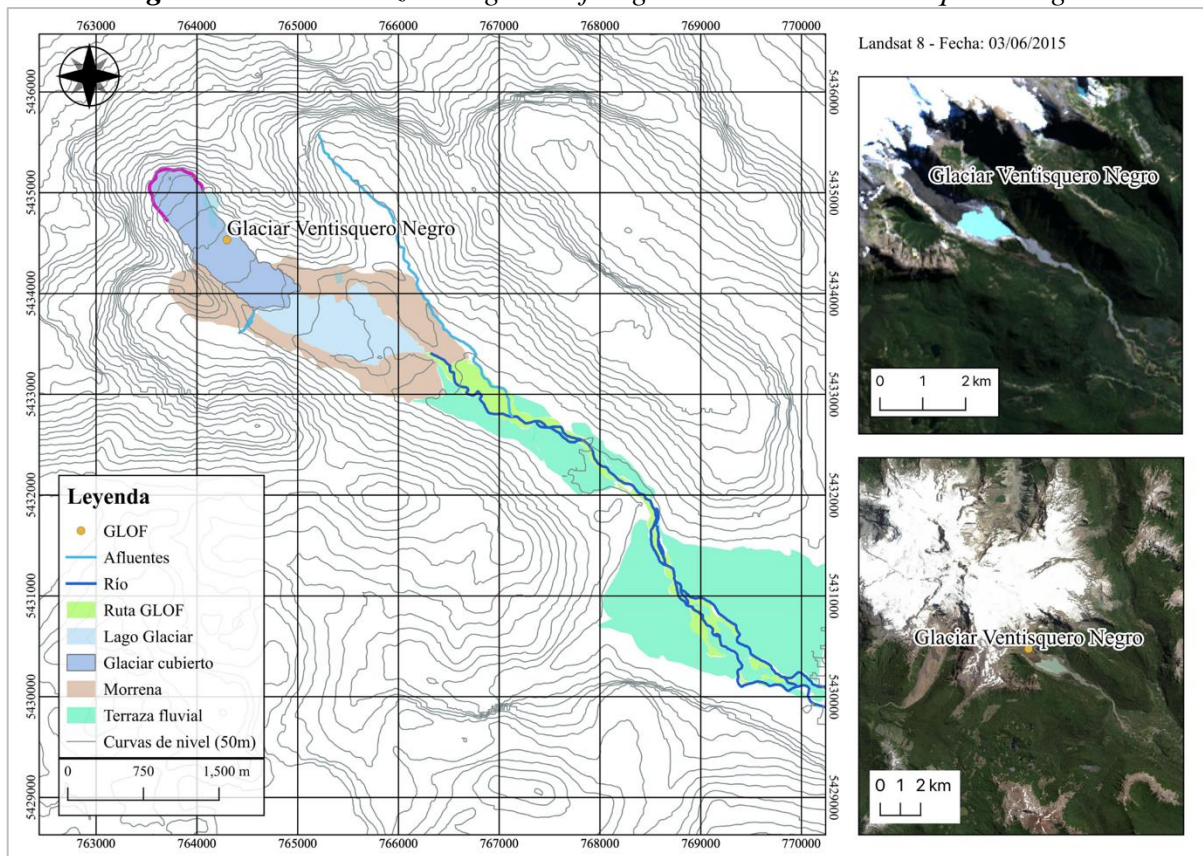
Figura 21: Comparación pre y post GLOF del lago pro-glaciar Ventisquero Negro



29 de abril, 2009 5 de junio, 2009

Fuente: Elaboración propia (2021), imagen extraída de Planet Explorer

Figura 22: Caracterización geomorfológica - GLOF Gl. Ventisquero Negro



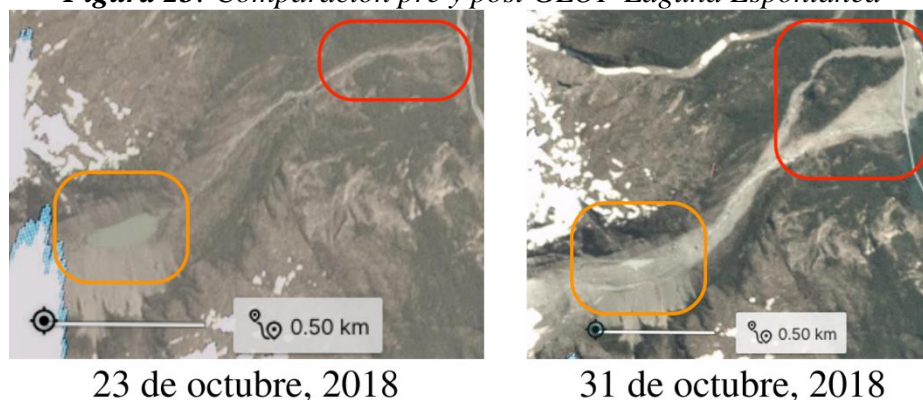
Fuente: Elaboración propia (2021)

b. GLOF Laguna Espontánea

La laguna Espontánea se encuentra ubicada en el Valle exploradores, al noroeste del campo de Hielo Norte, en la Región de Aysén, este evento de GLOF ocurrió el 27 de octubre del 2018, y corresponde al de menor magnitud de los 4 presentes en este informe. Iribarren *et al* (2019), menciona que este GLOF fue gatillado desde una avalancha de rocas que impactó sobre la laguna pro-glaciar, que según mediciones en *Planet Explorer* del 23 de octubre del 2018 -ver figura n° 23-, presentaba un área total de 1,6 há.

Este evento genero la pérdida casi absoluta del agua de la laguna, llegando a presentar un área de sólo 0,35 há en total, sin embargo, el GLOF generó una serie de cambios en la ladera en la que se encuentra, como un aumento en el ancho de la zona erosionada por el curso de agua, y una pérdida de vegetación desde el término de la laguna, hasta llegar a más allá de la ruta (X-728), posicionándose como un riesgo potencial hacia turistas o habitantes que circulen por aquella vía.

Figura 23: Comparación pre y post GLOF Laguna Espontánea

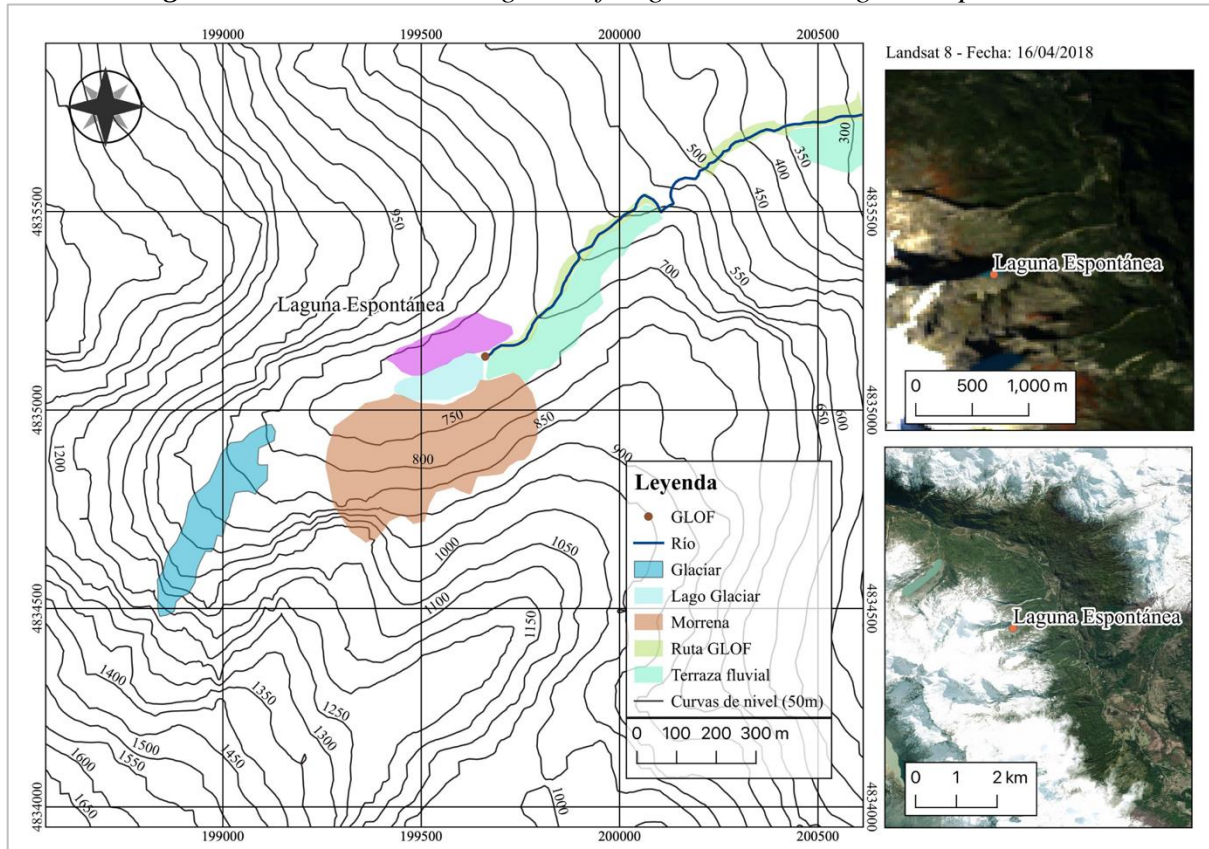


Fuente: Elaboración propia (2021), imagen extraída de Planet Explorer

Como es posible observar en la figura n° 24, este GLOF ocurrió en una de las laderas del Valle Exploradores, por lo que no presenta un curso de agua importante, como lo vimos en el GLOF del Glaciar Ventisquero Negro.

En cuanto a las morfologías presentes alrededor de la Laguna, se puede observar un Glaciar clasificado como glaciarete (glaciar de 1 a 25 há), puesto que solo presenta 4,5 há de área, el cual no se encuentra conectado de manera directa con la laguna. Además de esto, se divisa una morrena lateral al sur de la laguna, y una zona erosionada identificada como la ruta del GLOF.

Figura 24: Caracterización geomorfológica - GLOF Laguna Espontánea



Fuente: Elaboración propia (2021)

c. GLOF Laguna el Triángulo

Al igual que la Laguna espontánea, la Laguna el Triángulo se encuentra ubicada en el Valle Exploradores, al norte del Campo de hielo Norte, en la región de Aysén, y como es posible observar en la imagen n° 1, solo se encuentra un poco más al sureste de la laguna espontánea.

En la figura n° 24, es posible observar que este evento de GLOF a diferencia del resto de los GLOF anteriores, no presenta un rastro erosivo de manera muy notoria, dado que esta laguna se posiciona en la zona lateral al glaciar Exploradores. Desde lo divisado en la imagen, esta laguna se posiciona dentro de una depresión alrededor de laderas muy empinadas, por lo que, su curso de descarga fue dirigido por el costado del glaciar Bayo y Exploradores, hasta llegar a otro lago glaciar también de tipo lateral.

En términos de cambios observados pre y post GLOF, sólo es posible notar los cambios del área total del lago, en donde, para el 19 de marzo del 2018, la laguna presentaba un total de 96 há, el cual bajó a un área total de 55,31 há, para el 30 de abril del 2018. Esto se identifica desde el aumento de visibilidad en las paredes de la laguna, y su falta de vegetación, en comparación al resto de las laderas -ver figura n° 25-.

Este evento presentó una descarga total de $20 \times 10^6 \text{ m}^3$ de agua, el cual generó la subida de mas de 5 m del río de deshielo de los glaciares presentes, el cual se encuentra 11 km aguas debajo de la laguna -ver figura n° 26- (Iribarren *et al.*, 2019).

Figura 25: Comparación pre y post GLOF Laguna el Triángulo

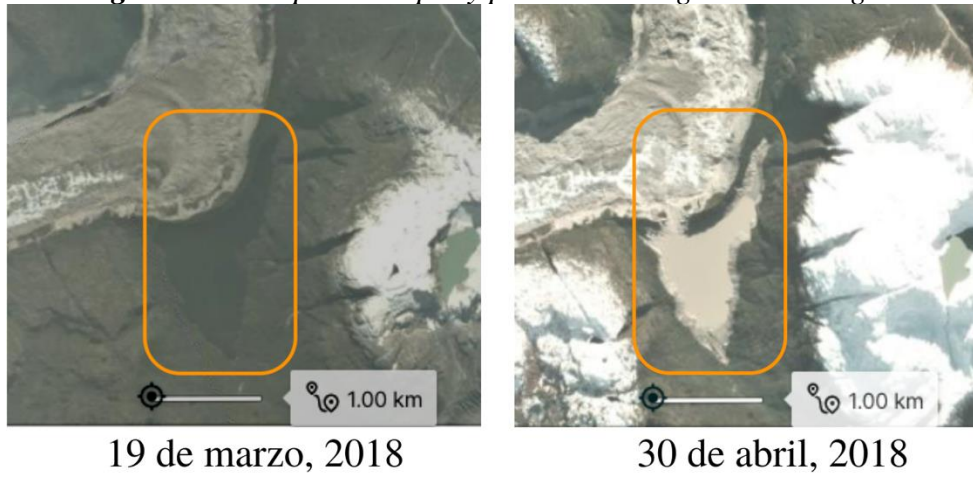
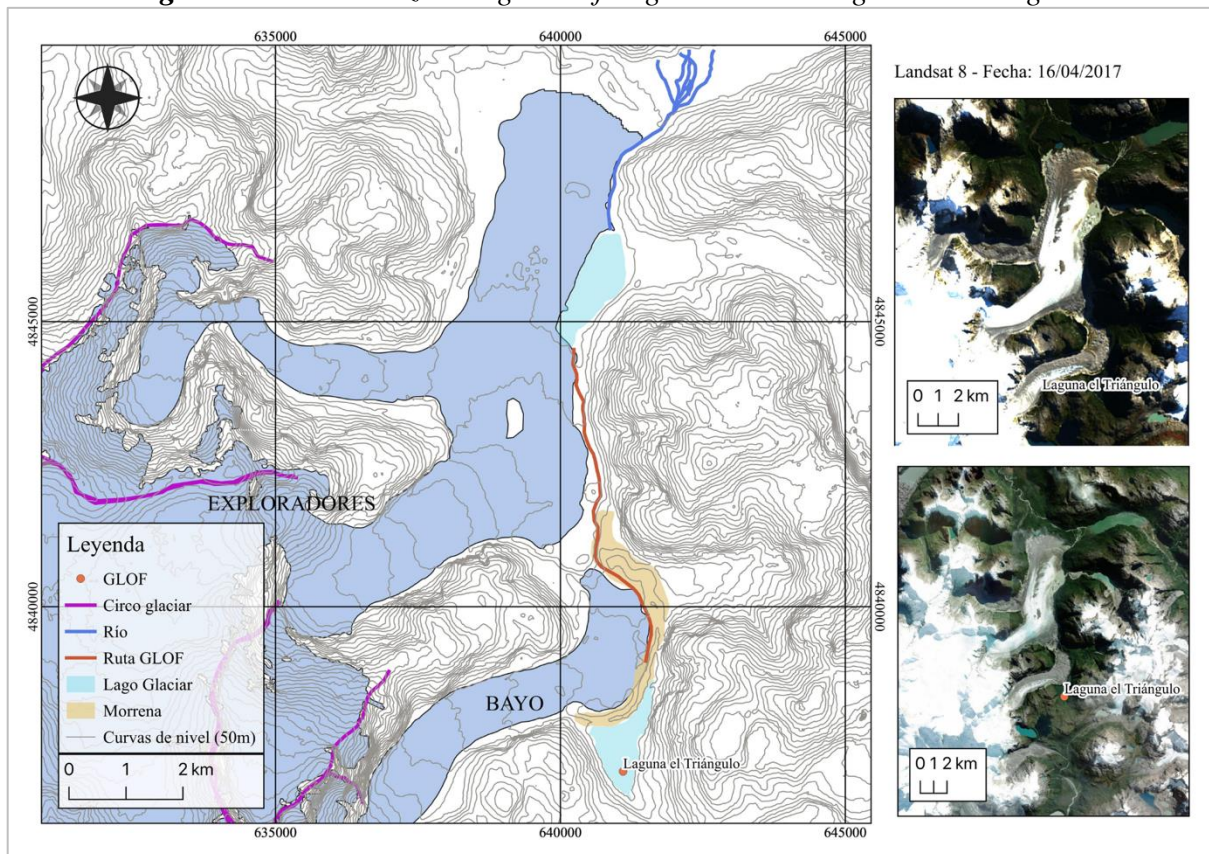


Figura 26: Caracterización geomorfológica - GLOF Laguna el Triángulo



Fuente: Elaboración propia (2021)

d. GLOF Cerro Largo

En términos de descarga total de agua, el drenaje de la laguna del Cerro Largo ha sido uno de los eventos de GLOFs más importantes registrados en la literatura hasta el momento, con un total de $229 \times 10^6 \text{ m}^3$ de descarga, y un peak de descarga de 1800-2000 m^3/s según Hauser (2000), no obstante, Burton *et al.* (2020) menciona que este valor se encuentra subestimado, llegando a alcanzar un total de 20.000 m^3/s según los modelos analizados por los autores.

En términos geográficos, la laguna del Cerro Largo se encuentra ubicada dentro del Valle Soler, en la comuna de Chile Chico, Región de Aysén, específicamente al noreste del campo de hielo norte. Esta laguna, como es posible observar en la figura n° 27, se alimenta de deshielos de un conjunto de glaciares a su alrededor, como el Glaciar Nef, el más importante en tamaño, y otros dos glaciares de menor envergadura.

Esta zona se caracteriza por ser un paisaje extremadamente escarpado, caracterizado por su circo glaciar que presenta paredes rocosas que alcanzan los 800 m o más de altura (Burton *et al.*, 2020).

La laguna del Cerro Largo se encuentra posicionada dentro de una depresión generada por el avance glaciar, evidenciado desde la presencia de morrenas laterales y terminales. Se estima que la morrena terminal principal se encuentra depositada desde el LIA, mientras que otras morrenas terminales cercanas puede haber sido depositadas durante un avance glaciar más reciente. Esta laguna presenta un constante drenaje de agua a través de las morrenas, lo que forma el río Soler, el cual baja 5 km por el valle Soler por un río de tipo trezado compuesto por depósitos fluvio glaciares (Burton *et al.*, 2020).

Esta laguna alimenta al río Soler, el cual desemboca en el lago el Plomo, el cual a su vez desemboca el lago Bertrand, que a su vez desemboca en el Lago General Carrera, lago que traspasa la frontera chilena hacia la argentina.

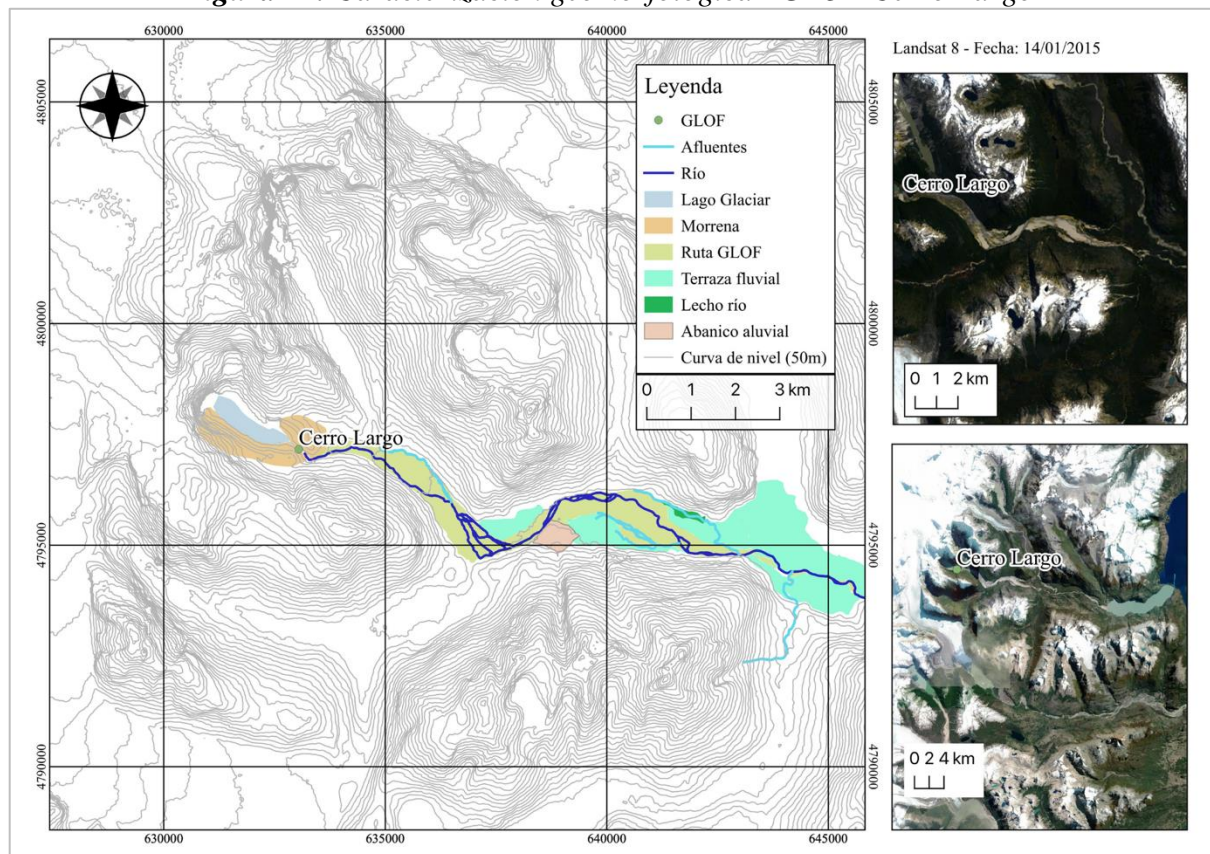
Se han postulado diferentes escenarios de desencadenamiento de este evento, debido a que no existen evidencias empíricas que demuestren su veracidad. Hauser (2000) postula un bloqueo del canal de drenaje de la laguna por parte de un iceberg, ocurrido durante un episodio de aumento de temperaturas en la zona, lo que provocó un incremento en la escorrentía, resultante de una subida del nivel de la laguna y una falla en la represa (Iribarren *et al.*, 2015)a.

Si bien, Burton *et al.* (2020) indica la posibilidad de esta teoría, e igual manera menciona la probabilidad de una caída de roca en el lago glaciar desde la desestabilización de las paredes rocosas que envuelven al lago. Todo esto, debido a la presunción de un aumento de temperaturas durante el evento, lo que provocó la degradación del permafrost en la pared rocosa. Esta teoría se basa en el rápido y corto drenaje que se presenta en el modelo en el hidrograma del evento, en el cual, para poder lograr un peak de descarga tan elevado, es necesario que se produzca una incisión de la morrena o una caída de roca.

Se destacan algunos cambios en el valle fluvial, uno de ellos corresponde a los cambios en el curso del agua, como también, el aumento del ancho del lecho fluvial, el conjunto a la pérdida de bosque presente pre GLOF, lo cual evidencia el gran poder erosivo de este tipo de amenazas, y las huellas en cambios geomorfológicos que puede llegar a dejar (Iribarren *et al.* (2015a). Se evidenció una baja en el nivel del agua de un total de 93 m desde 534 m.s.n.m. a 441 m.s.n.m., lo que generó la pérdida de volumen total de $140 \times 10^6 \text{ m}^3$, siendo un total de 4% del volumen. Además, se calculó una pérdida de $9.5 \times 10^6 \text{ m}^3$ de volumen de sedimento de la morrena, mientras que otro modelo calcula un total de $7 \times 10^6 \text{ m}^3$.

En la figura nº 27 se observa un curso de agua de tipo trenzado, el cual recibe una serie de afluentes de otros valles colindantes. En este valle fluvial es posible evidenciar 2 niveles de principales, el primero donde se distingue el paso de la crecida, y el segundo como una terraza fluvial.

Figura 27: Caracterización geomorfológica - GLOF Cerro Largo



Fuente: Elaboración propia (2021)

4.3.2. Proyecciones de cambio global en Patagonia

Las actividades antrópicas han generado el aumento de $1 \text{ }^\circ\text{C}$ en las temperaturas a nivel global, en comparación a valores preindustriales. Esto ha traído consecuencias en diversos temas tanto ambientales como sociales, uno de ellos es el aumento de los riesgos y amenazas que han surgido de estos fenómenos (IPCC, 2019).

La Patagonia corresponde a una de las regiones del mundo más afectadas por el cambio climática, el cual ha traído consecuencias en el aumento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones. El Ministerio del medio ambiente (MMA) (2016) realizó una comparación entre el estado actual de estos parámetros y las proyecciones a futuro para el año 2050, según modelo el RCP 8.5, el cual corresponde el modelo más pesimista entre otros 4 existentes.

En este informe se detalla comuna por comuna la situación de temperaturas y precipitación - ver tabla n° 5-, el cual indica que, para toda región de Aysén, las temperaturas aumentarán para el 2050 en comparación a la línea de base actual. Se divisa que tanto la temperatura media estival (TE_{med}), como la temperatura media invernal (TI_{med}) subirán en promedio 1,4 °C. Lo mismo ocurre con las precipitaciones, que de forma unánimes en todas las comunas de la región estas disminuyen, bajando en promedio 5,8% de las precipitaciones, en términos de precipitación normal anual (PPA) (MMA, 2016).

De forma contraria, ocurre en la región de Magallanes, en donde, se proyecta un aumento de temperaturas para el periodo invernal (\bar{x} 1,6 °C) como para el estival (\bar{x} 1 °C) en todas las comunas. Sin embargo, en términos de precipitaciones, sólo en las comunas de San Gregorio y Primavera se divisan bajas en las precipitaciones, pero en promedio, existe un aumento en 2,2% de las precipitaciones normales anuales (MMA, 2016).

Tabla 5: Proyección de cambio de temperaturas y precipitaciones de comunas en Región de Aysén y Magallanes

Región	Provincia	Comuna	TE_{med} (°C)	TI_{med} (°C)	PPA (%)
Aysén	<i>Aysén</i>	Aysén	1.4	1.3	-6.2
		Cisnes	1.5	1.2	-8.1
		Guaitecas	0.7	0.5	-4.5
	<i>Capitán Prat</i>	Cochrane	1.5	1.7	-4.7
		O'Higgins	1.4	1.7	-2.6
		Tortel	1.2	1.3	-2.4
	<i>Coyhaique</i>	Coyhaique	1.6	1.5	-8.4
		Lago Verde	1.8	1.4	-9.3
	<i>General Carrera</i>	Chile Chico	1.5	1.7	-5.5
Río Ibáñez		1.5	1.6	-6.4	
Magallanes	<i>Magallanes</i>	Laguna Blanca	1.0	1.7	2.1
		Punta Arenas	0.9	1.5	4.2
		Río Verde	0.9	1.4	3.8
		San Gregorio	1.1	1.7	0.0
	<i>Tierra del Fuego</i>	Porvenir	1.0	1.5	1.9
		Primavera	1.1	1.5	-0.3
		Timaukel	1.0	1.5	4.0
	<i>Última Esperanza</i>	Natales	1.0	1.4	1.3
		Torres del Paine	1.1	1.8	2.4

TE= temperatura estival; TI: temperatura invernal; PPA= precipitación normal anual

Fuente: Ministerio del medio ambiente (2016)

Esto se encuentra altamente relacionado con lo expuesto por el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)², los cuales indican que en Patagonia los cambios anuales entre 2021 y el 2050 van entre 0,4 °C y 0,6 °C, con los modelos RCP 2,6¹² y RCP 8,5¹³ respectivamente, y que, por lo general, se proyecta una disminución en los días fríos. Además, tanto los modelos 2,6 y 8,5 proyectan una disminución en las precipitaciones en todo el territorio nacional, excepto en la Patagonia Sur (Rojas, Gallardo & Bozkurt, 2018).

En contraste con los resultados obtenidos en las secciones anteriores de este trabajo, factores como la temperatura corresponden a condiciones importantes y presentes durante tres de los GLOFs analizados, el cual presenta concordancia con lo dicho por en MMA y CR². Estas condiciones traerían como consecuencia el aumento de deshielo de glaciares, y, por lo tanto, en el número y dimensión de los lagos glaciares ante el retroceso glaciar.

Capítulo 5: Discusión y conclusiones

Varios autores han evidenciado el retroceso glaciar en la Patagonia durante las últimas décadas, lo cual se encuentra acompañado con desfavorables proyecciones a futuro frente al actual escenario de cambio climático (Barcaza *et al.*, 2017). Tanto los modelos más optimistas como más pesimistas indican un aumento de las temperaturas y una disminución en las precipitaciones, lo cual, favorece al derretimiento glaciar, e incrementa las amenazas naturales asociadas a esta situación (Rojas *et al.*, 2018).

Los GLOFs corresponden a un tipo de amenaza de análisis complejo, puesto que presentan condicionantes, desencadenantes, y fases claves del evento, que actúan de manera simultánea antes, durante y después de los eventos de crecida (Westoby, 2017). Sin embargo, según Allen *et al.*, (2016), los desencadenantes climáticos corresponden a los principales factores en la ocurrencia de eventos de GLOF, quien sugiere que la presencia de lluvias monzónicas, en conjunto al decrecimiento del área de nieve cubierta, desencadenaron el evento de GLOF en India para junio del 2013, en el cual se perdieron más de 6000 vidas humanas. Este mismo, acusa la falta de información y estudios acerca de los factores desencadenantes en eventos de GLOF, tales como lluvias intensas, aumento de temperaturas y derretimiento de nieve. Así mismo, Iribarren *et al.* (2015) menciona la falta de entendimiento de los factores desencadenantes de estos eventos usualmente asociados a condiciones meteorológicas de altas temperaturas y a eventos de precipitación extremos, los cuales pueden producir importantes cambios geomorfológicos. Es por esto, que se realizó la caracterización de precipitaciones y temperaturas en cuatro eventos de GLOFs.

¹² Escenario en el cual las causas antrópicas son consecuencias del aumento inferior a 2°C en comparación a la época preindustrial

¹³ Escenario en el cual las causas antrópicas pueden causar el calentamiento de hasta 5°C

5.1. Discusión

En primer lugar, se buscó realizar una serie de tiempo con el cálculo del índice NDVI en los rastros erosivos de 20 GLOFs, distinguidos previamente por varios autores, con el fin de identificar la fecha de ocurrencia de estos eventos. Sin embargo, esto no logró ser conclusivo debido a que se esperaba una interrupción en el patrón estacional de la vegetación ripariana, que trae como consecuencia el efecto erosivo de la crecida, lo cual no pudo ser determinado en ninguno de los casos estudiados. Cabe destacar que esta interpretación se realizó visualmente, lo que tiene un componente subjetivo, en estudios futuros se sugiere la des-estacionalización de los datos, puesto que la base de datos corresponde a datos con tendencia estacional (Hyndman & Athanasopoulos, 2018).

Cabe destacar que, en cada uno de los GLOFs estudiados, se presentó un patrón estacional en el índice NDVI con valores máximos durante en las temporadas de verano, especialmente en los meses de enero y febrero, y valores mínimos durante los meses de invierno (julio, agosto), lo cual, evidencia la capacidad del satélite (imágenes MODIS) de distinguir los ciclos anuales de vegetación presentes en cada polígono de muestra.

Sólo fue posible observar cambios en los ciclos anuales de vegetación en los GLOFs del Río los Leones y el GLOF #6. En el caso del Río Los Leones, este se presentó una baja para el año 2001, el cual subió de manera gradual hasta llegar a sus valores “normales” para el año 2006. Y en el caso del GLOF denominado como #6, este presentó una caída de los valores cercanos al año 2008. De igual manera, en ninguno de los dos fue posible identificar una fecha exacta en la cual pudo haber ocurridos los eventos de GLOF.

En este objetivo fueron ocupados imágenes MODIS, las cuales presentan una resolución espacial de 250 m, siendo una resolución espacial baja en comparación a resoluciones espaciales de imágenes como Landsat o Sentinel. Sin embargo, fueron ocupadas debido a su resolución temporal diaria, con el fin de identificar las fechas exactas de cada uno de los GLOFs.

Debido a que no fue posible identificar las fechas en las cuales ocurrieron los eventos de GLOFs, fueron analizados cuatro GLOFs con fechas ya identificadas. Este análisis se llevó a cabo mediante la caracterización de las condiciones de precipitación y temperatura, dado que estos factores se posicionan como claves en el desencadenamiento de GLOFs, utilizando fuentes CHIRPS y NOAA. (Clague & Evans, 2000; O'Connor, Hardison & Costa, 2001; Iribarren *et al.*, 2015a; Allen *et al.*, 2016).

Las principales fuentes utilizadas en este trabajo presentan tanto ventajas como desventajas en sus características. Una de las principales razones por la cual se ocuparon las imágenes CHIRPS y/o NOAA corresponde a la abundancia en el registro histórico que estos poseen, dando como resultado una base de datos que presenta continuidad tanto espacial como temporal

(Funk *et al.*, 2015). Dado que, para los objetivos de este trabajo, se prioriza el análisis del comportamiento histórico de los datos, por encima de sus datos absolutos.

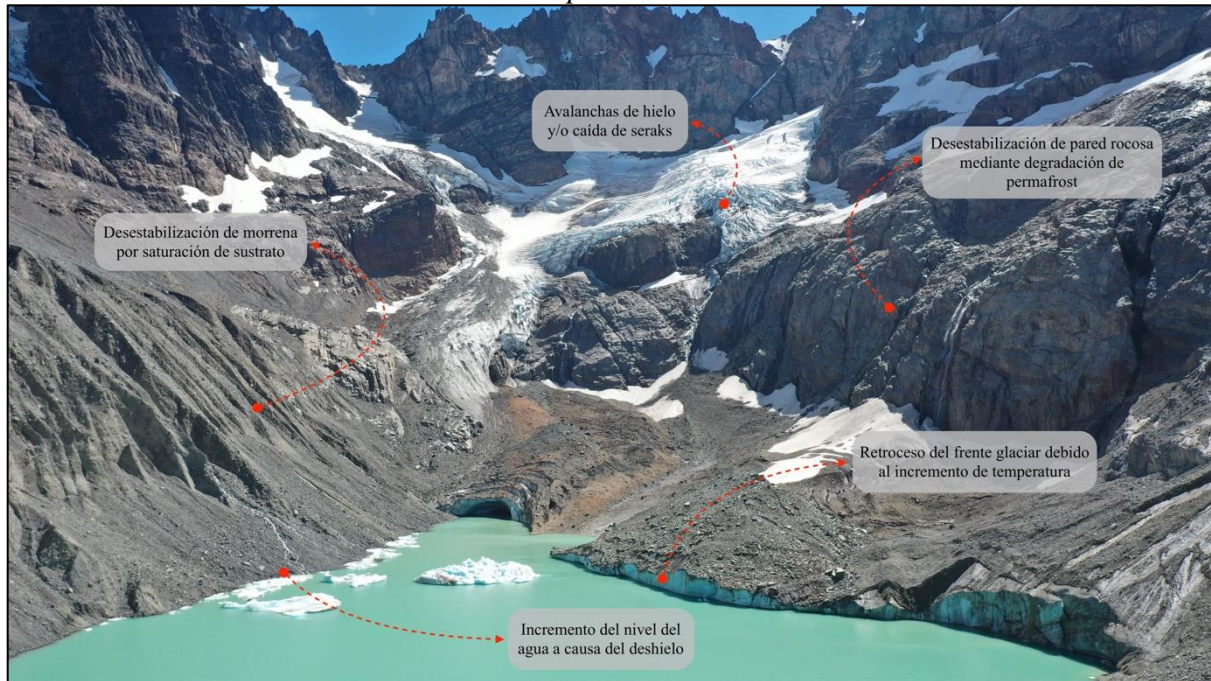
Si bien, existen valores entregados de fuentes como las estaciones meteorológicas que entregan datos con mayor precisión, estas no son representativas de áreas extensas. Además, estas presentan fallas técnicas del instrumento que generan pérdidas de toma de datos, lo cual produce una pérdida en la continuidad de los datos (Dirección General de Aguas, 2012).

Por otro lado, si bien las fuentes de datos entregan una base de datos abundante, estas presentan una resolución espacial de menor calidad que otras fuentes, lo cual se encuentra perjudicado por las variaciones de relieve que puede presentar el terreno (Universidad de Chile, 2006). No obstante, los objetivos de este trabajo priorizan el comportamiento histórico de los datos de precipitación y temperatura.

Las condiciones de temperaturas analizadas en este estudio pueden haber sido indicador de procesos desencadenantes en los eventos de GLOF. Puesto que como es mencionado por Huggel *et al.* (2012) y Westoby *et al.* (2017), existen procesos o factores desencadenante derivados de eventos de temperaturas altas. La desestabilización de las laderas es uno de los procesos o amenazas que se encuentran potencialmente activadas debido las nuevas tendencias de las condiciones de precipitación y temperaturas desde la mitad del siglo XX en contexto del cambio climático, en el cual la sensibilidad termal del hielo juega un papel importante. En zonas de alta montaña, en las cuales se ha degradado el permafrost en contexto del aumento de las temperaturas, y los cambios constantes que existen de este mismo factor, ha venido provocando la desestabilización de paredes rocosas, lo cual, sumado a la infiltración de agua desde el derretimiento de hielo o de precipitaciones, han generado las fracturas de rocas y una cadena de amenazas desde la cabecera de los valles hacia aguas abajo (Huggel *et al.*, 2012). Estos mismos, por ejemplo, pueden provocar caídas de rocas sobre lagos glaciares, o desestabilizar morrenas laterales y terminales, influyendo directamente en la generación de GLOFs -ver figura n° 28-.

Lo ocurrido en el Cerro Largo concuerda con lo mencionado por Hauser (2000) citado por Iribarren *et al.*, (2015a), el cual postula que la ocurrencia de este evento se debió a un proceso calving, el cual bloqueó el canal de drenaje del lago glaciar, acompañado de días de altas temperaturas. Por otro lado, Burton *et al.* (2020) indica que otra de las teorías corresponde a la caída de un bloque de roca sobre el lago glaciar, lo cual provocó el vaciamiento repentino. De igual manera, esto habría sido provocado por la degradación constante del permafrost sobre la pared rocosa, asociado al aumento de las temperaturas.

Figura 28: Factores claves en eventos de GLOF influenciados por el aumento de las temperaturas



Fuente: Elaboración propia (2021), fotografía tomada por Pablo Iribarren

De lo anterior se desprende la importancia de entender las condiciones termales y de precipitación previas a los eventos de GLOF. Por lo que, en los cuatro eventos de GLOFs estudiados, fueron calculados los P70, P80 y P90, con el propósito de categorizar e identificar si los GLOF responde los eventos meteorológicos.

En lo relacionado a las precipitaciones previas a los eventos de GLOFs, se divisa que el GLOF del Glaciar Ventisquero Negro corresponde al que concentra mayor cantidad de precipitaciones entre los cuatro GLOFs estudiados, con un total de 68,2 mm para el día del evento y 77,7 mm el día previo a este. Por el cual, la semana previa al evento de caracteriza por se una semana de lluvias significativas, con un promedio de 53,5 mm, el cual se posiciona como una semana muy lluviosa. Esto mismo ocurre al calcular el promedio de los 3 días antes del evento, terminando en promedio como días muy lluviosos ver tabla n° 6-.

Muy diferente es la situación de la laguna Espontánea, el cual presentó 0 mm de lluvia la semana previa al evento, y que, por lo general, durante todo el periodo, presenta la menor cantidad de precipitaciones entre los cuatro GLOFs -ver tabla n° 6-.

En cuanto a los GLOFs ocurridos en la laguna el Triángulo y el Cerro Largo, se evidenciaron condiciones muy similares de precipitación una semana previa a cada evento, en las cuales se caracterizaron por ser semanas con muy poca acumulación de lluvia, y sin días que alcancen ninguno de los percentiles calculados. En ambos GLOFs se presentaron en su mayoría días con lluvias usuales (< P70), lo cual es ve reflejado en el promedio de pp de los últimos 4 días del evento, categorizando a estos días en general como lluvias usuales -ver tabla n°6-.

Tabla 6: Precipitación asociada a GLOFs en Patagonia. Basado en datos satelitales de precipitación CHIRPS

GLOF	Gl. Ventisquero Negro	Laguna Espontánea	Laguna el Triángulo	Cerro Largo
72 hrs antes	Sin lluvia	Sin lluvia	Sin lluvia	Lluvia usual
48 hrs antes	Lluvioso	Sin lluvia	Lluvioso	Lluvia usual
24 hrs antes	Extremadamente lluvioso	Sin lluvia	Lluvia usual	Sin lluvia
día del evento	Extremadamente lluvioso	Sin lluvia	Sin lluvia	Lluvia usual
promedio	Muy lluvioso	Sin lluvia	Lluvias usuales	Lluvias usuales

Fuente: Elaboración propia (2021)

En lo relacionado a las temperaturas de cada uno de los eventos de GLOF, estos se caracterizaron por presentar histogramas de comportamiento normal, los cuales concentran gran cantidad de datos en la zona central de este. Por lo general, los datos en los cuatros GLOF se concentraban cercanos a los 0 °C, fluctuando entre el -2 °C y los 2 °C. Cabe recalcar que esta zona de Chile corresponde a un clima que oscila entre templado y boreal (Luebert & Plissock, 2016).

En cuanto a las condiciones de una semana previa en cada evento de GLOF, se divisa que tanto las condiciones previas al GLOF Cerro Largo y de la Laguna Espontánea fueron significativamente más calurosas en comparación al resto de los eventos de GLOFs. En el caso del Cerro Largo, el promedio de las temperaturas 72 horas antes del evento alcanzó a superar el P90, lo cual clasificó a este día como extremadamente cálido, llegando a presentar una máxima de 6,3 °C, por encima de los 3,3 °C que presenta el P90.

La laguna Espontánea por su parte presentó 7 días consecutivos con valores que marcan por encima del P70, llegando para los días 25 y 27 de octubre, a marcar por encima del P90. Es posible divisar que los días 26 y 27 de octubre, presentaron temperaturas mínimas y máximas muy cercanas, por lo cual, se posicionan como días cálidos, sin embargo, debido a las mínimas muy bajas durante la semana, hubo en promedio temperaturas por debajo del P70 -ver tabla n° 7-. Las temperaturas máximas marcadas se posicionan en su mayoría por encima del P80, siendo muy cálidas -ver tabla n° 8-.

La laguna del Triángulo por su parte no presenta una semana con una gran cantidad de días de altas temperaturas, sin embargo, el día 15 de abril, se alcanzó 4,7 °C de temperatura máxima, lo cual logró posicionarse por encima del P90. Esta semana presentó un promedio de -2,1 °C, correspondiente al promedio semanal más frío de los cuatros GLOFs, posicionando a esta semana como de bajas temperaturas (< P70).

Por último, la situación en el Glaciar Ventisquero Negro corresponde a una semana sin una gran cantidad de días con altas temperaturas, con promedio semanal de 3,7 °C, el cual se encuentra por debajo de la mediana de los datos del periodo completo. No obstante, los dos días antes del evento se marcaron máximas por encima del P70 -ver tabla n° 8-.

Tabla 7: Temperatura media diaria asociada a GLOFs en Patagonia. Basado en datos satelitales de temperatura NOAA/CFSV2/FOR6H

GLOF	Gl. Ventisquero Negro	Laguna Espontánea	Laguna el Triángulo	Cerro Largo
72 hrs antes	Inferior	Inferior	Inferior	Extremadamente cálido
48 hrs antes	Inferior	Inferior	Inferior	Muy cálido
24 hrs antes	Cálido	Cálido	Muy cálido	Inferior
día del evento	Inferior	Cálido	Inferior	Muy cálido
promedio	Inferior	Inferior	Inferior	Muy cálido

Fuente: Elaboración propia (2021)

Tabla 8: Temperatura máxima diaria asociada a GLOFs en Patagonia. Basado en datos satelitales de temperatura NOAA/CFSV2/FOR6H

GLOF	Gl. Ventisquero Negro	Laguna Espontánea	Laguna el Triángulo	Cerro Largo
72 hrs antes	Inferior	Muy cálido	Cálido	Extremadamente cálido
48 hrs antes	Cálido	Muy cálido	Extremadamente cálido	Muy cálido
24 hrs antes	Cálido	Cálido	Muy cálido	Inferior
día del evento	Cálido	Muy cálido	Inferior	Muy cálido
promedio	Inferior	Muy cálido	Muy cálido	Muy cálido

Fuente: Elaboración propia (2021)

5.2. Conclusiones generales

La Patagonia chilena ha sido escenario de un aumento de las amenazas asociadas al cambio climática. Una de ellas corresponde al vaciamiento repentino de lagos glaciares, el cual se encuentra vinculado al incremento en cantidad y superficie de los lagos glaciares, debido a fenómenos como el aumento de las temperaturas, derretimiento general de los glaciares, intensificación de las precipitaciones, entre otras. Esto ha generado una preocupación debido a los efectos en daños tanto de infraestructura como de vidas humanas. Por lo que se tuvo por objetivo analizar en mas detalles los procesos o condicionantes climáticos que gatillan estos fenómenos

Dentro de los eventos de GLOF estudiados, sólo uno de estos se encuentra asociado a precipitaciones extremas tantos días anteriores al evento como durante el evento (entendidas como pp por encima del percentil 90), correspondiente al GLOF del glaciar ventisquero. El resto de los GLOFs estudiados presentó en general lluvias que no sobresalen o categorizadas como lluvias usuales por encontrarse debajo del percentil 70.

Caso contrario ocurre con las condiciones de temperaturas la semana previa al evento, donde, en los cuatro casos de GLOF estudiados se marcaron temperaturas que al menos sobrepasaron uno de los percentiles calculados ($> P70$), queriendo decir, que se categorizaban como eventos de índole más extremo (por encima de percentil 70). Esto ocurrió sobre todo en los casos del Cerro Largo y la Laguna Espontánea, en los cuales en especial los dos días previos al evento, hubo temperaturas más cálidas (por encima del percentil 70) en consideración a las temperaturas típicas del registro histórico a los lugares en donde se originaron los GLOFs.

Finalmente, según lo visto en las proyecciones de aquí al 2050 en la región patagónica chilena, se espera un aumento en las temperaturas con una alta confianza, debido que, hasta lo modelos más optimistas proyectan estas condiciones, y cabe destacar que 3 de los 4 GLOF estudiados en este trabajo se asociaron en algún punto a condiciones de temperaturas extremas. Lo que seguirá repercutiendo en el derretimiento general de los glaciares, implicando a su vez, el aumento del número y superficie de los lagos glaciares en la zona. Y si bien, los GLOF son amenazas complejas de estudiar, se requiere un mayor alcance y entendimiento de estas, de cara, a las proyecciones climáticas.

Bibliografía

- Allen, S. K., Rastner, P., Arora, M., Huggel, C., & Stoffel, M. (2016). Lake outburst and debris flow disaster at Kedarnath, June 2013: hydrometeorological triggering and topographic predisposition. *Landslides*, 13(6), 1479–1491. <https://doi.org/10.1007/s10346-015-0584-3>
- Bahamontes, D. (2020). Vaciamientos súbitos de lagos glaciares como agentes geomorfológicos: Análisis comparativos de la evolución morfológica de ríos Patagónicos (tesis de postgrado). Universidad Austral de Chile, Valdivia.
- Bajracharya, S. R., & Mool, P. (2009). Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 50(53), 81–86. <https://doi.org/10.3189/172756410790595895>
- Barcaza, G., Nussbaumer, S. U., Tapia, G., Valdés, J., García, J. L., Videla, Y., Albornoz, A., & Arias, V. (2017). Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America. *Annals of Glaciology*, 58(75), 166–180. <https://doi.org/10.1017/aog.2017.28>
- Bolch, T., Peters, J., Yegorov, A., Pradhan, B., Buchroithner, M., & Blagoveshchensky, V. (2011). Identification of potentially dangerous glacial lakes in the northern Tien Shan. *Natural Hazards*, 59(3), 1691–1714. <https://doi.org/10.1007/s11069-011-9860-2>
- Bown, F., Rivera, A., Peętlicki, M., Bravo, C., Oberreuter, J., & Moffat, C. (2019). Recent ice dynamics and mass balance of Jorge Montt Glacier, Southern Patagonia Icefield. *Journal of Glaciology*, 65(253), 732–744. <https://doi.org/10.1017/jog.2019.47>
- Breien, H., De Blasio, F.V., Elverhøi, A. *et al.* Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides* 5, 271–280 (2008). <https://doi.org/10.1007/s10346-008-0118-3>
- Bravo, C., Bozkurt, D., Gonzalez-Reyes, Á., Quincey, D. J., Ross, A. N., Farías-Barahona, D., & Rojas, M. (2019). Assessing snow accumulation patterns and changes on the Patagonian Icefields. *Frontiers in Environmental Science*, 7(MAR), 1–18. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2019.00030>
- Burton, J. W., Chambers, F. B., Sincavage, R., & Cross, M. D. (2020). Analysis of glacial lake outburst flood terrain and sedimentary deposits in valle soler, Northern Patagonia Icefield. *Physical Geography*, 00(00), 1–17. <https://doi.org/10.1080/02723646.2020.1839213>

- Carrión, D. (2007). *Riesgos naturales asociados a glaciares chilenos*. Informe final de práctica profesional, Dirección general de aguas, Centro de información recursos hídricos, Santiago.
- Carrión, D. (2010). *Análisis de un posible vaciamiento del lago Greve, Campo de Hielo Sur, en relación con distintos escenarios climáticos*. 123.
- Casassa, G., Haeberli, W., Jones, G., Kaser, G., Ribstein, P., Rivera, A., & Schneider, C. (2007). Current status of Andean glaciers. *Global and Planetary Change*, 59(1–4), 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2006.11.013>
- Clague, J. (2000). A review of catastrophic drainage of moraine-dammed lakes in British Columbia. *Quaternary Science Reviews*, 19(17-18), 1763–1783. doi:10.1016/s0277-3791(00)00090-1
- CR2. (2013, 10 octubre). *Acerca del (CR)2 | Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia - CR2*. <http://www.cr2.cl/acerca-del-cr2/>
- Dirección General de Aguas & Universidad de Chile. (2012, diciembre). *Modelación del balance de masa y descarga de agua en glaciares de Chile central (VIII)*. <https://snia.mop.gob.cl/sad/GLA5565.pdf>
- Dussaillant J., A., Buytaert, W., Meier, C., & Espinoza, F. (2012). Le régime hydrologique de bassins versants éloignés soumis á des gradients extrêmes et á de brusques changements: Le bassin de Baker en Patagonie. *Hydrological Sciences Journal*, 57(8), 1530–1542. <https://doi.org/10.1080/02626667.2012.726993>
- Emmer, A. – Cochachin, A. (2013): The causes and mechanisms of moraine-dammed lake failures in the Cordillera Blanca, North American Cordillera, and Himalayas AUC *Geographica*, 48, No. 2, pp. 5–15
- Emmer, A., & Emmer, A. (2017). Glacier Retreat and Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs). In *Oxford Research Encyclopedia of Natural Hazard Science*. <https://doi.org/10.1093/acrefore/9780199389407.013.275>
- Farr, T. G., et al. (2007), The Shuttle Radar Topography Mission, *Rev. Geophys.*, 45, RG2004, doi:10.1029/2005RG000183.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M. *et al.* The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2, 150066 (2015). <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>
- Garreaud, R. D., & Rojas, M. (2013). *Large-Scale Control on the Patagonian Climate. May 2014*. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>

- GOOGLE Developers. (2012, 15 mayo). *USGS Landsat 5 Surface Reflectance Tier 1*.
https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LT05_C01_T1_SR
- GOOGLE Developers. (2013, 15 abril). *USGS Landsat 8 Surface Reflectance Tier 1*.
https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/LANDSAT_LC08_C01_T1_SR#bands
- Grabs, W. E., & Hanisch, J. (1993). *Objectives and prevention methods for glacier lake outburst floods (GLOFs)*. 218, 341–352.
- Gut, B. (2009). Trees in Patagonia. In *Choice Reviews Online* (Vol. 46, Issue 08).
<https://doi.org/10.5860/choice.46-4431>
- Harrison, S., Kargel, J. S., Huggel, C., Reynolds, J., Shugar, D. H., Betts, R. A., Emmer, A., Glasser, N., Haritashya, U. K., Klimeš, J., Reinhardt, L., Schaub, Y., Wiltshire, A., Regmi, D., & Vilímek, V. (2018). Climate change and the global pattern of moraine-dammed glacial lake outburst floods. *The Cryosphere*, 12(4), 1195–1209.
<https://doi.org/10.5194/tc-12-1195-2018>
- Hernandez Sampieri, R., Fernandez Collado, C., & Baptista Lucio, M. del P. (2010). Definición del alcance de la investigación a realizar: exploratoria, descriptiva, correlacional o explicativa. In *Metodología de la investigación*.
<http://www.casadellibro.com/libro-metodologia-de-la-investigacion-5-ed-incluye-cd-rom/9786071502919/1960006>
- Huggel, C., Kääh, A., Haeberli, W., & Krummenacher, B. (2003). Regional-scale GIS-models for assessment of hazards from glacier lake outbursts: evaluation and application in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, 3(6), 647–662. doi:10.5194/nhess-3-647-2003
- Huggel, C., Kääh, A., Haeberli, W., Teyssere, P., & Paul, F. (2002). Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: A case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 39(2), 316–330. <https://doi.org/10.1139/t01-099>
- Huggel, C., Salzmann, N., Allen, S., Caplan-Auerbach, J., Fischer, L., Haeberli, W., Larsen, C., Schneider, D., & Wessels, R. (2010). Recent and future warm extreme events and high-mountain slope stability. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 368(1919), 2435–2459. <https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0078>
- Hyndman, R.J., & Athanasopoulos, G. (2018) *Forescasting: principles and practice, 2nd edition*, OTexts: Melbourne, Australia. OTexts.com/fpp2. Accessed on March 10th, 2020.

- IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [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, and T. Waterfield (eds.)].
- IPCC, Portner, H. O., Roberts, D. C., Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Tignor, M., Poloczanska, E., Mintebek, K., Nicolai, M., Okem, A., Petzold, J., Rama, B., & Weyer, N. (2019). IPCC The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate Summary for Policymakers. *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate*, September, SPM-1-SPM-42. https://report.ipcc.ch/srocc/pdf/SROCC_SPM_Approved.pdf
- Iribarren, P., Mackintosh, A., & Norton, K. P. (2015) a. Hazardous processes and events from glacier and permafrost areas: Lessons from the Chilean and Argentinean Andes. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1), 2–21. <https://doi.org/10.1002/esp.3524>
- Iribarren, P., Mackintosh, A., & Norton, K. (2015) b. Reconstruction of a glacial lake outburst flood (GLOF) in the Engaño valley, Chilean Patagonia: Lessons for GLOF risk management. *Science of the Total Environment*, 527–528, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.04.096>
- Iribarren, P., Norton, K., Mackintosh, A., Escobar, F., Allen, S., Mazzorana, B., & Schaefer, M. (2018). Dynamics of an outburst flood originating from a small and high-altitude glacier in the Arid Andes of Chile. *Natural Hazards*, 94(1), 93–119. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3376-y>
- Iribarren Anaconda P, Virgillito J, Berkhoff J, Durán G, Kloubová M (2019) Lagunas glaciares en el valle Exploradores: evolución, peligros y desafíos para el turismo. Segundo Congreso de la Sociedad Chilena de la Criósfera, La Serena.
- Iribarren Anaconda P, Zingaretti V, Virgillito J, Rojas I, Uribe G (2019) Peligros en cadena generados por lagos glaciares: la formación de la “Laguna Espontánea” en el valle Exploradores. Segundo Congreso de la Sociedad Chilena de la Criósfera, La Serena.
- Leinss, S., Bernardini, E., Jacquemart, M., & Dokukin, M. (2020). Glacier detachments and rock-ice avalanches in the Petra Pervogo range, Tajikistan (1973–2019). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, October, 1–31. <https://doi.org/10.5194/nhess-2020-28>

- León-Munõz, J., Urbina, M. A., Garreaud, R., & Iriarte, J. L. (2018). Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). *Scientific Reports*, 8(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4>
- Liu, J., Tang, C., & Cheng, Z. (2013). *The two main mechanisms of Glacier Lake Outburst Flood in Tibet, China*. *Journal of Mountain Science*, 10(2), 239–248. doi:10.1007/s11629-013-2517-8
- Luis Alfaro Lozano. (2014). METEOROLÓGICOS Precipitaciones Extremas Para la Emisión de Avisos Meteorológicos. *Senamhi*, 1–11.
- Loriaux, T., & Casassa, G. (2013). Evolution of glacial lakes from the Northern Patagonia Icefield and terrestrial water storage in a sea-level rise context. *Global and Planetary Change*, 102, 33–40. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.12.012>
- Luebert, F., & Pliscoff, P. (2016, 24 agosto). *Sinopsis bioclimática y vegetacional de Chile / Bioclimatic and vegetational synopsis of Chile* [Conjunto de datos]. Sinópsis climática y vegetacional de Chile. Santiago, Chile: Editorial Universitaria. <https://doi.org/10.5281/zenodo.603485>.
- Mardones F., M., Aguayo A., M., Smith A., E., & Ruiz L., P. (2018). Retroceso glacial reciente en el Campo de Hielo Norte, región de Aysén, Chile: Relación con variaciones climáticas. *Revista de Geografía Norte Grande*, 2018(69), 121–147. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022018000100121>
- Marín, V. H., Tironi, A., Paredes, M. A., & Contreras, M. (2013). Modeling suspended solids in a Northern Chilean Patagonia glacier-fed fjord: GLOF scenarios under climate change conditions. *Ecological Modelling*, 264, 7–16. doi:10.1016/j.ecolmodel.2012.06.017
- Masiokas, M. H., Luckman, B. H., Villalba, R., Ripalta, A., & Rabassa, J. (2010). Little Ice Age fluctuations of Glaciar Río Manso in the north Patagonian Andes of Argentina. *Quaternary Research*, 73(1), 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2009.08.004>
- Masiokas, M. H., Cara, L., Villalba, R., Pitte, P., Luckman, B. H., Toum, E., Christie, D. A., Le Quesne, C., & Mauget, S. (2019). Streamflow variations across the Andes (18°–55°S) during the instrumental era. *Scientific Reports*, 9(1), 1–13. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-53981-x>
- Ministerio del medio ambiente. (2016). *Base digital del clima comunal de Chile*. http://basedigitaldelclima.mma.gob.cl/estudio_uno/Informe_01_08.pdf
- Ministerio del medio ambiente. (2017, 30 noviembre). *Estructura organizacional*. mma.gob.cl. <https://mma.gob.cl/estructura-organizacional/>

- Mir, R. A., Jain, S. K., Lohani, A. K., & Saraf, A. K. (2018). Glacier recession and glacial lake outburst flood studies in Zaskar basin, western Himalaya. *Journal of Hydrology*, 564, 376–396. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.031>
- Mouginot, J., & Rignot, E. (2015). *Ice motion of the Patagonian Icefields of South America*: 1441–1449. <https://doi.org/10.1002/2014GL062661.1>.
- NASA. (2006, 15 marzo). *MODIS Web*. MODIS Vegetation Index Products (NDVI and EVI). <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>
- Neil Glasser & Krister Jansson (2008) The Glacial Map of southern South America, *Journal of Maps*, 4:1, 175-196, DOI: 10.4113/jom.2008.1020
- O'Connor JE, Hardison JH, Costa JE (2001) Debris flows from failures of Neoglacial-Age moraine dams in the Three Sisters and Mount Jefferson wilderness areas, Oregon. US Geological Survey Professional Paper 1606
- Peña, H., & Escobar, F. (1985). *Análisis del aluvión de mayo de 1985 del río Manflas*. Dirección general de agua, Departamento de hidrología, Santiago.
- Quincey, D., & Carrivick, J. (2015). Glacier floods. In C. Huggel, M. Carey, J. Clague, & A. Kääb (Eds.), *The High-Mountain Cryosphere: Environmental Changes and Human Risks* (pp. 204-226). Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781107588653.012
- Reboita, M. S., Ambrizzi, T., & Rocha, R. P. da. (2009). Relationship between the southern annular mode and southern hemisphere atmospheric systems. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 24(1), 48–55. <https://doi.org/10.1590/s0102-77862009000100005>
- Rivera, J. A., Marianetti, G., & Hinrichs, S. (2018). Validation of CHIRPS precipitation dataset along the Central Andes of Argentina. *Atmospheric Research*, 213(January), 437–449. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2018.06.023>
- Rojas, M., Gallardo, L., & Bozkurt, D. (2018). Simulaciones climáticas regionales. *CR2 Publication*, 2 (Fondap 15110009), 1–27. <http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2019/06/Simulaciones-climáticas-regionales-2018.pdf>
- Round, V., Leinss, S., Huss, M., Haemmig, C., & Hajnsek, I. (2017). Surge dynamics and lake outbursts of Kyagar Glacier, Karakoram. *The Cryosphere*, 11(2), 723-739. <https://doi.org/10.5194/tc-11-723-2017>
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., Behringer, D., Hou, Y.-T., Chuang, H., Iredell, M., Ek, M., Meng, J., Yang, R., Mendez, M. P., van den Dool, H., Zhang, Q., Wang, W., Chen, M., & Becker, E. (2011). The NCEP Climate

Forecast System Version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185-2208.
<https://doi.org/10.1175/jcli-d-12-00823.1>

Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S., & García, J. (2014). Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences*, 35, 145–155.
<https://doi.org/10.5194/adgeo-35-145-2014>

Segovia Rocha, A., & Videla Giering, Y. (2017). Caracterización Glaciológica de Chile. *Investigaciones Geográficas*, (53), pp. 3-24. doi:10.5354/0719-5370.2017.41739

Tucker, C. J., Pinzon, J. E., Brown, M. E., Slayback, D. A., Pak, E. W., Mahoney, R., Vermote, E. F., & El Saleous, N. (2005). An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 26(20), 4485–4498. <https://doi.org/10.1080/01431160500168686>

Vandekerkhove, E., Bertrand, S., Mauquoy, D., McWethy, D., Reid, B., Stammen, S., Saunders, K. M., & Torrejón, F. (2020). Neoglacial increase in high-magnitude glacial lake outburst flood frequency, upper Baker River, Chilean Patagonia (47°S). *Quaternary Science Reviews*, 248, 106572.
<https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2020.106572>

Viale, M., & Garreaud, R. (1955). Journal of geophysical research. *Nature*, 175(4449), 238. <https://doi.org/10.1038/175238c0>

Xu, J., Grumbine, R. E., Shrestha, A., Eriksson, M., Yang, X., Wang, Y., & Wilkes, A. (2009). The melting Himalayas: Cascading effects of climate change on water, biodiversity, and livelihoods. *Conservation Biology*, 23(3), 520–530.
<https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2009.01237.x>

Walder, J. S., & Driedger, C. L. (1995). Frequent outburst floods from South Tahoma Glacier, Mount Rainier, U.S.A.: relation to debris flows, meteorological origin and implications for subglacial hydrology. *Journal of Glaciology*, 41(137), 1-10.
<https://doi.org/10.3189/s0022143000017718>

Wang, W., Yang, X., & Yao, T. (2012). Evaluation of ASTER GDEM and SRTM and their suitability in hydraulic modelling of a glacial lake outburst flood in southeast Tibet. *Hydrological Processes*, 26(2), 213–225. <https://doi.org/10.1002/hyp.8127>

Westoby, M.J.; Glasser, N.F.; Brasington, J.; Hambrey, M.J.; Quincey, D.J.; Reynolds, J.M. (2014). Modelling outburst floods from moraine-dammed glacial lakes. *Earth-Science Reviews*, 134(), 137–159. doi:10.1016/j.earscirev.2014.03.009

WGMS. (2017). Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014-2015). 2017, 1(1), 244. <http://www.wgms.ch>

Wilson, R., Glasser, N. F., Reynolds, J. M., Harrison, S., Anaconda, P. I., Schaefer, M., & Shannon, S. (2018). Glacial lakes of the Central and Patagonian Andes. *Global and Planetary Change*, 162(July 2017), 275–291. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.01.004>

Worni, R., Stoffel, M., Huggel, C., Volz, C., Casteller, A., & Luckman, B. (2012). Analysis and dynamic modeling of a moraine failure and glacier lake outburst flood at Ventisquero Negro, Patagonian Andes (Argentina). *Journal of Hydrology*, 444-445, 134–145. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.04.013

Yin, B., Zeng, J., Zhang, Y., Huai, B., & Wang, Y. (2018). Recent Kyagar glacier lake outburst flood frequency in Chinese Karakoram unprecedented over the last two centuries. *Natural Hazards*, 95(3), 877-881. <https://doi.org/10.1007/s11069-018-3505-7>

Anexos

Anexo n° 1: Tabla de eventos de GLOF

Anexo 2.a: Tabla de eventos de GLOFs en Patagonia identificados por Iribarren et al., (2015)

N°	Nombre	Long	Lat	Fecha aproximada	Referencia
1	Estero El Blanco	-72°52'	-46°14'	Entre años 2000 y 2003	Iribarren & Ruiz (2011); Autores
2	Río Los Leones	-73°02'	-46°44'	2000	Harrison <i>et al</i> (2006); Autores
3	Seno Mayo	-73°18'	-50°17'	Entre años 2001 y 2003	Autores
4	Gl. Olvidado	-73°12'	-50°53'	2003	Rivera & Casassa (2004); Autores
5	Península de las Montañas	-73°19'	-51°55'	Entre años 2005 y 2006	Autores
6	Gl. Ventisquero Negro	-71,82	-41,2	21 de mayo, 2009	Worni <i>et al</i> (2012)
7	Río Lacaya	-72,15	-41,3	Entre los años 2000 y 2001	Iribarren & Ruiz (2011); Autores
8	Cerro Largo	-73,93	-46,95	16 de marzo, 1989	Hauser (2000); Clague and Evans (2000); Autores

Fuente: Iribarren, Mackintosh, Norton (2015)

Anexo 1.b: Tabla de eventos de GLOFs en Patagonia identificados por Wilson et al., (2018)

N°	Long	Lat	Fecha aproximada
1	-72,11	-42,3	Entre 21/02/2000 y 16/12/2009
2	-72°34'	-45°55'	Entre 08/03/2000 y 01/02/2015
3	-73°07'	-46°32'	Entre 04/12/2015 y 07/01/2016
4	-72°26'	-46°32'	Entre 08/03/2000 y 23/02/2010
5	-73°02'	-46°37'	Entre 08/03/2000 y 01/01/2013
6	-73°06'	-49°42'	Entre 12/03/2001 y 22/10/2014
7	-73°05'	-49°44'	Entre 12/03/2001 y 02/02/2016

Fuente: Wilson et al (2018)

Anexo 1.c: Tabla de Eventos de GLOFs en Patagonia identificados por Iribarren

N°	Nombre	Long	Lat	Fecha aproximada
1	Río Huiña	-72,88	-46,27	Entre 2015 y 2016
2	Glaciar Bernardo	-73,74	-48,54	Entre agosto y octubre 2019
3	Río Turbio	-72,13	-42,28	Entre junio y julio 2017
4	Laguna Triángulo	-73,15	-46,59	17 de abril, 2018
5	Laguna Espontánea	-72,92	-46,57	27 de oct, 2018

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Anexo n° 2: Descarga de imágenes satelitales para análisis geomorfológico

N°	Nombre	Fecha Estimada	Fecha descarga de imagen
1	Estero El Blanco	Entre años 200 y 2003	31-12-2002
2	Río Los Leones	2000	13-03-2001
3	Seno Mayo	Entre años 2001 y 2003	Base Map
4	Gl. Olvidado	2003	03-03-2019
5	Península de las Montañas	Entre años 2005 y 2006	22-02-2006
6	Gl. Ventisquero	21 de mayo, 2009	06-12-2009
7	Río Lacaya	Entre los años 2000 y 2001	31-12-2002
8	1	Entre 21/02/2000 y 16/12/2009	23-01-2010
9	2	Entre 08/03/2000 y 01/02/2015	18-01-2014

10	3	Entre 04/12/2015 y 07/01/2016	02-12-2016
11	4	Entre 08/03/2000 y 23/02/2010	20-02-2011
12	5	Entre 08/03/2000 y 01/01/2013	23-10-2013
13	6	Entre 12/03/2001 y 22/10/2014	04-02-2017
14	7	Entre 12/03/2001 y 02/02/2016	04-02-2017
15	Río Huiña	Entre 2015 y 2016	02-12-2016
16	Glaciar Bernarno	Entre agosto y octubre 2019	09-11-2019
17	Río Turbio	Entre Junio y Julio 2017	13-01-2018

Fuente: Elaboración propia, 2020.

Anexo nº3: Códigos utilizados en Google earth engine (GEE)

Anexo 3.a: Código ocupado para descarga de imágenes Landsat 5 y 8 (gee)

```
In [ ]:
var table = ee.FeatureCollection("users/Ctlnacvdcr/glof_shp");

var imagen= ee.ImageCollection("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR")
.filterDate('2019-01-01', '2019-12-30')
.select(['B2', 'B3', 'B4'])
.filterBounds(table)
.filterMetadata("CLOUD_COVER", "Less_than", 20);

print(imagen);

var imagen1= ee.Image("LANDSAT/LC08/C01/T1_SR/LC08_228098_20190205")
.select(['B4', 'B3', 'B2']);

Map.addLayer(imagen1,{
  max:2500,
  min:0,
  gamma:1.5,
  bands:['B4', 'B3', 'B2']},
  'Imagen 1');

Map.addLayer(table.draw({color:'black'}), {}, 'Ptos GLOF');
```

Fuente: Elaboración propia (2020)

Anexo 3.b: Código ocupado para descarga de archivos CSV con datos de índice NDVI

```
In [ ]: var table = ee.FeatureCollection("users/Ctlnacvdcr/GLOFS/rio_lacaya_poly");

//Creando la banda NDVI en cada imagen de la coleccion
var addNDVI = function(image) {
  var nir = image.select('sur_refl_b02');
  var red = image.select('sur_refl_b01');
  var ndvi = nir.subtract(red).divide(nir.add(red)).rename('NDVI')
  //var ndvi = image.normalizedDifference(['B4', 'B3']).rename('NDVI');
  return image.addBands(ndvi);
};

//Agregando la banda NDVI a la coleccion entera
var coleccion = ee.ImageCollection("MODIS/006/MOD09GQ")
.map(addNDVI);

// Seleccionando la banda NDVI y filtrando por fecha
var dataset = coleccion
.select("NDVI")
.filterDate("2000-01-01", "2002-12-30");

//Escalar la coleccion
var ndvi_escala = dataset.map(function(img){
  return img.multiply(1).copyProperties(img, ['system:time_start'])
});

//Creacion del gráfico
var graph = ui.Chart.image.seriesByRegion(dataset, table, ee.Reducer.mean(), 'NDVI', 250);
print(graph);
```

Fuente: editado desde Sarricolea (2020)

Anexo nº 4: Códigos ocupado par objetivo nº 2

Anexo 4.a: Código ocupado para descarga de archivos CHIRPS con datos de precipitación

Descarga de imágenes CHIRPS

Importando librerías

```
In [ ]: import ee
ee.Initialize()
import datetime
from matplotlib import dates
import matplotlib.dates as mdates
import pandas as pd
import matplotlib as plt
import numpy as np
from pylab import *

import geopandas as gpd
from IPython.display import Image, display
import os
import glob
import zipfile
from subprocess import call
```

Selección de colección y filtros

```
In [ ]: #selección de colección
coleccion= "UCSB-CHG/CHIRPS/DAILY"

#selección de shp de vértices
pto= gpd.read_file(r"vertices_espontanea.gpkg")

#filtro de fecha
start_date= "2006-01-01"
end_date= "2014-01-01"

#filtro de proyección
crs= "EPSG:32718"
```

Crear lista de imágenes disponibles filtrando por fecha y localización

```
In [ ]: glof= pto.to_crs({'init': 'epsg:4326'})
glof["x"] = glof.centroid.map(lambda p: p.x)
glof["y"] = glof.centroid.map(lambda p: p.y)
new = glof[["x", "y"]].values.tolist()
shapefile = [new]
```

Descarga múltiple de imágenes

```
In [ ]: pto_glof = ee.Geometry.Polygon(new)

gpm = ee.ImageCollection(coleccion).filterDate(start_date, end_date).filterBounds(pto_glof)

for images in gpm.getInfo()['features']:
    imagel = ee.Image(images["id"]).select(['precipitation'])
    name= images["properties"]['system:index']

    task=ee.batch.Export.image.toDrive(image= imagel,
                                       description=name+"CHIRP",
                                       folder="espontanea_30a",
                                       scale= 5000,
                                       crs=crs,
                                       region= pto_glof)

    task.start()
    print(task.status())
```

Fuente: Pablo Iribarren (2020)

Anexo 4.b: Código ocupado para procesamiento de "raster sampling" con datos de precipitación

Proceso "raster sampling" Qgis

Importando librerías

```
In [ ]: #Herramientas generales

import sys
import os
import matplotlib.pyplot as plt
import geopandas as gpd
import glob
import pandas as pd
from statsmodels.tsa.seasonal import seasonal_decompose

#Herramientas de QGIS

from osgeo import ogr
from qgis.core import *
from qgis.core import QgsProject

from qgis.core import (
    QgsApplication,
    QgsProcessingFeedback,
    QgsVectorLayer
)

from qgis.analysis import QgsNativeAlgorithms

QgsApplication.setPrefixPath(r'C:\OSGeo4W64\apps\qgis', True)
qgs = QgsApplication([], False)
qgs.initQgis()
sys.path.append(r'C:\OSGeo4W64\apps\qgis\python\plugins')
QgsApplication.processingRegistry().addProvider(QgsNativeAlgorithms())

import processing
from processing.core.Processing import Processing
Processing.initialize()

%matplotlib inline
```

Procesamiento múltiple de "raster sampling"

```
In [ ]: #rastersampling

#archivo de punto
punto= r"\\Mac\Home\Desktop\MEMORIA\Resultados\Obl_pasol\glofs_finales\cerro_largo\cerro_largo_pto.gpkg"

#archivo de punto con info precipitaciones
punto_pp= r"\\Mac\Home\Desktop\MEMORIA\Resultados\Obl_pasol\glofs_finales\cerro_largo\CL_30a.gpkg"

#carpeta de archivos CHIRPS
carpeta= glob.glob(r"\\Mac\Home\Desktop\MEMORIA\Resultados\Obl_pasol\glofs_finales\cerro_largo\cerro_largo_30a/*.tif")

# Loop de raster sampling
pp=[]

for i in range(len(carpeta)):

    try:

        processing.run("qgis:rastersampling", {'INPUT':punto,
                                                'RASTERCOPY':carpeta[i],
                                                'COLUMN_PREFIX':'PP_1',
                                                'OUTPUT':punto_pp})

        muestra= gpd.read_file(punto_pp)
        muestra["Fecha"]= carpeta[i][-17:-9]
        print(carpeta[i][-17:-9])

        muestra["Fecha"]=pd.to_datetime(muestra["Fecha"],format="%Y%m%d")
        pp.append(muestra)

    except:

        print("No se pudo procesar imagen", carpeta[i])
        pass

#Creación de dataframe con datos de pp
baseFinal= pd.concat(pp)
baseFinal.set_index("Fecha",inplace=True)
```

Fuente: Pablo Iribarren (2020)

Anexo 4.c: Código ocupado para la realización de gráficos de histograma

```
In [ ]: import sys
import os
import matplotlib.pyplot as plt
import geopandas as gpd
import glob
import pandas as pd
from statsmodels.tsa.seasonal import seasonal_decompose
import numpy as np

#Herramientas de QGIS

from osgeo import ogr
from qgis.core import *
from qgis.core import QgsProject

from qgis.core import (
    QgsApplication,
    QgsProcessingFeedback,
    QgsVectorLayer
)

from qgis.analysis import QgsNativeAlgorithms

QgsApplication.setPrefixPath(r'C:\OSGeo4W64\apps\qgis', True)
qgs = QgsApplication([], False)
qgs.initQgis()
sys.path.append(r'C:\OSGeo4W64\apps\qgis\python\plugins')
QgsApplication.processingRegistry().addProvider(QgsNativeAlgorithms())

import processing
from processing.core.Processing import Processing
Processing.initialize()

%matplotlib inline

In [ ]: data = pd.read_csv("cerro_largo_NOAA.csv")

In [ ]: data["Fecha"] = data.index + "-" + data["system:time_start"].astype('str')

In [ ]: data["Fecha"] = pd.to_datetime(data["Fecha"], format="%b %d-%Y")

In [ ]: data.set_index("Fecha", inplace=True)
data

In [ ]: data["tcel"] = data["00000000000000000000"] - 273.15
data

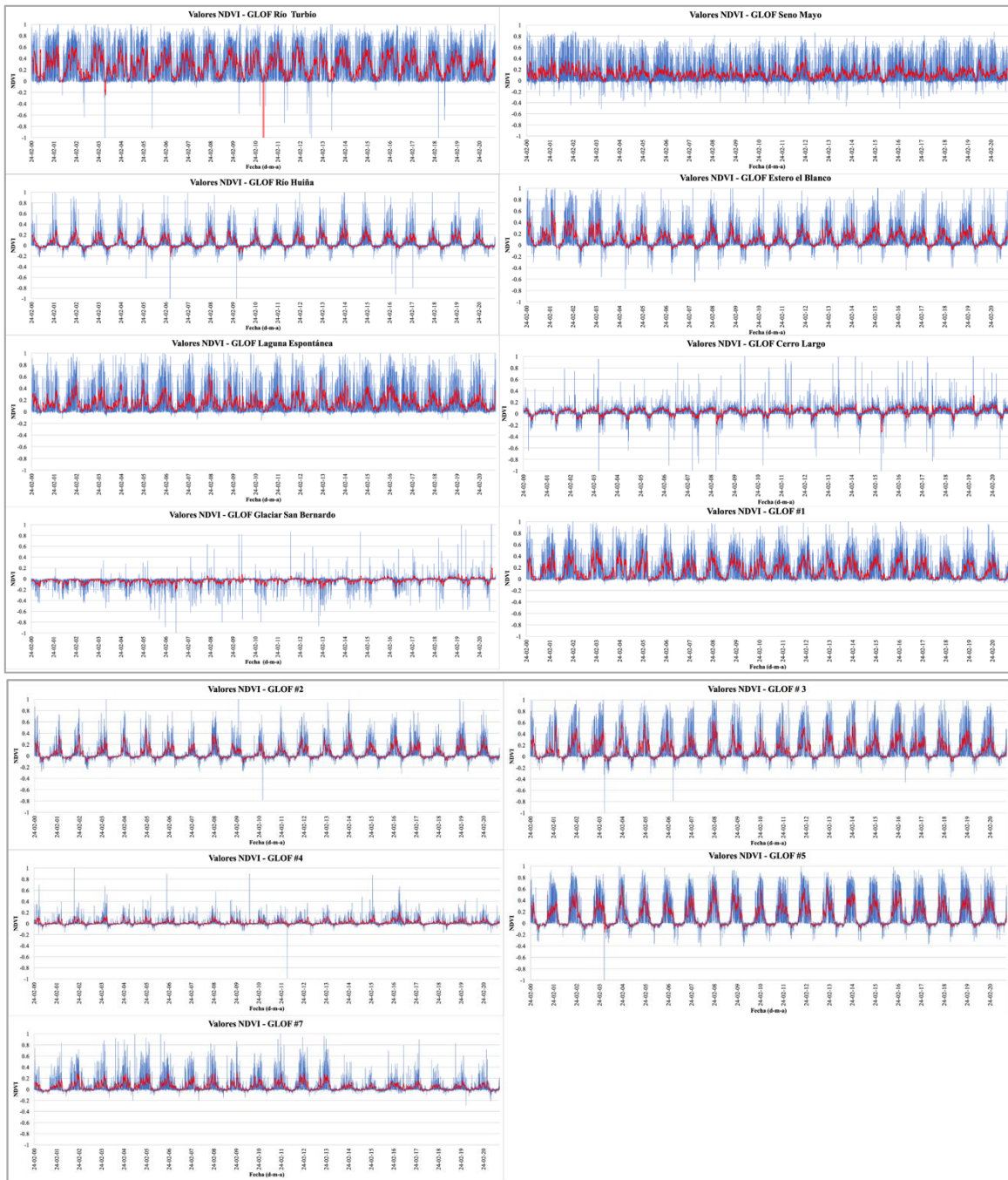
In [ ]: fig = plt.figure(figsize=(15,5))

ax = fig.add_subplot(111)
data["tcel"].plot.hist(ax=ax, weights = (np.ones_like(np.arange(len(data.index)))/ len(data.index))*100, bins=30,
color = "grey")
plt.xlabel("Temperatura (°C)", fontweight="bold", fontsize=15)
plt.ylabel("Frecuencia (%)", fontweight="bold", fontsize=15)
plt.title("Histograma de temperaturas\nGLOF Cerro Largo (1979-2020)", fontweight="bold", fontsize=20)
plt.grid()
plt.xticks(range(0,30, 1))
plt.yticks(range(0,19,2))
plt.xlim(0,30)

#fig.savefig("hist_tem_triangulo.png")
```

Fuente: Elaboración propia (2020)

Anexo 5: Series de tiempo de NDVI en corredores fluviales producto de GLOFS



Fuente: Elaboración propia (2020)