

**ESTIMACIÓN DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA
EXTENSIÓN Y VOLUMEN DE LOS GLACIARES GREY, TYNDALL Y
DICKSON, EN EL PERIODO 1998 – 2017.**

Néstor Sáez Alveal

Proyecto de Título presentado al

Departamento de Ciencias Geodésicas y Geomática

Universidad de Concepción, Campus Los Ángeles

En cumplimiento del requisito parcial

Para obtener el título de

Ingeniero Geomático

Escrito bajo la orientación del profesor

Dr. Ing. Guido Staub (Dpto. Cs. Geodésicas y Geomática)

Aprobado por la comisión

Dr. Cs. Rodrigo Abarca del Río (Dpto. Geofísica)

Dr. Cs. Henry Montecino (Dpto. Cs. Geodésicas y Geomática)

Los Ángeles

Agosto, 2018

Resumen

Los glaciares del Parque Nacional Torres del Paine (PNTP), son agentes fundamentales en el equilibrio hídrico de la duodécima región, sin embargo se encuentran amenazados por los efectos del cambio climático, provocando un derretimiento del hielo constante hasta el año 2003.

En este proyecto se han analizado, calculado y representado las variaciones temporales de área y volumen de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson (Pertenecientes al PNTP) en el periodo 1998 – 2017.

Para el estudio se utilizaron métodos automatizados de diferenciación de píxeles (*Normalized Difference Snow Index* y *Band Ratio 3/5*) y combinaciones de bandas a partir de imágenes satelitales (*Landsat*), además, se utilizaron modelos digitales de elevación (*ASTER GLOBAL DEM V2*, *SRTM* y *WorldDEM*) y datos climáticos, para estimar la relación entre las variaciones (área y volumen) de los glaciares anteriormente nombrados y las tendencias climáticas en la zona.

Los resultados son alarmantes debido al retroceso de los glaciares Tyndall, Grey y Dickson en el periodo de estudio, alcanzando los 13,68, 10,87 y 3,94 km² de área y 6,80, 2,67 y 0,58 km³ de volumen, respectivamente. Este retroceso se encuentra fuertemente relacionado con las variaciones de temperatura y precipitación registradas en las estaciones DGA del PNTP desde 1998.

Palabras clave: Cambio climático, Extensión, Volumen, Imágenes satelitales, Modelos digitales de elevación, *Landsat*, *ASTER GLOBAL DEM*, *SRTM*, *WorldDEM*, *NDSI*, *Ratio 3/5*

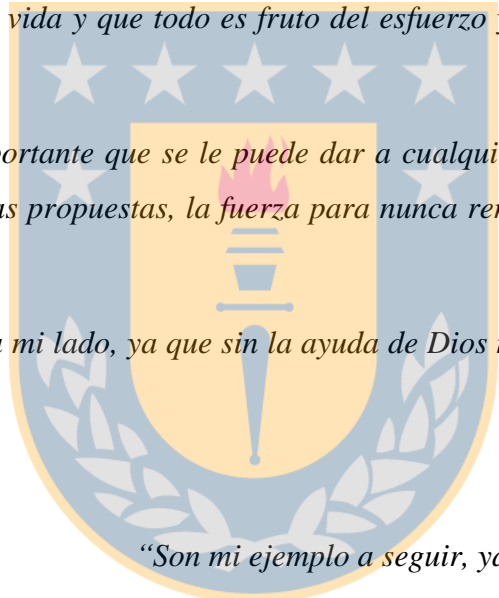
Dedicatoria

A mis padres Carmen y Néstor, hermano Eric y seres queridos, por ese cariño incondicional que me han brindado en todas las etapas de mi vida, apoyándome en cada una de las decisiones que tomaba y desafíos que emprendía. Por siempre estar en los momentos de alegría y dificultad, y nunca dudar de mis capacidades en ocasiones que incluso yo lo hacía.

Por esforzarse cada día con tal de entregar las mejores condiciones para mi desarrollo humano y profesional, dejando de lado a veces sus propias actividades con tal de estar ahí cuando los necesitaba. Por enseñarme que las cosas se obtienen trabajando duro por ellas, que nada viene gratis en la vida y que todo es fruto del esfuerzo y perseverancia que uno realice todos los días.

Por entregarme lo más importante que se le puede dar a cualquier persona, la confianza para superar todas las metas propuestas, la fuerza para nunca rendirse y disfrutar la vida al máximo.

Gracias por siempre estar a mi lado, ya que sin la ayuda de Dios ni la de ustedes, nada de esto sería posible...



“Son mi ejemplo a seguir, ya que ustedes crecieron y se formaron en los entornos más hostiles y humildes, luchando durante sus vidas para entregarles a su hijos las mejores herramientas para enfrentar el mundo actual.

Muchas gracias Padres. Son mi mayor orgullo”.

Agradecimientos

En primer lugar a Dios, por ser mi pilar en los momentos de dificultad y siempre entregar esa cuota de ayuda inexplicable en los momentos más complicados. Estoy seguro que sin su presencia nada de esto sería posible.

A mi profesor guía Guido Staub, por su colaboración a lo largo de este proyecto como también durante mi formación universitaria, entregando sus certeras opiniones, comentarios y sugerencias en cada momento que fuera necesario, destacando siempre por su gran calidad profesional y humana.

A Don Andrés Rivera, Dr. en Glaciología e Investigador del Centro de Estudios Científicos (CECs), por su excelente disposición para responder cada una de las dudas presentadas y por entregarme material de apoyo que fue fundamental para la realización del proyecto.

A los profesores de la comisión evaluadora, por entregar su tiempo y conocimiento al momento de corregir este proyecto, ya que cada una de las observaciones fue de gran importancia en el resultado final.

A mi familia, por siempre tener fe en mis capacidades, ayudando en cada una de las cosas que estuviera a su alcance y entregando sus principios, valores y amor incondicional cada día.

A mi compañera y pareja Daniela Mardones que me ha entregado su apoyo y amor desde el primer día, confiando en mis capacidades e instándome a trabajar cada día con tal de lograr el objetivo de ser profesional.

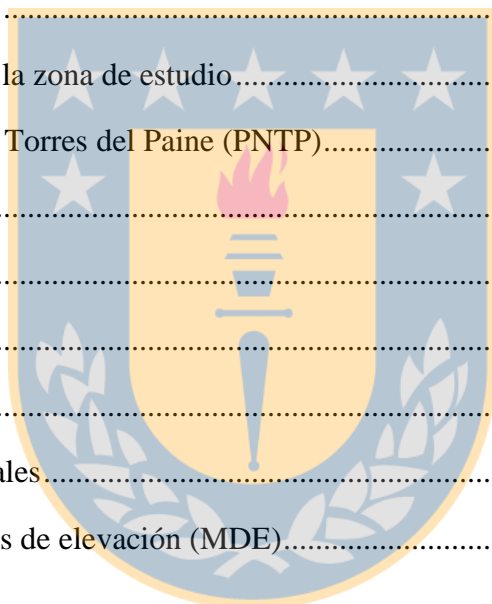
A mis amigos, especialmente a Esteban, Italo y Aníbal, por los momentos vividos a lo largo de la carrera, por siempre apoyarnos en las situaciones más complicadas y a la vez por compartir el objetivo de convertirnos en ingenieros de la mejor forma. Espero que esta amistad perdure siempre y supere las barreras académicas.

Y en general a cada uno de mis compañeros, profesores y personas que estuvieron directa o indirectamente durante estos años de carrera. Muchísimas Gracias.

Índice de Contenidos

1. Aspectos preliminares	1
1.1. Introducción	1
1.2. Planteamiento del problema.....	2
1.3. Objetivo general.....	3
1.4. Objetivos específicos	3
1.5. Metodología de proyecto	3
2. Fundamentos teóricos.....	6
2.1. Conceptos.....	6
2.1.1. Definición de glaciar	6
2.1.2. Formación.....	6
2.1.3. Campos de Hielo	8
2.1.4. Importancia hídrica de los glaciares.....	9
2.2. Distribución de los glaciares a nivel mundial y nacional	12
2.2.1. Distribución en el mundo	12
2.2.1.1. Distribución en Chile.....	13
2.2.2. Estado de los glaciares en Chile.....	14
2.3. Cambio Climático	16
2.3.1. El Cambio Climático como problemática	16
2.3.2. Causas.....	17
2.3.3. Efectos y proyecciones a futuro	18
2.3.3.1. La atmosfera	18
2.3.3.2. Los océanos	19
2.3.3.3. La criosfera.....	20
2.3.3.4. El nivel del mar	21

2.3.4.	Relación del Cambio Climático con los glaciares.....	23
2.4.	Panorama climático en el país	25
2.4.3.	Clima en Chile.....	25
2.4.4.	Panorama actual	27
2.4.5.	Temperatura	28
2.4.6.	Precipitación.....	30
2.4.7.	Eventos climáticos extremos.....	31
3.	Desarrollo del proyecto	33
3.1.	Caracterización de la zona de estudio.....	33
3.1.1.	Parque Nacional Torres del Paine (PNTTP).....	33
3.1.2.	Glaciar Grey	34
3.1.3.	Glaciar Tyndall.....	36
3.1.4.	Glaciar Dickson.....	37
3.2.	Datos	38
3.2.1.	Imágenes satelitales.....	38
3.2.2.	Modelos digitales de elevación (MDE).....	40
3.2.3.	Datos climáticos	42
3.3.	Pre procesamiento.....	43
3.4.	Procesamiento	45
3.4.1.	NDSI.....	45
3.4.2.	Band Ratio 3/5.....	45
3.4.3.	Digitalización manual y combinación de bandas.....	47
3.4.4.	Estimación variaciones en glaciares.....	48
4.	Estimación de las variaciones temporales de los glaciares	53
4.1.	Glaciar Tyndall	53
4.2.	Glaciar Grey.....	56



4.3.	Glaciar Dickson	58
4.4.	Retroceso de las líneas de equilibrios de los glaciares	60
5.	Análisis de datos climáticos	62
5.1.	Análisis de Temperaturas.....	62
5.1.1.	Estación Torres del Paine.....	62
5.1.2.	Estación Glaciar Tyndall.....	66
5.2.	Análisis de Precipitaciones	69
5.2.1.	Estación Torres del Paine.....	69
5.2.2.	Estación Lago Dickson.....	71
5.2.3.	Estación Lago Grey.....	73
6.	Relación entre retroceso glaciar y variables climáticas	75
6.1.	Coefficiente de correlación de variables y significancia estadística.....	76
6.2.	Resultados y análisis de las relaciones entre variaciones temporales glaciares y variables climáticas.....	77
6.2.1.	Glaciar Grey.....	78
6.2.2.	Glaciar Dickson.....	79
6.2.3.	Glaciar Tyndall.....	80
7.	Conclusiones	83
8.	Referencias	85

Índice de Figuras

Figura 1: Zonas principales de un glaciar.....	7
Figura 2: Campos de Hielo Sur, Coordenadas UTM 18 Sur. Recuperado Google Earth (2018).	9
Figura 3: Perfil Altitudinal de la Cordillera de los Andes a lo largo de Chile, con las líneas de nieves y limites aproximados de zonificación del país. Recuperado de Broecker y Denton (1990).	13
Figura 4: Nivel de CO2 en ppm en los últimos 400 mil años. Fuente IPCC (2014).	16
Figura 5: Concentración mensual de Dióxido de Carbono, periodo 1960-2017.	17
Figura 6: Anomalía observada en el promedio mundial de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas combinadas, 1850-2012.	18
Figura 7: Niveles de CO2 atmosférico 1950-2010.	19
Figura 8: Cambio en el contenido calórico medio global de las capas superiores del océano.	20
Figura 9: Extensión de Hielo marino en verano en el Ártico desde 1900.	21
Figura 10: Cambio en el nivel medio global del mar 1900-Actualidad.	21
Figura 11: Mapa de Tendencias expresadas en °C por década de la temperatura mínima, media y máxima, la escala de colores representa en azul las tendencias negativas (más frío) y rojo las tendencias positivas (más cálido).	29
Figura 12: Parque Nacional Torres del Paine. Región de Magallanes y Antártica Chilena. (CONAF plan de mejoramiento de gestión, 2012).....	33
Figura 13: Glaciar Grey. Parque Nacional Torres del Paine. (USGS, 2017)	35
Figura 14: Glaciar Tyndall. Parque Nacional Torres del Paine. (USGS, 2017).....	36
Figura 15: Glaciar Dickson. Parque Nacional Torres del Paine. (USGS, 2017).....	37
Figura 16: Representación 3D Glaciar Grey en QGIS. Parque Nacional Torres del Paine. Elaboración Propia (2018).....	41
Figura 17: Glaciar Tyndall en combinaciones de banda 742 (izquierda), 567 (centro) y 451 (derecha), USGS (2017).	47
Figura 18: Línea de Equilibrio Dickson (Izquierda), Grey (Centro) y Tyndall (Derecha), banda verde OLI/TIR, año 2017.....	48

Figura 19: Variaciones alturas (m) línea de equilibrio Glaciar Tyndall. Año 2017 (Izquierda), Año 1998 (Derecha).	52
Figura 20: Antes y después Glaciar Tyndall, 1998(rojo) y 2017 (azul). Elaboración propia.	55
Figura 21: Variaciones Glaciar Tyndall, Elaboración propia (2018).	55
Figura 22: Antes y después Glaciar Grey, 1998(rojo) y 2017 (azul). Elaboración propia. ...	57
Figura 23: Variaciones Glaciar Grey, Elaboración propia (2018).	57
Figura 24: Antes y después Glaciar Dickson, 1998(rojo) y 2017 (azul). Elaboración propia.	59
Figura 25: Variaciones Glaciar Dickson, Elaboración propia (2018).	59
Figura 26: Línea de Equilibrio Glaciar Grey 2011 sensor TM (Izquierda) y 2017 sensor OLI/TIR (Derecha). Elaboración propia.	60
Figura 27: Variaciones anuales temperatura mínima media estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.	64
Figura 28: Variaciones anuales trimestre Septiembre-Noviembre temperatura mínima media estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.	65
Figura 29: Variaciones anuales temperatura máxima media trimestre Junio-Agosto estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.	66
Figura 30: Variaciones anuales temperatura mínima media estación DGA Glaciar Tyndall, periodo 2012-2017.	67
Figura 31: Variaciones anuales temperatura máxima media estación DGA Glaciar Tyndall, periodo 2012-2017.	68
Figura 32: Variaciones anuales precipitaciones (mm) del mes de Junio, estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.	69
Figura 33: Variaciones anuales precipitaciones (mm) del trimestre Septiembre-Noviembre, estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.	71
Figura 34: Variaciones anuales precipitaciones (mm) del mes de Febrero, estación DGA Lago Dickson, periodo 2004-2017	73
Figura 35: Variaciones anuales precipitaciones (mm), estación DGA Lago Grey, periodo 2012-2017	74

Índice de Tablas

Tabla 1: Área aproximada cubierta por glaciares (km ²)	12
Tabla 2: Glaciares por zonas glaciológicas (Km ²).....	14
Tabla 3: Contribución al aumento del nivel medio del mar (mm/año)	22
Tabla 4: Variaciones Frontales (m a-1) Glaciar Grey.	35
Tabla 5: Frontal variations (m a-1) of Glaciar Tyndall	36
Tabla 6: Variaciones Frontales (m a-1) of Glaciar Dickson.....	37
Tabla 7: Características de los sensores Landsat 5,7 y 8.....	39
Tabla 8: Imágenes de Estudio.....	40
Tabla 9: Misiones MDE	41
Tabla 10: Archivos MDE.	42
Tabla 11: Estaciones Meteorológicas DGA, Parque Nacional Torres del Paine.....	43
Tabla 12: Valores Índice NDSI	45
Tabla 13: Valores Band Ratio 3/5	46
Tabla 14: Asociación época de estudio de Glaciares a sensor MDE.....	49
Tabla 15: Asociación fecha de adquisición Imágenes satelitales - Archivos MDE.	51
Tabla 16: Altura (m) mínimas y máximas Área de ablación glaciares a partir de MDE.	51
Tabla 17: Variaciones de Glaciares Dickson, Grey, Tyndall.	53
Tabla 18: Variaciones Área y Volumen desde línea de equilibrio 2017 del Glaciar Tyndall. 1998-2017.....	54
Tabla 19: Variaciones Área y Volumen desde línea de equilibrio 2017 del Glaciar Grey. 1998-2017.....	56
Tabla 20: Variaciones Área y Volumen desde línea de equilibrio 2017 del Glaciar Dickson. 1998-2017.....	58
Tabla 21: Altura media (m) de línea de equilibrio 1998-2017.....	61

Tabla 22: Análisis de Series Temporales de temperatura (°C) anuales, Estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.....	63
Tabla 23: Análisis de Series Temporales de temperatura (° C) anuales, Estación DGA Glaciar Tyndall, periodo 2012-2017.	67
Tabla 24: Análisis de Series Temporales de precipitaciones (mm) anuales, Estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.	70
Tabla 25: Análisis de Series Temporales de precipitaciones (mm) anuales, Estación DGA Lago Dickson, periodo 2004-2017	72
Tabla 26: Análisis de Series Temporales de precipitaciones (mm) anuales, Estación DGA Lago Grey, periodo 2012-2017	74
Tabla 27: Variaciones Campo de Hielo Norte y Sur, 1870-2011.....	75
Tabla 28: Relaciones Glaciares y variables climáticas, estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.....	77
Tabla 29: Coef. de Correlación y significancia, glaciar Grey y variables climáticas estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.....	78
Tabla 30: Coef. de Correlación y significancia, glaciar Dickson y variables climáticas estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.....	80
Tabla 31: Coef. de Correlación y significancia, glaciar Tyndall y variables climáticas estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.....	81

Listado de siglas y abreviaturas

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change.

CECS: Centro de Estudios Científicos.

CHN: Campo de Hielo Norte.

CHS: Campo de Hielo Sur.

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

CONAF: Corporación Nacional Forestal.

DGA: Dirección General de Aguas.

DMCH: Dirección Meteorológica de Chile.

GEI: Gases de Efecto Invernadero.

GISS: Goddard Institute for Space Studies.

INACH: Instituto Antártico Chileno.

MDE: Modelo Digital de Elevación.

NASA: National Aeronautics and Space Administration.

NDSI: Normalized Difference Snow Index.

NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration.

MMA: Ministerio de Medio Ambiente.

PNTP: Parque Nacional Torres del Paine.

Ppm: Partes por millón.

Ppmm: Partes por mil millones.

SNASPE: Sistema Nacional de Áreas Protegidas.

UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization.

USGS: United States Geological Service.



1. Aspectos preliminares

1.1. Introducción

El cambio climático es una realidad hoy en día, afectando los ecosistemas, la población y las actividades que se realizan en el planeta de forma alarmante. El aceleramiento de este cambio se debe principalmente al aumento desmesurado de emisiones de gases derivados de combustibles fósiles desde la época preindustrial hasta nuestros días, contaminando la atmósfera y acidificando los océanos a niveles sin precedentes (IPCC, 2013). Este problema de grandes dimensiones, posee como causa principal la intervención humana, a través de la emisión de contaminantes y el mezquino cuidado de los recursos naturales, y dentro de sus principales consecuencias se encuentran el aumento del nivel medio del mar, el incremento de la temperatura media global de la superficie y de los océanos, el retroceso y adelgazamiento del hielo marino, la reducción de la flora y fauna, el aumento de la contaminación en el aire y aumento en la ocurrencia de eventos climáticos extremos, entre otros (IPCC, 2013). Provocando alteraciones nunca antes registradas en el planeta.

Dentro de las consecuencias más visibles del cambio climático, se encuentra el retroceso glaciar, un problema que crece año tras año, disminuyendo aceleradamente el tamaño de estos cuerpos de hielo, considerados como las reservas de agua dulce más importantes en la actualidad (IPCC, 2014a).

En Chile se encuentran numerosos glaciares, que debido a la accidentada geografía nacional varían morfológicamente a medida que se avanza hacia el sur, aumentando su cantidad y extensión en las regiones más australes (CECS, 2009a). Entre la XI y XII región se encuentra la mayor reserva de glaciares de la Patagonia y de Suramérica, Los Campos de Hielo, que destacan por su gran importancia en la dinámica natural afectando los ciclos hidrológicos como también la biodiversidad a nivel regional (CECS, 2009b).

1.2. Planteamiento del problema

Chile es un país diverso, con una riqueza natural única en el mundo (Manzur, 2005). Dentro de los recursos naturales más importantes en el país se encuentran los glaciares, que se han visto afectados de manera continua por el constante incremento de la temperatura media global, en torno a los 0,9° C desde 1970 hasta la última actualización del año 2017 (NASA/GISS, 2018), provocando rápidos efectos en las zonas australes del planeta, incluyendo el extremo sur del país.

En este contexto, Chile presenta una gran concentración de glaciares en la zona austral, principalmente entre los Campos de Hielo Norte (CHN) y Sur (CHS). Al sureste de los CHS, se encuentra el Parque Nacional Torres del Paine, el cual presenta una gran diversidad física, climática y biológica (Mora, 2006). Este parque es hogar de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson que destacan por su tamaño y a su vez, acelerado decrecimiento (Rivera y Casassa, 2004).

De acuerdo con Rivera y Casassa (2004), los glaciares Grey, Tyndall y Dickson han perdido 7,4, 8,1 y 2,1 km² de superficie en el periodo 1949-2004. Números como los presentados anteriormente convierte a estos glaciares en objetos de estudio para la cuantificación de los cambios de extensión y volumen, y de esta forma estimar cómo es su comportamiento ante el presente escenario climático.

En la actualidad el tema toma mayor relevancia debido al desprendimiento de un gran bloque de hielo del glaciar Grey, el cual ha sido avistado por las autoridades del parque nacional el día 28 de noviembre del 2017. Dicho bloque tiene unos 350 metros de largo por 300 de ancho aproximadamente, lo cual puede provocar inconvenientes en la navegación turística, principalmente por lo angosto del lago Grey, afirma el glaciólogo Dr. Ricardo Jaña del Instituto Antártico Chileno (INACH).

Estos antecedentes justifican la necesidad de determinar el comportamiento de los glaciares de mayor envergadura en el PNTP en los últimos 19 años ante el actual escenario climático, entregando resultados que permitan establecer a futuro planes de trabajo y concientización medioambiental con el fin de proteger estas imponentes reservas naturales de la zona austral del país.

1.3. Objetivo general

Cuantificar las variaciones de extensión y volumen de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson en el periodo 1998-2017 y determinar si tales variaciones se encuentran relacionadas con los efectos del cambio climático.

1.4. Objetivos específicos

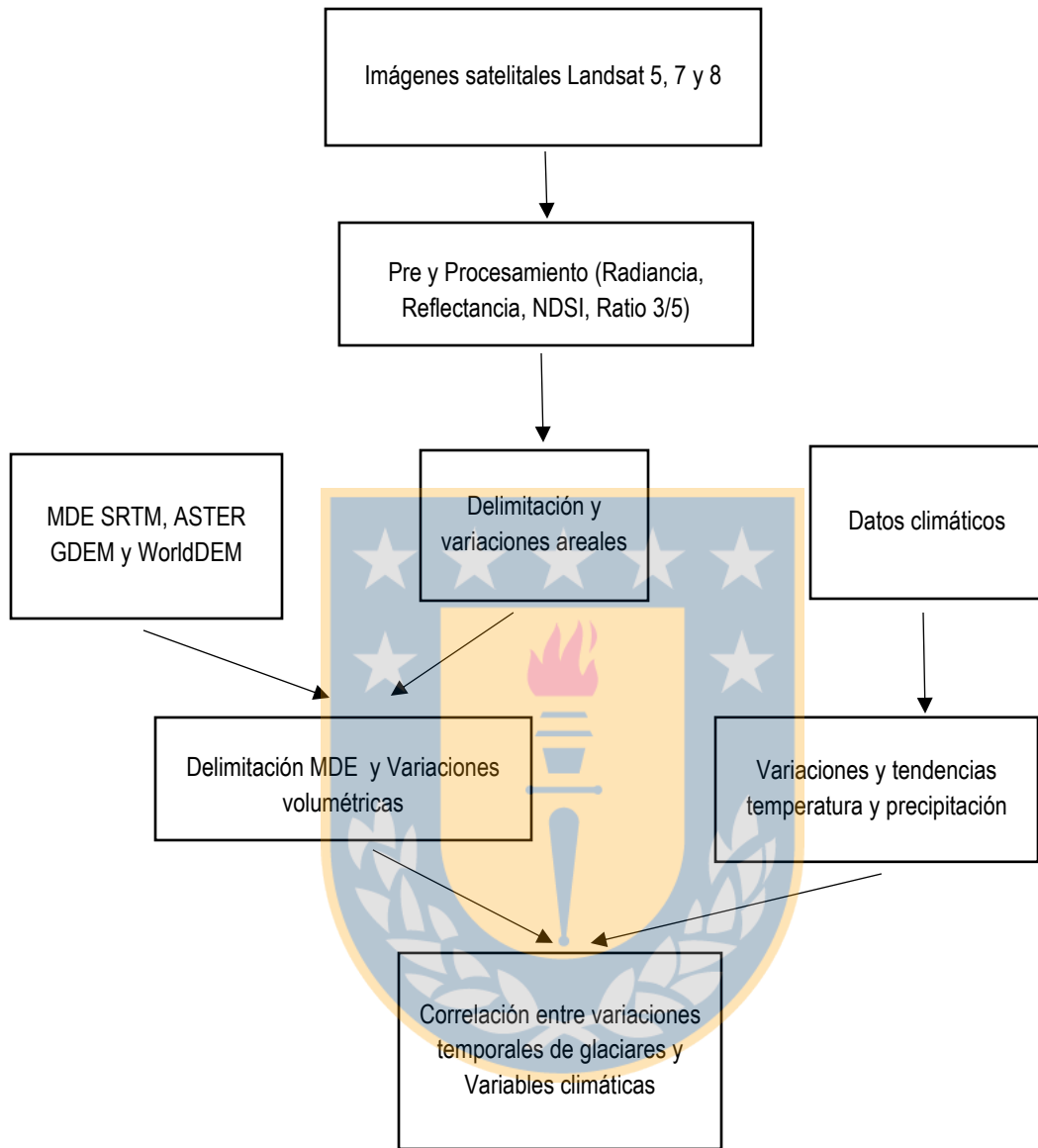
- Determinar y comparar las variaciones de extensión y volumen de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson en el periodo de estudio (1998-2017).
- Estimar tasas de cambio por año de los glaciares estudiados, temperatura y precipitaciones en el periodo de estudio y a futuro.
- Analizar la influencia de factores climáticos (Temperaturas y precipitaciones) en los glaciares estudiados.

1.5. Metodología de proyecto

En la delimitación y digitalización de la superficie de cada glaciar, se utilizaron imágenes satelitales provenientes de los sensores TM, ETM+ y OLI/TIR de las misiones *Landsat 5*, *Landsat 7*, *Landsat 8* respectivamente, con una resolución espacial de 30 metros en multiespectral y de 15 metros en pancromático, este último disponible en Landsat 7 y 8. Estas imágenes fueron obtenidas durante los meses de Diciembre, Enero, Febrero, Marzo y Abril entre los años 1998 y 2017, época del año donde se produce el máximo deshielo glaciar y menor nubosidad atmosférica, facilitando la delimitación de los glaciares bajo estudio.

Para la determinación de las variaciones volumétricas de los glaciares, se utilizaron imágenes raster de los modelos digitales de elevación de las misiones WorldDEM, ASTER GLOBAL DEM V2 y SRTM, que poseen una resolución espacial de 12, 12 y 50 metros y precisión bajo 16 metros en vertical, comprendidas entre los años 2000 - 2013.

En el análisis de las variaciones climáticas en las zonas aledañas a los glaciares, se utilizaron datos climáticos pertenecientes a la Dirección General de Aguas (DGA) en el glaciar Tyndall y en los lagos Grey y Dickson durante los años 2004 - 2017, que permitirán obtener una visión sobre el panorama climático presente en la zona en los últimos años.



Esquema 1: Metodología básica Proyecto.

La metodología básica del proyecto presentada en el esquema 1, se divide en las siguientes etapas:

- Pre procesamiento de Imágenes Satelitales: Corrección efectos de bandeo en imágenes sensor EMT+, realización de Pan-sharpening en imágenes obtenidas por los sensores ETM+ y OLI/TIR, y por ultimo corrección radiométrica de las imágenes, obteniendo archivos de radiancia y reflectancia, utilizando software ENVI 5.3.

- Procesamiento de imágenes satelitales: Cálculo de *Normalized Difference Snow Index* (NDSI) y *Ratio 3/5* en las imágenes de reflectancia bajo estudio, facilitando la discriminación de los glaciares en función del valor umbral de cada uno de los indicadores, utilizando el software ENVI 5.3.
- Delimitación y estimación de las variaciones areales de los glaciares: En función de las zonas discriminadas por el cálculo de NDSI y Ratio 3/5 y complementado con digitalización manual utilizando combinación de bandas en falso color y otros, se realiza la delimitación y generación de capas poligonales, que facilitaran la estimación de las variaciones areales, utilizando el software ArcGIS 10.3.
- Delimitación de MDE y estimación de las variaciones volumétricas de los glaciares: Utilizando como base las capas poligonales de cada uno de los glaciares, se delimitan los modelos digitales de elevación para cada época de estudio, lo cual permite la generación de mallas TIN y su vez la estimación de las variaciones volumétricas de los glaciares en cada uno de las épocas de estudio, utilizando el software ArcGIS 10.3.
- Variaciones y tendencias de temperatura y precipitación : Utilizando los datos de las estaciones DGA Torres del Paine, Lago Dickson, Lago Grey y Glaciar Tyndall aledañas a los glaciares estudiados, se analizan las variaciones de temperatura y precipitación en los periodos 1998-2017 (Torres del Paine), 2004-2017 (Dickson) y 2012-2017 (Grey y Tyndall).
- Correlación entre variaciones temporales de glaciares y variaciones climáticas: Se estiman y analizan las correlaciones existentes entre las variaciones temporales de los glaciares bajo estudio y las variaciones climáticas (precipitación y temperatura) de la estación DGA Torres del Paine, determinando su significancia estadística.

2. Fundamentos teóricos

2.1. Conceptos

2.1.1. Definición de glaciar

Existen múltiples definiciones de glaciar, pero la más aceptada corresponde al IPCC, que define glaciar como una “masa permanente de hielo sobre tierra originada por nieve comprimida; muestra evidencias del flujo pasado y presente (mediante deformación interna y/o deslizamiento de su base) y está constreñido por el estrés interno y por el rozamiento de su base y de sus lados. Los glaciares se mantienen por la acumulación de nieve en grandes altitudes, compensada por la fusión en altitudes bajas y por la descarga vertida al mar” (IPCC, 2013a).

En Chile se tiene una definición operativa de glaciar, con tal de ayudar y facilitar su comprensión y aplicación. Esta define glaciar como “Toda superficie de hielo y nieve permanente generada sobre el suelo, que sea visible por periodos de al menos 2 años y de un área igual o superior a 0,01 Km², o cualquier superficie rocosa con evidencia superficial de flujo viscoso, producto de un alto contenido de hielo actual o en el pasado en el subsuelo” (CECS, 2009c)

Los glaciares se forman en zonas donde la acumulación de nieve en época invernal es mayor a la nieve que se funde ante el aumento de temperaturas en el verano, preferentemente en entornos cordilleranos, polares o subpolares (Rivera, Bown, Muñoz, Napoleoni y Vuille, 2016).

2.1.2. Formación

Los glaciares se forman principalmente en regiones polares o de latitudes altas, como también en zonas geográficas a gran altura que permiten la acumulación de nieve por miles de años; formando capas inferiores cristalinas debido a la presión del peso superior. La transformación de nieve a hielo, se denomina diagénesis. Esto se produce por la acumulación progresiva de nieve durante años y consiste en la compresión de la nieve acumulada en las capas inferiores por el peso producido por las capas superiores, ocasionando la pérdida de burbujas de aire,

generando granos más definidos y capas de hielo más duras, realizando transformaciones sucesivas en su densidad (Rivera et al., 2016).

La temperatura es vital para la formación de glaciares, debido a que depende de esto la duración de los procesos de formación y derretimiento de un glaciar. El proceso de formación es más rápido en zonas más templadas debido a la fusión de cristales sobre el 0°C . provocando infiltración de agua a la parte más baja del glaciar, facilitando a la compactación del hielo (Rivera, 1990).

En los glaciares se identifican dos zonas divididas por una línea divisora de equilibrio, el área de acumulación y el área de ablación. En el área de acumulación se distingue 4 subzonas de importancia:

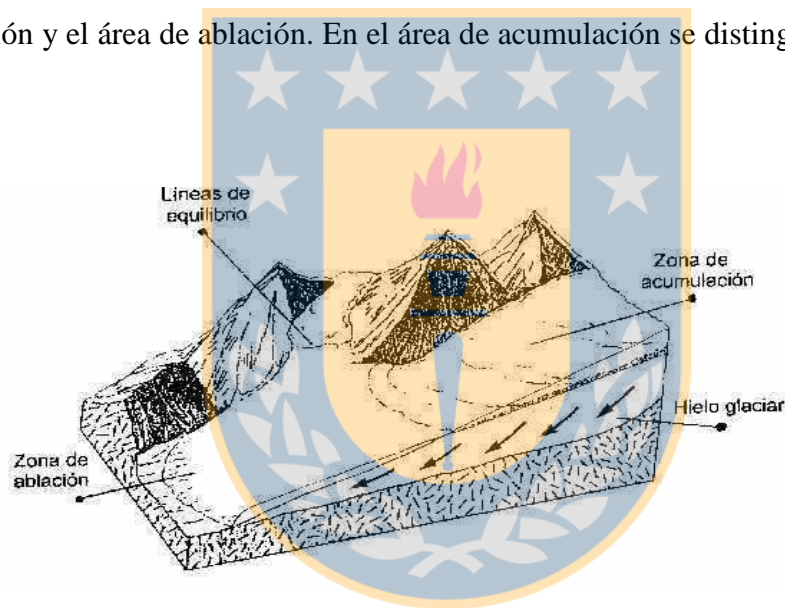


Figura 1: Zonas principales de un glaciar.

- Zona de nieve seca: no existe fusión durante el año, es fácil de encontrar en los glaciares del norte de Chile. El límite entre esta zona y la de percolación se denomina línea de nieve seca.
- Zona de percolación: en esta zona existe un bajo nivel de fusión de superficie y el agua avanza irregularmente en la nieve hasta llegar a las capas inferiores a temperaturas bajo los 0°C antes de congelar. El límite entre esta zona y la de nieve húmeda es denominada línea de nieve húmeda.

- Zona de nieve húmeda: la totalidad de la nieve acumulada del verano se encuentra a 0° C. La infiltración de nieve se realiza hasta las capas más profundas, sin provocar un aumento en la temperatura de las capas. El límite entre esta zona y la de hielo sobreimpuesto se denomina línea de nieve.
- Zona de hielo sobreimpuesto: se restringe a la región donde exista un crecimiento anual de hielo sobreimpuesto apareciendo en la superficie. El límite inferior de esta zona se denomina línea de equilibrio.

A continuación de la línea de equilibrio, se encuentra el área de ablación en la cual se da el proceso de fusión de forma más dinámica, permitiendo la generación de las capas más visibles de los glaciares.

En la capa superficial del glaciar, la cantidad de nieve que se acumula año tras año excede a la cantidad perdida por la fusión, escurrimiento y evaporación del hielo. Posteriormente se realiza un proceso de cambio de hielo superficial debido al derretimiento de capas antiguas. Estos glaciares poseen desplazamiento de hielo debido a la fuerza ejercida por el propio peso.

2.1.3. Campos de Hielo

Corresponde a grandes superficies de hielo que exhiben una zona de acumulación compuesta por una planicie en zona de alturas y zonas escarpadas de gran pendiente que la rodean. El hielo acumulado en la transición de la zona de planicie y escarpada es evacuado a través de varias lenguas, que en algunos casos pueden presentar cuencas parcialmente definidas, no como en sus zonas de alimentación que necesita diversas técnicas para la estimación de tal división. En nuestro país se encuentran los Campos de Hielo Norte y Sur en la zona Austral de la Patagonia Chilena (Estrategia Nacional de Glaciares, 2009a).

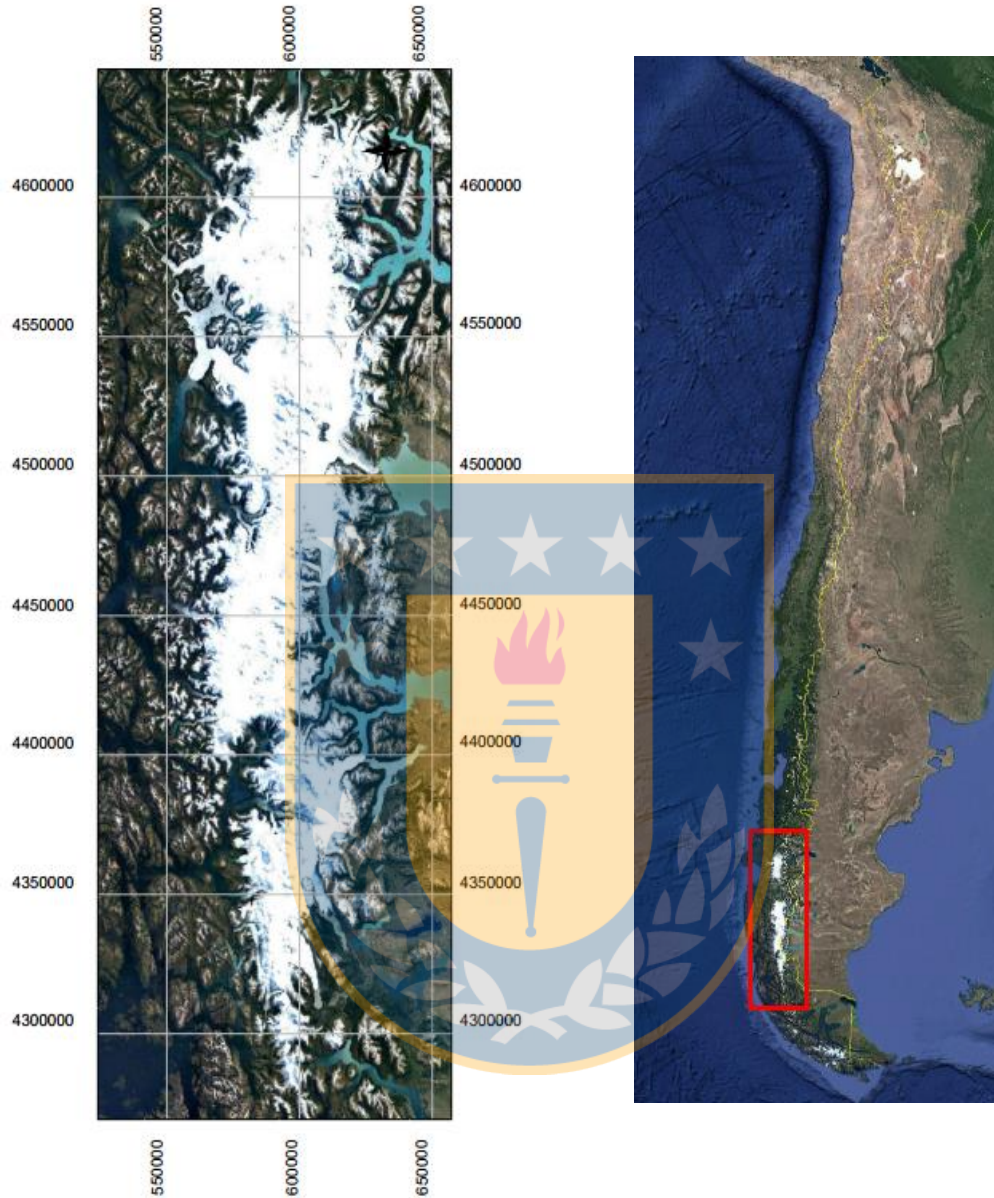


Figura 2: Campos de Hielo Sur, Coordenadas UTM 18 Sur. Recuperado Google Earth (2018).

2.1.4. Importancia hídrica de los glaciares

Los glaciares interactúan de forma compleja con el clima predominante en la región que se encuentran, además de reaccionar de diferentes maneras a factores no climáticos que afectan en su estado de conservación actual y futuro.

Su aporte hídrico varía principalmente de la superficie de cada glaciar, la meteorología, del balance de masas actual, de sus condiciones de flujo y de la topografía propia que subyace al glaciar (Estrategia Nacional de Glaciares, 2009b).

Estos cuerpos de hielo impactan positivamente la hidrología de sus cuencas por cinco motivos fundamentales:

- Aportan escorrentías a las cuencas adyacentes:

Su importancia es vital para las zonas con menor disponibilidad del recurso hídrico, debido a que nutren en los periodos estivales con el derretimiento de sus capas superiores a los diferentes afluentes y cuencas que lo componen, permitiendo el riego, el consumo humano y la conservación de la flora y fauna.

- Son grandes reservas de agua dulce:

Los glaciares juegan una doble preponderancia en la disponibilidad de agua dulce, ya que preservan en estado sólido la precipitación caída en los meses más lluviosos/nivosos para luego ser liberada en los meses más secos, manteniendo la regularidad en la disponibilidad del recurso hídrico durante el año. Además, por el retroceso glaciar, dichos cuerpos emiten el recurso hídrico de manera continua y sostenida durante el tiempo, evitando problemas de saturación en los caudales adyacentes al glaciar sin afectar de forma compleja a la población, como también a la misma estructura natural del cauce de agua.

- Por su baja temperatura, permiten la acumulación y preservación de la nieve durante todo el año, incluso en verano:

Un glaciar se formara en cada zona que en base a sus condiciones climáticas y topográficas permita la acumulación de nieve año tras año. De esta forma la nieve puede acumularse progresivamente hasta formar un glaciar que eventualmente empezará a fluir, ese hielo acumulado desde zonas de conservación del hielo a zonas de ablación, donde el agua preservada en estado sólido por años, se derrite y se integra a los caudales de los ríos.

- Pierden menos agua por procesos físicos que el suelo descubierto, debido a su gran conservación a baja temperatura:

Las cuencas presentes en el planeta siempre perderán agua hacia la atmosfera en función de la temperatura de interacción entre el ambiente y la cuenca. Es por esto, que los glaciares tienden a liberar menos agua hacia la atmosfera que cualquier superficie de contacto debido a la baja temperatura que tienen, como también el elevado albedo en relación a superficies rocosas.

- Intervienen formando microclimas locales.

No se puede cuantificar la intervención de los glaciares en los microclimas locales de forma exacta, debido que es muy difícil identificar como afecta a las diferentes condiciones presentes y en función a la época del año que corresponde. Además dichos efectos también pueden ser propiciados por otros agentes climáticos como la topografía propia del lugar, la tendencia climática predominante, la distancia a cuerpos de agua, la altura sobre el nivel del mar, entre otros factores.

Sin embargo, los glaciares afectan a sus cercanías en función de la distancia, manteniendo temperaturas más bajas en los sectores más cercanos a ellos, como también en las zonas más altas que lo componen.

En base a datos históricos, se ha determinado que la desaparición de un glaciar provoca grandes cambios en el microclima local, especialmente por el aumento de temperaturas, y la disminución de los cauces de las cuencas cercanas.

Estos cinco motivos, nos permiten comprender la importancia de estos cuerpos de hielo y su influencia sobre su entorno, ratificando su gran aporte al equilibrio de los ciclos hidrológicos, como también el abastecimiento a la población humana.

2.2. Distribución de los glaciares a nivel mundial y nacional

2.2.1. Distribución en el mundo

Los glaciares se encuentran distribuidos heterogéneamente en el planeta, existiendo regiones geográficas con mayor cantidad, como otras que no tienen glaciares de importancia dentro de su territorio.

La mayoría del hielo glaciar se encuentra distribuido en la Antártica y en Groenlandia, pero también se encuentran numerosos cuerpos de hielo de importancia en todos los continentes, menos en África (NASA, 2017). Para que se den las condiciones de supervivencia de un glaciar, siempre se deben tomar en cuenta las condiciones climáticas y geográficas, específicamente en zonas de montaña y regiones polares donde las temperaturas en épocas estivales sean moderadas o bajas.

En la tabla 1 se muestra la distribución de los glaciares en el mundo, con una mayor superficie en las regiones polares (Antártica y Ártico) y montañosas (Asia Central, Norteamérica y Sudamérica).

Tabla 1: Área aproximada cubierta por glaciares (km²)

Región	Área (km ²)
Nueva Zelanda	1600
Escandinavia	2940
Europa Central	3785
Suramérica	25500
Norte de Asia	59600
Antártica (sin incluir manto principal)	77000
Asia Central	114800
Norteamérica	124000
Ártico (sin incluir manto de Groenlandia)	275500

Nota: Recuperado de *Global Glacier Changes: facts and figures (2008)*.

2.2.1.1. Distribución en Chile

En nuestro país existe una gran diversidad glaciológica, debido a la gran variedad de climas y características geográficas. En base a la Estrategia Nacional de Glaciares (2009), se pueden identificar cuatro zonas glaciológicas divididas principalmente por su latitud y línea de nieve, tal como se muestra en la Figura 3.

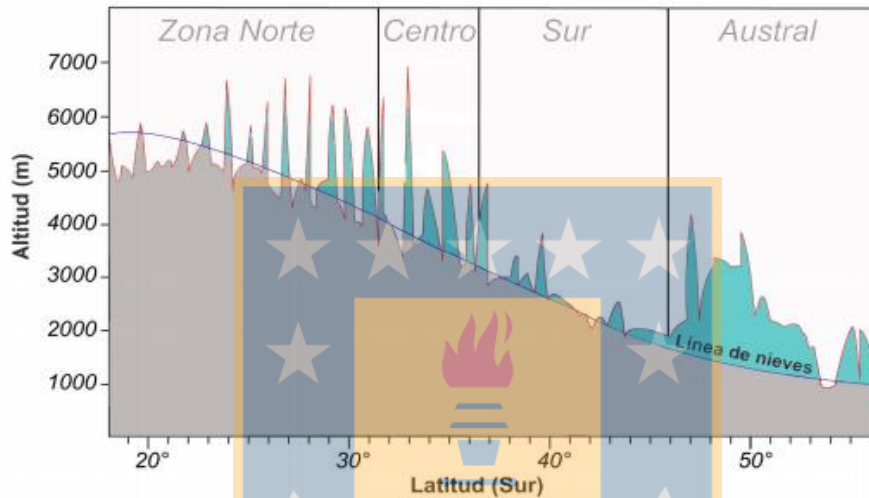


Figura 3: Perfil Altitudinal de la Cordillera de los Andes a lo largo de Chile, con las líneas de nieves y límites aproximados de zonificación del país. Recuperado de Broecker y Denton (1990).

En la Figura 3, podemos apreciar la distribución de las zonas en base a las condiciones geográficas. La Zona Norte corresponde a un sector con gran aridez, bajas precipitaciones y línea de nieve a gran altitud, dando lugar a pequeños glaciares alrededor de las altas cumbres, en la Zona Centro podemos notar diferencias principalmente en la reducción de altitud de la línea de nieve, con altas cumbres más cerca de los valles, generando glaciares de mayor extensión. En la Zona Sur, la Cordillera de los Andes sigue a la baja, solo permitiendo la generación de glaciares en torno los conos volcánicos. Por último en la Zona Austral, las precipitaciones aumentan y la línea de nieve baja considerablemente insertándose en las zonas planas, dando a lugar a glaciares de gran extensión y campos de hielo enormes.

Nuestro país posee un Inventario Nacional de Glaciares, el cual nos entrega la distribución y cantidad de glaciares divididos en las zonas anteriormente mencionadas.

Se tienen en el inventario 3763 glaciares con una superficie estimada de 21063 km². Estas cifras no consideran los datos de inventario realizados por la Unidad de Glaciología y Nieves de la DGA en 2009. En la tabla 2 se muestra una Síntesis Nacional de Glaciares distribuidos en las zonas anteriormente nombradas.

Tabla 2: Glaciares por zonas glaciológicas (Km2)

Zona Glaciológica	Número de Glaciares	Área (Km ²)
Norte	274	113.97
Centro	1335	877.9
Sur	117	354.71
Austral	1911	17368.92
Total	3636	18715.5

Nota: Recuperado de Unidad de Glaciología y Nieves 2009.

Se puede ver una mayor superficie en la zona austral del país, debido a sus condiciones geográficas y climáticas que favorecen la acumulación de hielo hace millones de años, dando origen a la concentración glaciológica más importante de América del Sur.

2.2.2. Estado de los glaciares en Chile

En base a los diferentes inventarios a nivel nacional realizados por diversos autores (e.g. Garín, 1987; Marangunic, 1979; Valdivia, 1984; Rivera, 1989), los cuales han sido desarrollados con variables métodos (Topografía, fotografías) y escalas. Además de las actualizaciones de algunos cuerpos de hielo en la década del 2000, se estima un evidente retroceso en los glaciares chilenos, el cual se ha intensificado en las últimas tres décadas (Pellicciotti, Ragetti, Careno y McPhee, 2013).

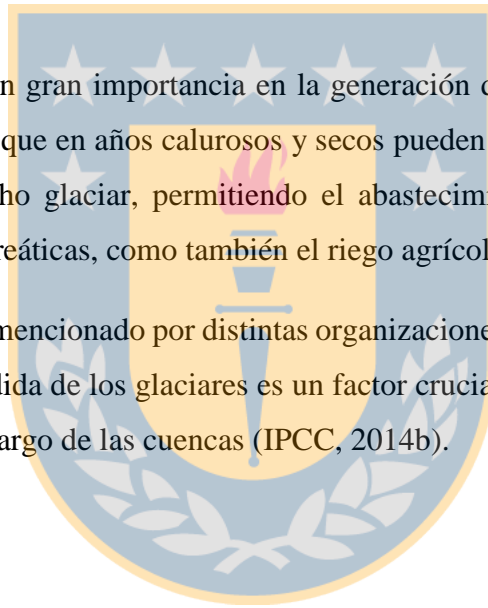
Los glaciares presentes a lo largo de la cordillera de los Andes denominados de montaña (Blancos y Rocosos), como también los localizados en los Campos de Hielo (Norte y Sur), en Chile Continental presentan un retroceso y adelgazamiento notorio en el último siglo (Rivera, 2008), aunque existen casos de glaciares que no representan la tendencia actual al retroceso, como el glaciar Pio XI (Wilson, Carrión y Rivera, 2016).

Las mayores tasas de pérdida de hielo se han registrado en la Zona Austral del país, con claros ejemplos como los 15 km² de superficie en 100 años en el glaciar O'higgins (Casassa et al., 1997), como también el retroceso de 787 metros por año en el glaciar Marinelli entre 1992 y 2000 (Porter y Santana, 2003).

La gran vulnerabilidad de los glaciares de los Campos de Hielo se debe a su rápido tiempo de respuesta frente a los cambios climáticos y a las líneas de nieve al término del verano, ubicadas a alturas muy bajas. Esto ha aumentado sustancialmente el desprendimiento de témpanos, debido a la interacción de los glaciares con sus cuencas hidrográficas asociadas (lagos y ríos).

Los glaciares chilenos tienen gran importancia en la generación de recursos hídricos en la época de deshielo, debido a que en años calurosos y secos pueden aportar más del 60 % del caudal total asociado a dicho glaciar, permitiendo el abastecimiento de la población, la estabilización de las capas freáticas, como también el riego agrícola en periodos de verano.

Estos resultados afirman lo mencionado por distintas organizaciones internacionales como el IPCC, indicando que la pérdida de los glaciares es un factor crucial afectando la escorrentía y los recursos hídricos a lo largo de las cuencas (IPCC, 2014b).



2.3. Cambio Climático

2.3.1. El Cambio Climático como problemática

El cambio climático se ha convertido en el mayor desafío que ha debido enfrentar la humanidad, y lo peor es que es un problema causado por la propia humanidad, detonado a través de las excesivas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y otros contaminantes al medio ambiente (MMA, 2016). Tal influencia humana aumenta la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles sobre las personas y los ecosistemas (IPCC, 2014c).

El aumento de las emisiones de Dióxido de Carbono (CO₂) hacia la atmósfera ha llegado a niveles nunca antes visto, superando las realizadas durante 400 mil años en solo 65 años, desde 1950 (NASA, 2018), tal como se muestra en la Figura 4.

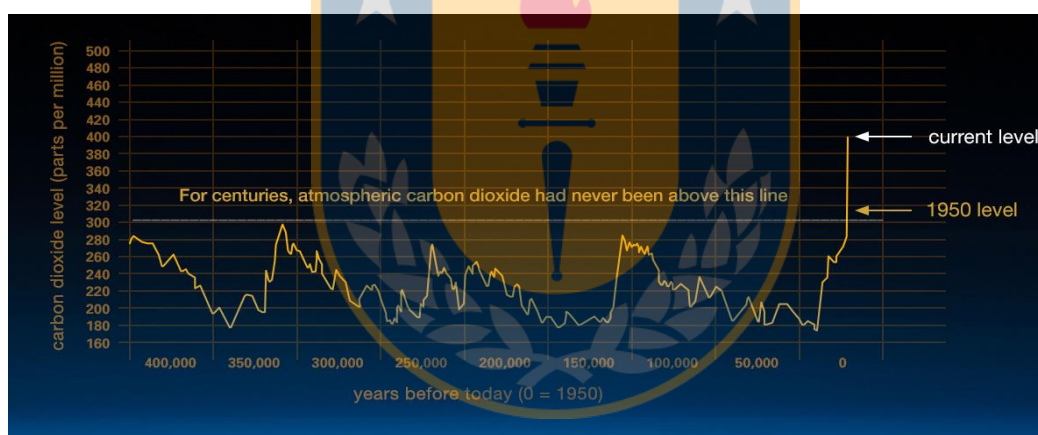


Figura 4: Nivel de CO₂ en ppm en los últimos 400 mil años. Fuente IPCC (2014).

Para controlar dichos efectos se plantea limitar el aumento global de la temperatura de la superficie a no más de 2°C, respecto de la época preindustrial, umbral definido como máximo por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Se deberán restringir y reducir las emisiones de GEI a la atmósfera, a través de la búsqueda de alternativas energéticas más amigables con el medio ambiente, lo que supone un gran reto tecnológico, económico e institucional a nivel global.

2.3.2. Causas

La influencia humana en el cambio climático es clara, debido a la descontrolada emisión de GEI en la actualidad, siendo los niveles más altos en la historia, afectando en forma directa el equilibrio climático en el planeta.

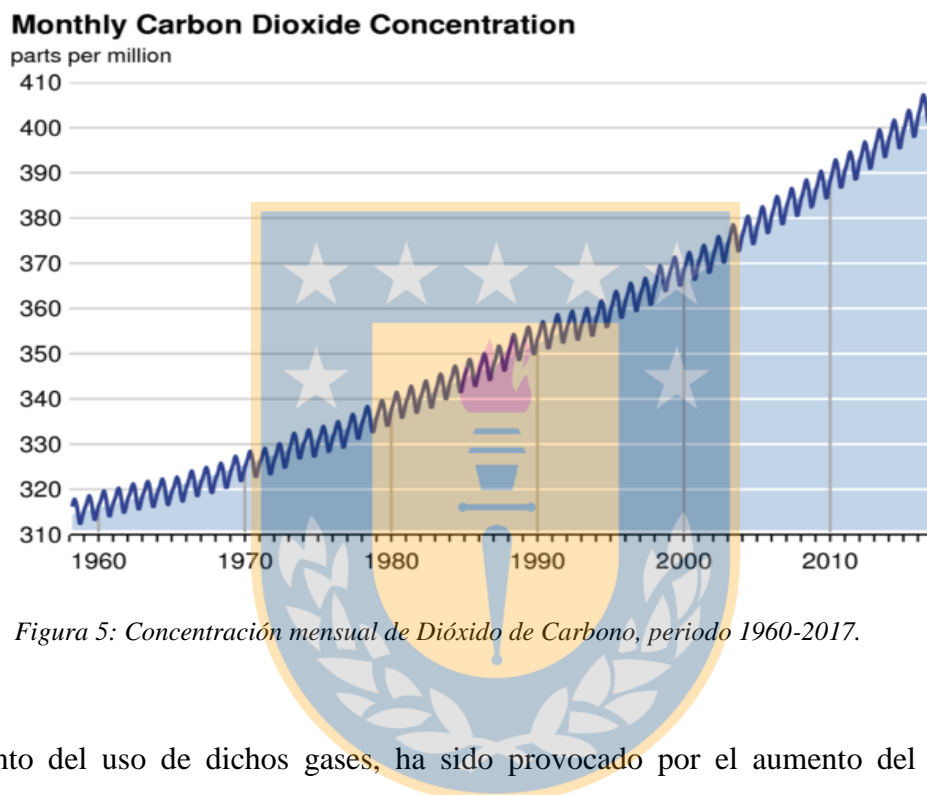


Figura 5: Concentración mensual de Dióxido de Carbono, periodo 1960-2017.

El aumento del uso de dichos gases, ha sido provocado por el aumento del desarrollo económico y de la población mundial, generando mayor concentración de dióxido de carbono, metano y óxido de nitrógeno que en los últimos 800000 años (IPCC, 2014d).

Las concentraciones atmosféricas de los GEI, como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y el óxido nitroso (N₂O), han aumentado desde 1750 debido a la creciente actividad humana. En 2011, las concentraciones de estos GEI eran 391 partes por millón (ppm), 1803 partes por mil millones (ppmm) y 324 ppmm, respectivamente. Tales valores excedían los niveles pre revolución industrial el 40%, 150% y 20% (IPCC, 2013b).

Estos gases y sustancias que alteran el balance energético de la Tierra, son los principales impulsores del cambio climático. Existe un proceso denominado “Forzamiento Radiativo”, el cual permite cuantificar los cambios en los flujos de energía producidos por los GEI y sustancias contaminantes en 2011, en relación a 1750. Tal forzamiento radiativo total es

positivo, concluyendo una absorción de energía por el sistema climático. El principal agente contaminante que provocó dicha absorción es el CO₂, el cual su concentración en la atmósfera se ha sostenido de forma alarmante durante los últimos 200 años (IPCC, 2013c).

2.3.3. Efectos y proyecciones a futuro

Los efectos que están experimentando la Tierra y la población por acción del Cambio Climático son variados, afectando casi en su totalidad a todos los sistemas que componen el planeta, generando incertidumbre en torno a las ciudades y países más vulnerables ante el escenario actual y futuro.

Los efectos observados en el sistema climático se pueden separar en torno a los diferentes sistemas presentes en el planeta: la atmósfera, los océanos, la criosfera y el nivel del mar.

2.3.3.1. La atmósfera

El aumento de la temperatura del planeta, considerando la superficie terrestre y oceánica ha llegado a 0,85° C durante el periodo 1880-2012, en base a conjuntos de datos recuperados de todo el planeta procesados de forma independiente (Figura 6). Estos resultados se deben a la reconstrucción de la temperatura de la superficie a escala continental, los cuales poseen un alto nivel de confianza.

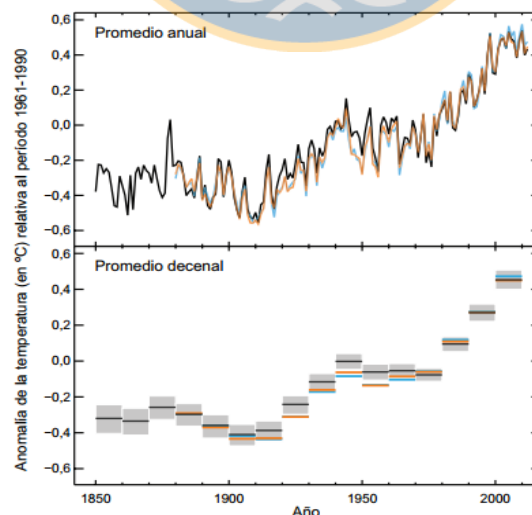


Figura 6: Anomalía observada en el promedio mundial de temperaturas en superficie, terrestres y oceánicas combinadas, 1850-2012.

Estos resultados se deben a la gran emisión de gases contaminantes que afectan a la atmósfera (Figura 7). En base al informe Cambio Climático 2013 “Bases Físicas”: Resumen para responsables de políticas del IPCC, se afirma como “Prácticamente seguro” (99 – 100%) que la troposfera se haya calentado a nivel global desde mediados del siglo XX. Tal afirmación nos permite entender el efecto invernadero que produce la atmósfera por la acumulación de GEI en el planeta, como también el efecto negativo que provoca dichos gases sobre la capa de ozono, menguando su nivel de filtración ante la energía calórica proveniente del sol.

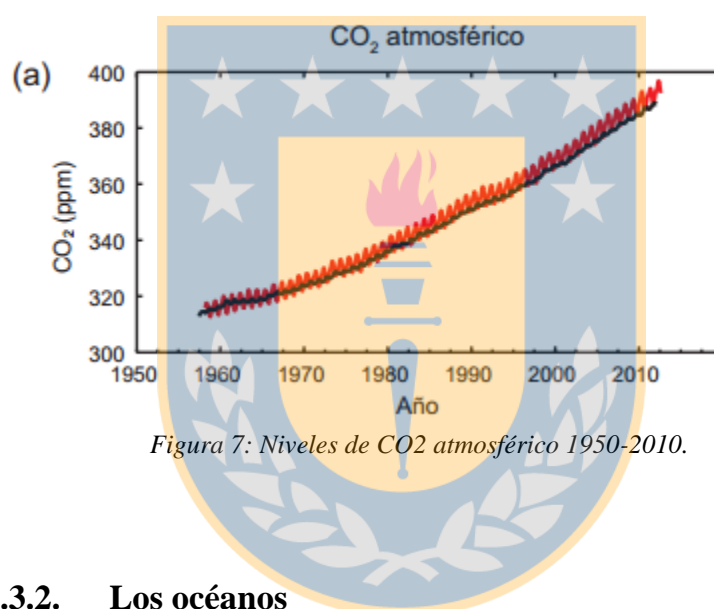


Figura 7: Niveles de CO2 atmosférico 1950-2010.

2.3.3.2. Los océanos

Los océanos cubren la mayor parte de la superficie del planeta, son el principal agente regulador de la temperatura a nivel global, permitiendo la vida en la Tierra. Sin embargo, los océanos se están calentando, principalmente por almacenar más del 90% de la energía del sistema climático en los últimos 45 años.

El calentamiento del océano es mayor cerca de la superficie, principalmente por ser la zona de mayor interacción entre la energía calórica y el agua (Figura 8). En los 75 metros superiores se han calentado en torno a los 0,11 °C cada década, en los últimos 40 años. Además es probable (66 – 100%) que los océanos se hayan calentado entre los 700 - 2000 metros, 2000 - 3000 metros y más de 3000 metros en los periodos comprendidos entre 1957 a 2009 y 1992 a 2005 (2 últimos casos) respectivamente.

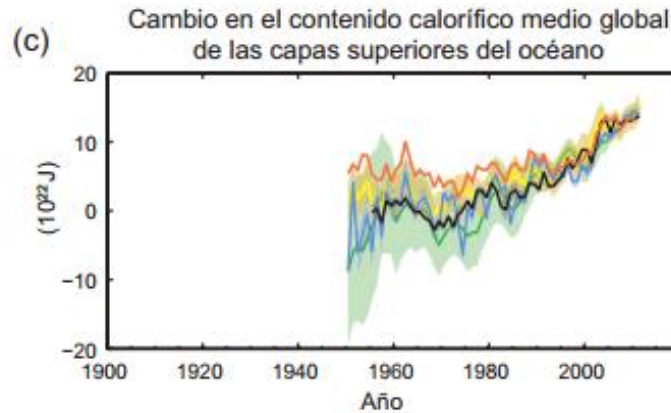


Figura 8: Cambio en el contenido calórico medio global de las capas superiores del océano.

Al absorber tal nivel de energía, además del aumento sostenido de los niveles de CO₂ en la atmósfera, los océanos se han vuelto más ácidos en las últimas décadas, debido a la disolución de este contaminante en el agua. El aumento de los niveles de acidez en los océanos afecta el equilibrio de los minerales existentes en el agua superficial y fondo marino (EPA, 2017). Esto causa un gran daño a la flora y fauna acuática que son muy vulnerables ante el aumento de la acidez, como caracoles, conchas y crustáceos que ven debilitadas sus posibilidades para sobrevivir, debido a que mayor acidez, dificulta la formación y conservación de sus capas protectoras de calcio. (U.S. Global Change Research Program, 2014).

2.3.3.3. La criosfera

Está compuesta por nieve, hielo marino, ríos y lagos cubiertos por hielo, plataformas de hielo, glaciares y permafrost que cubren nuestro planeta en diversas zonas geográficas, con mayor regularidad en regiones cordilleranas, polares y subpolares.

Actualmente la criosfera está disminuyendo dramáticamente, debido al aumento de las temperaturas a nivel global que afectan de forma severa a los frágiles ecosistemas polares y subpolares, reduciendo los niveles de hielo cada década y de forma más acelerada. Los mayores retrocesos se ven en el océano Ártico y Groenlandia, debido a que el ritmo acelerado de derretimiento de hielo ha generado pérdidas entre el 3,5 y 4,1% (equivalente a 0,45 y 0,51 millones de km²) en la superficie cubierta cada década (Figura 9). Esto es atribuido principalmente a la disminución de días de nieve y al aumento sostenido de las temperaturas superficiales del mar.

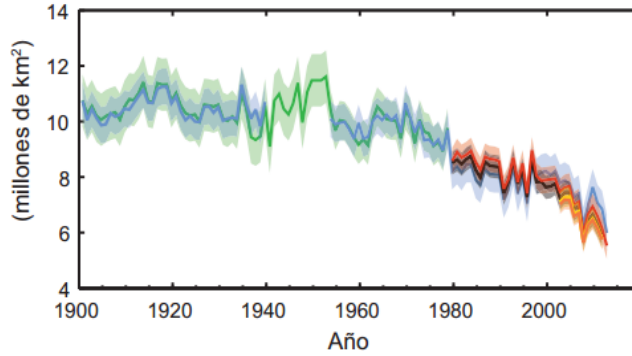


Figura 9: Extensión de Hielo marino en verano en el Ártico desde 1900.

Las zonas de permafrost (Principalmente en Siberia, Norte de Canadá, Alaska y Extremo Norte de Europa) han sufrido un aumento de temperaturas considerable en el último tiempo, lo cual se estima en 3° C en Alaska entre mediados de 1980 al 2000, y en 2° C en Rusia Europea Septentrional entre 1970 a 2010 (IPCC, 2013d). Esto genera un adelgazamiento considerable en las capas de Permafrost, disminuyendo su extensión y duración, colocando en riesgo múltiples estructuras, carreteras y obras civiles que están construidas sobre este tipo de suelo (SWIPA, 2009).

2.3.3.4. El nivel del mar

El nivel del mar está sufriendo aumentos considerables en los últimos años, con un ritmo nunca antes visto en el planeta. Durante el periodo 1901-2010 (Figura 10), el nivel medio global del mar se elevó 0,19 metros (IPCC, 2013e).

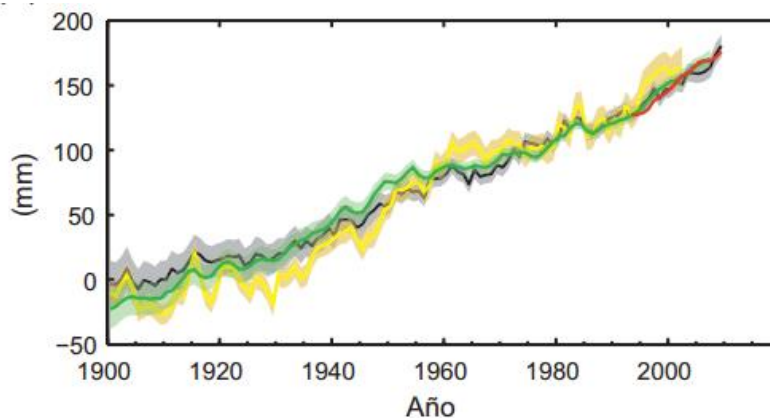


Figura 10: Cambio en el nivel medio global del mar 1900-Actualidad.

Este fenómeno se asocia principalmente a 2 factores, todos ellos generados por el Cambio Climático:

- Dilatación Térmica: el agua de los océanos debido al aumento de las temperaturas se ha dilatado con mayor velocidad en los últimos 100 años. Esta dilatación conlleva al aumento del espacio usado por el agua presente en el mar, disminuyendo la costa en las regiones subtropicales y polares.
- Deshielo de los glaciares, casquetes polares y pérdidas de hielo en Groenlandia y en Antártica Occidental: la velocidad de derretimiento de estos cuerpos de hielo ha aumentado considerablemente en los últimos 30 años. Esto se debe principalmente por el aumento de las temperaturas y disminución de las precipitaciones de nieve a nivel global, evitando la formación de capas de hielo compactas y promoviendo la evacuación del hielo derretido a los océanos. La alteración de los ciclos hidrológicos no permite la recuperación de las capas de hielo, ni la recuperación en sus plataformas, provocando la migración del hielo a aguas más cálidas por la atracción de las corrientes marítimas.

Estos factores combinados han provocado desde 1970 a la fecha, el 75% de la elevación observada del nivel medio del mar, y se esperan aumentos en torno a 0,5 metros si no se desarrollan cambios profundos en los próximos 70 años (tabla 3).

Tabla 3: Contribución al aumento del nivel medio del mar (mm/año)

Dilatación Térmica	1,6 ± 0,5
Glaciares y Casquetes de Hielo	0,77 ± 0,22
Manto de hielo Groenlandia	0,21 ± 0,07
Manto de Hielo Antártico	0,21 ± 0,35
Total	2,8 ± 0,7
Observados por Satélites	3,1 ± 0,7

Nota: Recuperado de IPCC 2007, Technical summary, pág. 50.

2.3.4. Relación del Cambio Climático con los glaciares

El cambio climático es un fenómeno que afecta cada vez con más fuerza los diferentes sistemas que existen en el planeta, provocando desequilibrio en los principales ciclos que ocurren en las diferentes regiones geográficas, generando efectos negativos en las principales reservas naturales. Tales efectos se intensificarán con los años según el consenso científico, lo cual solo cambiara a futuro si se realizan medidas urgentes con tal de evitar la contaminación en todos sus niveles y el uso inteligente de los recursos básicos para el desarrollo humano.

La criosfera es el sistema más afectado por el cambio climático, debido a que el aumento en la temperatura media global y la disminución de las precipitaciones de nieve provocan el derretimiento acelerado de los mantos de hielo en los polos, capas de hielo continental, nieve y glaciares tropicales, cordilleranos y subpolares.

Hoy en día los glaciares se encuentran en peligro, debido a que el hielo acumulado en periodos invernales es menor al hielo que se derrite en verano, provocando déficit año tras año en la superficie y volumen de estos cuerpos de hielo. Solo por nombrar algunas cifras, entre 1971 y 2009, los glaciares continentales han perdido en promedio 226 Gigatoneladas de masa por año (Gt/año), una cifra que aumenta en el periodo 1993-2009 a 275 Gt/año (IPCC, 2013f).

Las temperaturas elevadas cada vez son más recurrentes en zonas subpolares y australes, afectando los glaciares continentales y montañosos con gran rapidez. En nuestro continente, La Patagonia se identifica como una de las cuatro zonas montañosas con mayor pérdida de masa glacial, disminuyendo en promedio 35 metros entre 1960 y 2003.

Según el consenso científico, los escenarios futuros no son alentadores, ya que se espera un aumento en el retroceso glacial. El Quinto Informe de Evaluación del IPCC, predice una reducción considerable del volumen total de los glaciares dentro de los rangos de 15-55% y 35-85% a lo largo del siglo XXI, de acuerdo a distintos pronósticos del cambio climático (IPCC, 2013g). Es decir, bajo un escenario de calentamiento global limitado se perderá un mínimo de 15 % de volumen glacial mundial, mientras que en el peor escenario (actual, si no se toman medidas de disminución urgentes) se espera perder el 85% de volumen glacial

mundial. Algo que afectaría de sobremanera el nivel medio del mar, el clima en el planeta, los ciclos hidrológicos, la vida de los seres vivos pertenecientes a esos hábitats como la vida de la población en general.



2.4. Panorama climático en el país

2.4.3. Clima en Chile

Por las variadas características geográficas del país, el clima se ve influenciado por factores como la latitud, altura sobre el nivel del mar, dinámica atmosférica e influencia marítima, las que dominan algunas de las variables principales del clima como la temperatura, la presión, el viento, la humedad y la precipitación en el territorio chileno.

En nuestro país se identifican de acuerdo a la clasificación de Köppen de 1948, los siguientes climas (Riosseco y Tesser, 2005):

- Climas tipo A: Tropicales lluviosos. Se caracterizan por el calor constante. La temperatura media del mes más frío supera los 18° C, y la del mes más caluroso es superior a los 22 °C, con lluvias abundantes. Este clima se caracteriza por gran humedad durante todo el año. En el país este clima se da en los territorios insulares de Isla de Pascua y el Archipiélago de Juan Fernández.
- Climas tipo B: Desérticos. En la zona de climas secos las lluvias se presentan de forma escasa e irregular, cayendo la mayor parte del total en periodos cortos de tiempo. La temperatura del aire supera regularmente los 35° C. La aridez de estas regiones se limita a las zonas de llanuras. En Chile se encuentran las subdivisiones de los desiertos BWn, clima seco, que tiene por característica niebla frecuente; BWH, clima de altura a más de 3000 m; BWh, clima seco, cálido, con temperatura anual sobre los 18° C; y las estepas BSn con niebla regular y BSk con frío en invierno y la temperatura anual se encuentra bajo los 18° C, pero con la temperatura del mes más caluroso por sobre los 18° C.
- Climas tipo C: Templados lluviosos. Estos climas se caracterizan por la gran cantidad de precipitaciones en los meses invernales, como también por la existencia de una estación seca, pero no muy fría. En ellos el mes más frío tiene una temperatura media entre los 18° C y -3° C. Dentro de estos rangos comunes, presentan regularmente épocas lluviosas y de sequía. En Chile se encuentran las subdivisiones Csbn, con sectores con temperatura media del mes más cálido inferior a 22° C: Durante cuatro

meses mínimo superior a 10° C, con gran nubosidad y nieblas frecuentes, como también una estación seca de 7 a 8 meses. Otras subdivisiones presentes en el país son el Csb1, similar a la subdivisión Csbn pero con menor nubosidad debido a la poca influencia del mar, Csb2 con una estación seca de menor duración, en torno a los 4 a 5 meses y la Csb3 con una estación seca menor a los 4 meses. Estas subdivisiones se dan en el centro y centro sur del país, principalmente en los sectores costeros y valles centrales disminuyendo la estación seca de norte a sur.

- Climas tipo E: Climas fríos. Se caracterizan por tener condiciones extremas con una gran amplitud anual de temperatura. Dentro de las subdivisiones de este clima presentes en el país se encuentra el clima ETw que corresponde al polar de tundra con máxima de las lluvias en primavera y en el inicio del verano, con el cielo despejado en la segunda parte del período estival, y el EFH que corresponde a un clima polar de hielo en altura, que se da principalmente en las altas cumbres andinas.

Debido a la variedad de climas presentes en el país, existen 5 zonas naturales o geográficas, las que fueron definidas por sus tipos del clima (MMA, 2016):

- Norte Grande: Entre la región de Arica y Parinacota hasta la región de Antofagasta, con predominio de condiciones desérticas, y en la costa temperaturas en torno a los 20° C debido a la influencia marítima.
- Norte Chico: Clima subhúmedo en la costa y semiárido hacia el interior. Se extiende entre la región de Atacama hasta la región de Valparaíso (hasta el río Aconcagua).
- Zona Central: Dominada por climas templados cálidos y precipitación invernal que aumenta hacia el sur, entre la región de Valparaíso (desde el río Aconcagua) hasta la región del Biobío (hasta el río Biobío).

- Zona Sur: se caracteriza por gran nubosidad y precipitaciones, aumentando hacia el sur, se extiende esta zona entre la región del Biobío (desde el río Biobío) hasta la región de Los Lagos.
- Zona Austral: Alto predominio de climas fríos y lluviosos, con aumento de precipitaciones en la zona costera disminuyendo en la zona oriental de la cordillera de los Andes, Comprende las regiones de Aysén y de Magallanes y de la Antártica Chilena.

2.4.4. Panorama actual

Chile es uno de los países más vulnerables ante el cambio climático, debido a la gran variedad de recursos que están sufriendo los efectos negativos de este problema global. En los últimos años se ha sostenido un aumento en las temperaturas y episodios de sequía, presentando en el año 2016 las anomalías de temperatura media más altas en 56 años (Dirección Meteorológica de Chile, 2016), con aumento sobre lo normal en la zona norte, sur y austral.

La baja de la precipitación anual se sostiene en los últimos 8 años, cumpliendo las proyecciones realizadas hace dos décadas. Esto se debe a que los fenómenos de El Niño y de La Niña, han sufrido un déficit sostenido en las precipitaciones en gran parte del país (DMC, 2016a), mermando la acumulación hídrica y aumentando los eventos de sequía multianuales a nivel nacional.

Los efectos de fenómenos cíclicos también influyen en el estado climático actual de nuestro país. Un ejemplo claro es la influencia del fenómeno “El Niño” el cual provoca importantes alteraciones climáticas, manifestado a través de un aumento en invierno y primavera de la temperatura y precipitaciones en la zona centro sur en relación al promedio histórico y “La Niña” que en mismo periodo, provoca una baja sostenida de la temperatura y precipitación en el centro sur del país, un aumento en la precipitación en el altiplano chileno y en el extremo sur, como también una reducción de la temperatura en la costa del norte grande nacional (DMC, 2016b). Ambos fenómenos actualmente poseen una tendencia al alza de temperaturas y disminución de la precipitación, de forma más frenética año tras año.

2.4.5. Temperatura

El país presenta una gran variabilidad térmica debido a su extensión geográfica como también por la intervención de factores climáticos como la altitud, influencia marítima, latitud y relieve.

En el Norte Grande del país se presentan temperaturas suaves en el borde costero, con baja amplitud térmica durante todo el año, siendo cercanas a los 20 °C de media anual en Arica (19,7° C), Iquique (19,1° C) y Antofagasta (17,1 ° C). En cambio hacia el interior la influencia marítima desaparece, aumentando la diferencia entre las temperaturas mínimas y máximas en toda la zona, también entra en juego el aumento de altura sobre el nivel de mar que afecta a las principales localidades del interior en estas regiones. En Calama, la amplitud térmica es cercana a los 17° C, con mínimas alrededor de los 3° C y máximas sobre los 20 °C.

Más al sur, en el Norte Chico las temperaturas se encuentran en torno a los 15° C en Copiapó y 14° C en La Serena. Esta zona presenta condiciones similares en el interior, con altas amplitudes térmicas en la región de Atacama debido a la influencia desértica, en cambio, estas diferencias disminuyen levemente en la región de Coquimbo. Esto se debe a la mayor latitud de esta región, marcando más los efectos de las estaciones climáticas.

En la Zona Central, debido a la predominancia de los climas templados, la temperatura media anual se encuentra en torno a los 14 °C, con baja oscilación térmica el borde costero, aumentando hacia los valles centrales, los cuales en verano presentan temperaturas sobre los 20° C, en cambio en invierno estas bajan drásticamente a los 10° C. En Santiago, la temperatura media en Enero es de 21° C a diferencia que en Junio es alrededor de los 9° C.

Hacia el Sur, las temperaturas medias siguen bajando, alcanzando promedios anuales en Temuco en torno a los 11° C y en Puerto Montt de 10,5° C. En las regiones de Los Ríos y Los Lagos, el periodo invernal se caracteriza por temperaturas bajas, las cuales no superan los 7° C de media en Julio.

En la Zona Austral, el predominio de climas fríos y polares provoca la disminución de las temperaturas media de forma considerable, como también las propias características geográficas de cada comuna. En Coyhaique la media anual no supera los 9° C, similar a lo

que ocurre en Punta Arenas, donde la temperatura media anual no alcanza los 7°C. En el territorio chileno antártico la temperatura media en Julio es cercana a -5 ° C, debido a sus características polares.

Todo el país manifiesta un incremento de la temperatura, siendo más acentuado hacia las regiones andinas y disminuyendo de norte a sur (Véase Figura 11). En las zonas costeras del norte chileno se presenta una disminución de la temperatura media, pero dicha cantidad no es significativa.

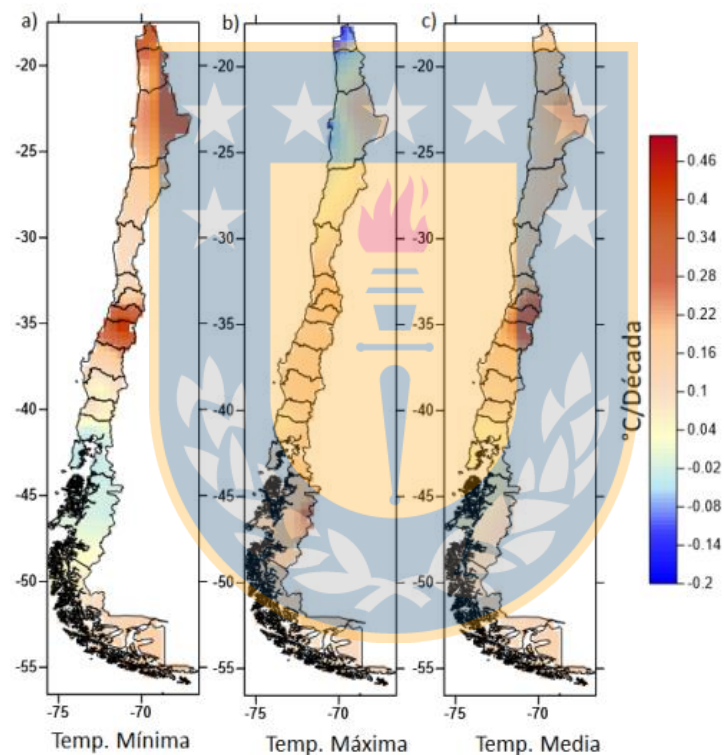


Figura 11: Mapa de Tendencias expresadas en °C por década de la temperatura mínima, media y máxima, la escala de colores representa en azul las tendencias negativas (más frío) y rojo las tendencias positivas (más cálido).

2.4.6. Precipitación

Las precipitaciones en el país aumentan considerablemente hacia el sur. Las lluvias están principalmente relacionadas con el fenómeno de “El Niño”, aportando el 60% de la precipitación anual. En las zonas semiáridas las precipitaciones se han caracterizado por años lluviosos sucesivos y sequías multianuales. En cambio el resto del país se ha caracterizado por una tendencia a la baja.

En el Norte Grande del país, las precipitaciones son prácticamente nulas, principalmente en las zonas costeras alcanzando los 0,3 mm en Arica y los 4,6 mm en Antofagasta. En cambio en las zonas altiplánicas afecta el denominado “Invierno Boliviano”

Avanzando al sur, en el Norte Chico, las precipitaciones aumentan considerablemente, llegando en el año 2016 a los 38,2 mm en La Serena, mucho menos que los 111 mm de lluvia en el año anterior. Esto se debe al evento que afectó el Norte Chico con lluvias extremas durante el 24 y 26 Marzo.

En la Zona Central, las precipitaciones bordean los 400 mm, aumentando hacia el sur. En Valparaíso las lluvias superaron los 312 mm, en Santiago bordearon los 270 mm, en cambio en Concepción aumentan considerablemente superando los 615 mm el año 2016.

La Zona Sur se caracteriza por tener las zonas con mayor precipitación en el país, debido a su latitud y clima lluvioso. Las lluvias alcanzaron los 815 mm en Temuco, 1270 mm en Valdivia y 960 mm en Puerto Montt.

Por último en Zona Austral se reducen las precipitaciones en relación a la Zona Sur, además de cambiar en algunos casos en nieve en las zonas más australes. En las zonas costeras y peninsulares las precipitaciones superan los 1200 mm en la región de Aysén, en cambio en Coyhaique nos superan los 530 mm. En Punta Arenas las precipitaciones bordean los 220 mm.

En Chile Central se presenta un déficit de precipitaciones importante. En la zona comprendida entre La Serena y Concepción las precipitaciones han bajado en torno a un 30%. Mientras que la zona más afectada es la región del Biobío, principalmente Chillán y Concepción con déficit de 54% y 44,5%.

2.4.7. Eventos climáticos extremos

Cada año los eventos climáticos extremos son más comunes en Chile, panorama que está en fuerte crecimiento. Los cambios climáticos que están experimentando las distintas zonas geográficas del país, aumentan la necesidad de establecer planes de control eficientes que eviten el aumento de las pérdidas ambientales, sociales y económicas cada año.

Dentro de los fenómenos más perjudiciales se encuentra la sequía, que cada vez son más recurrentes en Chile, afectando incluso el centro sur del país. Esto se debe al aumento sostenido del déficit hídrico en las principales reservas que se encuentran en la Cordillera Chilena, disminuyendo el caudal en época estival, y provocando la falta del recurso para el consumo humano, agrícola y energético. Las proyecciones no son alentadoras ya que se espera una ocurrencia de más de 10 veces en 30 años (CEPAL, 2009).

Otro fenómeno que genera gran preocupación en el país en los últimos años es el aumento de las olas de calor extremo, definidas como 3 días consecutivos por sobre los 32,4 °C, las cuales son más frecuentes e intensas en la zona centro sur. Uno de las más intensas de los últimos años se vivió entre el 25 y 27 de Enero del 2017, dicho evento se concentró entre las regiones Metropolitana y de la Araucanía, afectando con mayor intensidad el valle central de las regiones del Maule y del Biobío, elevando los termómetros hasta los 44,9 °C en Quillón (DGA, 2017). Esta temperatura es la más alta en nuestro país desde que se tiene registros. Por último, los eventos de precipitación extrema cada vez son más frecuentes en zonas que no están preparadas para dicha cantidad de agua, generando grandes pérdidas materiales y humanas en los últimos años. Un ejemplo claro corresponde las precipitaciones extremas que afectaron a la regiones de Antofagasta, Atacama y Coquimbo, entre el 24 y 26 de Marzo del 2015, generando aluviones e inundaciones en varias comunas y localidades, siendo las más afectadas las ciudades de Chañaral y Copiapó. Dichas precipitaciones superaron en algunas zonas los 50 mm diarios provocando aluviones que devastaron todo a su paso, generando pérdidas humanas y económicas.

El aumento en la frecuencia de tales fenómenos es asociado directamente al cambio climático, y en su condición de país altamente vulnerable a este problema, se estima que las

pérdidas totales por este fenómeno alcancen en el año 2100 un 1,1% anual del PIB (CEPAL, 2012).



3. Desarrollo del proyecto

3.1. Caracterización de la zona de estudio

3.1.1. Parque Nacional Torres del Paine (PNTTP)

Se encuentra ubicado en la Provincia de Última Esperanza en la Región de Magallanes y Antártica Chilena, geográficamente entre los 50° 45' y 51° 20' de latitud sur y los 72° 31' y 73° 22' de longitud oeste, a 112 km de Puerto Natales y 312 km de la capital regional Punta Arenas. Fue creado el 13 de Mayo de 1959, mediante el Decreto Supremo N°383 del Ministerio de Agricultura con una superficie inicial de 4332 hectáreas (hás). Posteriormente a mediados de la década de los setenta fue traspasada su administración a la Corporación Nacional Forestal (CONAF) (Ortiz Revista Ambienta, S.F.). Posteriormente debido a su gran diversidad natural, la UNESCO declaró al PNTTP como reserva de la Biosfera en 1978.



Figura 12: Parque Nacional Torres del Paine. Región de Magallanes y Antártica Chilena. (CONAF plan de mejoramiento de gestión, 2012)

Es uno de los parques nacionales más importantes de Chile y de la Patagonia. Tiene actualmente una extensión de 240000 hás. (Ferreiro: Guía turística Torres del Paine, S.F.), que son visitadas por miles de turistas nacionales e internacionales año tras año. Corresponde a uno de los parques del Sistema Nacional de Áreas Protegidas del Estado (SNASPE), además de ser la principal fuente de ingresos del sistema, aportando el 45% del total, por

concepto de cobro por derecho a entrada y pago de concesiones de servicios turísticos (CONAF programa de mejoramiento de la gestión, 2012).

Los ecosistemas que conviven en este parque son únicos en el mundo, de belleza incomparable y de gran interés científico (García, Hall, Kaplan, Vega y Strelin, 2013), destacando entre ellos formaciones geológicas, glaciares, ríos, lagos, cascadas, flora y fauna, los cuales se encuentran constantemente en peligro debido a la fragilidad de cada uno de ellos ante la intervención humana. Un ejemplo claro de esta fragilidad son los incendios forestales, que suelen ser muy violentos y de rápido avance, ayudado por las condiciones climáticas estivales, que destacan por la escasez de precipitaciones, baja humedad ambiental y permanentes vientos de gran velocidad, siendo escenario de voraces incendios como los vividos en 1985, 2005 y 2011, que afectaron superficies de 13000, 15000 y 17606 hás. respectivamente (CONAF programa de mejoramiento de la gestión, 2012, pág. 3).

El otro gran problema que afecta al PNTP es el retroceso de los glaciares ubicados en el parque y sectores aledaños. Los cuales están experimentando una tendencia generalizada a la pérdida de masa anual, superando los cientos de metros cada año, además de altas tasas de adelgazamiento en las zonas más bajas de los glaciares del parque (DGA, 2009). Tal tendencia se marca por la baja de las precipitaciones de nieve en la zona en los últimos 50 años, además del aumento progresivo de temperaturas que afecta al parque como a toda la zona austral del país.

3.1.2. Glaciar Grey

Se encuentra ubicado geográficamente en los 51° 01' latitud sur, 73° 12' longitud oeste. Corresponde a una lengua sureste de los CHS, que desemboca a través de 3 lóbulos distintos en el lago de mismo nombre, en la zona norte del PNTP. En 1996 tenía una superficie total de 252,9 km² y una longitud de 29 km (Rivera y Casassa, 2004).



Figura 13: Glaciar Grey. Parque Nacional Torres del Paine. (USGS, 2017)

Desde el inicio de los estudios en los glaciares del campo de hielo sur, el glaciar Grey ha sufrido importantes variaciones frontales, tal como se presenta en la tabla 4.

Tabla 4: Variaciones Frontales (m a-1) Glaciar Grey.

Periodo	Brazo Oeste	Brazo Este
1937-1945	-14	-12
1945-1975	-31	-3
1975-1986	-23	-16
1986-1995	-50	-56
1995-1997	-768	-125
1997-2000	-60	-75
2000-2003	Estable	-67

Nota: Recuperado de Rivera y Casassa, 2004.

Dicho glaciar presenta constantes retrocesos en las últimas décadas, alcanzando tasas de adelgazamiento de -2,3 (1975 – 1995) metros por año y disminución de área en torno 4 metros por año (1945-1986).

3.1.3. Glaciar Tyndall

Se encuentra ubicado geográficamente en los 51° 15' latitud sur, 73° 15' longitud oeste. Corresponde a una lengua sureste de los CHS, que desemboca en el lago Geinke, en la zona central del PNTP. En 1996 tenía una superficie total de 331 km² y una longitud de 32 km (Rivera y Casassa, 2004).



Figura 14: Glaciar Tyndall. Parque Nacional Torres del Paine. (USGS, 2017)

Dicho glaciar presenta importantes retrocesos en las últimas décadas, alcanzando tasas de adelgazamiento de -3,1 (1990 – 1993) metros por año y disminución de área en torno 83 metros por año (1945-1986).

Tabla 5: Frontal variations (m a-1) of Glaciar Tyndall

Period	Noncalving eastern tongue	Calving southern fronts	
		Lago Tyndall	Lago Geikie
1945-1975	-25	-30	-123
1975-1986	-27	-23	-32
1986-1996	-36	-58	-60
1996-2000	-25	-50	-50

Nota: Recuperado de Rivera y Casassa, 2004.

3.1.4. Glaciar Dickson

Se encuentra ubicado geográficamente en los 50° 47' latitud sur, 73° 09' longitud oeste. Corresponde a una lengua sureste de los CHS, que desemboca en el lago Dickson, en el extremo norte del PNTP. En 1996 tenía una superficie total de 61,6 km² y una longitud de 12 km (Rivera y Casassa, 2004).



Figura 15: Glaciar Dickson. Parque Nacional Torres del Paine. (USGS, 2017)

Dicho glaciar presenta importantes retrocesos en las últimas décadas, alcanzando tasas de adelgazamiento de -2,5 a -8,1 (1975 – 1998) metros por año y disminución de área en torno 38 metros por año (1945-1986).

Tabla 6: Variaciones Frontales (m a-1) of Glaciar Dickson.

Periodo	Brazo oeste	Brazo Este
1897-1945	-36	Sin datos
1945-1975	-37	-13
1975-1986	-110	-30
1986-1995	-39	-133
1995-1998	-64	Estable
1997-2000	Retroceso Mínimo	Estable
2000-2003	-30	-592

Nota: Recuperado de Rivera y Casassa, 2004.

Este glaciar presenta uno de los más rápidos adelgazamientos de todos los glaciares del PNTP y del CHS, vivido el año 1982, generando una gran crecida en el lago homónimo de hasta 4 metros sobre el nivel actual.

3.2. Datos

El conjunto de información y datos necesarios para la realización del proyecto se divide en tres grupos: las imágenes satelitales, los modelos digitales de elevación y los datos climáticos.

3.2.1. Imágenes satelitales

En la actualidad las imágenes satelitales son una de las mejores herramientas para el estudio de los diferentes fenómenos que afectan al planeta, a través de la constante observación por satélites que orbitan en torno al globo, obteniendo capturas de baja, media y alta resolución.

La resolución espacial, radiométrica y temporal de las imágenes satelitales ha aumentado en las últimas décadas, debido al lanzamiento de nuevos satélites con sensores más modernos y versátiles, obteniendo imágenes de mayor calidad, enfocados a los diversos fenómenos de estudio que enfrenta el mundo actual.

Uno de los programas más exitosos es Landsat, que nace del trabajo conjunto del *United States Geological Service* (USGS) y la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA), obteniendo imágenes periódicamente desde 1972 hasta la actualidad, a través de los diferentes satélites durante su historia, siendo el primer programa de alcance global.

Las imágenes utilizadas en el presente proyecto fueron obtenidas por los sensores TM, ETM+ y OLI/TIR a bordo de Landsat 5, 7 y 8 respectivamente, que poseen las siguientes características.

Tabla 7: Características de los sensores Landsat 5, 7 y 8.

TM (μm)		EMT+ (μm)		OLI/TIR (μm)	
1	0.45-0.52 (30 m)	1	0.45-0.52 (30 m)	1	0.43-0.45 (30 m)
2	0.52-0.60 (30 m)	2	0.52-0.60 (30 m)	2	0.45-0.51 (30 m)
3	0.63-0.69 (30 m)	3	0.63-0.69 (30 m)	3	0.53-0.59 (30 m)
4	0.76-0.90 (30 m)	4	0.76-0.90 (30 m)	4	0.64-0.67 (30 m)
5	1.55-1.75 (30 m)	5	1.55-1.75 (30 m)	5	0.85-0.88 (30 m)
6	10.40-12.50 (120 m)	6	10.40-12.50 (120 m)	6	1.57-1.65 (30 m)
7	2.08-2.35 (30 m)	7	2.08-2.35 (30 m)	7	2.11-2.19 (30 m)
		8	0.52-0.90 (15 m)	8	0.50-0.68 (15 m)
				9	1.36-1.38 (30 m)
				10	10.60-11.19 (100 m)
				11	11.50-12.51 (100 m)

Nota: Recuperado de *Fundamentals of Satellite Remote Sensing, Second Edition, 2016, pág. 102.*

Además, las imágenes satelitales fueron descargadas de forma gratuita del buscador *Earth Explorer* de la USGS, el cual posee un registro completo de las misiones a cargo de la NASA, ESA y otras instituciones afines.

Para este estudio, las imágenes cumplen los siguientes criterios para su utilización y procesamiento:

- Sólo son utilizadas imágenes adquiridas por los sensores durante los meses de verano, debido a que las condiciones climáticas (días despejados, menor nubosidad) permiten observar el estado de los glaciares durante el deshielo estival, distinguiendo su límite frontal, límites laterales y línea de equilibrio.
- El porcentaje de nubes en las escenas debe ser menor al 20% del área registrada, procurando que no afecte los glaciares de estudio en toda su extensión.
- Las áreas con sombras deben ser mínimas, ya que al igual que las nubes afectan en la calidad de los resultados de los índices NDSI y *Band Ratio 3/5*.

Las tomas que cumplieron los criterios y que son objeto de estudio son presentadas en la tabla 8.

Tabla 8: Imágenes de Estudio

Nombre Archivo	Fecha de Adquisición	Sensor
LC08_L1TP_230095_20131219_20170427_01_T1	19 Dic 2013	OLI/TIR
LC08_L1TP_230096_20131219_20170427_01_T1	19 Dic 2013	OLI/TIR
LC08_L1TP_231095_20160321_20170327_01_T1	21 Mar 2016	OLI/TIR
LC08_L1TP_231095_20170204_20170216_01_T1	04 Feb 2017	OLI/TIR
LC08_L1TP_231096_20170204_20170216_01_T1	04 Feb 2017	OLI/TIR
LT05_L1TP_230096_19980414_20161225_01_T1	14 Abr 1998	TM
LT05_L1TP_230096_20010321_20161212_01_T1	21 Mar 2001	TM
LT05_L1TP_231095_20020331_20161208_01_T1	31 Mar 2002	TM
LT05_L1TP_231096_20020331_20161209_01_T1	31 Mar 2002	TM
LT05_L1TP_231095_20060222_20161123_01_T1	22 Feb 2006	TM
LT05_L1TP_231096_20060222_20161123_01_T1	22 Feb 2006	TM
LE07_L1TP_231095_20100329_20161215_01_T1	29 Mar 2010	ETM+
LE07_L1TP_231096_20100329_20161215_01_T1	29 Mar 2010	ETM+
LT05_L1TP_231095_20110220_20161010_01_T1	20 Feb 2011	TM

Nota: Obtenidas de Earth Explorer, USGS, 2017.

Cabe mencionar que se evitó la utilización de imágenes obtenidas por el sensor ETM+ a bordo del satélite Landsat 7, por el no funcionamiento del escáner corrector SLC, generando franjas diagonales sin información (Chuvienco, 2016), las cuales afectan el cálculo de NDSI y Band Ratio 3/5.

Para el análisis y procesamiento de las imágenes satelitales se utilizó el programa ENVI 5.3. y para la estimación de las variaciones areales se utilizó el software ArcGIS 10.3.

3.2.2. Modelos digitales de elevación (MDE)

Los MDE permiten la representación de la topografía (principalmente altimetría) de diferentes zonas bajo estudio, siendo un componente de importancia en muchos análisis científicos con el fin de entender y explicar los fenómenos espaciales durante un periodo determinado (Cushing, 2008). La calidad de dichos análisis depende de la consistencia de los datos obtenidos para la generación de los MDE, y por ende de las condiciones topográficas, espaciales y temporales que se encuentran en las diferentes regiones del mundo.

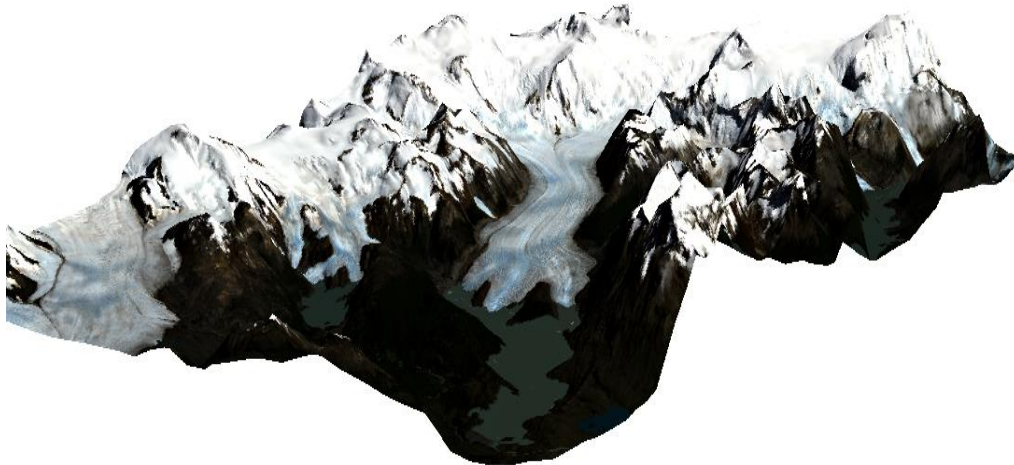


Figura 16: Representación 3D Glaciar Grey en QGIS. Parque Nacional Torres del Paine. Elaboración Propia (2018).

La cantidad de imágenes con datos altimétricos del PNTP es reducida, debido a la cobertura espacial de las misiones, que no llegan con frecuencia al extremo sur del continente americano.

Los MDEs obtenidos y ocupados en el proyecto, corresponden a las misiones altimétricas SRTM, ASTER GDEM V2 y WorldDEM. Que poseen las siguientes características.

Tabla 9: Misiones MDE

Misión	Modelo Geoidal	Resolución Espacial (m)	Error Vertical (m)	Fecha de Adquisición de Imágenes
SRTM ₁	EGM 96	50	6,2	Feb 2000
ASTER GDEM V2 ₁	EGM 96	12	7	17 Oct 2011
WorldDEM ₂	EGM 08	12	2-4	23 Ene 2013

Nota₁: Recuperado de Desarrollo de Mapas de Relieve, Hidrografía y Derivados para Suramérica, GeoSUR, 2008, Pág. 4.

Nota₂: Recuperado de AIRBUS, Defence and Space, Productos, TanDEM-X-DEM. URL: <http://www.infoterra.es/productos-geoelevation-tx-tdx-dem>.

Ocupando los siguientes archivos para el proyecto:

Tabla 10: Archivos MDE.

Nombre Archivo	Fecha de Descarga/ Obtención de las Imágenes	Misión
SRTM_96_DEM ₁	19 Dic 2017	SRTM
AP_26593_FBS_F6140_RT1 ₁	19 Dic 2017	ASTER GLOBAL DEM V2
TDM1_DEM__04_S51W074_DEM ₂	21 Mar 2018	WorldDEM

Nota₁: Descargado de Earth Explorer, USGS, 2017.

Nota₂: Obtenido de Mosaico realizado por Andrés Rivera, 2018.

El uso de distintos MDE es justificado por las mínimas variaciones que presentan los modelos geoidales EGM 96 y EGM 2008, ya que la diferencia de precisión de los incrementos de la ondulación del geoide no es significativa entre ambos modelos (Martínez y Bethencourt, 2012), considerando que su uso es el cálculo de volumen en km³.

Por otra parte, la limitada disponibilidad de imágenes MDE para la zona de estudio (3 imágenes), afecta la determinación de las variaciones de volumen de los glaciares, ya que estas imágenes deben ser usadas varias veces para diferentes épocas de estudio. Por esto, las variaciones de volumen son asociadas a los cambios de extensión, sin considerar las zonas centrales.

Para la delimitación de los MDE de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson y posterior estimación de las variaciones volumétricas se utilizó el software ArcGIS 10.3.

3.2.3. Datos climáticos

La información climática del país depende principalmente de dos organismos, la DMCH y la DGA, con una gran red de estaciones que miden diferentes variables climáticas, como temperatura (medía, mínima y máxima), precipitaciones, caudal y humedad a lo largo del territorio nacional.

Las estaciones se encuentran principalmente en las capitales regionales, provinciales y cuencas aledañas, con mayor frecuencia de datos en las principales ciudades, siendo discontinuadas las observaciones en las zonas remotas del país.

La estación meteorológica de mayor importancia en la región de Magallanes y Antártica Chilena, es la de Punta Arenas (53.1233° S, 70.8772°O, 5 m.s.n.m.), la cual realiza mediciones constantemente desde 1960. Otras estaciones de importancia son las ubicadas en la comuna de Porvenir y Puerto Williams.

En el Parque Nacional Torres del Paine se encuentran ocho estaciones meteorológicas, que permiten monitorear las condiciones climáticas en los diferentes puntos de importancia de la reserva nacional (tabla 11).

Tabla 11: Estaciones Meteorológicas DGA, Parque Nacional Torres del Paine.

Nombre	Norte (m)	Este (m)	VARIABLES MEDIDAS	Periodo de Medición
Lago Dickson	4368069	632950	Temperatura y Precipitación	2004-Actualidad
Lago Pehóe	4339432	640570	Precipitación	1964-1967 a 2012-Actualidad
Lago Sarmiento	4346359	660610	Precipitación	1964-1975 a 2011-Actualidad
Glaciar Tyndall			Temperatura	2012- Actualidad
Rio Paine	4352156	655031	Precipitación	2007-Actualidad
Torres del Paine	4327613	642093	Temperatura y Precipitación	1982-Actualidad
Rios Las Chinas en Co. Guido	4341472	674041	Temperatura y Precipitación	2001-Actualidad
Cerro Castillo	50.8986	72.3314	Temperatura y Precipitación	2000-Actualidad

Nota: Recuperado de CR2, 2017.

3.3. Pre procesamiento

El Pre procesamiento sobre las imágenes es de vital importancia, ya que permite el cálculo de radiancia y reflectancia a partir de los valores originales de los píxeles.

La radiancia es la cantidad de radiación procedente de un área determinada, cada elemento existente tiene diferentes valores de radiancia que permiten la clasificación y agrupación de píxeles en función de su valor. Para obtener una imagen de radiancia de una imagen sin calibrar se debe aplicar un aumento y un desfase a los valores de cada píxel. Estos se encuentran anexados en los metadatos de cada imagen, tal como se muestra a continuación:

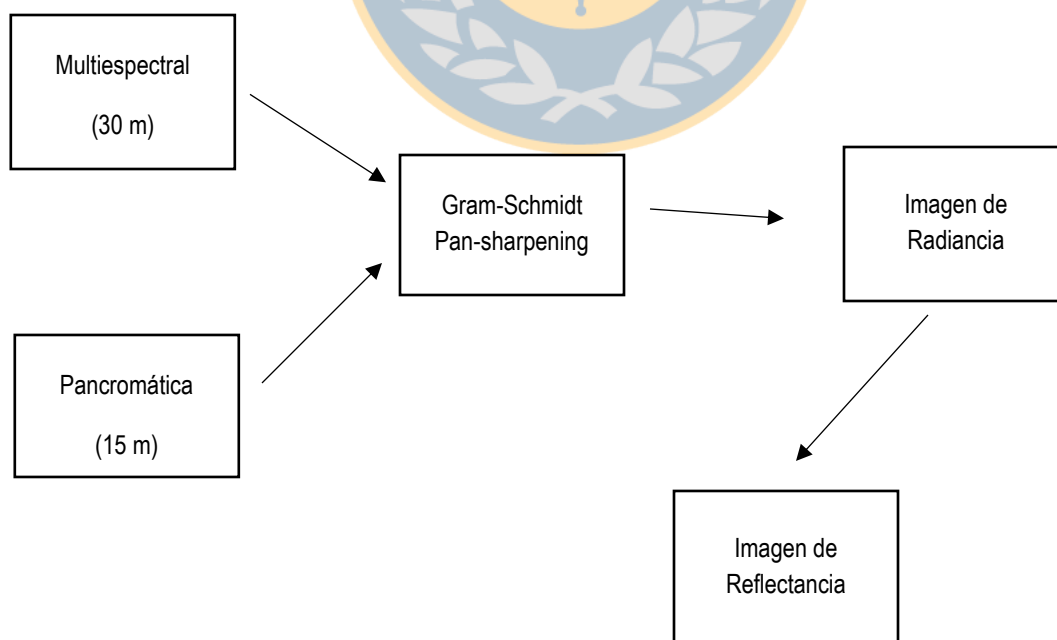
$$L_{\lambda} = G * Pv + O$$

Donde L_{λ} corresponde a la radiancia de la imagen, Pv son los valores de pixel iniciales, G es el aumento y O es el desfase, especificados en el archivo de metadatos de la imagen. Posteriormente con los valores de radiancia, se realiza el cálculo de reflectancia al tope de la atmosfera (ToA). A través de la siguiente formula:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\pi L_{\lambda} d^2}{ESUN_{\lambda} \sin \theta}$$

Donde ρ_{λ} corresponde a la reflectancia ToA, π es la constante euclidiana ($\pi = 3,141592$), L_{λ} es la radiancia de la imagen, d es la distancia Tierra-Sol, en unidades astronómicas (149597,87 km), $ESUN_{\lambda}$ es la irradiancia solar y θ la elevación solar en grados sexagesimales.

Cabe mencionar que en las imágenes obtenidas de los sensores ETM+ y OLI/TIR se realizó la combinación de las bandas pancromáticas (15m) con las bandas multiespectrales, proceso denominado Pan-Sharpening, obteniendo como resultado una imagen con mayor resolución espacial. El método utilizado es *Gram-Schmidt Pan Sharpening* (Maurer, 2013).



Esquema 2: Metodología Preprocesamiento de Imágenes Satelitales

3.4. Procesamiento

3.4.1. NDSI

La nieve y el hielo poseen cualidades espectrales especiales que las distinguen de otras cubiertas. En las zonas nevadas y con hielo los valores de reflectancia son muy altos comparados a otras cubiertas como agua, tierra y vegetación. Sin embargo, la diferencia con las zonas rocosas no es tan clara en el espectro visible, por ende la utilización de la banda infrarroja permite diferenciar de forma clara tales elementos (Cea et al., S.F.).

Por esto se propone el cálculo de un índice normalizado utilizando la banda verde y la banda infrarroja media, tal como se muestra a continuación:

$$NDSI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

El resultado corresponde a las celdas con valores superiores a 0,4, que representa a la cubierta nival (Dozier, 1989).

A las imágenes de reflectancia se aplica el cálculo del índice, clasificando las zonas en base a la siguiente tabla.

Tabla 12: Valores Índice NDSI

Valor	Superficie
-0,31 - 0,11	Suelo Desnudo
0,30 - 0,42	Sombra
0,42 - 0,79	Nieve/Hielo

Nota: Recuperado de Copé de los Mozos, 2014, 36.

3.4.2. Band Ratio 3/5

Este ratio es una relación entre la banda roja y la banda infrarroja media, siendo un efectivo discriminador de la nieve y hielo con los demás elementos presentes en la escena.

$$Ratio \frac{3}{5} = \frac{Red}{SWIR}$$

Este cálculo se aplica en las imágenes de reflectancia, proponiendo un valor umbral a los valores de pixel superiores a 1,4. Aplicando la siguiente clasificación presente en la tabla 13.

Tabla 13: Valores Band Ratio 3/5

Valor	Superficie
0 – 1,10	Suelo Desnudo
1,10 – 1,40	Agua
1,40 – 2,00	Agua/Hielo
2,00 – 9,00	Nieve/Hielo

Nota: Recuperado de Copé de los Mozos, 2014, 41.



3.4.3. Digitalización manual y combinación de bandas

La digitalización es fundamental para la cuantificación de las variaciones de los glaciares bajo estudio, además permite complementar los resultados obtenidos por NDSI y Ratio 3/5, los cuales se encuentran condicionados a situaciones ideales, y se distorsionan en zonas de transición, como también de sombras, principalmente en los bordes del glaciar. Para facilitar la digitalización manual, es necesario utilizar combinaciones de bandas espectrales en las imágenes de reflectancia, con tal de identificar variaciones frontales, laterales y líneas de equilibrio. Las combinaciones de bandas 742, 567 y 451 debido a sus características espectrales (Diferenciación elementos geológicos, Agua y Tierra, Identificación vegetación sana, Diferenciación Hielo-Nieve) permiten identificar de mejor forma los límites de los glaciares, complementando la información obtenida de los índices automatizados. Generando diferencias notables en los colores, tal como se muestra en la figura 17, correspondiente al glaciar Tyndall.

Para las líneas de equilibrio, es de gran ayuda la utilización de la banda verde (B3), ya que permite diferenciar de mejor forma los límites entre las zonas descubiertas (hielo) y las nevadas (Rabatel et al., 2012).

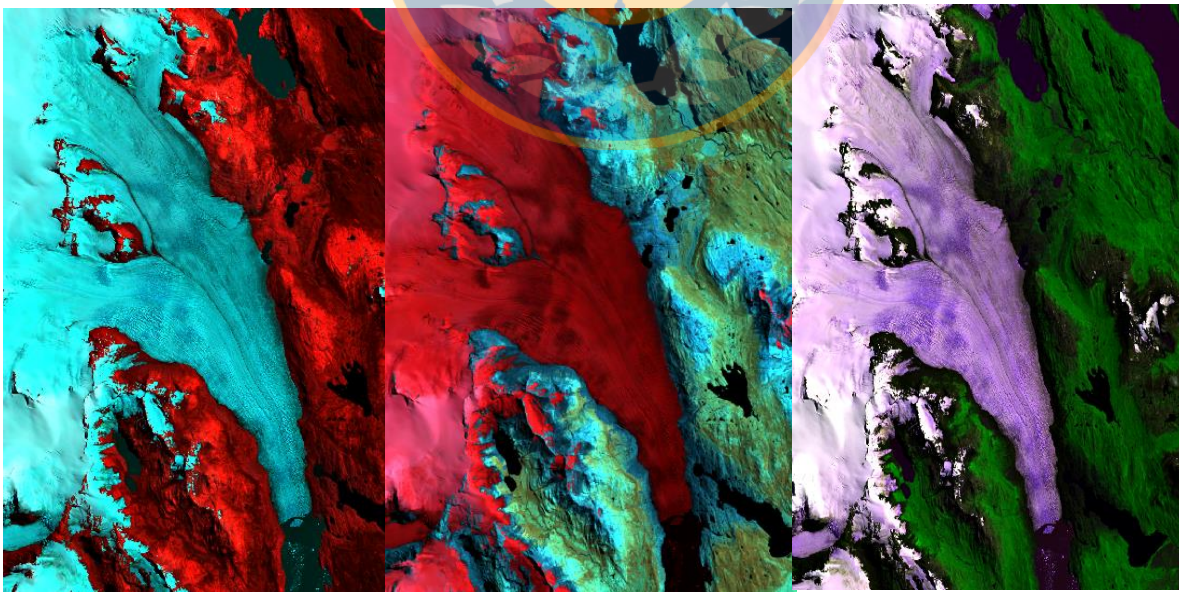


Figura 17: Glaciar Tyndall en combinaciones de banda 742 (izquierda), 567 (centro) y 451 (derecha), USGS (2017).

3.4.4. Estimación variaciones en glaciares

Con el fin de estimar los cambios en el área y volumen de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson es necesario la digitalización de ellos en cada una de las imágenes de estudio. Como estos glaciares son parte del CHS, su delimitación solo es posible en sus caras laterales y frontales, pero no en su parte superior, ya que estos glaciares son brazos laterales CHS, por ende, se encuentran unidos a la plataforma principal. Por esto se ocupa como referencia de límite superior, la línea de equilibrio de cada uno de los glaciares correspondiente a la última imagen de estudio (figura 18).

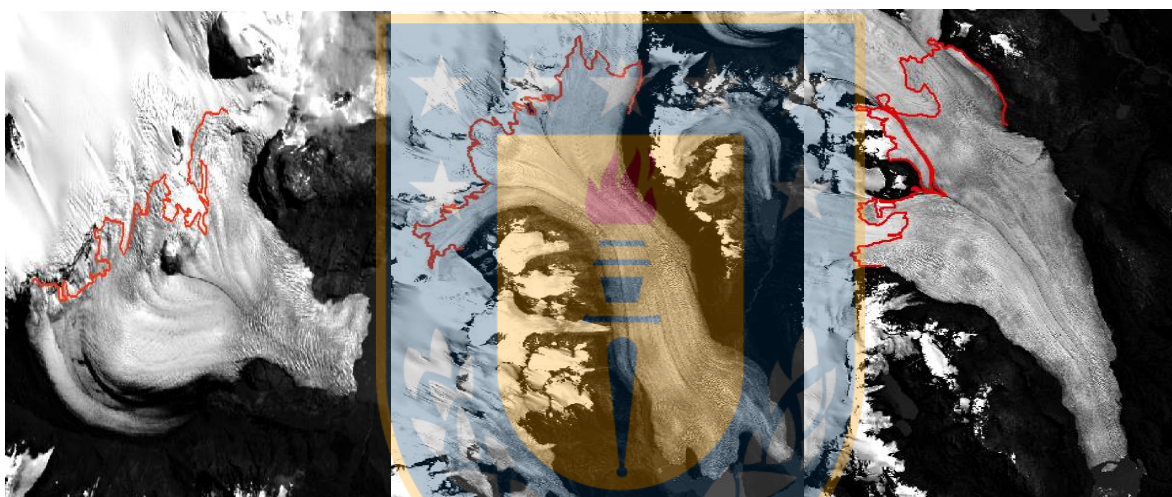


Figura 18: Línea de Equilibrio Dickson (Izquierda), Grey (Centro) y Tyndall (Derecha), banda verde OLI/TIR, año 2017.

Posteriormente, se determinó el área de cada uno de los glaciares en sus correspondientes épocas de estudio, ocupando como sistemas de coordenadas proyectadas (Universal Transversal de Mercator) UTM 18 Sur, correspondiente a la zona de estudio.

A continuación se realizó la estimación de volumen de los glaciares involucrados, en base a los MDE anteriormente nombrados (tabla 14).

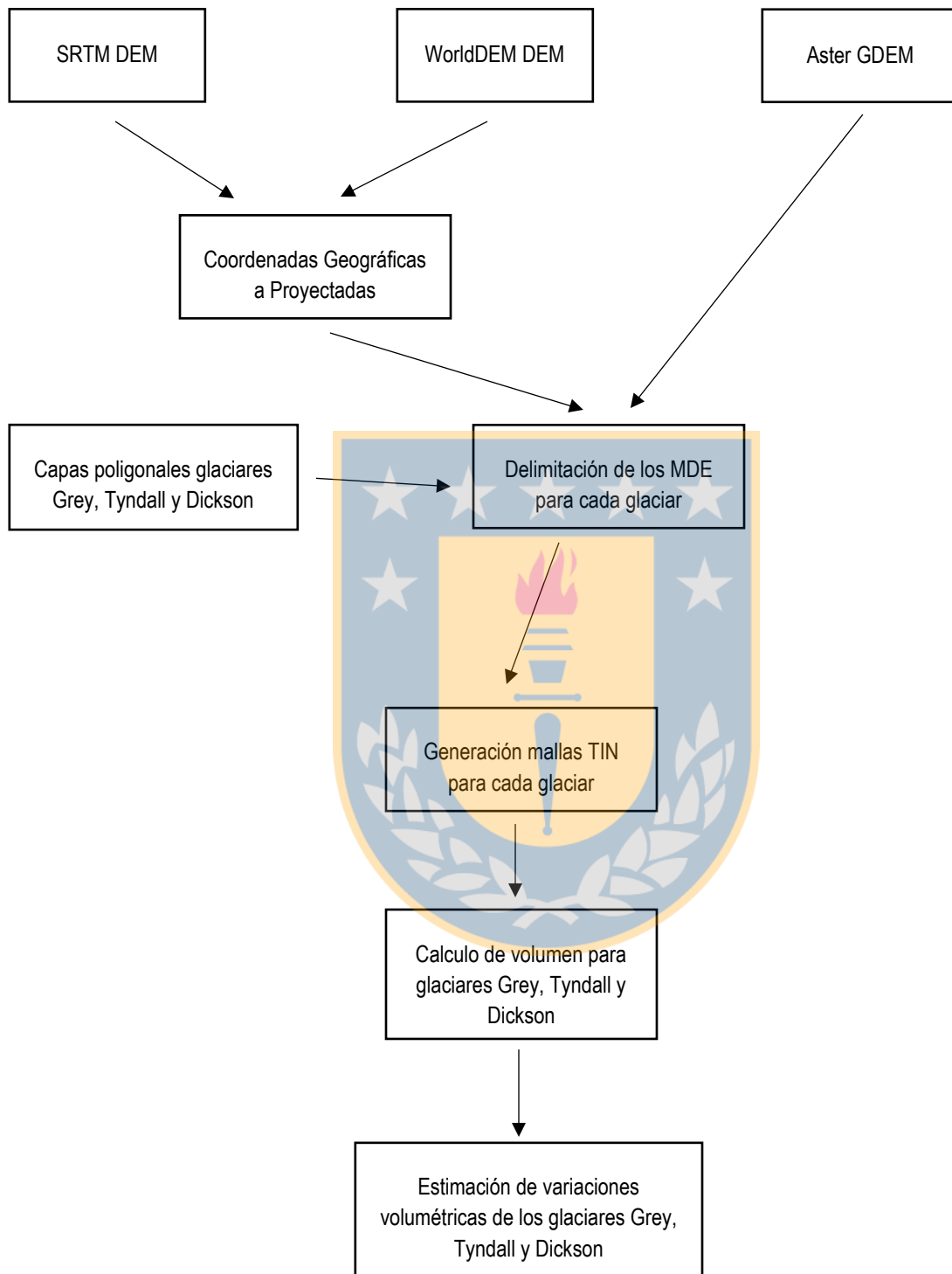
Tabla 14: Asociación época de estudio de Glaciares a sensor MDE

Época de Estudio	Sensor MDE	Modelo Geoidal	Sistema de Coordenadas
1998 - 2006	SRTM	EGM 96	Geográficas WGS 84
2010 - 2011	ASTER GLOBAL DEM V2	EGM 96	Proyectadas WGS 84, UTM 18 S
2013 - 2017	WorldDEM	EGM 08	Geográficas WGS 84

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

Cabe mencionar que los archivos MDE presentes en la tabla 10, se encuentran ortorrectificados desde el momento de su obtención y/o descarga, además los modelos geoidales asociados a cada MDE son los definidos de origen para cada uno de sensores, es decir para SRTM es EGM 96 (USGS, 2015), para ASTER DEM es EGM 96 (LP DAAC, 2009) y para WorldDEM es EGM 08 (AIRBUS, 2015).

Para el cálculo de volumen es necesario que los modelos se encuentren en un sistema de coordenadas proyectadas, tal como ASTER DEM. Por esto es necesario la transformación de coordenadas geográficas a proyectadas para los dos modelos restantes (SRTM y WorldDEM. En este caso de coordenadas geográficas WGS 84 a proyectadas WGS 84, UTM 18S. Posteriormente se delimitaron los MDE transformados en función de cada uno de los glaciares (Tabla 15). Se generaron mallas TIN y se realizó el cálculo de volumen. Este procedimiento se realizó en cada uno de los glaciares estimando así el volumen de cada glaciar y por ende, cuantificando las diferencias en función de las variaciones superficiales y archivos MDE asociados a cada una de las épocas de estudio (Esquema 3).



Esquema 3: Metodología utilizada para la estimación de las variaciones volumétricas de los glaciares bajo estudio.

Tabla 15: Asociación fecha de adquisición Imágenes satelitales - Archivos MDE.

Fecha	Archivos MDE Asociados		
	SRTM_96_DEM	AP_26593_FBS_F6140 _RT1	TDM1_DEM_04_S5 1W074_DEM
14-04-1998	X		
21-03-2001	X		
31-03-2002	X		
22-02-2006	X		
29-03-2010		X	
20-02-2011		X	
19-12-2013			X
21-03-2016			X
04-02-2017			X

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

Las diferencias de volumen al ocupar la misma imagen MDE, solo representan las variaciones frontales y laterales de los glaciares de estudio, ya que en la región central de cada cuerpo de hielo no se pueden determinar diferencias. En cambio, cuando se utiliza distintos MDE, si se puede determinar diferencias volumétricas en la extensión completa del glaciar.

Tabla 16: Altura (m) mínimas y máximas Área de ablación glaciares a partir de MDE.

Glaciar	Tyndall		Grey		Dickson	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
14-04-1998	15	1094	45	1368	191	1417
21-03-2001	44	1118	45	1380	197	1417
31-03-2002	55	1118	54	1368	203	1431
22-02-2006	61	1118	47	1380	-	
29-03-2010	90	1139	69	1402	251	1441
20-02-2011	-	-	69	1400	241	1441
19-12-2013	22	1129	31	1418	225	1441
21-03-2016	-	-	45	1418	230	1419
04-02-2017	22	1130	45	1418	244	1441

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

Un ejemplo de tales variaciones en las alturas mínimas y máximas de los glaciares, son las ocurridas en el glaciar Tyndall, tal como se aprecia en la Figura 19. Existiendo una mayor altura en la zona de ablación del glaciar en el periodo 2017 (color gris a blanco), superando en más de 30 metros la altura correspondiente al mismo glaciar en el periodo 1998.



Figura 19: Variaciones alturas (m) línea de equilibrio Glaciar Tyndall. Año 2017 (Izquierda), Año 1998 (Derecha).

4. Estimación de las variaciones temporales de los glaciares

Luego de los cálculos de área y volumen correspondiente a cada uno de los glaciares, se evidencia retrocesos importantes en el periodo de estudio, los cuales llegan a niveles muy preocupantes (tabla 17).

Tabla 17: Variaciones de Glaciares Dickson, Grey, Tyndall.

Época	Glaciar	$\Delta \text{Área (km}^2\text{)}$	$\Delta \text{Volumen (km}^3\text{)}$
1998 - 2017	Dickson	-3,94	-0,582
1998 - 2017	Grey	-10,87	-2,665
1998 - 2017	Tyndall	-13,68	-6,805

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

Esta estimación no considera las variaciones sobre la línea de referencia que se establecieron para cada uno de los glaciares, por esto el retroceso puede ser aún mayor.

Estos valores superan la tasa estimada de pérdida de área en el periodo 1948 - 1998 (véase en pág.2). La velocidad se ha duplicado generando colapsos mayores y desprendimientos cada vez más recurrentes. Estos retrocesos no son esperanzadores, principalmente a que la zonas de ablación cada vez son mayores, provocando una mayor exposición de las capas superficiales de los glaciares en los últimos años.

4.1. Glaciar Tyndall

El mayor de los glaciares del PNTP, presenta los resultados más desalentadores, perdiendo más de 13 km² de área y casi 7 km³ de volumen en 19 años (tabla 18). Sus características físicas generan una mayor interacción del glaciar con los lagos asociados (22 m) y la “baja” altura de su línea de equilibrio, afectan directamente su velocidad de retroceso, ya que las tasas de precipitaciones de nieve cada vez son menores y su isoterma cero se produce a mayor elevación, truncando la generación de nuevas capas de nieve en todo el glaciar.

Tabla 18: Variaciones Área y Volumen desde línea de equilibrio 2017 del Glaciar Tyndall. 1998-2017

Fecha	Método aplicado	Δ Área (km ²)	Δ Volumen (km ³)
14/04/98	B3-DM	0,000	0,000
21/03/01	B3-DM	-1,702	-3,332*
31/03/02	B3-DM	-3,309	-4,688*
22/02/06	B3-DM-R(3/5)	-5,129	-5,699*
29/03/10	NDSI-R(3/5)-DM	-8,163	-6,212
19/12/13	NDSI-R(3/5)-DM	-10,891	-5,892
04/02/17	NDSI-R(3/5)-DM	-13,675	-6,805*

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018, (*) sólo variaciones frontales y laterales.

Anteriormente, la variación anual promedio del glaciar, específicamente en el periodo 1945-1986, alcanzaba unos 0,26 km²/a, determinado a través de combinaciones de imágenes satelitales de los sensores MSS y TM de Landsat (Aniya et al., 1997). Hoy en día, esta variación alcanza en promedio los 0,72 km²/a, destacando las variaciones de 1,61 km² el periodo 2001-2002 y 0,90 km²/a en el periodo 2010-2013. Estas cifras son alarmantes, debido a la gran variación en un periodo tan corto de tiempo.

A simple vista, el glaciar ha visto reducido su tamaño de forma considerable, enfocado en su cara frontal (sur) y su límite lateral derecho (noreste), tal como se puede ver en la Figura 20.



Figura 20: Antes y después Glaciar Tyndall, 1998(rojo) y 2017 (azul). Elaboración propia.

El glaciar Tyndall ha presentado retrocesos sostenidos desde el año 1998, con mayor velocidad en el periodo 2006-2017, perdiendo más de 8 km² de extensión y 1,5 km³ de volumen (Figura 21).

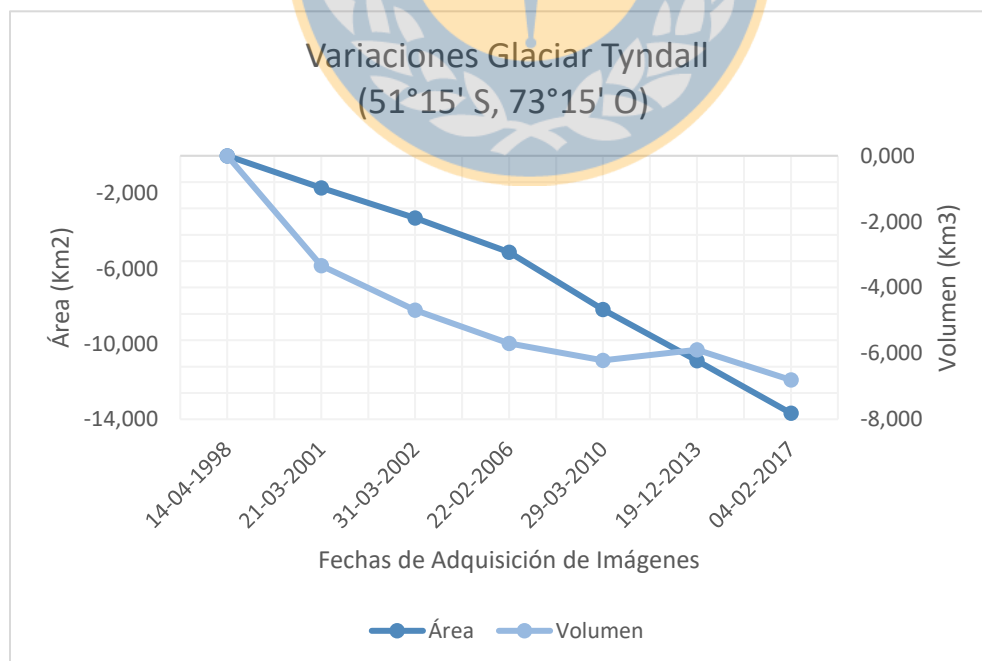


Figura 21: Variaciones Glaciar Tyndall, Elaboración propia (2018).

4.2. Glaciar Grey

El glaciar más visitado del PNTP, presenta constantes resultados a la baja, reduciendo su superficie en torno a 11 km² y su volumen en 2,6 km³ (tabla 19). Su altimetría permite mayor acumulación de nieve en meses invernales (1200 m en su línea de equilibrio) que el glaciar Tyndall, pero no es suficiente para evitar su retroceso.

Tabla 19: Variaciones Área y Volumen desde línea de equilibrio 2017 del Glaciar Grey. 1998-2017

Fecha	Método Aplicado	Δ Área (km ²)	Δ Volumen (km ³)
14/04/98	B3-DM	0,000	0,000
21/03/01	B3-DM	-3,375	-0,136*
31/03/02	B3-DM	-4,555	-1,667*
22/02/06	B3-DM-R(3/5)	-5,588	-1,486*
29/03/10	NDSI-DM-R(3/5)	-7,611	-0,387
20/02/11	NDSI-DM-R(3/5)	-7,895	-0,595*
19/12/13	NDSI-DM-R(3/5)	-9,414	-1,052
21/03/16	NDSI-DM-R(3/5)	-10,559	-2,700*
04/02/17	NDSI-DM-R(3/5)	-10,870	-2,665*

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018 (*) sólo variaciones frontales y laterales.

El glaciar Grey en el periodo 1945-1986, tenía una tasa de retroceso de 0,02 km²/a (Aniya et al., 1997). Actualmente tal variación se eleva a los 0,57 km²/a, un aumento explosivo en los últimos años, que se ha podido evidenciar con los desprendimientos ocurridos en Noviembre del 2017 (INACH, 2017).

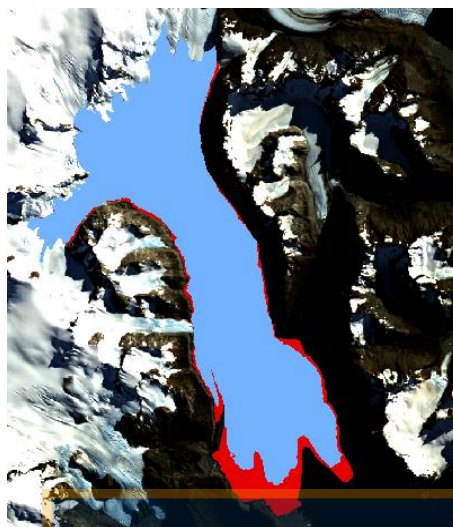


Figura 22: Antes y después Glaciar Grey, 1998(rojo) y 2017 (azul). Elaboración propia.

El glaciar Grey ha presentado grandes cambios en su extensión, principalmente en las zonas de menor altura (zona frontal), que se ven afectadas a mayores temperaturas y menor cantidad de nieve constantemente. Las variaciones de volumen son sostenidas pero menores a las del glaciar Tyndall (Figura 22).

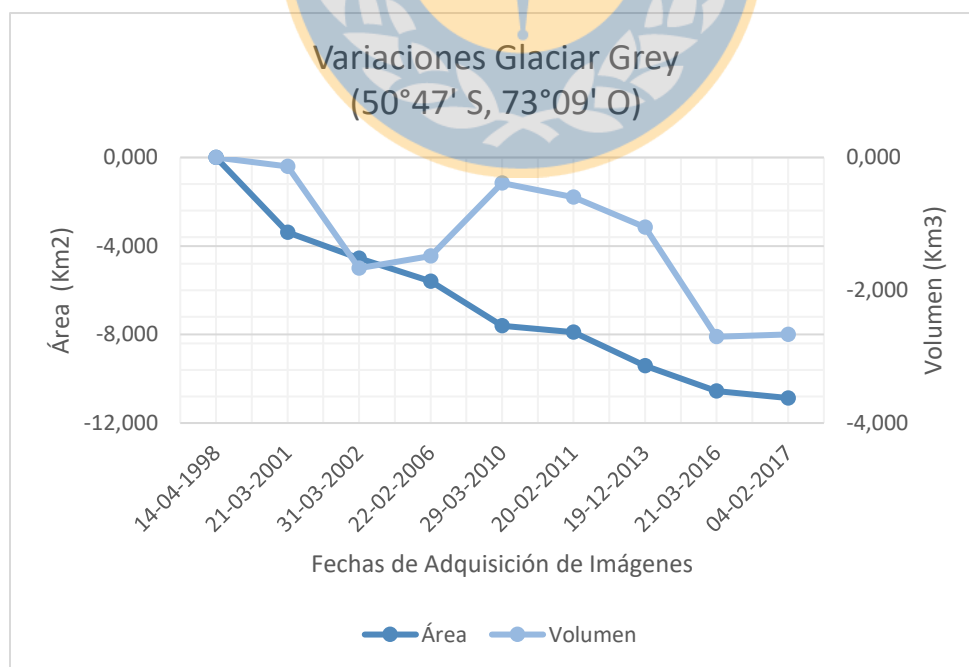


Figura 23: Variaciones Glaciar Grey, Elaboración propia (2018).

4.3. Glaciar Dickson

Este glaciar ubicado en la zona norte del PNTP, ha sufrido un gran retroceso en la época de estudio, estimada en casi 4 km² de área y 0,5 km³ de volumen. Pese a su menor tamaño y su mayor altitud en su línea de costa y de equilibrio (250 a 1450 m), este cuerpo de hielo ha tenido desprendimientos de importancia en la época de estudio.

Tabla 20: Variaciones Área y Volumen desde línea de equilibrio 2017 del Glaciar Dickson. 1998-2017

Fecha	Método Aplicado	Δ Área (Km ²)	Δ Volumen (Km ³)
14/04/98	BG-DM	0,000	0,000
21/03/01	BG-DM	-0,153	-0,014*
31/03/02	BG-DM	-2,236	-0,459*
29/03/10	NDSI-DM-R(3/5)	-2,778	-0,347
20/02/11	NDSI-DM-R(3/5)	-2,833	-0,161*
19/12/13	NDSI-DM-R(3/5)	-3,049	-0,335
21/03/16	NDSI-DM-R(3/5)	-3,610	-0,459*
04/02/17	NDSI-DM-R(3/5)	-3,939	-0,582*

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018 (*) sólo variaciones frontales y laterales.

El glaciar Dickson ha perdido en torno de 17% de su área de ablación en 19 años, viendo aumentado su retroceso promedio por año desde los 0,12 km² (Aniya et al., 1997, solo variaciones frontales), hasta los 0,21 km² actualmente. El volumen del glaciar se ha comportado de forma más variable, existiendo periodos de alza y pérdida desde 1998. Hoy en día la tasa de retroceso anual es de 0,03 km³.

Se puede ver (Figura 24), una disminución del glaciar enfocada en cara frontal (noreste), y brazo lateral inferior (sur). Estas zonas abarcan prácticamente la totalidad del área perdida en el periodo de estudio. La disminución (rojo) del glaciar, es muy acelerada incluso superior en su ritmo al glaciar Tyndall.

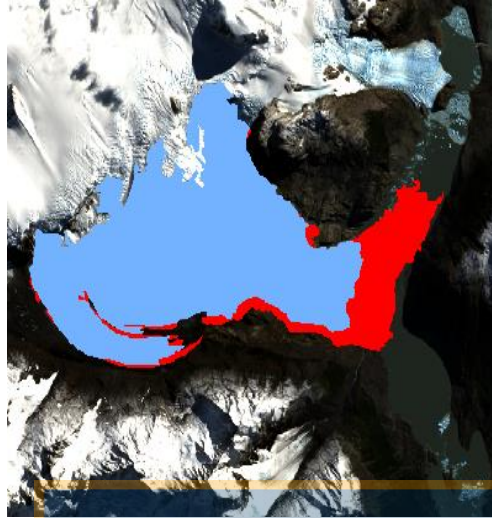


Figura 24: Antes y después Glaciar Dickson, 1998(rojo) y 2017 (azul). Elaboración propia.

El glaciar Dickson ha presentado dinámicos retrocesos, destaca entre ellos los desprendimientos ocurridos entre 2001 y 2002, generando disminuciones en el área de 2 km² y en el volumen de 0,5 km³. Estas variaciones se concentraron casi en su totalidad en la zona frontal de glaciar, las cuales siguen ritmos constantes desde 2010 en adelante.

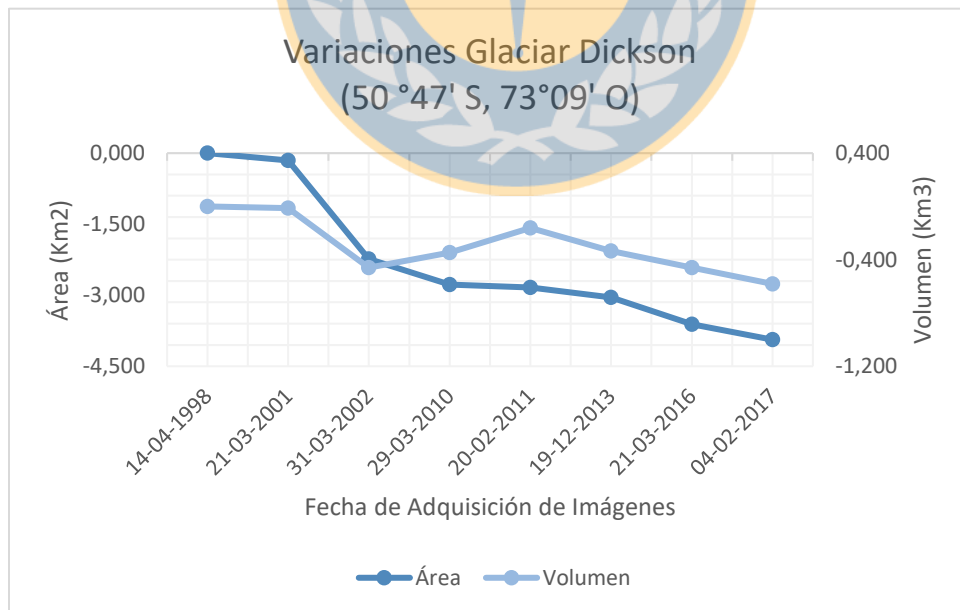


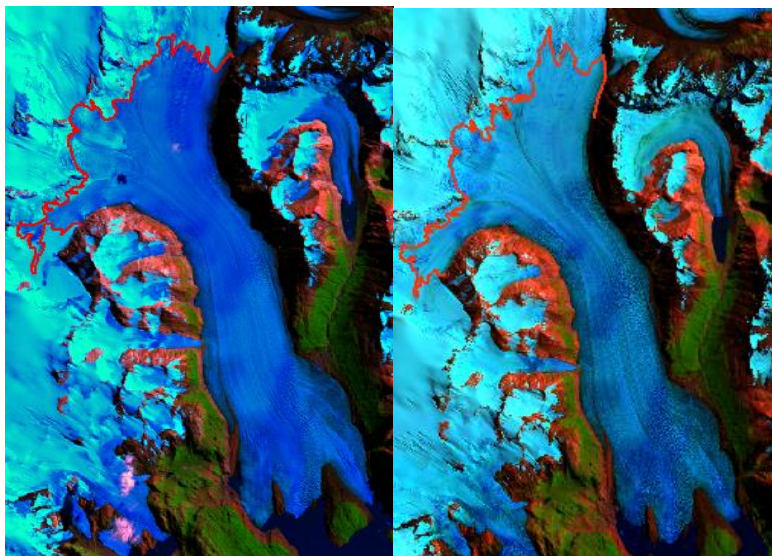
Figura 25: Variaciones Glaciar Dickson, Elaboración propia (2018).

4.4. Retroceso de las líneas de equilibrios de los glaciares

Uno de los cambios experimentados por los glaciares Grey, Tyndall y Dickson en los últimos 19 años, es el retroceso de sus líneas de equilibrio, la cual corresponde al límite entre el área de acumulación y de ablación de un glaciar. Esta línea cada vez se encuentra a mayor altura con el paso de los años, aumentando el área de ablación continuamente.

Este retroceso se explica principalmente por la tendencia a la baja de las precipitaciones de nieve en los glaciares, las cuales cada vez son a mayor altura, evitando la formación de nuevas capas nivosas sobre el hielo glaciar. Otro factor de importancia a considerar es el aumento de la temperatura en área de estudio, derritiendo las capas superficiales de nieve y exponiendo a las capas de hielo a su adelgazamiento.

En base a las imágenes satélites analizadas (véase tabla 8), se puede estimar el retroceso de las líneas de equilibrio de los glaciares, realizando combinaciones de bandas que permitan discriminar de forma clara el límite entre las áreas de acumulación y ablación (Wu, He, Guo y Chen, 2014). Espectralmente la reflectancia de ambas áreas es muy alta, pero se distinguen variaciones notables a medida que la longitud de banda aumenta, alcanzando diferencias del 40% en el infrarrojo medio (Castro, 1999) entre la nieve seca y el hielo glaciar. Debido a este comportamiento, se realizan combinaciones ocupando las bandas 752 para las imágenes adquiridas por el sensor OLI/TIR y 641 por el sensor ETM+ y TM (figura 26).



*Figura 26: Línea de Equilibrio Glaciar Grey 2011 sensor TM (Izquierda) y 2017 sensor OLI/TIR (Derecha).
Elaboración propia.*

Este procedimiento es realizado para las imágenes correspondientes a 1998, 2010 y 2017, determinando alturas medias de línea de equilibrio para cada uno de los tres glaciares bajo estudio. Cabe mencionar que estas alturas son en base a los tres modelos digitales de elevación correspondientes a cada una de las épocas de estudio, es decir, STRM para 1998, Aster DEM para 2010 y WorldDEM para 2017.

Tabla 21: Altura media (m) de línea de equilibrio 1998-2017.

Fecha	Glaciar Grey	Glaciar Tyndall	Glaciar Dickson	Misión Altimétrica
14-04-1998	1137	880	1424	SRTM
29-03-2010	1150	908	1463	ASTER GLOBAL DEM V2
04-02-2017	1178	993	1565	WorldDEM

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

Los resultados muestran un aumento en la altura media (m) de línea de equilibrio de los tres glaciares bajo estudio. La variación se encuentra en torno a los 100 m en el caso de los glaciares Tyndall y Dickson (tabla 21), en cambio el glaciar Grey presenta una variación menor, la cual alcanza los 40 m, entre 1998 y 2017.

5. Análisis de datos climáticos

Para el análisis de temperaturas y precipitación se utilizó el *MSExcel Template: “Mann-Kendall Test and Sen’s Slope Estimates for the Trend of Annual Data”*, versión 1.0 Freeware del *Finnish Meteorological Institute 2002*, que permite la detección y estimación de tendencias en series temporales. Usando esta herramienta se realizó la estimación Sen de tasa de cambio anual, de forma general y específica para cada mes y trimestre, como también se aplicó a las series temporales el test de Mann-Kendall no-paramétrico que permite estimar la presencia de tendencia y su significancia estadística. Esta validación solo se pudo realizar en la estación DGA Torres del Paine y Lago Dickson, debido a que son las únicas que superan la cantidad mínima de datos (10) para tal análisis, por esto, en las estaciones DGA Lago Grey y Glaciar Tyndall solo se realizan estimaciones de tendencias.

5.1. Análisis de Temperaturas

5.1.1. Estación Torres del Paine

La estación Torres del Paine de la DGA, es la que concentra mayor cantidad de datos, registrando mediciones de temperatura, precipitación y humedad regularmente desde 1983 hasta la fecha. Desde el sitio web de la DGA se encuentra permitida la descarga de los datos de temperatura mínima media y temperatura máxima media.

Al analizar las temperaturas mínimas medias, podemos notar una tendencia al aumento en base a los resultados de la pendiente Sen, ya que en todos los meses y periodos trimestrales se estimaron valores positivos, menos en Agosto. Con tal de estimar la significancia de los resultados de estas tendencias, se aplicó a la muestra el test de tendencia de Mann-Kendall no paramétrico, el cual entrega como resultados, que la tendencia al aumento de las temperaturas en los meses de Enero, Febrero, Marzo, Junio, Octubre y en el trimestre Diciembre-Enero es significativa al 90% y en los meses de Septiembre, Noviembre y en el trimestre Septiembre-Noviembre es significativa al 95% (tabla 22).

Tabla 22: Análisis de Series Temporales de temperatura (°C) anuales, Estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

Serie	N° Años	Temperaturas Mínimas Medias					Temperaturas Máximas Medias				
		Mann-Kendall Z	Sig. Z	Sen Pendiente °C/Año	Sen conf. 95% min	Sen conf. 95% max	Mann-Kendall Z	Sig. Z	Sen Pendiente °C/Año	Sen conf. 95% min	Sen conf. 95% max
Enero	20	1,79	+	0,069	-0,013	0,161	0,72		0,037	-0,073	0,067130
Febrero	20	1,89	+	0,092	0,000	0,186	-0,45		-0,050	-0,234	0,100
Marzo	20	1,75	+	0,110	-0,014	0,214	0,46		0,015	-0,053	0,126
Abril	20	0,06		0,003	-0,114	0,151	-0,62		-0,028	-0,093	0,040
Mayo	20	0,94		0,065	-0,091	0,225	0,68		0,031	-0,091	0,209
Junio	20	1,88	+	0,159	-0,021	0,352	2,44	*	0,200	0,052	0,351
Julio	20	1,56		0,133	-0,052	0,302	1,72	+	0,104	-0,011	0,272
Agosto	20	-0,62		-0,046	-0,177	0,074	-0,81		-0,030	-0,125	0,067
Septiembre	20	1,98	*	0,094	0,000	0,211	1,07		0,053	-0,028	0,163
Octubre	20	1,76	+	0,089	-0,010	0,235	0,33		0,011	-0,067	0,076
Noviembre	20	2,09	*	0,084	0,000	0,146	0,91		0,056	-0,062	0,129
Diciembre	20	0,52		0,045	-0,090	0,156	-0,49		-0,035	-0,158	0,119
Anual	20	2,40	*	0,063	0,023	0,137	1,46		0,029	-0,015	0,081
Mar-May	20	1,01		0,058	-0,033	0,148	0,49		0,020	-0,054	0,094
Jun-Ago	20	1,40		0,089	-0,026	0,187	2,40	*	0,102	0,019	0,215
Sep-Nov	20	2,50	*	0,085	0,020	0,162	1,46		0,031	-0,015	0,087
Dic-Ene	20	1,65	+	0,060	-0,015	0,150	-0,42		-0,024	-0,116	0,075

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

Nota: Significancia 90% (+), 95 (*) y 99 (**).

Al interpretar estos resultados podemos inferir que en la mayoría de los meses la tendencia al aumento de las temperaturas mínimas medias es significativa, lo cual se ve reflejado en la estimación de los resultados anuales existiendo una tendencia al alza de $0,06\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año en el periodo 1998-2017, con una significancia estadística que alcanza el 95%, tal como se puede apreciar en la figura 27, con un aumento constante en periodo de estudio.

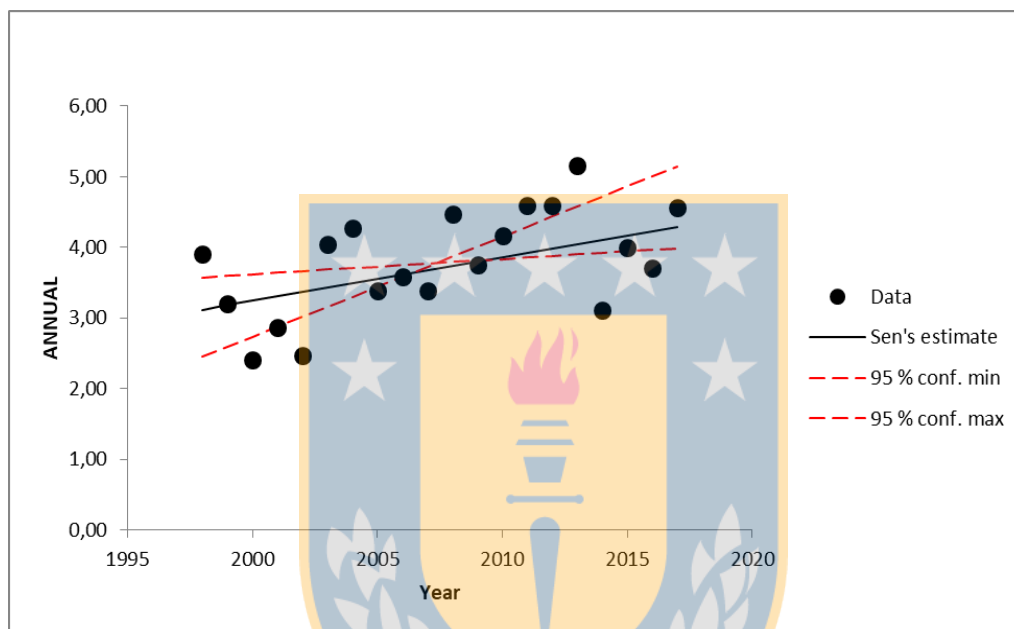


Figura 27: Variaciones anuales temperatura mínima media estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

Los resultados del trimestre Septiembre-**Noviembre**, correspondiente al periodo primaveral sorprenden, ya es el periodo que presenta el mayor aumento de temperaturas mínimas medias, existiendo una tendencia al alza de $0,085\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año en el periodo 1998-2017, con una significancia estadística que alcanza el 95%. Este periodo es altamente sensible, ya que un aumento de temperaturas acelera posiblemente el derretimiento de la nieve acumulada en el invierno, minimizando la generación de nuevas capas de hielo (Figura 28).

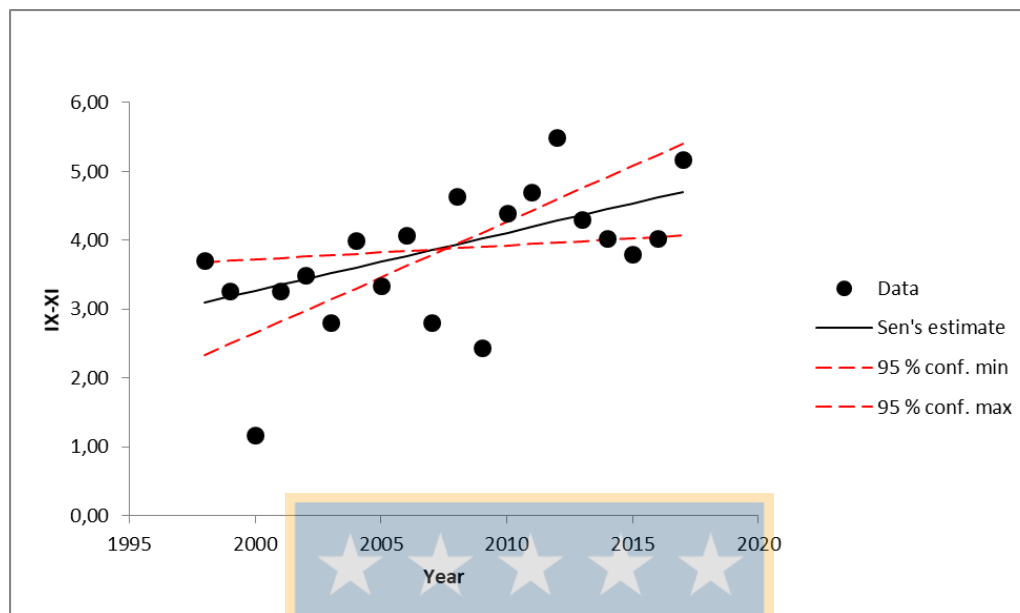


Figura 28: Variaciones anuales trimestre Septiembre-Noviembre temperatura mínima media estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

En cambio, al analizar las temperaturas máximas medias, las tendencias no son tan claras, existiendo una gran variabilidad entre cada mes. Al aplicar a la muestra el test de tendencia de Mann-Kendall, se detecta solo un periodo con una tendencia clara al aumento de temperaturas que corresponde a los meses de Junio y Julio con una significancia estadística del 95% y 90% respectivamente.

El trimestre Junio-Agosto correspondiente al invierno en el hemisferio sur, presenta una tendencia marcada al alza, alcanzando una tasa de cambio anual Sen de $0,102^{\circ} \text{C}$ con una significación estadística importante (95%). En base a los resultados de este trimestre, se puede afirmar un aumento sostenido en las temperaturas máximas medias en los meses de invierno, lo cual puede afectar de sobremanera a los glaciares del PNTP, como se puede apreciar en la Figura (Figura 29).

La tendencia anual se encuentra al alza, pero esta no es significativa, por lo tanto no se puede considerar que anualmente existe un alza sostenida en las temperaturas máximas medias, ya que el resultado se ve impulsado especialmente por el comportamiento en los meses invernales presentados anteriormente.

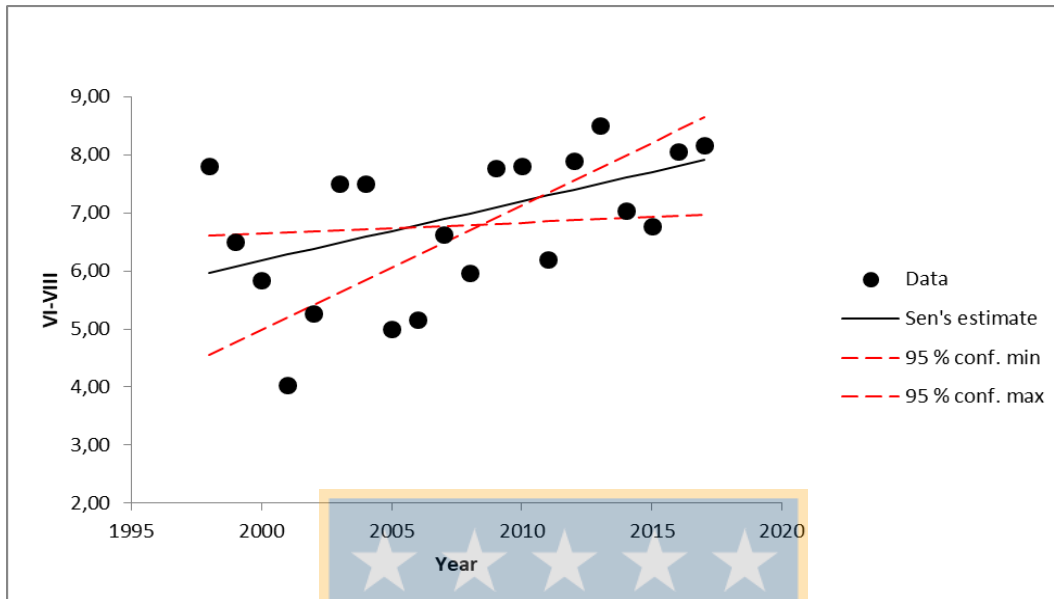


Figura 29: Variaciones anuales temperatura máxima media trimestre Junio-Agosto estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

5.1.2. Estación Glaciar Tyndall

La estación Glaciar Tyndall de la DGA, concentra mediciones de temperatura desde 2012 hasta la fecha. Desde el sitio web de la DGA se encuentra permitida la descarga de los datos de temperatura mínima media y temperatura máxima media.

Su ubicación cercana al glaciar Tyndall permite la obtención de datos más representativos de temperatura, con tal de estimar el escenario climático que se enfrenta este cuerpo de hielo, sin embargo el bajo periodo de datos climáticos continuos (2012-2017) no permite estimar la significancia de las tendencias calculadas a través de la aplicación del test de Mann-Kendall.

Los resultados muestran una tendencia al aumento de temperatura mínima media que alcanza los $0,158^{\circ}\text{C}$ por año, pero tal tendencia no es clara por la baja cantidad de datos presentes en su cálculo (6), por ende no se puede calificar como significativa (Figura 30). Destaca el mes de Enero que presenta una tendencia a la baja de $0,240^{\circ}\text{C}$ por año y los meses de Junio y Julio con una tendencia al alza de $0,4^{\circ}\text{C}$ (Tabla 23).

Tabla 23: Análisis de Series Temporales de temperatura (° C) anuales, Estación DGA Glaciar Tyndall, periodo 2012-2017.

Serie	N° Años	Temperatura Min Media		Temperatura Max Media	
		Sen °C/Año	Pendiente	Sen °C/Año	Pendiente
Enero	6	-0,240		-0,167	
Febrero	6	0,033		0,400	
Marzo	6	0,025		0,100	
Abril	6	0,200		0,300	
Mayo	6	0,250		0,350	
Junio	6	0,400		0,467	
Julio	6	0,400		0,300	
Agosto	6	-0,050		-0,200	
Septiembre	6	0,250		0,500	
Octubre	6	-0,020		0,300	
Noviembre	6	0,333		0,300	
Diciembre	6	0,100		0,175	
Anual	6	0,158		0,182	
Mar-May	6	0,260		0,311	
Jun-Ago	6	0,193		0,167	
Sep-Nov	6	0,200		0,233	
Dic-Ene	6	0,160		0,111	

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

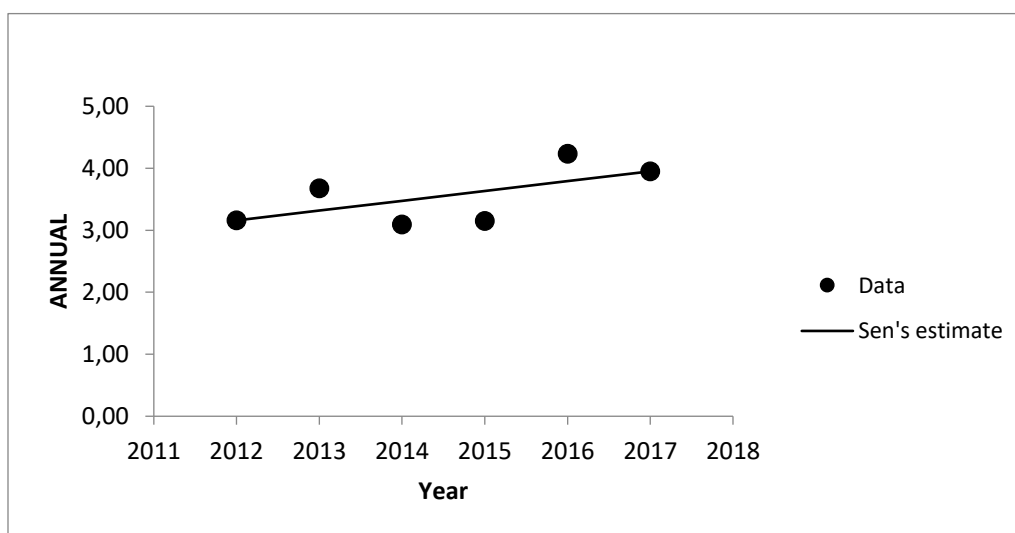


Figura 30: Variaciones anuales temperatura mínima media estación DGA Glaciar Tyndall, periodo 2012-2017.

La temperatura máxima media presenta una tasa de cambio de $0,182\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año, pero tal tendencia no es clara por la baja cantidad de datos presentes en su cálculo (6), por ende no se puede calificar como significativa (Figura 31). Destaca el mes de Agosto que presenta una tendencia a la baja de $0,200\text{ }^{\circ}\text{C}$ por año y los meses de Junio y Septiembre con una tendencia al alza de $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$.

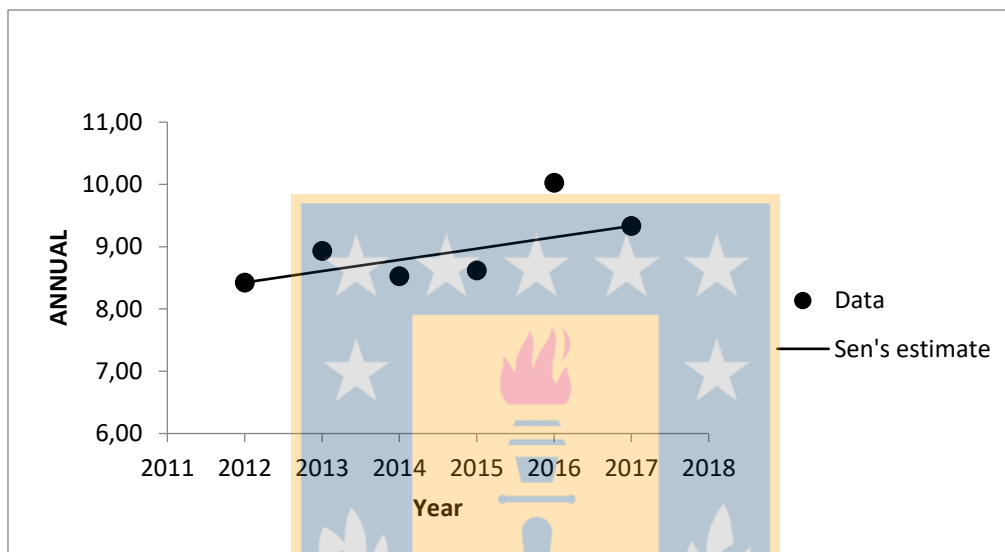


Figura 31: Variaciones anuales temperatura máxima media estación DGA Glaciar Tyndall, periodo 2012-2017.

Al comparar las tendencias de temperatura mínima y máxima media, se encuentra un comportamiento similar en las tasas de cambio anual para mes y año, destacando la tendencia a la baja en el mes de Enero y Agosto ($-0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$) y al alza en los meses Junio y Julio ($+0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$).

5.2. Análisis de Precipitaciones

5.2.1. Estación Torres del Paine

Las mediciones correspondientes a precipitaciones (mm) han sido continuas desde el año 1986, permitiendo el análisis de tales datos estimando tendencias con tasas de cambio anuales y su significancia estadística.

En el periodo de estudio 1998-2017, se puede apreciar una tendencia anual a la baja la cual no es significativa, alcanzando los $-0,368$ mm por año que corresponde a una cifra mínima, este comportamiento se debe a la gran variabilidad de precipitaciones entre los diferentes meses del año (Tabla 24). En el periodo Otoño-Invierno se aprecia un aumento sostenido en las precipitaciones, el cual no es significativo pero marca una tendencia a que cada vez es mayor la precipitación líquida en los meses invernales en el PNTP. Destaca en este periodo el aumento significativo experimentado en el mes de Junio, que proyecta una tasa de $4,52$ mm por año, con una significancia que llega al 99%. Entre los años 1998 y 2003, las precipitaciones mensuales no superaban los 45 mm, en cambio entre los años 2004 y 2017, existieron varias muestras que superaban los 110 mm, destacando el año 2015 con 164 mm (Figura 32).

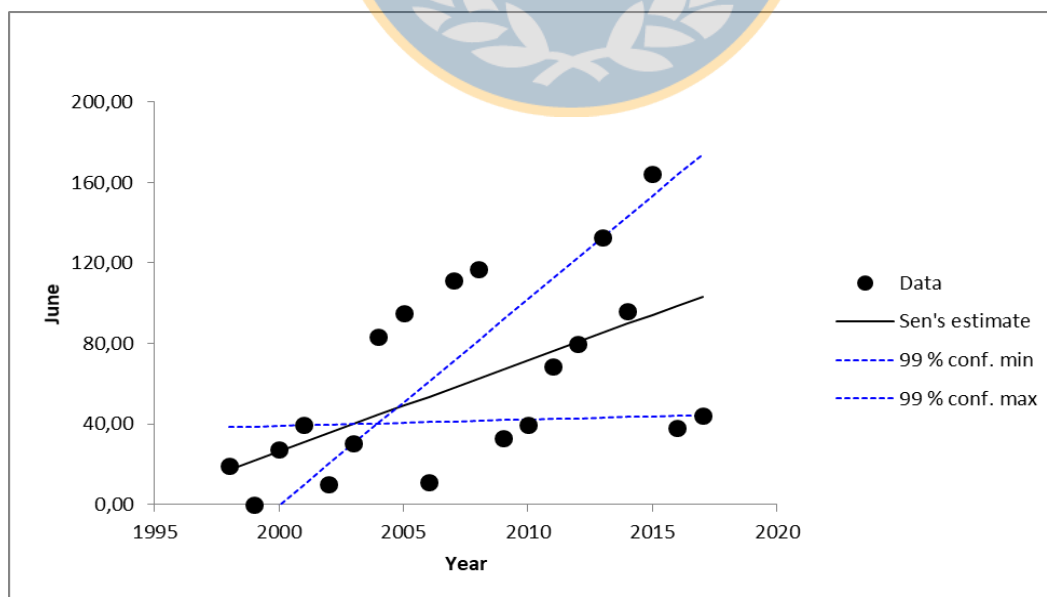


Figura 32: Variaciones anuales precipitaciones (mm) del mes de Junio, estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

Tabla 24: Análisis de Series Temporales de precipitaciones (mm) anuales, Estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

Serie	N° Años	Precipitaciones (mm)				
		Mann- Kendal I Z	Signi f. Z	Sen Pendi ente mm/A ño	Sen conf. 95% min	Sen conf. 95% max
Enero	20	-0,16		-0,219	-2,881	1,745
Febrero	20	-0,75		-1,695	-4,579	2,378
Marzo	20	-1,04		-2,014	-5,460	1,721
Abril	20	0,32		0,657	-3,815	5,480
Mayo	20	-0,03		-0,297	-4,102	4,253
Junio	20	2,76	**	4,525	1,035	8,466
Julio	20	0,13		0,250	-3,678	2,969
Agosto	20	0,00		-0,050	-1,629	1,623
Septiembre	20	-1,65	+	-1,688	-3,754	0,191
Octubre	20	-1,52		-3,391	-5,202	1,028
Noviembre	20	-0,10		-0,034	-2,501	2,079
Diciembre	20	-0,68		-0,620	-3,424	2,430
Anual	20	-0,55		-0,368	-1,368	0,864
Mar-May	20	0,36		0,492	-2,484	3,332
Jun-Ago	20	0,88		0,703	-1,055	3,454
Sep-Nov	20	-1,98	*	-1,308	-2,650	0,015
Dic-Ene	20	-0,75		-0,797	-2,781	1,053

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

Entre los periodos con tendencia a la baja en las precipitaciones, destaca el trimestre Septiembre-Noviembre, que proyecta una disminución anual en torno a los 1,31 mm, con una significancia en torno al 95% (Figura 33). Esta disminución equilibra el aumento existente en el periodo invernal, especialmente en el mes de Junio.

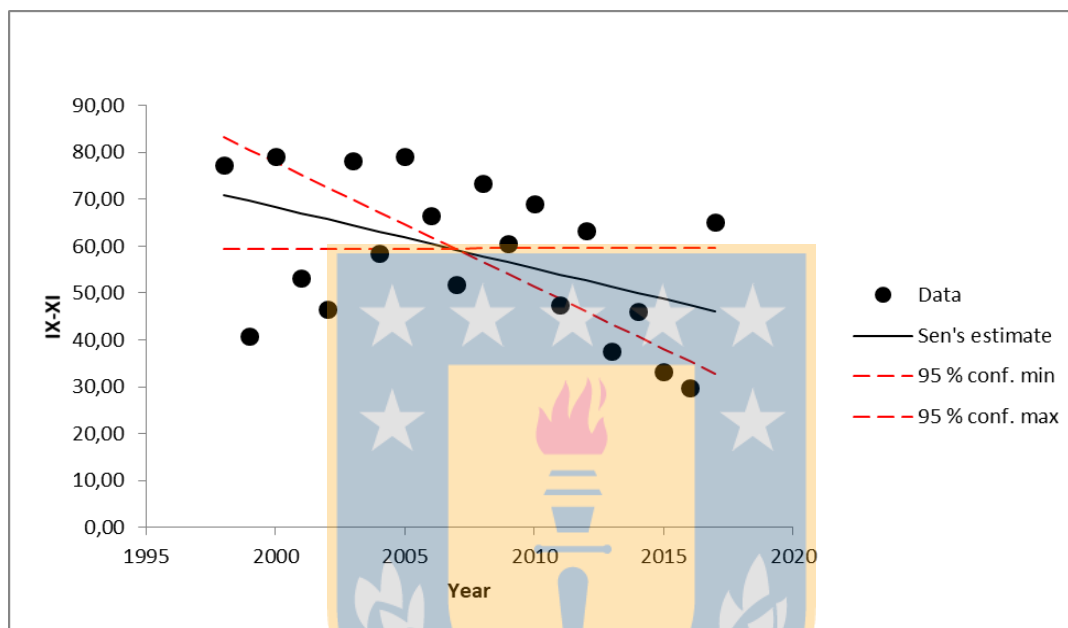


Figura 33: Variaciones anuales precipitaciones (mm) del trimestre Septiembre-Noviembre, estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

5.2.2. Estación Lago Dickson

Ubicada en las inmediaciones del Lago Dickson, es la estación más cercana al glaciar del mismo nombre. Esta estación ha realizado mediciones de precipitación desde el año 2004, lo cual permite el análisis temporal de ambas variables climáticas en gran parte del periodo de estudio.

En el periodo de estudio 2004-2017, se puede apreciar una tendencia anual al alza, la cual no es significativa, alcanzando los 1,109 mm por año, este comportamiento se debe a la gran variabilidad de precipitaciones entre los diferentes meses del año (Tabla 25). En el periodo Diciembre-Febrero se aprecia un aumento sostenido en las precipitaciones, alcanzando los 1,333 mm por año con una significancia estadística del 95%, con lo cual se puede afirmar que se prevé un aumento en las precipitaciones estivales. Destaca en este periodo el aumento

significativo experimentado en el mes de Febrero que proyecta una tasa crecimiento de 7,880 por año, alcanzando una significancia del 99% (Figura 34).

Tabla 25: Análisis de Series Temporales de precipitaciones (mm) anuales, Estación DGA Lago Dickson, periodo 2004-2017

Serie	N° Años	Precipitaciones (mm)				
		Mann-Kendall I Z	Signif. Z	Sen Pendi ente mm/A ño	Sen conf. 95% min	Sen conf. 95% max
Enero	14	-0,77		-1,600	-5,730	2,236
Febrero	14	3,07	**	7,880	4,192	13,673
Marzo	14	-0,11		-0,550	-9,198	7,732
Abril	14	-0,71		-3,413	-13,028	5,666
Mayo	14	0,00		0,320	-10,850	5,764
Junio	14	0,33		1,614	-4,436	8,981
Julio	14	2,08	*	4,714	0,465	7,482
Agosto	14	-1,20		-2,250	-6,293	2,404
Septiembre	14	-1,04		-1,875	-5,827	2,971
Octubre	14	-0,99		-4,267	-8,376	6,802
Noviembre	14	2,30	*	2,200	0,765	3,722
Diciembre	14	0,88		1,683	-2,883	6,229
Anual	14	1,53		1,109	-0,465	2,131
Mar-May	14	-0,44		-1,692	-8,781	3,211
Jun-Ago	14	0,66		1,256	-1,406	4,206
Sep-Nov	14	-0,11		-0,117	-2,418	2,519
Dic-Ene	14	1,97	*	1,333	-0,007	5,303

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

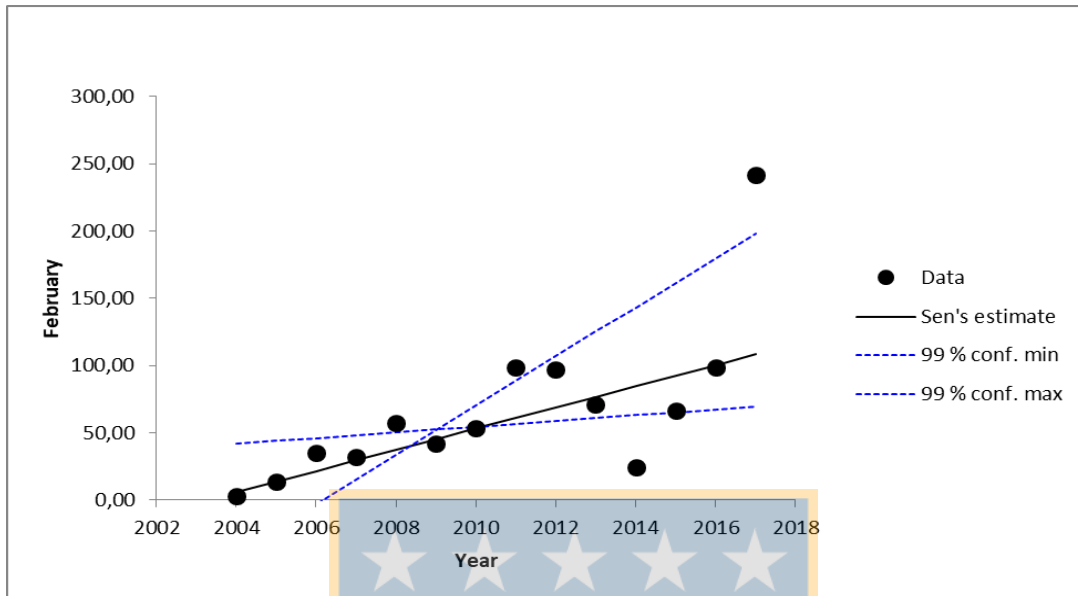


Figura 34: Variaciones anuales precipitaciones (mm) del mes de Febrero, estación DGA Lago Dickson, periodo 2004-2017

5.2.3. Estación Lago Grey

La estación lago Grey de la DGA, se encuentra operativa desde el año 2012 realizando mediciones de precipitaciones de forma regular. Estas mediciones fueron descargadas de la base de datos climáticos de la DGA solo presentaba disponible las precipitaciones medias mensual entre los años 2012-2017.

Los resultados muestran una tendencia a la baja en las precipitaciones medias mensuales que alcanza los 3,004 mm por año, pero tal tendencia no es clara por la baja cantidad de datos presentes en su cálculo (6), por ende no se puede calificar como significativa (Figura 35). Destaca el mes de Abril y Mayo que presenta una tendencia a la baja de -22,260 y -16,900 mm por año y el trimestre Marzo-Mayo con una tendencia a la baja de 19,200 mm por año (Tabla 26).

Tabla 26: Análisis de Series Temporales de precipitaciones (mm) anuales, Estación DGA Lago Grey, periodo 2012-2017

Serie	N° Años	Precipitaciones medias mensuales
		Sen
		Pendiente mm/Año
Enero	6	3,900
Febrero	6	1,320
Marzo	6	3,360
Abril	6	-22,260
Mayo	6	-16,900
Junio	6	-2,060
Julio	6	-2,700
Agosto	6	-6,400
Septiembre	6	-3,100
Octubre	6	-1,367
Noviembre	6	-6,175
Diciembre	6	-1,500
Anual	6	-3,004
Mar-May	6	-19,200
Jun-Ago	6	-2,700
Sep-Nov	6	-0,080
Dic-Ene	6	1,758

Nota: Fuente Elaboración propia, 2018.

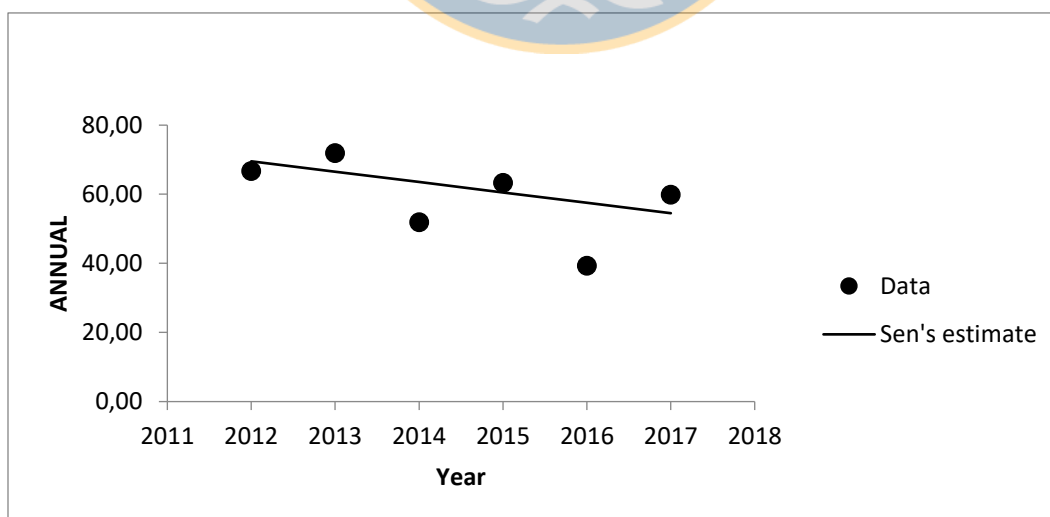


Figura 35: Variaciones anuales precipitaciones (mm), estación DGA Lago Grey, periodo 2012-2017

6. Relación entre retroceso glaciar y variables climáticas

La extensión y volumen de los glaciares Tyndall, Grey y Dickson ha disminuido considerablemente en el periodo 1998-2017, entregando como resultado pérdidas superiores a los 28 km² en la cubierta glaciar en conjunto. En torno a los cambios volumétricos, los tres glaciares bajo estudio han tenido un comportamiento a la baja, alcanzando los 10 km³ entre estos cuerpos de hielo.

La velocidad en el retroceso de estos glaciares ha aumentado en el periodo de estudio, llegando a los 0,72, 0,57 y 0,21 km², mucho mayor a lo determinado en el periodo 1945-1986, que alcanzaba los 0,26, 0,02 y 0,12 km², para los glaciares Tyndall, Grey y Dickson respectivamente. Estos números solo reafirman el comportamiento de los CHN y CHS en el periodo 1986-2011, que han perdido en torno de un 3% de su área total (tabla 27).

Tabla 27: Variaciones Campo de Hielo Norte y Sur, 1870-2011.

Campo de Hielo (Zona)	Área Glaciarizada 2011 (Km ²)	Tasa de Cambio		
		1870-1986 (% a ⁻¹)	1986-2001 (% a ⁻¹)	2001-11 (% a ⁻¹)
Norte Oeste	2952,5	-0,08	-0,12	-0,24
Norte Este	1013,5	-0,13	-0,09	-0,22
Sur Oeste	8417,4	-0,05	-0,13	-0,14
Sur Este	4801,4	-0,09	-0,09	-0,18

Nota: Recuperado de *Journal of Glaciology*, Vol. 58, 2012.

Estos cambios que han sufrido los campos de hielo, evidencian cada vez más rápido los efectos que tiene el cambio climático sobre estos frágiles ecosistemas, aumentando sus tasas de retroceso, desestabilizando las cuencas asociadas a los ríos y lagos adyacentes a los glaciares, como también reducción de las reservas más importantes de agua dulce a nivel nacional y continental.

6.1. Coeficiente de correlación de variables y significancia estadística

Para estimar la relación entre las variables climáticas (temperatura y precipitación) con el retroceso del glaciar, es de gran importancia la determinación de la correlación entre estas variables. Para esto, se calcula el coeficiente de correlación lineal (ρ) entre dos variables.

$$\rho = \frac{\sigma v_1 v_2}{\sigma v_1 \sigma v_2}$$

Donde $\sigma v_1 v_2$ corresponde a la covarianza de la variable v_1 con la variable v_2 , σv_1 la desviación estándar v_1 y σv_2 la desviación estándar de v_2 . Dependiendo el valor de este coeficiente, se estima el grado de correlación entre variables, la cual puede ser débil, fuerte directa y fuerte inversa.

Posteriormente calculado el valor del coeficiente de correlación es necesario determinar el grado de significancia que posee tal coeficiente. Para esto aplicamos el test de significancia de *Student* con $N - 2$ grados de libertad. Para esto se calcula *t de Student* del coeficiente de correlación.

$$t = \frac{\rho - 0}{\sqrt{\frac{1 - \rho^2}{N - 2}}}$$

Donde ρ corresponde al coeficiente de correlación de las variables con la variable y N corresponde a los grados de libertad de la muestra. Posteriormente se busca el valor en la tabla de valores críticos de la distribución de *t Student* para un valor de significancia y grados de libertad determinado. Si el valor calculado supera al valor crítico se puede concluir que las variables bajo estudio están relacionadas.

Para la estimación de la correlación entre las variables climáticas y las variaciones de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson se utilizarán los datos climáticos de la estación DGA Torres del Paine por su mayor cantidad de datos continuos que abarcan en su totalidad el periodo de estudio (1998-2017). Entre las variables a considerar se encuentran las precipitaciones medias anuales y las correspondientes al trimestre Septiembre-Noviembre, periodo en cual existe una baja significativa en las precipitaciones. En la temperatura se considerara la mínima y máxima media anual y las correspondientes al trimestre Diciembre-

Enero y Junio – Agosto respectivamente, periodo que tiene un alza significativa en las temperaturas mínimas y máximas medias (Tabla 28).

Tabla 28: Relaciones Glaciares y variables climáticas, estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

Fecha de Imágenes Satelitales	Glaciar ₂	Precipitación Anual (Año)	Precipitación media Trimestre Septiembre- Noviembre (Año)	Temperatura Min Media		Temperatura Max Media	
				Anual	Trimestre Diciembre- Febrero	Anual	Trimestre Junio- Agosto
14-04-1998	T-G-D	1998	1998	1998	1998	1998	1998
21-03-2001	T-G-D	2001	2001	2001	2001	2001	2001
31-03-2002	T-G-D	2002	2002	2002	2002	2002	2002
22-02-2006	T-G	2006	2006	2006	2006	2006	2006
29-03-2010	T-G-D	2010	2010	2010	2010	2010	2010
20-02-2011	G-D	2011	2011	2011	2011	2011	2011
19-12-2013	T-G-D	2013	2013	2013	2013	2013	2013
21-03-2016	G-D	2016	2016	2016	2016	2016	2016
04-02-2017	T-G-D	2017	2017	2017	2017	2017	2017

Nota₁: Elaboración propia, 2018.

Nota₂: T: Tyndall, G: Grey, D: Dickson.

6.2. Resultados y análisis de las relaciones entre variaciones temporales glaciares y variables climáticas

Al realizar el cálculo del coeficiente de correlación y posterior aplicación del test *t de Student*, se presentan los resultados para cada uno de los glaciares y variables climáticas. Que representan el grado de correlación entre las diferentes variables climáticas (precipitación y temperatura) con las variaciones temporales (área y volumen) de los glaciares Grey, Dickson y Tyndall en el periodo 1998-2017.

6.2.1. Glaciar Grey

Basado en los resultados obtenidos de los cálculos de coeficiente de correlación y aplicación del test de *t de Student* de significancia estadística, la disminución de área y volumen del glaciar Grey en el periodo 1998-2017 se encuentra directamente relacionada con la disminución de las precipitaciones medias anuales medidas por la estación DGA Torres del Paine, lo cual es afirmado con un nivel de significancia que alcanza el 95% (Tabla 29).

La relación entre las variaciones temporales del glaciar Grey y las temperaturas mínimas y máximas medias a nivel anual y trimestral (Diciembre-Febrero y Junio-Agosto respectivamente) es inversa, por lo tanto al existir un aumento de temperaturas, disminuye el área y volumen, aunque esta relación no se puede calificar como significativa.

Tabla 29: Coef. de Correlación y significancia, glaciar Grey y variables climáticas estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

Relación	Periodo	Coef. Pearson	t de Student	Significancia
Area – P (Annual)	1998-2017	0,676	2,424	95%
Area – T Min (Annual)	1998-2017	-0,537	1,686	-
Area – T Max (Annual)	1998-2017	-0,537	1,686	-
Area – P (Sep-Nov)	1998-2017	0,520	1,609	-
Area – T Min (Dic-Feb)	1998-2017	-0,521	1,614	-
Area – T Max (Jun-Ago)	1998-2017	-0,489	1,483	-
Vol– P (Annual)	1998-2017	0,720	2,745	95%
Vol – T Min (Annual)	1998-2017	-0,172	0,461	-
Vol – T Max (Annual)	1998-2017	-0,380	1,087	-
Vol – P (Sep-Nov)	1998-2017	0,340	0,956	-
Vol – T Min (Dic-Feb)	1998-2017	-0,347	0,980	-
Vol – T Max (Jun-Ago)	1998-2017	-0,425	1,243	-

Nota: Elaboración propia, 2018.

6.2.2. Glaciar Dickson

Según los resultados obtenidos de los cálculos de coeficiente de correlación y aplicación del test de *t de Student* de significancia estadística, la disminución de área y volumen del glaciar Dickson en el periodo 1998-2017 se encuentra directamente relacionada con la disminución de las precipitaciones medias anuales medidas por la estación DGA Torres del Paine, lo cual es afirmado con un nivel de significancia que alcanza el 95% (Tabla 30).

La relación entre las variaciones de extensión del glaciar Dickson y las temperaturas mínimas y máximas medias a nivel anual y trimestral (Diciembre-Febrero y Junio-Agosto respectivamente) es inversa, por lo tanto al existir un aumento de temperaturas, disminuye el área del glaciar, aunque esta relación no se puede calificar como significativa. Se debe tomar en cuenta que este análisis no considero la estación meteorológica más cercana al glaciar que corresponde a la estación DGA Lago Dickson, porque los años de medición continua (2004-2017) no abarcan el periodo de tiempo bajo estudio (1998-2017).



Tabla 30: Coef. de Correlación y significancia, glaciar Dickson y variables climáticas estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

Relación	Periodo	Coef. Pearson	t de Student	Significancia
Area – P (Annual)	1998-2017	0,730	2,615	95%
Area – T Min (Annual)	1998-2017	-0,476	1,686	-
Area – T Max (Annual)	1998-2017	-0,563	1,686	-
Area – P (Sep-Nov)	1998-2017	0,435	1,185	-
Area – T Min (Dic-Feb)	1998-2017	-0,441	1,205	-
Area – T Max (Jun-Ago)	1998-2017	-0,539	1,569	-
Vol– P (Annual)	1998-2017	0,814	3,435	95%
Vol – T Min (Annual)	1998-2017	-0,128	0,316	-
Vol – T Max (Annual)	1998-2017	-0,274	0,699	-
Vol – P (Sep-Nov)	1998-2017	0,313	0,806	-
Vol – T Min (Dic-Feb)	1998-2017	-0,190	0,475	-
Vol – T Max (Jun-Ago)	1998-2017	-0,428	1,160	-

Nota: Elaboración propia, 2018.

6.2.3. Glaciar Tyndall

En base a los resultados obtenidos de los cálculos de coeficiente de correlación y aplicación del test de *t de Student* de significancia estadística, la disminución de área del glaciar Tyndall en el periodo 1998-2017 se encuentra inversamente relacionada con el aumento de las temperaturas mínimas medias medidas por la estación DGA Torres del Paine, de forma anual y trimestral (Diciembre-Febrero), lo cual es afirmado con un nivel de significancia que alcanza el 90 y 95% respectivamente (Tabla 31)

La disminución de volumen se encuentra relacionada de forma directa con la disminución de precipitaciones medias a nivel anual con un nivel de significancia que alcanza el 90%. En cambio, se encuentra relacionada de forma inversa con el aumento de temperaturas mínimas medias en el trimestre Diciembre-Febrero con un nivel de significancia que alcanza el 90%.

Tabla 31: Coef. de Correlación y significancia, glaciar Tyndall y variables climáticas estación DGA Torres del Paine, periodo 1998-2017.

Relación	Periodo	Coef. Pearson	t de Student	Significancia
Area – P (Annual)	1998-2017	0,470	1,192	-
Area – T Min (Annual)	1998-2017	-0,732	2,400	90%
Area – T Max (Annual)	1998-2017	-0,619	1,761	-
Area – P (Sep-Nov)	1998-2017	0,330	0,782	-
Area – T Min (Dic-Feb)	1998-2017	-0,790	2,881	95%
Area – T Max (Jun-Ago)	1998-2017	-0,565	1,532	-
Vol– P (Annual)	1998-2017	0,717	2,299	90%
Vol – T Min (Annual)	1998-2017	-0,372	0,897	-
Vol – T Max (Annual)	1998-2017	-0,217	0,497	-
Vol – P (Sep-Nov)	1998-2017	0,517	1,350	-
Vol – T Min (Dic-Feb)	1998-2017	-0,724	2,344	90%
Vol – T Max (Jun-Ago)	1998-2017	-0,060	0,134	-

Nota: Elaboración propia, 2018.

Se debe tomar en cuenta que este análisis no considero la estación meteorológica más cercana al glaciar que corresponde a la estación Glaciar Tyndall, porque los años de medición continua (2012-2017) no abarcan el periodo de tiempo bajo estudio (1998-2017).

En los tres casos se puede concluir que existe una relación directa entre la disminución de volumen y precipitaciones medias anuales en el periodo 1998-2017, lo cual alcanza un nivel de significancia de 95% en los glaciares Grey y Dickson, y un 90% en el glaciar Tyndall. Además, este último es el que posee mayor relación de sus variaciones temporales (área y

volumen) con respecto a las variaciones climáticas (precipitación y temperatura), ya que estas son significativas sobre el 90%.



7. Conclusiones

Desde los primeros estudios realizados por distintos investigadores en CHS, se ha visto un incremento constante en las tasas de decrecimiento de la mayoría de los glaciares que componen este gigantesco campo de hielo. Este tipo de tasas se manifiestan a través de reducciones en la extensión de los glaciares, adelgazamiento y desprendimientos en los cuerpos de agua asociados y su reducción altimétrica debido al derretimiento de las capas superficiales de hielo.

La determinación de variaciones en la extensión y volumen de cuerpos de hielo individualizados asociados al CHS, provoca una mayor dificultad a los investigadores, debido a que estos no se encuentran totalmente delimitados, al ser parte de un campo de hielo.

Ocupando imágenes satelitales corregidas radiométricamente correspondientes a los últimos 19 años y diversas técnicas de identificación de cubierta glaciaria, tal como NDSI, combinaciones de bandas y Ratio 3/5, complementados con digitalización manual, se logró la cuantificación del área de los glaciares Grey, Tyndall y Dickson desde 1998 a 2017, la cual trae consigo bajas alarmantes en torno a los 10,87, 13,68 y 3,94 km² respectivamente. A continuación ocupando las áreas digitalizadas de cada uno de los glaciares involucrados y aplicando el uso de MDE correspondientes a las épocas de estudio, se logró estimar cambios en el volumen, los cuales alcanzaron 2,6, 6,8 y 0,6 km³ para los glaciares Grey, Tyndall y Dickson (véase pág. 51). Estas pérdidas son superiores a lo esperado, duplicando el retroceso glaciario en el periodo 1945-1986. Tal comportamiento coincide con los estudios para el CHS (véase tabla 27), que estiman que la velocidad del retroceso glaciario se duplicó entre 2000 y 2011, alcanzando el 0,18 % anual. Este retroceso es dramático para el estado de estos tres glaciares, proyectando en caso de que se mantenga la tendencia actual se mantenga, pérdidas superiores a los 48 km² y 17 km³ en conjunto desde el año 2017 a 2050, una cifra impensada para un periodo de tiempo tan corto. Esto no considera un aumento en la velocidad de retroceso glaciario, por ende si el escenario empeora tales cifras pueden ser mayores.

Estas cifras se encuentran relacionadas con las variaciones climáticas en la zona, ya que los glaciares son ecosistemas extremadamente frágiles ante las variaciones atmosféricas, siendo identificados como importantes indicadores de los efectos de actual panorama climático.

Para cuantificar este nuevo escenario climático se generaron series temporales de temperaturas y precipitación de las diferentes estaciones provistas por parte de la DGA al monitoreo del PNTP. Las estaciones fueron analizadas a través de cálculo de tendencia anual, mensual y trimestral, siendo analizadas a través de aplicación del test Mann-Kendall, presentando condiciones al alza en las temperaturas mínimas medias principalmente en los trimestres Septiembre-Noviembre y Diciembre-Febrero, con una tasa anual de 0,8 y 0,6°C, con una significancia estadística del 95%. En las precipitaciones medias anuales existe una tendencia anual a la baja, la cual no es significativa, sin embargo, destaca el trimestre Septiembre-Noviembre, con una tasa anual de 1,3 mm, con una significancia estadística del 95%.

Con el fin de entender la relación de ambas variables climáticas con los glaciares, fue necesario la estimación del coeficiente de correlación de Pearson y para la validación la aplicación del test de significancia estadística *t de Student*, determinando si las relaciones entre las variaciones temporales de los glaciares y las variables climáticas son significativas.

Los resultados confirman la tendencia de decrecimiento del glaciar Tyndall en función al aumento de las temperaturas mínimas medias registradas en la estación DGA Torres del Paine, las cuales son significativas estadísticamente (95%). Por el decrecimiento de los glaciares se encuentra directamente relacionado con la disminución de precipitaciones medias anuales registradas por la estación, siendo significativas en los glaciares Grey, Tyndall y Dickson. Ambos fenómenos se encuentran relacionados con la disminución de área y volumen en estos tres glaciares del PNTP, afectando a las cuencas aledañas y reduciendo la calidad de los mismos.

Si estas tendencias se mantienen a futuro, las consecuencias negativas que trae consigo el retroceso de estos glaciares son importantes, afectando de sobremanera la disponibilidad de estas reservas de agua, como también produciendo cambios notables en la biodiversidad presente en la zona, afectando el equilibrio de las especies que habitan estos ecosistemas como también las oportunidades económicas que presenta la zona a través del turismo, afectando notablemente la economía comunal, provincial y regional. Cabe considerar que este parque nacional concentra el mayor número de ingresos económicos de todos los parques o reservas nacionales pertenecientes al SNASPE.

8. Referencias

- AIRBUS. (2015). WorldDEM Technical Product Specification, Version 2.0.
- Castro, R. (1997). Sistema para el seguimiento y análisis de tierras mediante Teledetección, Bases Teóricas, Proyecto: GCP/RLA/126/JPN, FAO, pág. 32.
- Casassa, G., Brecher, H., Rivera, A., Aniya, M. (1997). A century-long recession record of Glaciar OHiggins, Chilean Patagonia. *Annals of Glaciology*, 24: 106-110.
- Centro de Estudios Científicos (CECS). (2009a, b, c). Estrategia Nacional de Glaciares: Fundamentos.
- Chuvieco, E. (2016). *Fundamentals of Satellite Remote Sensing*, Second Edition, 102.
- Comisión económica para América Latina y el Caribe (CEPAL). (2016). Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2016.
- Copé, R. (2014). Cálculo del retroceso glaciar en Isla Livingston y de su línea de costa para actualización de cartografía, Instituto Hidrográfico de la Marina, España.
- Cushing, M. (2008). Desarrollo de Mapas de Relieve. Hidrografía y Derivados para Sudamérica, 2.
- Davies, B.J., Glasser, N.F. (2012). Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from the Little Ice Age to 2011. *Journal of Glaciology*, Vol. 58, 212, 1072.
- Dirección Meteorológica de Chile. (2016a, b). Resumen Climático: Chile – 2016
- Dirección General de Aguas (DGA). (2009a, b). Estrategia Nacional de Glaciares. Publicación DGA, S.I.T. N° 205, diciembre. Preparado por Centro de Estudios Científicos (CECS). Santiago de Chile: DGA, Ministerio de Obras Públicas.
- Dozier, J., (1989). *Spectral signature of alpine snow cover from the Landsat Thematic Mapper*. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 28, 9-22.

Environmental Protection Agency (EPA). (2017). Climate Change Indicators: Oceans. Ocean Acidity. Recuperado de <https://www.epa.gov/climate-indicators/oceans>

García, J., Hall, B., Kaplan, M., Vega, R., Strelin, J. (2013). Glacial geomorphology of the Torres del Paine region (Southern Patagonia): Implications for glaciation, deglaciation and paleolake history. *Geomorphology*, 204 (2014), 599-616.

Instituto Antártico Chileno (INACH). (2017). Desprendimientos en el glaciar Grey. Glaciólogo Ricardo Jaña: “El hielo se ve compacto y consistente”. Recuperado de <https://www.inach.cl/inach/?p=22656>

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2013a, b, c, d, e, f, g). “Resumen para responsables de políticas. En: *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*”. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014a): *Cambio Climático 2014: Informe de síntesis. Contribución del Grupo de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*”. IPCC, Ginebra, Suiza.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014b, c, d). Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2014). Climate Change 2014 Synthesis Report Summary for Policymakers.

Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC). (2009). METI and NASA Release the ASTER Global DEM. Recuperado de [https://lpdaac.usgs.gov/about/news_archive/meti_and_nasa_release_aster_global_de](https://lpdaac.usgs.gov/about/news_archive/meti_and_nasa_release_aster_global_dem)
[m](https://lpdaac.usgs.gov/about/news_archive/meti_and_nasa_release_aster_global_dem)

- Martínez, E., Bethencourt, A. (2012). Comparación de la precisión de los modelos geopotenciales globales EGM08 y EGM96 en la zona del caribe, Congreso TOPCART 2012 – 1 Congreso Iberoamericano de Geomática y C.C. de la Tierra.
- Manzur, M. (2005). Situación de la Biodiversidad en Chile, Desafíos para la Sustentabilidad, Programa Chile Sustentable.
- Maurer, T. (2013). How to Pan-Sharpen images using the Gram-Schmidt Pan-Sharpen Method – A Recipe, ESRI.
- Mora, A. (2006). Propuesta para el Desarrollo Sustentable del Parque Nacional Torres del Paine, en la Estancia Cerro Paine. (Tesis de Pregrado, para optar el título profesional de Geógrafa). Universidad de Chile, Santiago, Chile
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2016). Plan de Acción Nacional de Cambio Climático 2017-2022.
- Ministerio de Medio Ambiente (MMA). (2016). Tercera Comunicación Nacional de Chile ante la Convención Marco de la Naciones Unidas sobre el Cambio Climático 2016
- NASA. (2017). Where are glaciers located?. Recuperado de <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
- NASA/GISS. (2018). Global Temperature, Latest Annual Average: 2017. Recuperado de <https://climate.nasa.gov/vital-signs/global-temperature/>
- Paul, F., Winsvold, S., Kääb, A., Nagler, T., Schwaizer, G. (2016). Glacier Remote Sensing Using Sentinel-2. Part II: Mapping Glacier Extents and Surface Facies, and Comparison to Landsat 8. *Remote Sensing*, 8(7), 575, doi: 10.3390.
- Pellicciotti, F., Ragetti, S., Carenzo, M., McPhee, J. (2013). Changes of glaciers in the Andes of Chile and priorities for future work. *Science of the Total Environment*, 493(2014), 1970-1210.
- Porter, C., Santana, A. (2003). Rapid 20th century retreat of Ventisquero Marinelli in the Cordillera Darwin Icefield. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 31, 17-26.

- Rabatel, A., Bermejo, A., Loarte, E., Soruco, A., Gomez, J., Leonardini, G., Vincent, C., Sicart, J. (2012). Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics?. *Journal of Glaciology*, 212, 1027-1036.
- Rioseco, R., Tesser, C. (2005). Cartografía Interactiva de los climas de Chile. Fondo de Desarrollo Docente de Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Rivera, A. (1990). Apuntes de Glaciología Teórica. Santiago de Chile: Departamento de Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile, 1990, pp. 3 y 4.
- Rivera, A., Casassa, G. (2004). Ice Elevation, Areal, and Frontal Changes of Glaciers from National Park Torres Del Paine, Southern Patagonia Icefield. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36 (4), 379-389. Chile.
- Rivera, A., Bown, F., Acuña, C., F, Ordenes. (2008). Chilean glaciers as indicators of climate change. *Terra Glacialis*, 11, 193-207.
- Rivera, A., Bown, F., Muñoz, C., Napoleoni, F., Vuille, M. (2016). Balance de masa glaciar. Ediciones CECs, Valdivia, Chile.
- Santana, A., Butorovic, N., Olave. (2009). Variación de la temperature en Punta Arenas (Chile) en los últimos 120 años. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*, 37(1), 91.
- Snow, Water, Ice and Permafrost in the Arctic (SWIPA). (2009). Climate Change and the Cryosphere.
- U.S. Global Change Research Program. (2014). Oceans Acidification Alters Marine Ecosystems. *Oceans and Marine Resources*. Recuperado de <https://nca2014.globalchange.gov/report/regions/oceans>
- USGS. (2015). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. Recuperado de <https://lta.cr.usgs.gov/SRTM1Arc>

Wilson, R., Carrión, R., Rivera, A. (2016). Detailed dynamic, geometric and supraglacial moraine data for Glaciar Pío XI, the only surge-type of the Southern Patagonia Icefield. *Annals of Glaciology*, 1-12.

Wu, Y., He, J., Guo, Z., Chen, A. (2012). Limitations in identifying the equilibrium-line altitude from the optical remote-sensing derived snowline on the Tien Shan, China. *Journal of Glaciology*, 224, 1093-1100.

