



UNIVERSIDAD DE CHILE
Facultad de Arquitectura y Urbanismo
Escuela de Pregrado
Carrera de Geografía

**SUCESIÓN PRIMARIA VEGETAL EN VALLES GLACIARES DEL PARQUE
NACIONAL HORNOPIRÉN. APROXIMACIONES DESDE LA PERCEPCIÓN
REMOTA, DATOS ATMOSFÉRICOS, E IMPLICANCIAS DEL CAMBIO
CLIMÁTICO**

Memoria para optar al título de Geógrafo

Por:

JOAQUÍN VALENZUELA JARA

Profesor guía

Pablo Sarricolea Espinoza

Profesor co-guía

Sebastián Cisternas Guzmán

SANTIAGO – CHILE (2023)

Agradecimientos

Un largo camino que comenzó por la ruta equivocada, y en el lugar equivocado, finalmente llegó a su ocaso, y son muchas las personas que se cruzaron en todo este sendero, y muchos también los momentos malos, como también los buenos.

Partiendo por agradecer de corazón a mi familia por el constante apoyo desde que partí de cero y comencé este camino en geografía, a mi hermana y hermano por sus constantes consejos y apoyo incondicional en los últimos años que no han sido para nada fácil entre nosotros. Muchas gracias a ustedes y a sus bellas familias que han formado.

Gracias mamá por enseñarme lo que es ser fuerte de corazón y de voluntad, por siempre mantenerse en pie a pesar de todas las desgracias que puedan ocurrir. Soy un hijo afortunado por todo el amor y apoyo que pude recibir de tu parte, y por la paciencia también que has tenido conmigo. También a mis pequeños sobrinos, gracias por ser una luz y alegría en el corazón. Por último, a mi gatita Lucy que siempre acompaña con su particular presencia en el hogar.

A todos mis amigos de la vida que aún siguen estando, desde el liceo, colegio, de ingeniería, gracias por siempre hacerme el aguante, los llevaré por siempre en mis pensamientos.

A mis amigos de geo con quienes siempre nos acompañamos en los trabajos, las conversaciones, los duros tiempos de la pandemia, las salidas al cerro y los carretes que se han podido dar. Gracias por las risas y los buenos momentos, nunca olviden que lo mejor está por venir.

Al Centro de Estudios Científicos por abrirme las puertas a aprender de ustedes y trabajar el tema de esta memoria, en particular a Sebastián Cisternas por su paciencia, sus enseñanzas y su optimismo para resolver los problemas de este trabajo. También agradecer por los datos a disposición de Hornopirén ya levantados en su anterior investigación. Mencionar también a Claudio Bravo y Camilo Muñoz por su constante disposición a responder mis dudas durante mi estadía en el CECs.

Al profesor Pablo Sarricolea por recibirme como memorista, y por las oportunidades de aprender nuevas cosas en paralelo a este proceso de título, y también por su gran sentido del humor.

También un agradecimiento especial a Alexis Segovia por permitirme trabajar con él en su curso de glaciares, por su ayuda y su confianza desde que trabajamos juntos, y a Carlos Guzmán por guiarme desde los inicios hasta el día de hoy, de cuando entré a esta carrera.

*Deberías disfrutar de los pequeños desvíos
Disfrútalos mucho*

Porque de ese modo encontrarás aquello que es más importante que lo que querías

Resumen

Los ecosistemas de montaña en diversas zonas y latitudes se han visto afectados primordialmente por efectos del cambio climático, donde en el caso de estudio, los cuerpos de hielo presentes en la zona se han visto seriamente reducidos dejando lugar a extensos valles propicios para el desarrollo de nuevas geoformas y también, de vida. El propósito de este trabajo es detectar el avance de la vegetación en la cota altitudinal de los valles a estudiar, donde a través de imágenes satelitales Landsat 5, 8 y 9, modelos digitales de terreno y datos atmosféricos se buscará explicar un correlato entre el cambio climático y el avance del bosque por los valles y laderas de este parque nacional. La intención es explicar y atribuir causas de este avance, en base a las características propias del área de estudio y cambios de su climatología, considerando las no menores limitantes que se derivan por la inexistencia de datos tomados en terreno.

Palabras claves: Ambientes periglaciares, sensores remotos, colonización vegetal, cambio climático, NDVI

Abstract

Mountain ecosystems in various areas and latitudes have been affected primarily by the effects of climate change, where in the case of the study, glaciers of this area have been seriously reduced leaving room for extensive valleys conducive to the development of new geoforms and also, forms of life. The purpose of this work is to detect the advance of vegetation in the altitudinal elevation of the valleys to be studied, where, through Landsat 5, 8, and 9 data, digital elevation models and atmospheric data, correlations between climate change and the advance of the forest in the valleys and slopes of this national park will be explained. The intention is to report and attribute the causes of this advance, based on the characteristics of the study area and changes in its climatology, considering the numerous limitations derived from the lack of data about this study area.

Keywords: Periglacial environments, remote sensing, plant colonization, climate change, NDVI

Índice de contenidos

Capítulo 1: Presentación	5
Introducción	5
1.2 Planteamiento del problema.....	6
1.3 Área de estudio	8
1.3.1 Caracterización glaciológica.....	10
1.3.2 Caracterización climática.....	13
1.3.3 Caracterización biofísica.....	17
1.4 Objetivos.....	24
1.4.1 Objetivo general.....	24
1.4.2 Objetivos específicos	24
Capítulo 2: Estado del arte	24
2.1 Criósfera y cambio climático	24
2.1.1 Contracción de glaciares de Andes Chilenos	24
2.1.2 Contracción de glaciares en Patagonia.....	25
2.2 Efectos del cambio climático sobre la cobertura vegetal	25
2.3 Oscilaciones atmosféricas	26
2.3.1 El niño/Oscilación del sur (ENSO).....	26
2.3.2 Oscilación antártica (AAO)	27
2.4 Monitoreo de vegetación en ambientes fríos	27
2.4.1 Casos de estudio europeos/norteamericanos	27
2.4.2 Casos estudiados en la Cordillera de Los Andes/Patagonia.....	28
Capítulo 3: Planteamiento metodológico.....	28
3.1 Descarga y procesamiento de imágenes.....	28
3.1.1 Delimitación de frentes glaciares	28
3.1.2 Cálculo de índices y gradientes de vegetación.....	30
3.2 Procesamiento de datos climáticos	33
3.2.1 Selección de datos para meses E-F-M	33
3.3 Otros aspectos del terreno	33
3.3.1 Modelo de pendientes	33
3.3.2 Altitud	33
3.3.3 Radiación solar de áreas.....	33
3.3.4 Índice topográfico de humedad.....	34
3.3.5 Flow accumulation.....	34
Capítulo 4: Resultados	36
Capítulo 5: Discusión y conclusiones	47

Bibliografía	51
Anexos	55

Índice de figuras

Figura 1: Ubicación área de estudio.....	9
Figura 2: Variaciones de superficie glaciar en zonas de interés	11
Figura 3: Retroceso acumulado en metros [m] de glaciares en referencia.....	12
Figura 4: Variaciones de altitud de frentes glaciares producto del retroceso de los cuerpos de hielo. .	13
Figura 5: Ubicación de cuenca Río Puelo antes Junta con Manso.....	14
Figura 6: Comportamiento climático de la zona según datos en Río Puelo antes Junta con Manso	15
Figura 7: Comportamiento de isotermas a partir de radiosonda Puerto Montt	16
Figura 8: Hectáreas por piso de vegetación en el Parque Nacional Hornopirén.....	19
Figura 9: Tipos forestales en zonas de interés y áreas colindantes.	21
Figura 10: Pisos vegetacionales de Luebert y Pliscoff (2017) en área de estudio	22
Figura 11: Vista hacia laderas norte del valle del Glaciar “El Navegante”	23
Figura 12: Vista del área de estudio hacia el sureste.	23
Figura 13: Mapa de correlación estacional entre el Índice Multivariante ENSO (MEI, Wolter and Timlin, 1998) y precipitaciones (fila superior) y temperatura del aire en superficie (fila inferior). Producto grillado de la Universidad de Delaware (1950-1999). Solo se muestran correlaciones superiores a $\pm 0,2$	26
Figura 14: DEM y frentes glaciares (2011) y puntos filtrados de Mann Kendall mayores a 0.9.....	29
Figura 15: Tabla de datos de imágenes Landsat utilizadas.	31
Figura 16: Algoritmo gráfico de acumulación de flujo.....	34
Figura 17: Ráster resultante de test Mann Kendall en R.....	36
Figura 18: Ubicación de puntos con valores τB superiores a 0.9.	37
Figura 19: Tabla de atributos de nube de puntos con valores τB mayores a 0.9 (grid_code).....	38
Figura 20: Gráficas de comportamiento de NDVI respecto a aspectos de terreno (valores τB mayores a 0.9).	39
Figura 21: Gráficas de comportamiento de NDVI respecto a aspectos de terreno (valores τB mayores a 0).	40
Figura 22: Gráficas de comportamiento de NDVI respecto a aspectos de terreno (en orden, tramos de valores τB descritos en el párrafo anterior).	41
Figura 23: Tabla de datos para cruce de comportamiento de NDVI y climatología de la zona.....	42
Figura 24: Comportamiento temporal, a nivel individual, de variables expuestas en figura 22.	43
Figura 25: Correlaciones entre NDVI y climatología del área de estudio. Datos utilizados en figura 22.	45
Figura 26: Fases positivas y negativas de ENSO y SAM en meses de E-F-M (promedios).....	46

Figura 27: Comportamiento general de SAM (1955-2018).....	46
Figura 28: Comportamiento general de SOI-ENSO (1985-2022).	47
Figura 29: Vistas a distintas resoluciones de puntos filtrados de test Mann Kendall sobre zonas vegetadas (mapa base de ArcGis como imagen de referencia).....	49
Figura 30: Fotografía de zona frontal del glaciar “El Navegante” (sin fecha).....	50

Índice de anexos

Anexo 1: Diagrama de flujo de trabajo para elaboración de productos finales	55
Anexo 2: Repositorio de códigos usados para descarga y procesamiento de imágenes Landsat utilizadas para el trabajo.	56

Capítulo 1: Presentación

Introducción

Las tendencias de pérdida de masa glaciaria producto del cambio climático, se han manifestado de manera sostenida y constante durante las últimas décadas, donde en específico en la sección septentrional de la Patagonia Chilena, los glaciares de la zona han perdido cerca de un 25% de su masa desde 1985 hasta la actualidad (Paul & Mölg, 2014). Estos precedentes generan importantes modificaciones en el paisaje que consideran los nombrados retrocesos de las lenguas glaciares, nacimientos de nuevos lagos, y extensos valles que antes estaban cubiertos por los hielos. Dichos cambios que han sido provocados por efectos del cambio climático tales como alteraciones en precipitaciones, temperaturas, variaciones de isoterma, entre otras; también son precursores de alteraciones ambientales a escala local, donde en ocasiones la flora presente en ambientes de montaña, o cercanas zonas frontales de glaciares, expanden su cobertura hacia nuevas superficies producto de los nombrados efectos.

Por otra parte, respecto a las conductas de la vegetación en zonas montañosas, es necesario mencionar que el área de estudio comprende pisos vegetacionales asociados a bosques templados lluviosos del sur de Chile, además de poblaciones del género *Nothofagaceae*, tales como Lengua (*Nothofagus pumilio*) y Ñirre (*Nothofagus nitida*), según la base de datos provistas por Luebert y Pliscoff (2017). Además, dentro del parque se encuentran antiguos bosques de Alerce (*Fitzroya cupressoides*) los cuales marcan la transición altitudinal entre los bosques templados y otras especies arbóreas propias de zonas más montañosas, como los recientemente nombrados bosques templados y de *Nothofagus*.

A raíz de esto, es necesario mencionar que la variable altitudinal es determinante en este estudio, debido a la exposición a congelamiento y fuertes vientos que pueden sufrir las especies en determinadas cotas. A raíz de esto, y tomando en cuenta la temperatura, es necesario considerar que no se ha establecido un valor en particular que nos especifique el límite de temperatura que puede soportar una determinada especie de planta. Estos límites de temperatura dependen de la edad, la época del año, la etapa de desarrollo, la historia climática, y el tipo de tejido del individuo/especie (Larcher 1985^{a-c}, 2003; Sakai and Larcher 1987; en Körner, 2012).

Para el caso de estudio, el uso de sensores remotos es la herramienta principal debido a la ausencia de estaciones de monitoreo y la difícil accesibilidad de la zona. Estudios han demostrado que las masas de hielo de esta zona han sufrido pérdidas cercanas a un 47% de su área de acumulación producto de los nombrados retrocesos, entre 1973 y 2019 (Cisternas & Paredes, 2020). Por otra parte, en investigaciones se ha hecho uso de índices espectrales como NDVI (Normalized Differenced Vegetation Index), el cual ha servido para detectar avances o proliferaciones de vegetación en ambientes periglaciares, mayoritariamente en los Alpes como en el caso del glaciar Jamtalferner donde se encontraron plantas vasculares colonizando el valle

(Fischer et al. 2019); y que además en conjunto con trabajos de campo, el uso de sensores remotos pudo rectificar la presencia de vegetación en zonas donde antes ocupaba el glaciar.

Es por esto que, en base a lo expuesto anteriormente, en el presente trabajo se realizarán análisis sobre los cambios vegetacionales en los valles de los glaciares “El Navegante”, “Río Blanca”, y “Confluencia” como zonas de interés para detectar cambios de superficie, específicamente de la cubierta vegetal en aquellas zonas. Se usarán imágenes satelitales de la misión Landsat, en conjunto con modelos digitales de elevación y datos climáticos grillados para generar los resultados esperados en la investigación.

La escala temporal del estudio comprende entre los años 1973 a 2022, donde se obtuvieron 15 imágenes satelitales seleccionadas para procesar (1973 considerado solo para los frentes glaciares). Se hará una comparación entre los píxeles de cada año para calcular tendencias del índice NDVI con el fin de detectar zonas de crecimiento o decrecimiento de la vegetación, donde luego se van a seleccionar las zonas donde hubo mayor alza en este índice generando una nube de puntos que muestre lugares donde la nombrada tendencia sea más significativa. Se debe considerar que la escala temporal para los cambios de cubierta vegetal será desde 1985 a 2022, por la disponibilidad de imágenes Landsat 5, 7, 8 y 9. Las imágenes obtenidas tienen fecha de captura entre enero y marzo por el porcentaje de nubosidad (menor o igual a 20%) y por la ausencia de nieve sobre el terreno. Sumado a esto, aspectos del terreno como altitud, radiación solar de áreas, pendientes, etc, serán usados para ser correlacionadas (en conjunto con las variables climáticas) con el avance de la vegetación. Este análisis estadístico permitirá describir que variables tienen mayor incidencia en este fenómeno y que limitantes son las que mayormente se presentan para este tipo de estudios. También se buscarán correlaciones con el comportamiento climático a modo de generar una aproximación y una explicación de que factores son los más incidentes en este fenómeno.

1.2 Planteamiento del problema

Es de suma importancia tomar en cuenta los impactos del cambio climático sobre la criósfera tanto a nivel mundial como a nivel país, donde Chile en particular ha sufrido considerables retrocesos de sus glaciares a distintas tasas a lo largo de su territorio (Barcaza et al. 2017) y que principalmente se han debido al alza de las temperaturas en el extremo sur de Sudamérica, siendo el alza de las líneas de nieve (Rosenblüth et al. 1997; Carrasco et al. 2005 en Barcaza et al. 2017) como una de sus consecuencias. Estas nombradas pérdidas expuestas durante los últimos años, ha puesto en riesgo la seguridad hídrica del país, siendo la reducción de estos glaciares y del volumen de agua “almacenada” en los campos de nieve uno de los primeros impactos del cambio climático en lo que respecta a recursos hídricos (Sanoff & Muller, 2010). En la zona sur y austral de Chile, se han registrado zonas con altas tasas de pérdida, la cual ha sido visible dentro de un conjunto de modificaciones del paisaje y los ecosistemas en las zonas nombradas.

Respecto al área de estudio, la provincia de Palena ha manifestado grandes cambios en sus ambientes glaciares y periglaciares, donde a pesar de que las masas de hielo han presentado grandes retrocesos, por lo general la atención de los estudios se centra en los cambios que sufren los glaciares desde sus causas a sus consecuencias. Si bien el paisaje predominante por el hielo se está perdiendo con el paso del tiempo, al mismo tiempo aparece uno nuevo para reemplazar lo que se ha perdido durante aquellos años (Paul & Molg, 2014). Estos cambios de paisaje dejan al descubierto nuevas laderas, cuyos procesos geomorfológicos propios de zonas montañosas genera condiciones propicias para la ocurrencia de flujos detríticos producto de GLOF (*Glacial Lake Outburst Flood*), alzas de isoterma, etc; y que, a su vez, las formas de vida presentes en estas zonas se ven expuestas también ante estos potenciales cambios y modificaciones del paisaje. Por otra parte, los efectos del cambio climático son potenciales agentes de alteraciones en los bosques de la Patagonia, considerando los constantes cambios que esta región ha sufrido producto de este fenómeno. En general, estos nuevos paisajes generados por el retroceso de los glaciares generan zonas propicias para el desarrollo de flora, principalmente de plantas vasculares, vegetación xerófila, y arbustos de baja altitud variando según las condiciones climáticas que influyan en la formación de suelos.

Bajo esta misma línea, es de vital importancia tener conocimiento sobre los cambios y dinámicas que ocurren aguas arriba en los valles del Parque Nacional Hornopirén, tanto por una correcta gestión de esta área protegida, como también por la incidencia que puede tener sobre el poblado de Hornopirén que se encuentra a pocos metros de la desembocadura del Río Blanco, donde las nombradas crecidas de este río por flujos de detritos o eventos de GLOF, pueden causar impactos directos en un poblado que en particular durante los veranos posee una alta población flotante al estar emplazada en medio de la carretera austral. Al mismo tiempo, el tránsito entre poblados de la comuna de Hualaihué y Chaitén, se vería parcialmente interrumpido en caso de que el puente que cruza el nombrado Río Blanco colapsara por una eventual crecida, lo que dificultará la circulación tanto de personas como también de productos y bienes esenciales entre estas zonas y el resto del país, además de la circulación de vehículos de emergencia en el caso que proceda.

La importancia del avance de la vegetación en estos valles radica no solo en comprender otro efecto del cambio climático en la zona, sino que también nuevos supuestos en base a cómo se comportará este ecosistema en particular con los respectivos cambios nombrados, ya que con el paso de los años esta sucesión primaria dará lugar a nuevos bosques que podrían ser capaces de contener eventos de aluviones en el futuro, lo cual este estudio abre a otras oportunidades de seguir investigando más a fondo en la zona durante el tiempo para comprender su comportamiento y sus nuevas dinámicas respecto al cambio climático, como agente mitigador o catalizador. Por otra parte, los cambios y expansiones que pueda tener este bosque a lo largo de los años se pueden traducir en alteraciones del ciclo hidrológico de la zona producto de los cambios en la evapotranspiración superficial. Dichos cambios pueden tener ocurrencia en el resto de la provincia de Palena, puesto que esta extensión de territorio presenta las mismas formaciones vegetales y comportamiento climático que el Parque Nacional Hornopirén. Bajo estos antecedentes, la puerta de entrada a la Patagonia por su sector más septentrional es un excelente laboratorio natural para el estudio de los bosques, los glaciares, y sus montañas,

considerando además los pocos trabajos existentes sobre la zona y la baja presencia de estaciones meteorológicas.

En particular para este trabajo, el uso de herramientas de percepción remota y de sistemas de información geográfica son de gran utilidad para generar una contextualización previa sobre lo que ocurre con este fenómeno, permitiendo generar un análisis multitemporal que muestra un escenario previo y un correlato histórico entre los cambios del paisaje y las variables climáticas como lo son precipitaciones y temperaturas.

1.3 Área de estudio

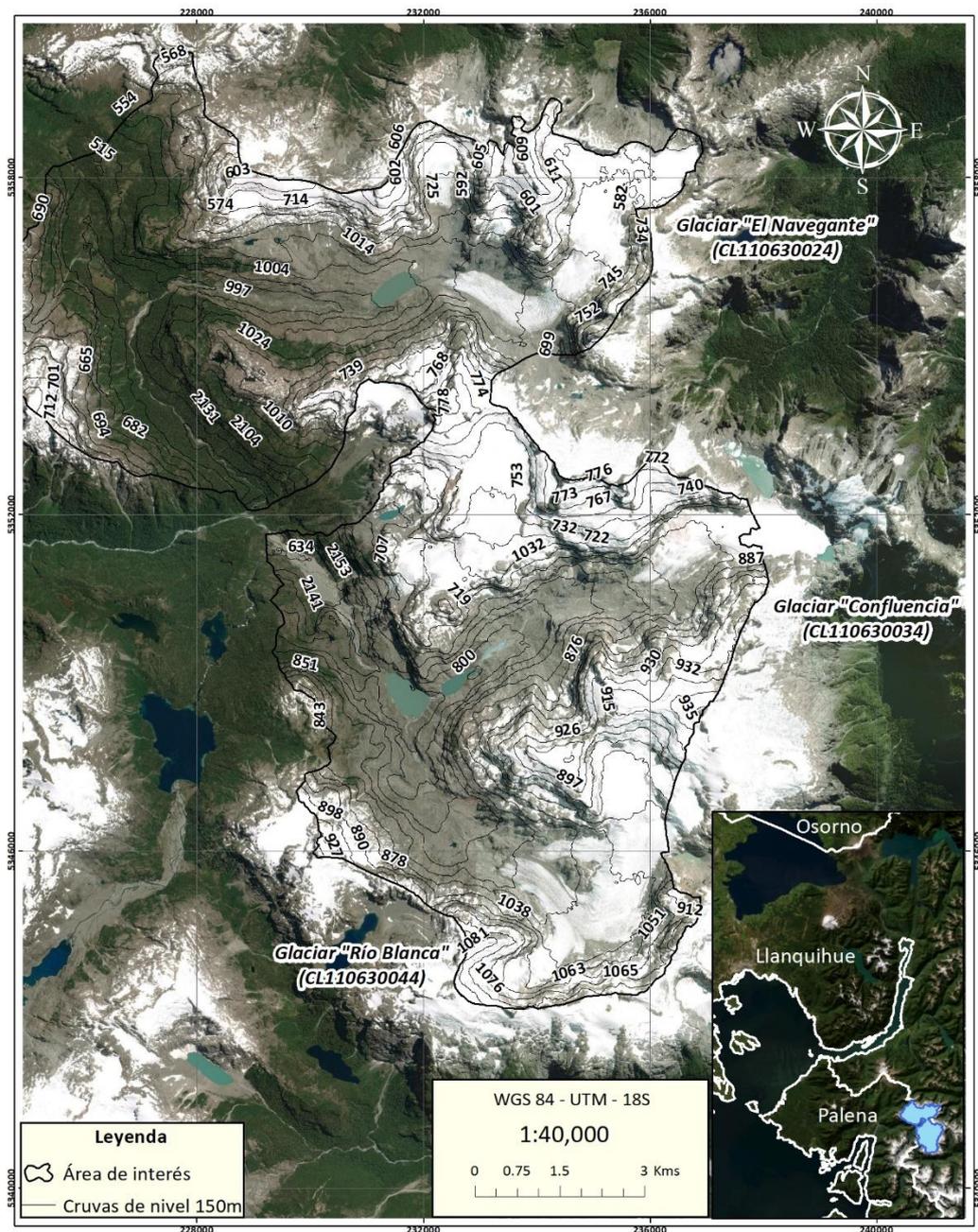
El Parque Nacional Hornopirén se encuentra ubicado en la décima región de Los Lagos, en las provincias de Llanquihue y Palena (producto que su jurisdicción comparte ambas unidades administrativas). Sus coordenadas geográficas son las siguientes:

Latitud Sur: 41°44' – 42°02'

Latitud Oeste: 72°09' – 72°29'

La zona habitada más cercana es la localidad de Hornopirén, la cual pertenece a la comuna de Hualaihué.

Figura 1: Ubicación área de estudio



Fuente: Elaboración propia (2022).

Forma parte de la llamada “Ruta de Los Parques de la Patagonia”, siendo un punto estratégico para el turismo en la región al ubicarse en el inicio de la carretera austral. Es parte de la Reserva Mundial de la Biósfera de los Bosques Templados Lluviosos de los Andes Australes y resguarda casi 9 mil hectáreas de Alerces (Ruta de los parques, 2018).

Cabe señalar que su plan de manejo data del año 1999, pero que, a pesar de no tener actualizaciones recientes, la información levantada sobre bosques, geología/geomorfología y

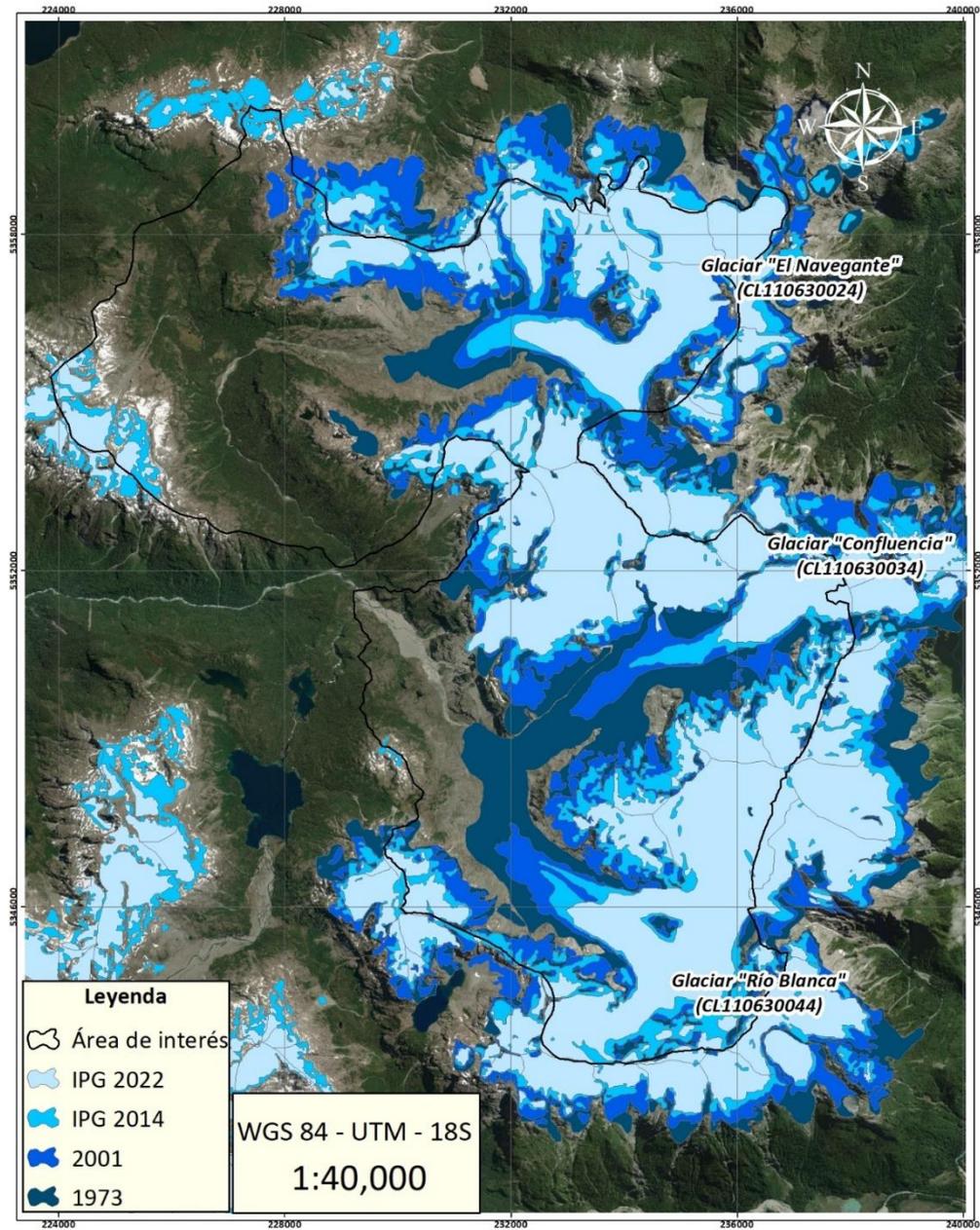
climatología, puede servir como una referencia a las condiciones biofísicas que caracterizan al área de estudio. Sumado a esto, tampoco se encuentran documentos oficiales como Planes de desarrollo Comunal (PLADECO), estudios de impacto ambiental, o investigaciones científicas que permitan dar una mayor descripción del área de estudio.

Para efectos prácticos, es necesario señalar que las áreas de interés de la presente investigación presentan climas de tipo montaña (G) y de hielo por efecto de la altura (EFH), según la clasificación de Köppen. También se debe señalar que este cordón montañoso (con cumbres de hasta ~2.200 m.s.n.m.) es parte de una gran barrera orográfica ubicada en esta parte de la Patagonia, generando un efecto de sombra de lluvias que se expresan en los grandes montos de precipitaciones anuales de la zona (Luebert & Plischoff, 2004).

1.3.1 Caracterización glaciológica.

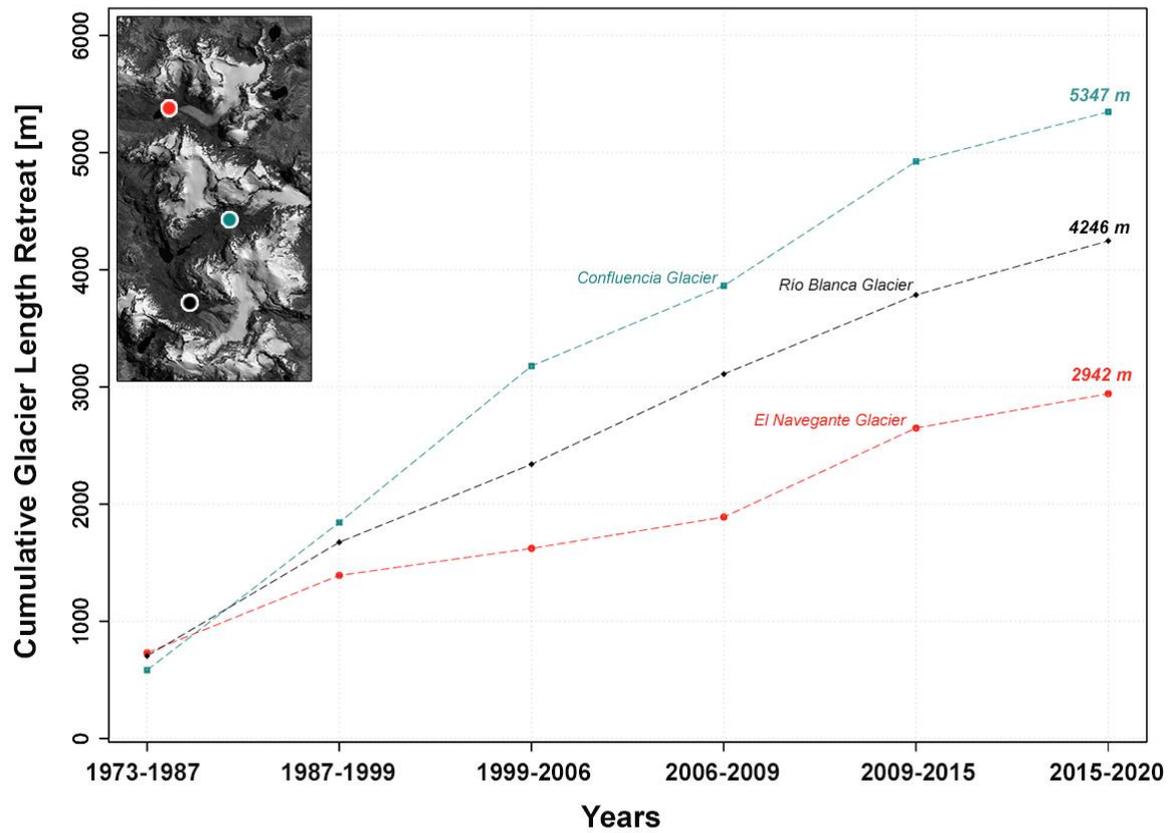
Estos cuerpos de hielo han sido incluidos en estudios previos como los realizados por Rivera y colaboradores (2011) analizando variaciones de glaciares ligados a actividad volcánica, así como también por efectos del cambio climático (Rivera et al., 2008). Bajo esta misma línea, Cisternas y Paredes (2020) realizaron un estudio más actualizado sobre el estado actual de estos glaciares arrojando constante retroceso con pérdidas de un 47% de su superficie glaciar desde 1973 a 2019 visibles en las figuras 2 y 3. Los 3 glaciares señalados son catalogados por el Inventario Público de Glaciares como Glaciares de montaña.

Figura 2: Variaciones de superficie glaciar en zonas de interés



Fuente: Elaboración propia basado en Cisternas & Paredes (2020).

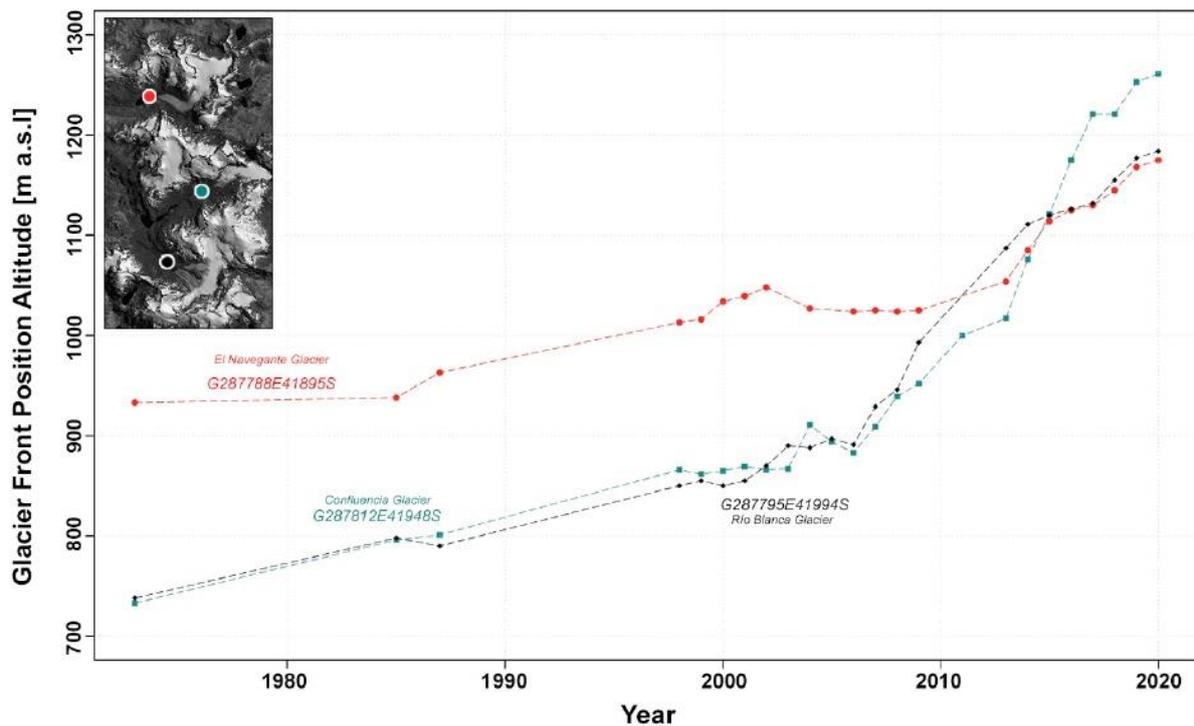
Figura 3: Retroceso acumulado en metros [m] de glaciares en referencia



Fuente: Cisternas & Paredes (2020)

Al mismo tiempo, la posición altitudinal de las zonas frontales de estos 3 glaciares sufrieron variaciones considerables, en particular Glaciar Confluencia donde su frente glaciar ascendió cerca de 600 metros durante los años analizados en este estudio.

Figura 4: Variaciones de altitud de frentes glaciares producto del retroceso de los cuerpos de hielo.



Fuente: Cisternas & Paredes (2020)

1.3.2 Caracterización climática

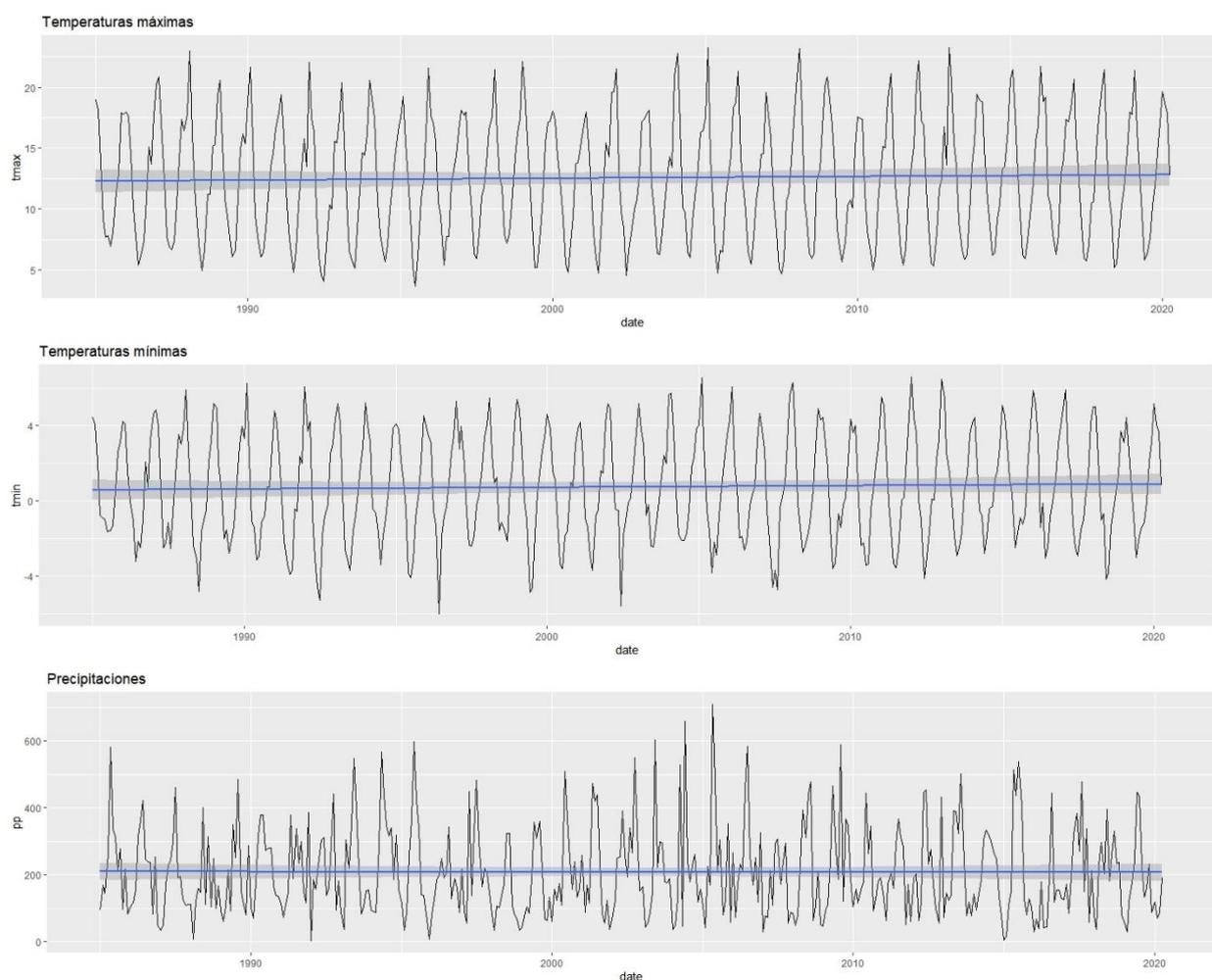
Según la web de Ruta de Los Parques de Patagonia (2018) en conjunto con la información provista desde la Corporación Nacional Forestal (CONAF), el clima de este parque se caracteriza por ser de tipo “templado lluvioso”, con montos de precipitaciones cercanos a los 2.250 milímetros por año, recibiendo en gran parte de su superficie precipitación nival durante los meses de invierno.

Por otra parte, y según Subiare & Rojas (1994) citado en CONAF (1999), el clima de este parque se caracteriza por presentar sus siguientes categorías según la clasificación climática de Köppen:

- Templado lluvioso con influencia mediterránea (Cfsb2), con distribución uniforme de precipitaciones.
- Clima de montaña (G).
- Clima de hielo por efecto de la altura (EFH).

Sus registros de temperaturas medias anuales poseen una variación de 10°C en zonas costeras, y 9°C en ambientes de montaña, siendo su media en el mes de enero de 14°C – 15°C, y en julio de 6°C – 7°C.

Figura 6: Comportamiento climático de la zona según datos en Río Puelo antes Junta con Manso

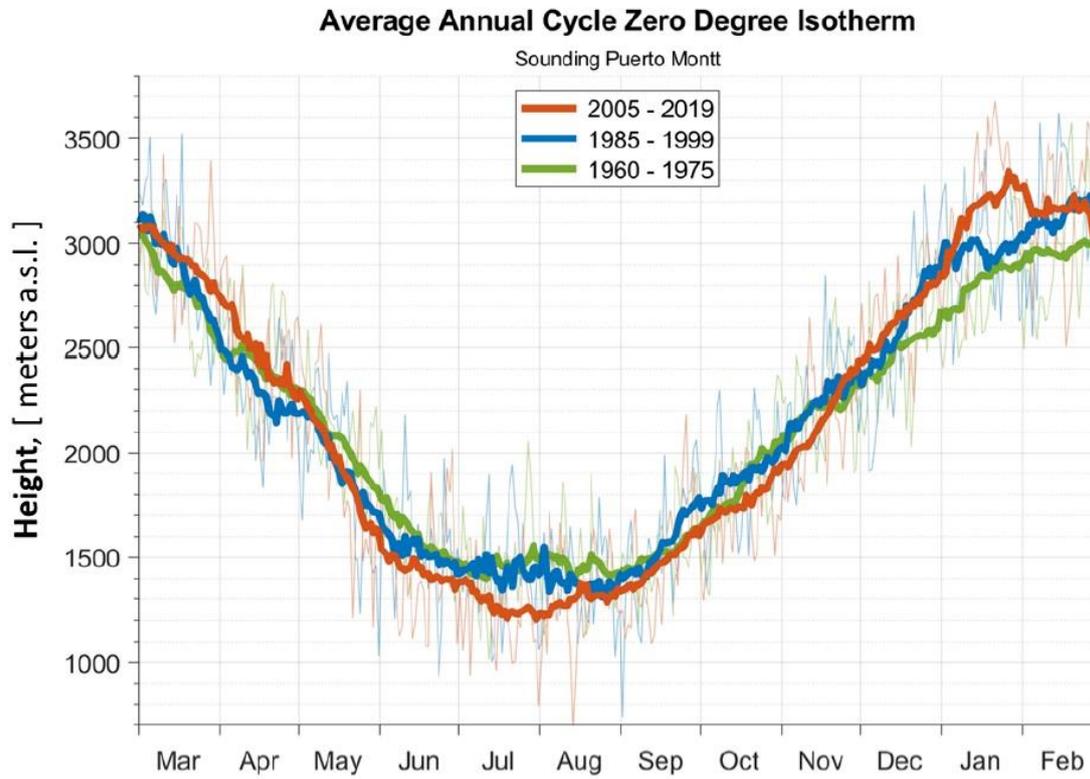


Fuente: Elaboración propia (2022). Datos obtenidos desde explorador de cuencas Camels-CI.

Donde las temperaturas mínimas y máximas señalan una sostenida pero leve alza con el pasar de los años comprendidos para este estudio, mientras que en precipitaciones no presenta una tendencia al ascenso o descenso, aunque su comportamiento es más inestable lo que señala que esta variable es propensa a eventos anómalos y/o extremos.

Para complementar, también se incluyeron las variaciones de isoterma obtenidas por radiosonda desde “El Tepual”, con gráficas elaboradas del trabajo de Cisternas & Paredes (2020), donde en épocas estivales en el tramo de 2015-2019 muestra alzas de isoterma respecto a los niveles históricos (1960-1975), contrario a los inviernos donde la isoterma se presenta en altitudes más bajas, generando una mayor amplitud en esta variable.

Figura 7: Comportamiento de isotermas a partir de radiosonda Puerto Montt



Fuente: Cisternas & Paredes (2020)

1.3.3 Caracterización biofísica

Producto de la naturaleza de este trabajo, este subapartado se focalizará netamente en la flora presente en el parque nacional y por, sobre todo, en el área de interés.

Según la información provista por CONAF, y del plan de manejo del parque nacional, elaborado desde la misma institución (1999), y complementada con el catastro de pisos vegetacionales de Luebert & Pliscoff (2017); el Parque Nacional Hornopirén cuenta con diversas tipologías forestales, siendo la principal el tipo forestal asociado a los bosques de Alerces (*Fitzroya cupressoides*) (específicamente nombrado como **bosque resinoso templado andino de *Fitzroya cupressoides***), el cual cubre cerca de 9000 hectáreas de superficie dentro del parque.

Dentro de las otras tipologías forestales presentes en el área de estudio, es posible nombrar las siguientes formaciones de bosques:

Región de bosques Laurifolios

Formación de Bosque Laurifolio de Chiloé: Asociación de *Nothofagus nitida* – *Podocarpus nubigena*; asociación de *Eucryphia cordifolia* – *Weinmannia trichosperma*.

Región de los bosques Andino – Patagónicos

Subregión de las Cordilleras Patagónicas: Formación de bosque caducifolio alto – andino húmedo. Asociación de *Nothofagus betuloides* – *Nothofagus pumilio*.

Región de los Bosques Siempreverdes y Turberas

Subregión de los bosques siempreverdes con coníferas. Formación de bosque siempre verde de la Cordillera de los Andes. Asociación de *Fitzroya cupressoides* – *Nothofagus betuloides*. Asociación de *Nothofagus nitida* – *Podocarpus nubigena*.

Es necesario señalar que se considera como “tipo forestal” a una superficie relativamente extensa de bosques caracterizados por estar constituidos por una o mas especies forestales y que pueden o no estar situados en condiciones iguales de sitio (Donoso, 1993)

Partiendo desde el tipo forestal Alerce, esta es una especie endémica de Chile y Argentina, donde en nuestro país crece desde la provincia de Valdivia (39°50’S), hasta la provincia de Palena (43°30’S). En el sector más septentrional de su distribución, este tipo forestal se encuentra en las zonas de la Cordillera de la Costa. En la región de Los Lagos tiende a distribuirse en las zonas de la Cordillera de Los Andes, teniendo como cota máxima de altitud de su hábitat los 1.500 m.s.n.m.

En los sectores de la Cordillera de los Andes (como en el caso de estudio), se desarrolla generalmente sobre suelos derivados de material parental volcánico, arenas, limos y gravas piroclásticas, en los que frecuentemente ocurren procesos pedogenéticos que disminuyen la infiltración de agua en profundidad, favoreciendo la acumulación y/o el escurrimiento lateral superficial, generado por las fuertes pendientes en períodos de alta pluviosidad. Es necesario mencionar también ante eventos anómalos de precipitaciones generados por el cambio climático, los bosques de Alerce se comportan como una especie más tolerante a eventos de sequía (Donoso et al., 2004).

Por otra parte, el tipo forestal lenga se distribuye desde el complejo volcánico Nevados de Chillán como límite norte (36° 50 'S) (Schlatter, 1994) y desde el paralelo 365' 56', hasta los 56° latitud sur y hasta los 45°S. Tiende a presentarse en la Cordillera de Los Andes sobre los 1.000 m.s.n.m. como consecuencia de que este tipo forestal está adaptado a bajas temperaturas y precipitaciones medias (Pooley, 1993). En particular, dentro del parque se distribuye en los sectores cercanos a altas cumbres, teniendo como característica principal recibir precipitaciones en forma de nieve durante gran parte del año. Durante los otoños se distingue por el color rojizo de sus hojas que permite ver el límite de vegetación en las laderas, debido al cambio de color de sus hojas. Esta especie suele asociarse con Ñirre (*Nothofagus antarctica*) y Coihue de magallanes (*Nothofagus betuloides*), formando los subtipos Ñirre y Lenga Coihue de magallanes, respectivamente (CONAF, 1999).

El tipo forestal Coihue de Magallanes (*Nothofagus betuloides*), corresponde a una gran parte de los bosques del parque, formando la transición entre el tipo forestal Siempreverde – Lenga, o Siempreverde – Alerce. Se ubica en una altitud media de 500 m.s.n.m. Se distribuye desde la provincia de Valdivia (40°31 'S), hasta el archipiélago de Cabo de Hornos (55°31' S) (Rodríguez & Quezada en Promis et al. 2003). Dentro del parque, habita por las laderas occidentales de los cerros de forma discontinua.

Pasando al tipo forestal Siempreverde, y según Donoso en Muñoz y colaboradores (2018), es un bosque que se extiende desde los 40°30 'S hasta los 47°S, y por debajo de los 1000 m.s.n.m. en la Cordillera de los Andes; y desde los 38°30 'S hasta los 47°S en la cordillera de la Costa, donde suele concentrarse en laderas occidentales y planicies de mal drenaje. Según el catastro de recursos vegetacionales nativos de Chile elaborado por CONAF (2020), la Región de Los Lagos alberga un 34,43% de este tipo forestal en su jurisdicción, respecto al total del país.

Dentro del parque, este tipo de bosque comprende diversas asociaciones arbóreas por la cantidad de especies que alberga esta tipología, de hoja perenne y rica composición florística. Se concentra en las zonas de menor altitud del parque con especies como el Coihue de Chiloé (*Nothofagus nitida*), Ulmo (*Eucryphia cordifolia*), y Tepa (*Laurelia philippiana*); acompañado su estrato inferior por Mañío macho (*Podocarpus nubigena*), Canelo (*Drimys winteri*), y Tiaca (*Caldcluvia paniculata*).

En áreas de mayor elevación, por sobre los 400 m.s.n.m., el Ulmo tiende a desaparecer, dejando como especie dominante al Coihue de Chiloé, Tapa, y en algunos sectores el Mañío macho. Posteriormente, entre los 750 y 800 m.s.n.m., se observa una zona de transición al tipo forestal Alerce, donde se encuentran los primeros ejemplares de la especie.

Por último, y según la base de datos disponible en IDE Chile (sitio web) generado por Luebert & Pliscoff (2017), se tiene la siguiente clasificación y superficie de los pisos vegetacionales en el parque nacional:

Figura 8: Hectáreas por piso de vegetación en el Parque Nacional Hornopirén.

Piso de vegetación	Formación boscosa	Superficie [Ha]
Bosque caducifolio templado andino de <i>Nothofagus pumilio</i> y <i>Drimys andina</i>	Bosque caducifolio	89017.45
Bosque caducifolio templado andino de <i>Nothofagus pumilio</i> y <i>Ribes cucullatum</i>	Bosque caducifolio	7940.86
Bosque resinoso templado andino de <i>Fitzroya cupressoides</i>	Bosque resinoso	71680.93
Bosque siempreverde templado interior de <i>Nothofagus nitida</i> y <i>Podocarpus nubigena</i>	Bosque siempreverde	562232

Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2019).

Es necesario mencionar y destacar que los autores de esta base de datos se refieren a piso vegetacional como un “espacio caracterizado por un conjunto de comunidades vegetales zonales con estructura y fisionomía uniformes, situadas bajo condiciones mesoclimáticamente homogéneas, que ocupan una posición determinada a lo largo de un gradiente de elevación, a una escala espacio-temporal específica” (Luebert & Pliscoff, 2019). Dentro de esta misma base de datos, se refieren al piso vegetacional de *Nothofagus pumilio* y *Drimys andina* como un bosque caducifolio achaparrado denso de hasta 4 metros de altura, con un estrato herbáceo pobre y que, en situaciones, *Nothofagus pumilio* tiende a asociarse con *Nothofagus antarctica*. Su regeneración está asociada a fenómenos naturales de pequeña y gran escala, los cuales van desde caídas de árboles hasta avalanchas. Las pequeñas alteraciones generan claros que favorecen la regeneración de *Nothofagus pumilio* pero que mayormente favorecen más a *Nothofagus betuloides*, generando diversidad de zonas regeneradas con estas 2 especies bajo una mezcla de ambos tipos de eventos (como se cita en Luebert & Pliscoff, 2019).

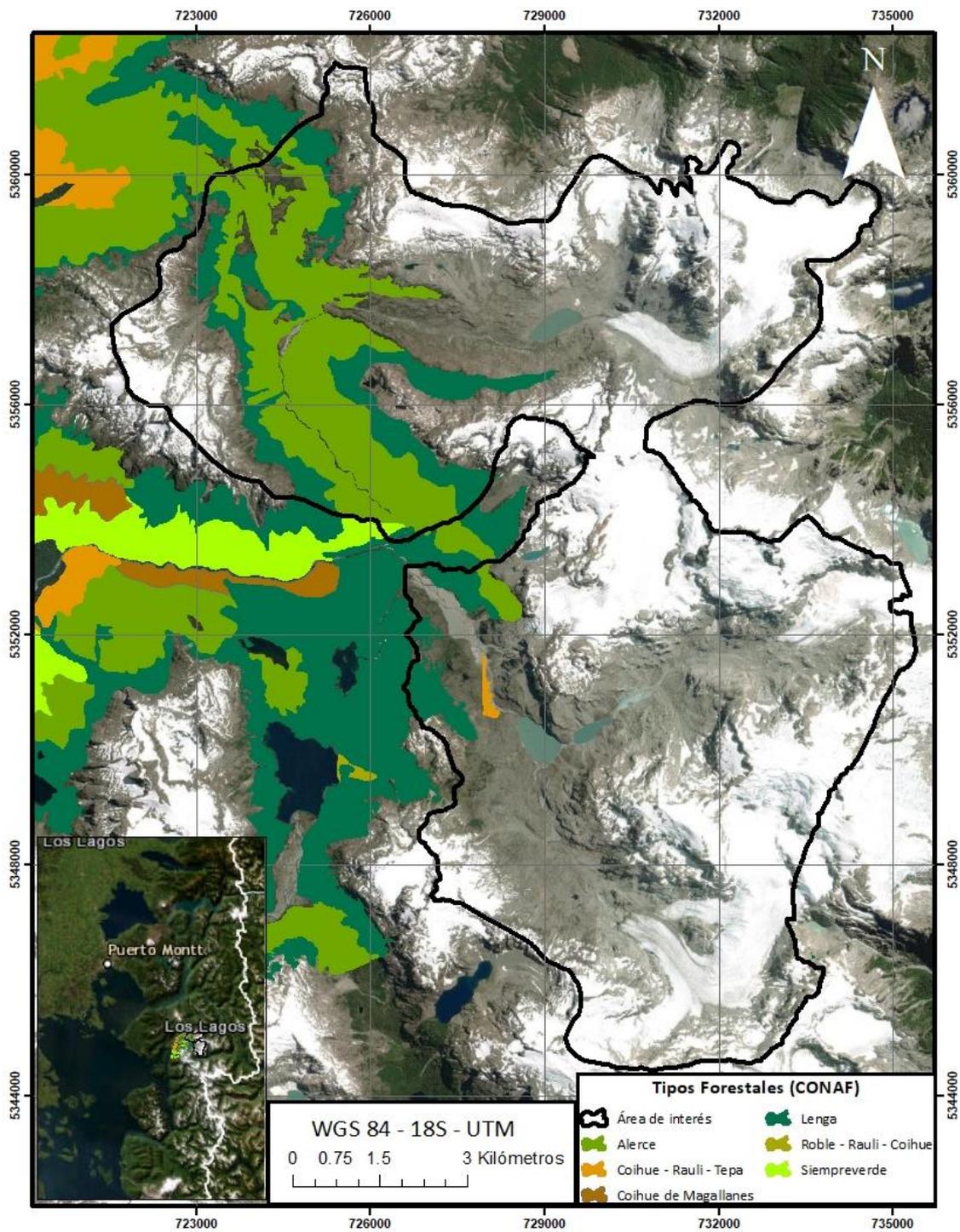
Por otra parte, el piso vegetacional *Nothofagus pumilio* y *Ribes cucullatum* se destaca por asociarse en partes bajas de sus vertientes occidentales con *Nothofagus betuloides* y un denso sotobosque de *Chusquea montana*. Este piso vegetacional sufre una disminución en la abundancia de *Nothofagus pumilio* comparado a *Nothofagus antarctica* en zonas que presencian perturbaciones a gran escala tales como volcanismo o avalanchas) donde las perturbaciones de gran escala propias de los límites de vegetación (volcanismo, avalanchas), y que favorecen su ascenso altitudinal de las formaciones achaparradas producto de las condiciones generadas hacia abajo en la pendiente. Esta forma achaparrada de ejemplares de Lengua y Ñirre se generan en parte por el peso de la nieve y la acción de vientos sobre los árboles expuestos a las mencionadas condiciones (Donoso C. (1998); Veblen et al., (1977) en Luebert & Plissock, 2019).

Por último, el piso vegetacional asociado al Bosque resinoso templado andino de *Fitzroya cupressoides* comprende un dominio de la nombrada especie que puede estar acompañado de *Podocarpus nubigenus* y *Nothofagus nitida* o *Nothofagus betuloides*. Su estrata herbácea es pobre y se compone principalmente de helechos y algunas Ciperáceas, mientras que plantas epífitas son muy frecuentes. Finalmente, *Fitzroya cupressoides* se comporta como un colonizador de áreas perturbadas por explotación o por deslizamientos (Donoso et al., (1993) en Luebert & Plissock, 2019).

Se resaltaron estos pisos vegetacionales producto de su ubicación en la figura 10 (mayormente ubicados en las áreas de interés).

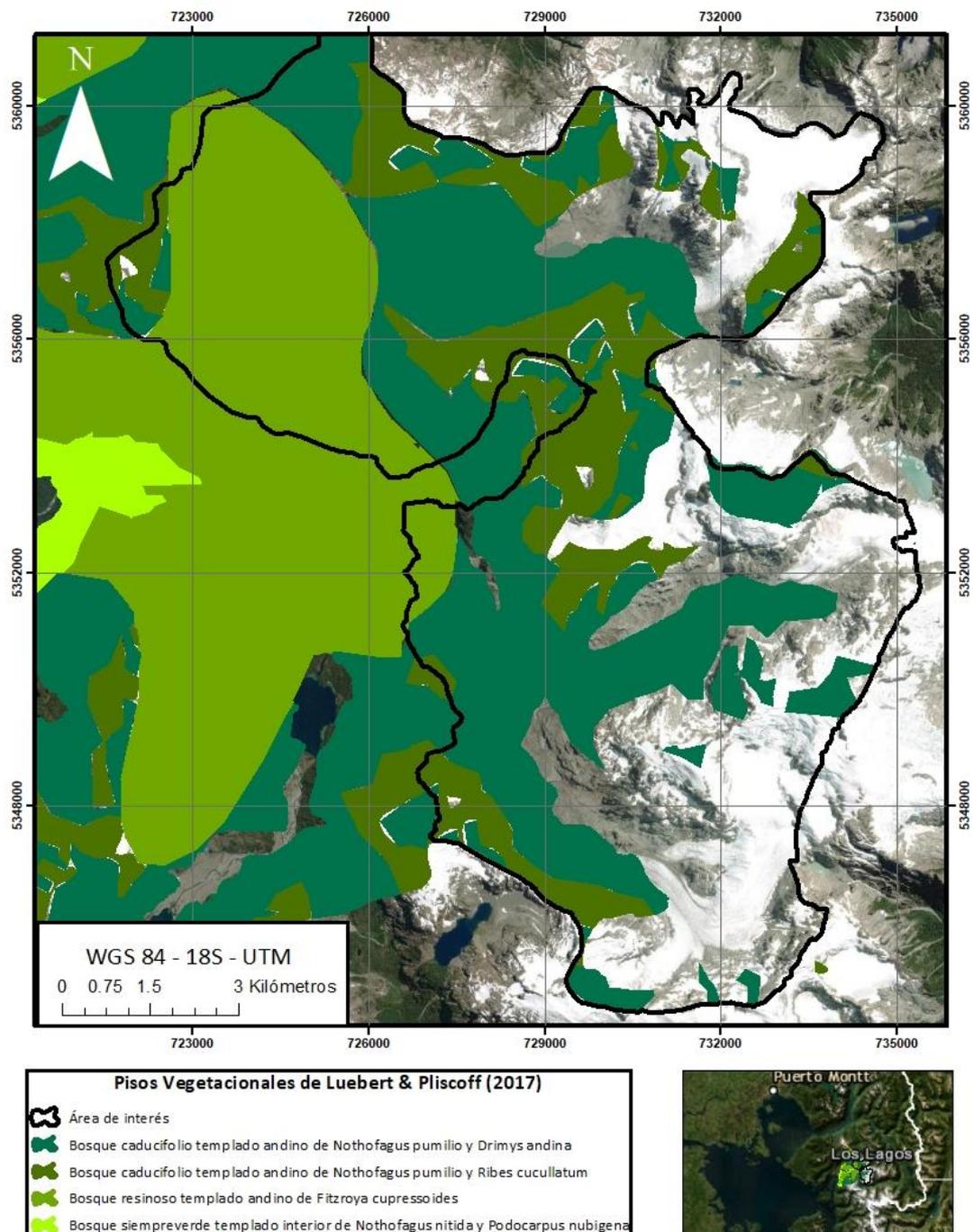
Donde en particular, se especifica su presencia en las áreas de interés en las siguientes figuras, sumando también la base de datos de tipos forestales de CONAF

Figura 9: Tipos forestales en zonas de interés y áreas colindantes.



Fuente: Elaboración propia en base a CONAF (2019).

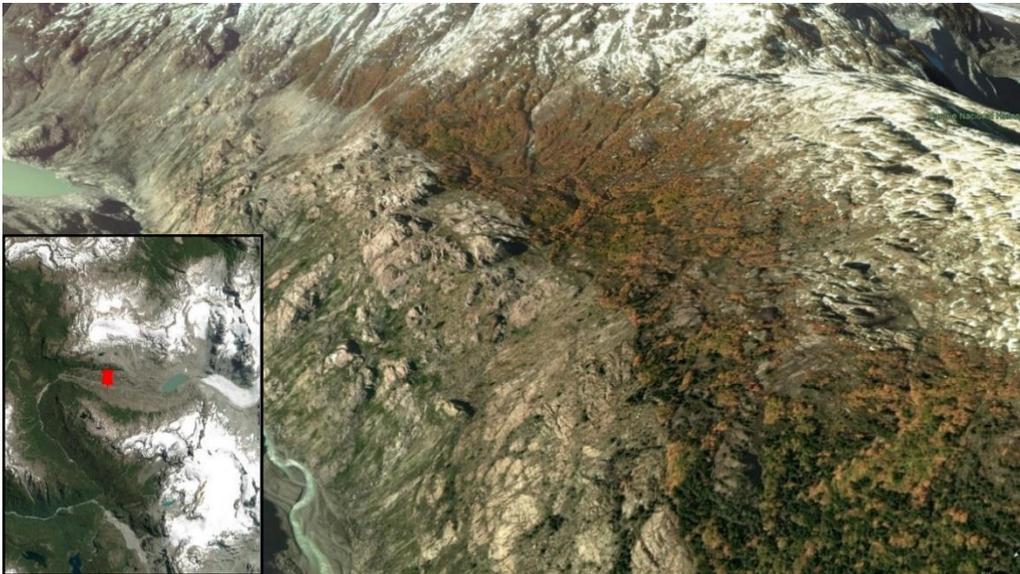
Figura 10: Pisos vegetacionales de Luebert y Plissock (2017) en área de estudio



Fuente: Elaboración propia (2022) en base a Luebert y Plissock (2017).

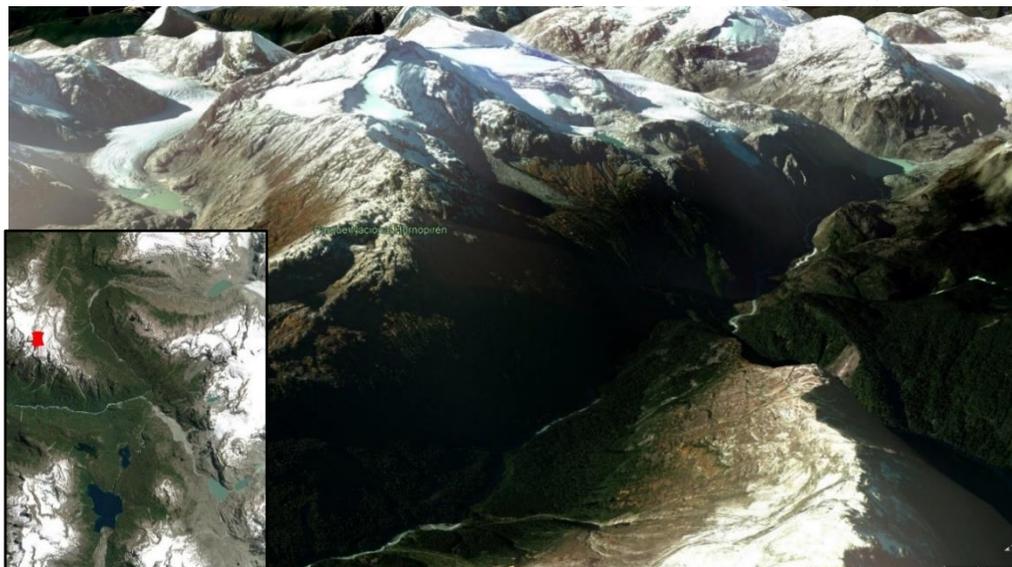
Las bases de datos levantadas se refuerzan con una captura de Google Earth Pro de enero de 2011, la cual muestra zonas pobladas de bosques del tipo caducifolio producto del cambio de coloración de las hojas en otoño.

Figura 11: Vista hacia laderas norte del valle del Glaciar “El Navegante”, desde punto rojo hacia el sureste.



Fuente: Elaboración propia (captura desde Google Earth Pro, abril de 2011).

Figura 12: Vista del área de estudio hacia el sureste, desde el punto rojo.



Fuente: Elaboración propia (captura desde Google Earth Pro, abril de 2011).

Donde en zonas entre los 950 – 1200 m.s.n.m. se muestra un cambio de tonalidades entre el bosque siempreverde – alerces y el bosque caducifolio.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo general

- Analizar temporalmente el avance de la vegetación en áreas deglaciadas del Parque Nacional Hornopirén, con el uso de sensores remotos y observaciones atmosféricas.

1.4.2 Objetivos específicos

- Identificar zonas de mayor tendencia positiva de desarrollo vegetacional en áreas deglaciadas.
- Caracterizar aspectos de terreno de los puntos que presentan mayor alza en áreas deglaciadas.
- Buscar correlaciones entre tendencias positivas de vegetación y aspectos de terreno/climatología.

Capítulo 2: Estado del arte

2.1 Criósfera y cambio climático

2.1.1 Contracción de glaciares de Andes Chilenos

A modo más generalizado, y en contextualización con el reciente inventario público de glaciares publicado por la Dirección General de Aguas (DGA); se tiene que la cantidad de cuerpos de hielo aumentó cerca de 2 mil en comparación al inventario anterior (2014) debido a la fragmentación de los mismos cuerpos de hielo anteriormente inventariados, y que, por ende, la superficie se vio reducida en 1.787 km² en comparación al Inventario Público de Glaciares (IPG) del 2014 (Segovia et al., 2022).

En la zona del norte grande, estudios sobre los glaciares del Volcán Parínacota y Pomerape señalan pérdidas registradas de 1.94% de su extensión por año (Reinthal et al., 2019). Caso similar en las cercanías del norte chico donde el glaciar Guanaco en Atacama ha registrado pérdidas de masa sostenidas desde 2005 en adelante (Kinnard et al., 2020). En Chile central glaciares como Echaurren norte han sufrido una constante pérdida de masa debido a afectaciones generadas por ENSO (El Niño Southern Oscillation) en los montos de precipitaciones (Farías-Barahona et al., 2019).

Finalmente, en la zona sur, las constantes mediciones y simulaciones sobre los glaciares del complejo volcánico Mocho-Choshuenco, arrojan distintas tasas de pérdidas basadas en

escenario modelados del cambio climático, donde en el escenario más crítico (RCP 8.5) solo algunos parches de hielo quedarían alojados en zonas cercanas a la cumbre (Scheiter et al., 2021).

2.1.2 Contracción de glaciares en Patagonia

Según mediciones geodésicas realizadas en la mencionada área, los glaciares de esta zona muestran una tendencia al adelgazamiento desde finales del siglo XX e inicios del siglo XXI, con algunas excepciones en los glaciares Pío XI, Perito Moreno, Garibaldi, entre otros (WGMS, 2017). En general se asume que los glaciares de Patagonia sean representados por los sistemas de Campos de Hielo Norte, y Sur; considerando que además existen otras zonas como la Cordillera de Darwin en Magallanes y la Sierra de Sangra en la región de Aysén, con retrocesos de 11% y 12% respectivamente entre 1985/86 y 2014 (Rivera et al., 2017). Por otra parte, glaciares asociados a sistemas volcánicos como el Michinmahuida, Hudson y Yates también tienen retrocesos documentados desde finales de los 70 hasta cercanías del año 2011 (Rivera & Bown, 2013).

2.2 Efectos del cambio climático sobre la cobertura vegetal

Desde el aspecto glaciológico y climático, los cambios generados por el calentamiento global también se han traducido sobre los bosques desde la abundancia de especies, su fenología en cuanto a la estacionalidad de floración, brotación, y fructificación; y la frecuencia e intensidad de los mecanismos clave de perturbación forestal, los cuales se incluyen los eventos de ráfagas de vientos e incendios, dinámicas de plagas y patógenos forestales. Bajo la misma línea, es importante resaltar la importancia de las especies de mayor longevidad en los bosques los cuales son más sensibles a alteraciones climáticas (Ipinza et al., 2021); a pesar de que los nombrados Alerce (*Fitzroya cupressoides*) son especies resistentes a periodos de sequía, señalado anteriormente.

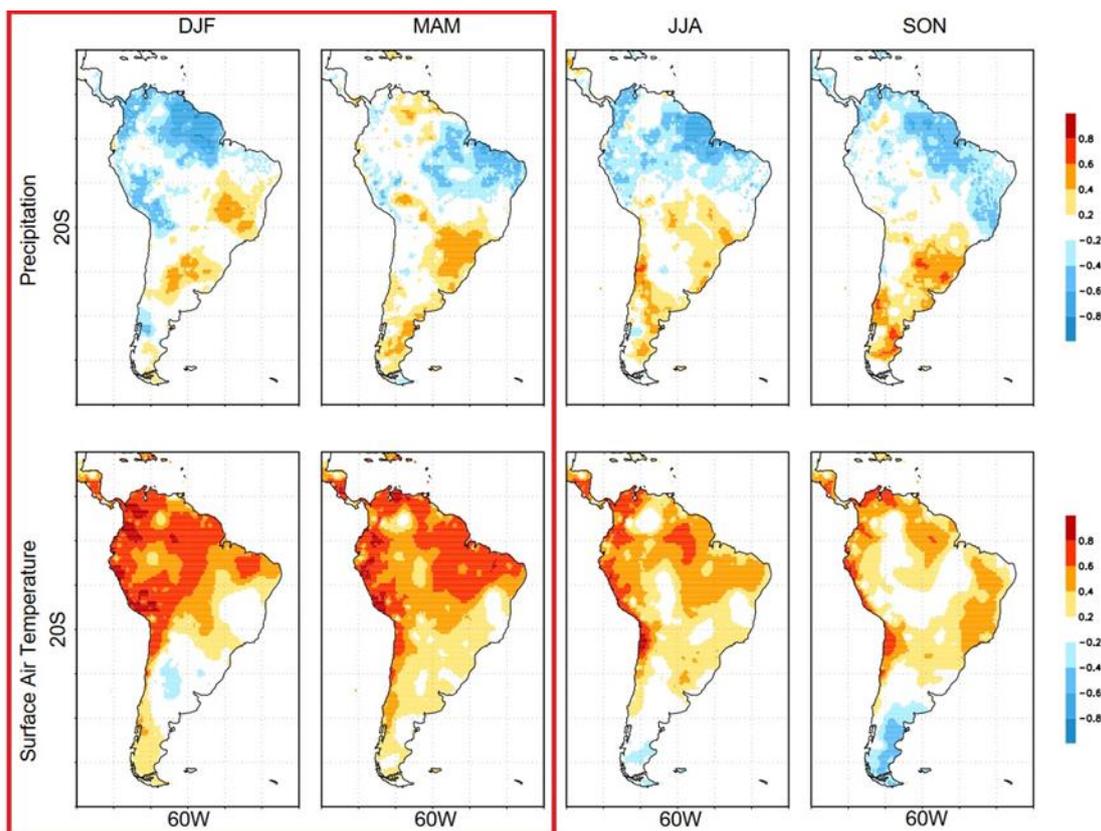
Por otra parte, modelamientos climáticos plantean que bajo el peor escenario en lo que respecta al cambio climático (RCP 8.5) se especifica que las zonas de los bosques perennifolios y los bosques semicaducifolios aumentarán su superficie cerca de un 21% y 30%, respectivamente (Tovar et al., 2022); lo que reforzaría además la premisa de que la línea de árboles en Patagonia estaría subiendo su cota altitudinal, y que además, se contrasta con la pérdida de biodiversidad en flora y fauna que podrían sufrir estos bosques.

2.3 Oscilaciones atmosféricas

2.3.1 El niño/Oscilación del sur (ENSO)

A macro escala, los ciclos positivos y negativos de ENSO se han remarcado en eventos notorios en ciertos años como fue a inicios de 1992 (Niña), 1998 (Niña), febrero de 2005 (Niña); y que posterior al año 2007 los ciclos positivos de ENSO han sido mayormente recurrentes con atenuaciones entre 2010 y 2012, marcando el inicio de la mega sequía de Chile central. Por otra parte, a escala estacional las fases positivas de ENSO predominan desde los inicios del 2000 hasta el día de hoy (meses E-F-M), considerando que las imágenes utilizadas en el presente trabajo se enmarcan mayoritariamente en los meses de verano. Si bien ENSO presenta influencias sobre la región norpatagónica, esta se enmarca por ser de carácter estacional, presentando correlaciones positivas entre las precipitaciones y sus fases positivas en conjunto con sus temperaturas (aunque para esta variable se presenta una correlación más débil) (Garreaud, 2009).

Figura 13: Mapa de correlación estacional entre el Índice Multivariante ENSO (MEI, Wolter and Timlin, 1998) y precipitaciones (fila superior) y temperatura del aire en superficie (fila inferior). Producto grillado de la Universidad de Delaware (1950-1999). Solo se muestran correlaciones superiores a $\pm 0,2$.



Fuente: The Andes Climate and Weather (Garreaud, 2009).

2.3.2 Oscilación antártica (AAO)

Por otra parte, los comportamientos de la Oscilación antártica (AAO o SAM Marshall) muestran una mayor amplitud de las precipitaciones de los meses de verano según la comparación entre el producto grillado de CAMELS (CR2met) y el comportamiento de esta oscilación, anteriormente revisado por Valenzuela (2022); donde se detallan períodos muy secos y otros con grandes montos de precipitaciones. En conjunto a lo señalado anteriormente, y basado en el estudio de Bravo (2014), se especifica que existe una relación directa entre las alzas de temperaturas y eventos de SAM positivos sin discriminar fases estacionales, lo que se traduce en un alza sostenidas de los mínimos y máximos de temperaturas, aunque de forma no tan pronunciada, para el área de estudio.

2.4 Monitoreo de vegetación en ambientes fríos

El estudio de la vegetación en ambientes de montaña o altas latitudes ha sido principalmente incursionado desde las ciencias biológicas, donde predominan metodologías basadas en muestreos de especies y registros de sus poblaciones in situ. A pesar de esto, existen investigaciones ligadas al tema que incluyen el uso de sensores remotos y el cálculo de índices de vegetación a distintas escalas. Los casos expuestos en los siguientes ítems se separan según los estudiados en el llamado “Norte global” con los casos sudamericanos con el fin de generar una distinción entre ambas zonas respecto al desarrollo de esta temática de investigación.

2.4.1 Casos de estudio europeos/norteamericanos

Dentro de los estudios más notorios de este tema, se encuentra el realizado por Fischer y colaboradores (2019) donde se analizaron series de tiempo del índice NDVI para su caso de estudio (Alpes austriacos), mostrando cambios de vegetación en los ambientes periglaciares de su área de interés. Su amplio registro fotográfico y climático le ha permitido generar mayores delimitaciones del glaciar, además de tener datos más robustos producto de tener una estación de monitoreo cercana al glaciar. La predominancia del uso de imágenes Landsat es lo que radica su similitud con el presente trabajo.

En otros casos similares como el de Lambert y colaboradores (2020), se incluyeron también otros índices como TWI (índice topográfico de humedad) y que, en conjunto al trabajo realizado con sensores remotos, se complementaron registros tomados en terreno para caracterizar la flora que está colonizando las zonas que el glaciar deja al descubierto. También en Norteamérica, y específicamente en Alaska y en zonas de tundra, se comprobó que el índice NDVI es un buen indicador para la detección de biomasa en este tipo de ambientes, además de ser una herramienta para medir la estructura de las comunidades de plantas (Goswami et al., 2019).

Volviendo a los casos en los Alpes, pero con una metodología similar a la realizada por el trabajo de Lambert y colaboradores (2020), es el trabajo realizado por Knoflach et al., (2021) que se centró en una cronosecuencia NDVI generada como trabajo de gabinete, comparándola con la vegetación registrada in situ, en el que, como mayor conclusión en su investigación, es la alta correlación establecida entre este índice y los sitios con vegetación que pudieron registrar.

2.4.2 Casos estudiados en la Cordillera de Los Andes/Patagonia

Dentro de los casos más notorios estudiados en Sudamérica, está el de Llambí y colaboradores (2020) donde se analizaron los ambientes cercanos al último glaciar venezolano ubicado en el Pico Humboldt. A pesar de que la investigación se centró netamente en parcelaciones y muestreos de la flora, las imágenes aéreas y modelos de elevación fueron partes fundamentales en los primeros procesos investigativos.

Las investigaciones de flora realizadas en Patagonia presentan casos como los estudiados en la Cordillera de Darwin (Domínguez et al., 1999), y otros glaciares de la región de Magallanes (Dollenz et al., 2012) que se basaron principalmente en muestreos de terreno sobre vegetación que coloniza morrenas y laderas descubiertas por el retroceso del glaciar. No se mencionan usos principales de imágenes de satélite debido a que el foco de la investigación es de carácter biológico al caracterizar las especies que han ido colonizando estos ambientes. A esto se suma el trabajo realizado por Cisternas (2016) que realizó estudios dendrocronológicos en los sectores cercanos al glaciar Mosco (Región de Aysén) para analizar el poblamiento de vegetación en morrenas del mencionado glaciar, donde se documentó que *Nothofagus betuloides* fue mayormente eficaz que *Nothofagus pumilio* en lo que respecta a procesos de colonización inicial.

Capítulo 3: Planteamiento metodológico

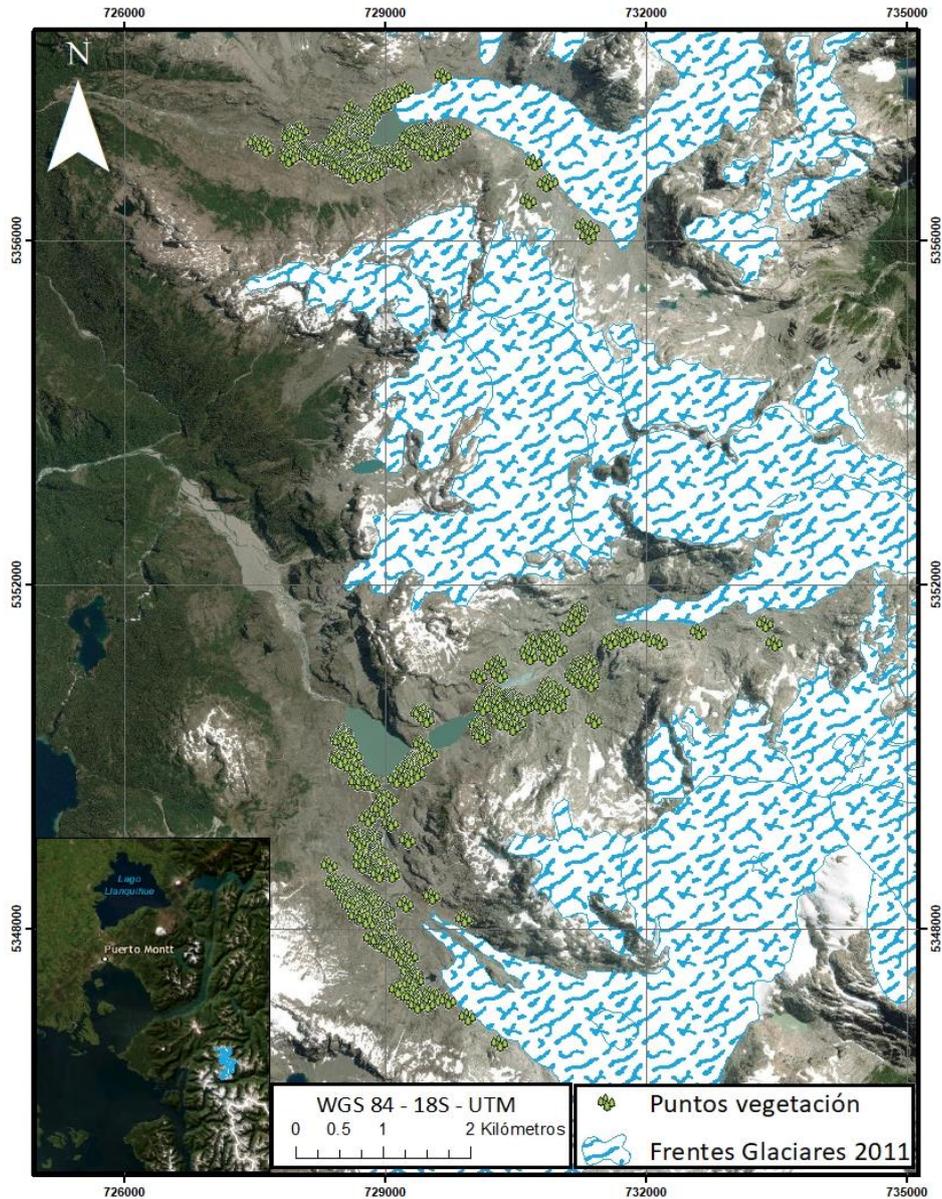
3.1 Descarga y procesamiento de imágenes

3.1.1 Delimitación de frentes glaciares

Los frentes glaciares de 1973 y 2001 fueron facilitados por el trabajo de Cisternas & Paredes (2020) que se focalizaron en el retroceso de las masas de hielo. También existen las bases de datos del Inventario Público de Glaciares del 2014 y 2022 provistas por la Dirección General de Aguas. De todas formas, como el IPG 2022 se elaboró hasta 2019, es necesario mencionar que existe un pequeño desfase visual de los polígonos del inventario respecto a la superficie actual de los glaciares del área de estudio.

Para el caso del 2011, se delimitaron los frentes glaciares de esa fecha debido a que coincide con el año de medición del DEM. Esto se debe a la posibilidad de que puntos con alto crecimiento vegetal se entrecruzan con el relieve del glaciar registrado en esa fecha, lo que sería información no coincidente con el relieve actual de la zona teniendo que ser eliminados de la muestra, según corresponda el caso. En la siguiente figura, se adelanta parte de los resultados para explicitar que los puntos no coinciden sobre la superficie del glaciar para el año de registro del DEM.

Figura 14: DEM y frentes glaciares (2011) y puntos filtrados de Mann Kendall mayores a 0.9



Fuente: Elaboración propia (2022).

3.1.2 Cálculo de índices y gradientes de vegetación

A través de Google Earth Engine, se seleccionarán imágenes Landsat 5TM, Landsat 7ETM+, Landsat 8OLI/TIRS y Landsat 9 OLI/TIRS con valores de reflectancia superficiales (colección 2, nivel 2, tier 1) las cuales ya fueron corregidas y preprocesadas. Como criterio principal se tendrá la primera imagen disponible entre los meses de enero y abril de cada año disponible, y que tenga un porcentaje de nubosidad menor al 20%. En el mismo script se operan los factores de escala a las bandas y el índice NDVI.

Los códigos de productos en GEE son los siguientes:

```
"LANDSAT/LT05/C02/T1_L2"  
"LANDSAT/LE07/C02/T1_L2"  
"LANDSAT/LC08/C02/T1_L2"  
"LANDSAT/LC09/C02/T1_L2"
```

La razón principal para el uso de esta plataforma en la descarga de imágenes es por la optimización de recursos de almacenamiento y de procesos en programas de SIG para elaborar los índices y también para realizar correcciones de imágenes, ya que, además, las imágenes son de la colección 2 nivel 2 (ya corregidas y preprocesadas). La elección de estos grupos de imágenes Landsat se debe a que la colección 1 nivel 1, serán eliminadas a finales de 2022, realizando este ajuste en la metodología para la obtención de esta data.

Sólo se considerará el índice NDVI en este trabajo producto que la complejidad y diversidad de especies arbóreas y de vegetación que existe en la zona, genera una baja distinción entre vegetación en etapa de crecimiento y zonas con bosques ya consolidados, así como también los bosques achaparrados de Lengua y Ñirre que pueden existir. Durante el proceso investigativo fueron puestos a prueba los índices MSAVI (Modified Soil Adjusted Vegetation Index), SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index), EVI (Enhanced Vegetation Index), y LAI (Leaf Area Index) para diferenciar zonas con muy densa vegetación respecto a otras que se presenten en etapas de crecimiento, pero que no se consideraron debido a que los objetivos de este trabajo se ajustaban netamente a la detección de vegetación, y no una caracterización en base a la salud de los bosques, su dosel, o su etapa de crecimiento. Además, anteriormente se mencionó que Goswami y colaboradores (2019) hicieron uso de NDVI para la detección de biomasa en ambientes fríos, motivo por el cual se eligió este índice como referencia en la detección de vegetación en estos ecosistemas de montaña.

Sumado a lo anterior, el índice NDVI fue aplicado en el trabajo anterior (Valenzuela, 2022) para la misma detección de vegetación, se debe señalar que los valores de este índice tienen tendencia a saturar en zonas del glaciar y otras cubiertas por nubes/vapor de agua, además de haber sido preprocesadas manualmente (imágenes C1-L1). Es necesario mencionar que estas zonas con saturación no solían cruzarse en zonas de colonización vegetal.

Se seleccionaron 15 imágenes entre 1985 y 2022, donde los años considerados se escogieron en base a la disponibilidad de imágenes y también las condiciones en las que estaba el producto. Existen imágenes que tienen errores o vacíos en sus valores de píxeles debido a afectaciones en sus bandas (principalmente del producto Landsat 7 ETM+). El código automáticamente escoge la primera imagen del rango temporal especificado en el script y que cumpla con las condiciones señaladas anteriormente. Dicho esto, las imágenes escogidas fueron las siguientes:

Figura 15: Tabla de datos de imágenes Landsat utilizadas.

Data	Fecha	Path/Row
LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_232089_19850307	3/7/1985	232/89
LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_232089_19860326	3/26/1986	232/89
LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_232089_19980207	2/7/1998	232/89
LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_232089_19990109	1/9/1999	232/89
LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_232089_20000221	2/21/2000	232/89
LANDSAT/LE07/C02/T1_L2/LE07_232089_20030213	2/13/2003	232/89
LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_232089_20060213	2/13/2006	232/89
LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_232089_20080203	2/3/2008	232/89
LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_232089_20090120	1/20/2009	232/89
LANDSAT/LT05/C02/T1_L2/LT05_232089_20100123	1/23/2010	232/89
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_232089_20150326	3/26/2015	232/89
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_232089_20170126	1/26/2017	232/89
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_233089_20180205	2/5/2018	232/89
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_233089_20190123	1/23/2019	233/89
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_232089_20200220	2/20/2020	232/89
LANDSAT/LC08/C02/T1_L2/LC08_232089_20210206	2/6/2021	232/89
LANDSAT/LC09/C02/T1_L2/LC09_232089_20220217	2/17/2022	232/89

Fuente: Elaboración propia (2022).

Posterior, las imágenes fueron llevadas a Rstudio para recortarlas con la máscara del área de estudio, apilar los ráster resultantes y realizar una prueba MannKendall de este conjunto de imágenes. La fórmula de Mann Kendall (Kendall, 1975; Mann, 1945) consta de una prueba no paramétrica que compara valores de una misma serie temporal de forma no secuencial, aplicando una hipótesis de estabilidad de esta misma serie, para evaluar la tendencia en una serie de datos ambientales (Yu et al., 2007; Silva, 2007; en Da Silva Alves & Silva Nóbrega, 2017). De esta forma, la aplicación de esta fórmula en cada píxel de la serie de rásters seleccionados consiste en la fórmula para calcular el valor τ_B de este test para calcular tendencias de este índice.

$$\tau_B = \frac{n_c - n_d}{\sqrt{(n_0 - n_1)(n_0 - n_2)}}$$

Donde:

$$n_0 = \frac{n(n-1)}{2}$$

$$n_1 = \sum_i t_i(t_i - 1)/2$$

$$n_2 = \sum_j u_j(u_j - 1)/2$$

n_c = Número de pares concordantes

n_d = Número de pares discordantes

t_i = Número de valores empatados en i^{th} grupos de empates para la primera cantidad

u_j = Número de valores empatados en j^{th} grupos de empates para la segunda cantidad

De modo que posterior al cálculo, el ráster generado arroja valores de tendencia de -1 a 1, donde desde -1 comienza una asociación negativa al 100% (en este caso, tendencia negativa de NDVI) a +1, asociación positiva al 100% o bien, tendencias mayormente positivas de NDVI).

Posteriormente, del ráster generado a través del test de Mann Kendall en R se seleccionarán los valores superiores a 0.9, con el motivo de generar una nube de puntos que presentaron la tendencia al alza más fuerte de toda la zona, y dentro de las áreas deglaciadas. A esta nube de puntos, se le añadirán la información sobre índice topográfico de humedad, acumulación de flujo, altitud, radiación solar de áreas, y pendiente; para posteriormente realizar un análisis estadístico de estas variables y si representan un correlato para el desarrollo de esta vegetación.

Datos climáticos como precipitaciones, temperaturas máximas y mínimas se cruzarán con valores promedio de NDVI para cada captura obtenida. Ante esto, a la nube de puntos se le debe añadir el valor de reflectancia de este índice para después calcular un promedio general de cada año. Los valores climáticos se seleccionaron para los mismos años y en los meses de enero, febrero y marzo; producto de que son los meses en que se obtuvieron las imágenes.

Cabe destacar que los puntos que estén sobre la superficie glaciaria correspondiente al año 2011, serán restados de la muestra puesto que parte de esa superficie registrada en el DEM, no es concordante con la realidad actual producto del retroceso de las masas de hielo.

3.2 Procesamiento de datos climáticos

3.2.1 Selección de datos para meses E-F-M

Desde la misma base de datos de donde fueron elaborados los gráficos de la figura 4, se hizo un apartado para los meses de captura de las imágenes obtenidas.

La estación meteorológica más cercana al área de estudio corresponde a la del aeropuerto “El Tepual”, en las cercanías de Puerto Montt, a unos 80 kilómetros aproximadamente del área de estudio. Esta es una estación de larga data que favorece la descripción climática del área de estudio. Aun así, en la región de Los Lagos existen fuertes diferencias en los montos de precipitaciones entre valle y cordillera, por lo que se tiene la ubicación de Río Puelo antes junta con Río Manso, como referencia para la descripción climática de la zona por su cercanía con el parque nacional. Cabe considerar que la data procesada de esta cuenca llega hasta mediados de 2020, la cual no se ha actualizado hasta la actualidad.

3.3 Otros aspectos del terreno

Para las siguientes variables, se utilizó un DEM ALOS-PALSAR del 2011 obtenido desde el soporte web de IDE Chile. Si bien los relieves de aquel período no coinciden totalmente con la situación actual, la afectación de los datos es mínima puesto que son muy pocos los puntos que se superponen al glaciar para el año en que fue tomada la medición de radar.

3.3.1 Modelo de pendientes

Se elaborará un modelo de pendientes a través de Arcgis 10.6, con el fin de tener a disponibilidad las zonas de mayor pendiente dentro de las áreas de interés. Su finalidad es añadir este valor de pendiente en la tabla de atributos de los gradientes ya elaborados.

3.3.2 Altitud

La caracterización de la altitud nos permitirá definir a que cotas está poblando la vegetación y posiblemente definir especies y/o tipologías forestales que se asocien a este poblamiento.

3.3.3 Radiación solar de áreas

La radiación solar entrante (insolación) que se recibe del sol, es la principal fuente de energía que impulsa muchos de los procesos físicos y biológicos que existen en la tierra, por lo que comprender su importancia para las escalas de paisajes es clave para comprender una gran variedad de procesos naturales y de actividades humanas (ESRI, 2022). Para el caso de estudio, esta variable es de gran importancia producto de la incidencia misma de la energía solar en la actividad fotosintética de la vegetación existente.

El cálculo de esta variable se realiza a través del geoproceso “*Area solar radiation*”, la cual mide la radiación solar en unidades de vatios hora/metro cuadrado [WH/m2]. Los parámetros se calcularon por defecto con fechas entre el 1 de enero de 2022, y el 1 de abril del mismo año, considerando las fechas de captura de las imágenes. Se compararon los valores entre este año y los calculados para la fecha inicial (mismo período, pero en 1985) y los valores no difieren de forma considerable en comparación con el ráster generado para la fecha actual, por lo que se dejaron estos parámetros para el procesamiento. El objetivo de generar esta variable es asociar los puntos de mayor crecimiento con un rango de valores de energía (considerando que esta energía puede variar según el porcentaje de días nublados en etapa de crecimiento como verano/primavera).

Por último, estas variables generadas (sumando a la altitud) serán agregadas a la información presente en la nube de puntos por generar que muestra los gradientes vegetacionales.

3.3.4 Índice topográfico de humedad

Es un índice desarrollado por Beven & Kirkby (1979) el cual es utilizado para cuantificar el control topográfico de los procesos hidrológicos (Sørensen et al., 2006), su fórmula es:

$$\ln \left(\frac{af}{\tan \beta} \right)$$

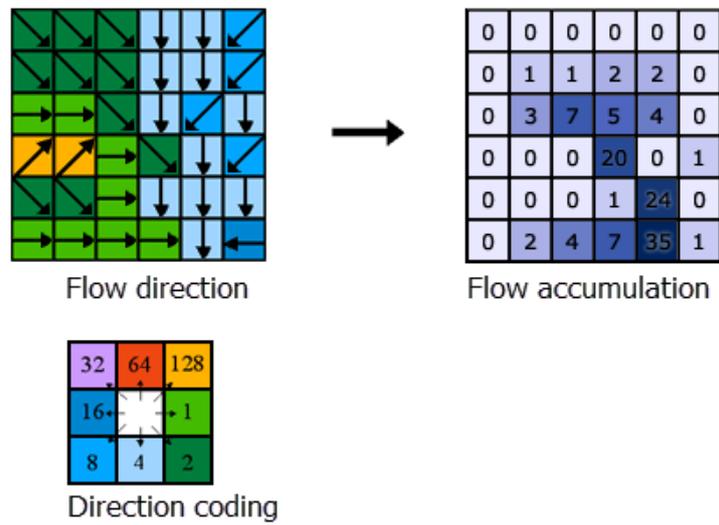
Donde alfa corresponde al área de captación de cada píxel y beta los grados de pendiente.

Sus aplicaciones van desde la cuantificación de riesgos geológicos, gestión de recursos hídricos, y estudios ecológicos. Sus valores por lo general fluctúan entre -3 y 30.

3.3.5 Flow accumulation

Este modelo calcula el flujo acumulado como el peso acumulado de todas las celdas que fluyen hacia cada celda con pendiente en descenso, con el objetivo de visualizar las tendencias de la escorrentía producto del relieve. Son útiles para identificar canales de arroyos. La siguiente figura ilustra el proceso de determinación de la acumulación de flujo (ESRI, 2022).

Figura 16: Algoritmo gráfico de acumulación de flujo.



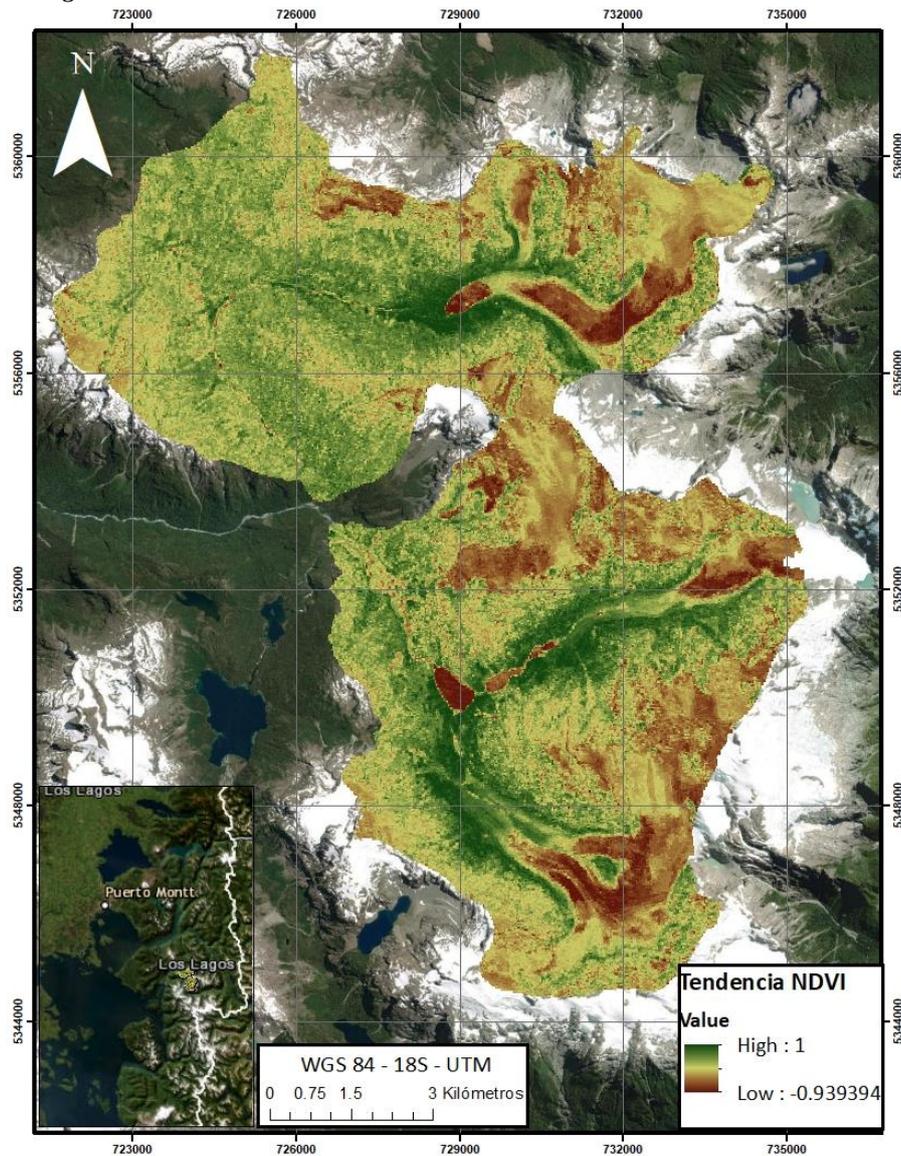
Fuente: ESRI (2022).

Por último, en el anexo 1 se especifica un resumen gráfico del flujo de trabajo realizado para la investigación. Por otra parte, en el anexo 2 se señala el repositorio de los scripts utilizados en la descarga y procesamiento de imágenes.

Capítulo 4: Resultados

El primer producto generado a través de las rutinas de códigos de R y Google Earth Engine fue el ráster de tendencias de NDVI, el cual muestra las nombradas tendencias vegetacionales de las imágenes procesadas en un solo archivo. Dentro de este ráster, se destacan muchas zonas de tendencia positiva no sólo dentro de los valles deglaciados, si no que también en zonas de bosques densos ubicados aguas abajo al interior de los valles.

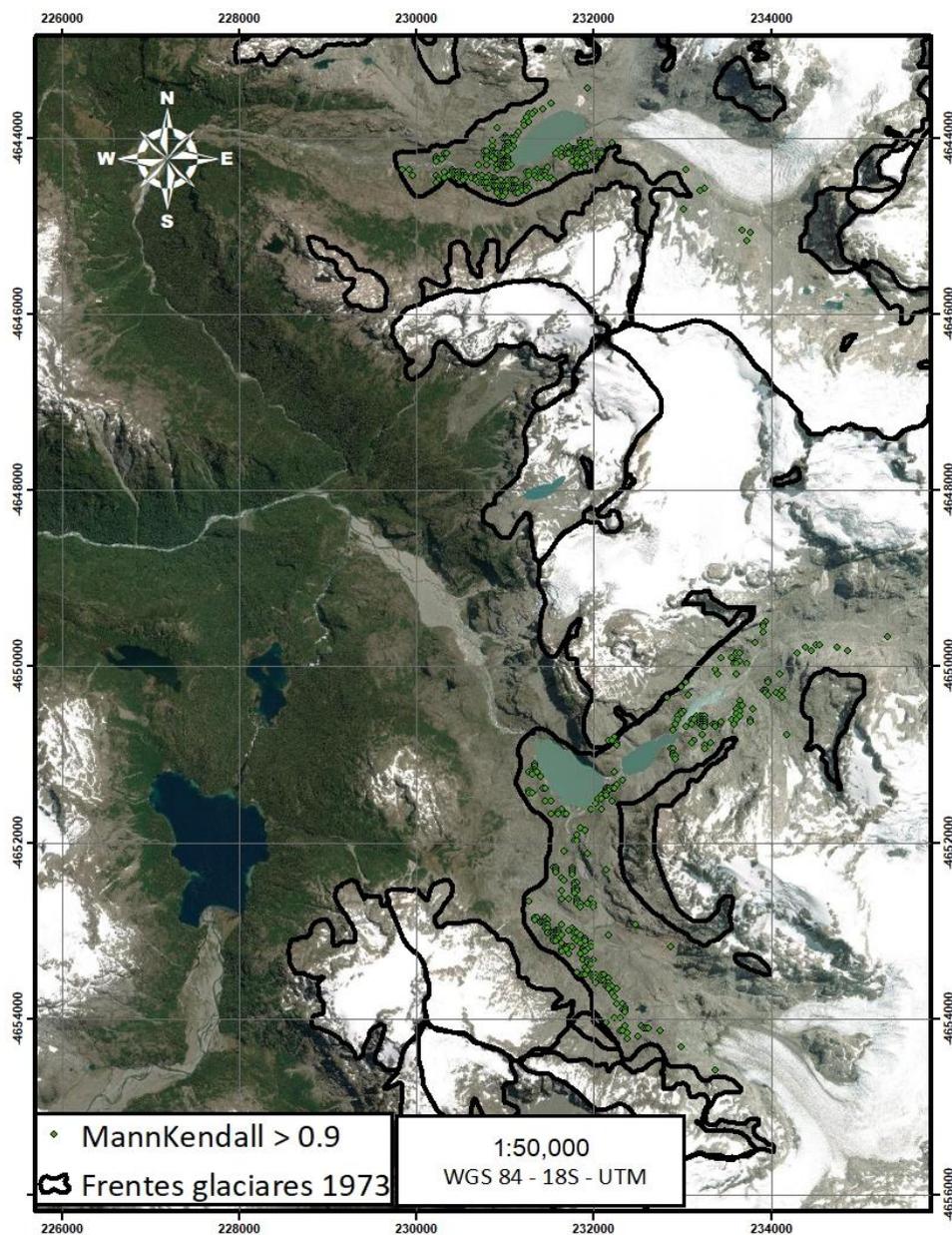
Figura 17: Ráster resultante de test Mann Kendall en R



Fuente: Elaboración propia (2022).

Se traspasaron los valores de cada píxel a punto (ráster a vectorial), para luego filtrar los puntos que tengan valores mayor o igual a 0.9, con el objetivo de discriminar las zonas que tuvieron mayor tendencia positiva dentro de las áreas deglaciadas. Dentro de este filtro, quedó un total de 532 puntos al cual se le agregaron los valores derivados de los ráster de cada aspecto de terreno calculado (mencionado en el sub ítem 3.3).

Figura 18: Ubicación de puntos con valores τ_B superiores a 0.9.



Fuente: Elaboración propia (2022).

Posterior, se añadieron aspectos de terreno derivados del DEM Alos-Palsar (2011) expuestos en la siguiente figura:

Figura 19: Tabla de atributos de nube de puntos con valores τ_B mayores a 0.9 (grid_code).

MannKendall > 0.9									
FID *	Shape *	OBJECTID	pointid	grid_code	Altitud	Flow accumulation	ITH	Insolación	Pendientes
1	Point	25605	25605	0.933333	1196.33	89.46637	7.19376	445069	9.595234
2	Point	27876	27876	0.933333	1150.396	33.03239	3.519895	453715.3	6.164851
3	Point	28632	28632	0.933333	1136.293	10.0919	6.592528	446256.8	7.63954
4	Point	29008	29008	0.9	1118.157	83.73772	8.47135	418638	8.464807
5	Point	29385	29385	0.916667	1117.442	25.62489	4.939347	372070.7	19.26506
6	Point	29386	29386	0.9	1114.515	89.96675	-2.423473	414009	9.680308
7	Point	29762	29762	0.933333	1114.579	51.1711	4.373331	381582.9	19.58611
8	Point	30516	30516	0.9	1114.193	41.70065	6.282115	403453.7	17.08644
9	Point	30518	30518	0.9	1110.192	63.86336	-0.088478	448337.7	12.27381
10	Point	30893	30893	0.933333	1109.901	66.0222	0.71407	412118.1	12.39705
11	Point	31260	31260	0.9	1128.88	25.66223	4.118207	410758	11.36756
12	Point	32022	32022	0.9	1091.162	87.74087	6.703404	429772.2	8.237045
13	Point	32394	32394	0.933333	1112.179	81.53971	4.878114	396677.9	14.03153
14	Point	32398	32398	0.9	1088.381	74.64845	6.025663	436306.8	5.793153
15	Point	32770	32770	0.933333	1110.315	20.56782	5.422003	382841.9	18.80124
16	Point	32771	32771	0.916667	1103.4	82.66254	4.068233	377069.2	18.83702
17	Point	32772	32772	0.9	1097.619	80.20917	1.640437	356351.9	22.90117

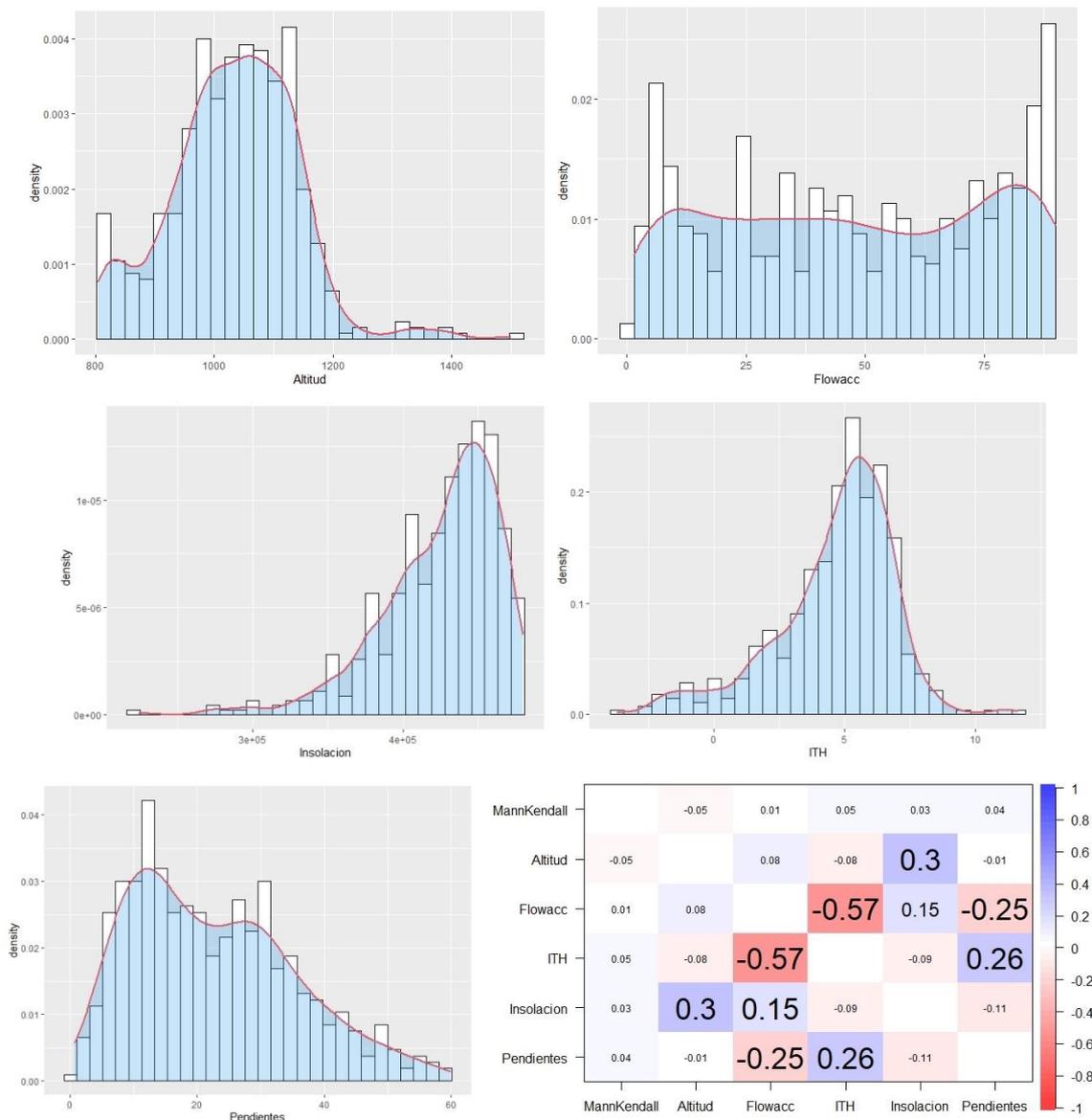
Fuente: Elaboración propia (2022).

Por otra parte, analizando visualmente el cruce entre la nube de puntos y los pisos vegetacionales de Luebert & Plissock (2017) la totalidad de los puntos que se ubican sobre algún piso vegetacional elaborado en la base de datos son del tipo “*Bosque caducifolio templado andino de Nothofagus pumilio y Drimys andina*”, el cual es un posible indicador de las especies que estén colonizando estas áreas descubiertas.

Dicho lo anterior, se analizará estadísticamente la muestra con aspectos del terreno y climatología para buscar un correlato entre las nombradas variables y el crecimiento de la vegetación.

En primer lugar, se estudiarán los aspectos de terreno de la nube de puntos. Sus gráficas son las siguientes:

Figura 20: Gráficas de comportamiento de NDVI respecto a aspectos de terreno (valores τ_B mayores a 0.9).



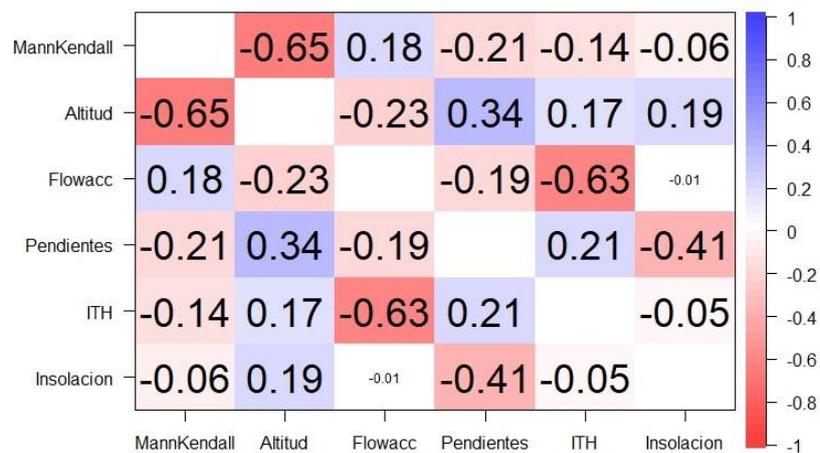
Fuente: Elaboración propia (2022).

Según las gráficas, se muestra una concentración entre los 900 y 1150 m.s.n.m. (aproximadamente) respecto a la altitud, valores de acumulación de flujo se muestran heterogéneos entre sí, similar a los valores de pendientes excluyendo las que son mayores o iguales a 35 grados producto de ser terrenos más abruptos. Los valores de insolación tienden a concentrarse entre medios a altos dentro de la muestra, y los de ITH en valores intermedios bajos dentro de su escala. Por último, la tabla de correlaciones (hacer énfasis en columna de MannKendall) nos señala que la muestra de MannKendall no es influida por las nombradas

variables analizadas, siendo necesaria estudiar el comportamiento de completo de la muestra para establecer algún correlato del terreno respecto a la vegetación.

Bajo este caso, se consideraron los puntos mayores o iguales a 0 para describir los procesos de colonización vegetal. De todas formas, es necesario un estudio más minucioso para separarlo por tramos puesto que en la siguiente figura, el comportamiento no especifica una fuerte correlación con alguna variable.

Figura 21: Gráficas de comportamiento de NDVI respecto a aspectos de terreno (valores τ_B mayores a 0).

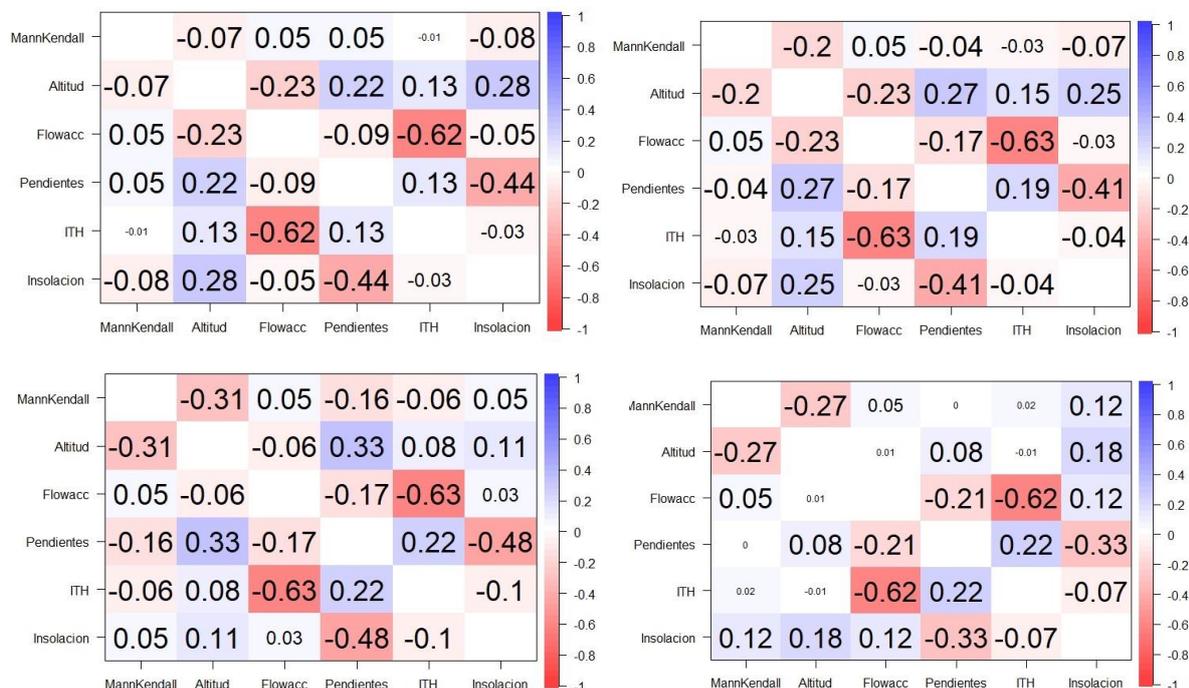


Fuente: Elaboración propia (2022).

A pesar de lo anterior, existe una correlación negativa de MannKendall positivos con la altitud, y se explica debido a que las condiciones ambientales se tornan mas agrestes a medida que uno aumenta la cota altitudinal en zonas de montaña, tales como ráfagas de viento y temperaturas bajo cero (aunque se documenta según INFOR-CONAF (1997) que *Nothofagus pumilio* es capaz de tolerar condiciones ambientales adversas como las descritas anteriormente). Una leve correlación positiva existe con acumulación de flujo, aunque no tan notoria como para establecer una causalidad de esta variable sobre el crecimiento de la vegetación.

Debido a esto, es que se analizarán por tramos las muestras positivas de MannKendall, por lo que se separaron en 4 tramos: de 0 a 0.25 (baja tendencia positiva); de 0.25 a 0.5 (tendencia positiva intermedia-baja); 0.5 a 0.75 (tendencia positiva intermedia-alta); y 0.75 a 1 (tendencia positiva alta); con la finalidad de identificar posibles tendencias en tramos de este valor según el grado de tendencia que muestra este modelo.

Figura 22: Gráficas de comportamiento de NDVI respecto a aspectos de terreno (en orden, tramos de valores τ_B descritos en el párrafo anterior).



Fuente: Elaboración propia (2022).

Figuras que nos muestran que solo en el tramo 0.5-0.75 existe una leve correlación negativa con la altitud. En general, los aspectos de terreno no inciden de forma directa en ciertas fases del crecimiento de esta vegetación, considerando que a mayor altitud dentro de los valles se encontrarán suelos con menor grado de desarrollo y más adelante, los mismos cuerpos de hielo.

De todas formas, es necesario acotar que para los puntos con valores τ_B mayores a 0.9, en las variables de insolación y de índice topográfico de humedad, y considerando la base de datos de pisos vegetacionales anteriormente revisada, es que existe la posibilidad que estos puntos sean zonas predominantemente de *Nothofagus pumilio*, debido a que esta especie es exigente en luz, y con ciertos requerimientos de humedad del suelo. Aun así, no es posible aseverar que se trate de esta especie como la predominante en estos puntos, esto debido a que existe una cantidad de factores considerables que no se incluyeron en este ejercicio tales como velocidad del viento, tipos de suelos, porcentaje de humedad relativa en el aire, entre otros; pero que al menos si sirve como una aproximación a lo que podría verse en terreno.

Por último, para buscar un correlato respecto a los registros climáticos que se consideraron para representar este aspecto físico en el área de estudio, se correlacionaron los valores de NDVI de estos puntos por año con temperaturas mínimas, temperaturas máximas, y precipitaciones.

Debido a que existen diferencias notables entre los años de captura de las imágenes Landsat y los datos climatológicos disponibles, es que se realizaron los siguientes ajustes para poder analizar ambas variables en conjunto.

En primer lugar, para discriminar las zonas de mayor crecimiento vegetacional, se tomaron como referencia los puntos con valores taub mayores a 0.9 para sumarles en su tabla de atributos los valores de NDVI de cada año, en cada punto correspondiente. Posteriormente, se acumulan los valores del índice NDVI para cada año para calcular un promedio anual de NDVI, en referencia a la totalidad de los puntos de la muestra, pudiendo así generar un gradiente temporal del índice a medida que avanzan los años. Por el aspecto climático, se consideraron los meses de enero, febrero y marzo para calcular un promedio estacional (tomando en cuenta que aquellos meses fueron los considerados para la descarga de las imágenes por las razones ya mencionadas al inicio del trabajo), y de este modo, se podría correlacionar las tendencias estacionales de las variables climáticas con la respuesta fotosintética capturada en los meses de verano.

Realizar un análisis con todas las imágenes disponibles fue descartado debido a que gran parte de la superficie donde se ubican los puntos quedan cubiertas por la nieve en meses de otoño e invierno, lo que mostraría cifras de NDVI que no son acordes con la realidad, además de presentarse la posibilidad que estos valores caigan a 0 en caso de que la vegetación presente sea de tipo caducifolio.

En referencia a lo mencionado anteriormente, la tabla de datos para los cruces de variables climáticas y NDVI se representa de la siguiente forma:

Figura 23: Tabla de datos para cruce de comportamiento de NDVI y climatología de la zona.

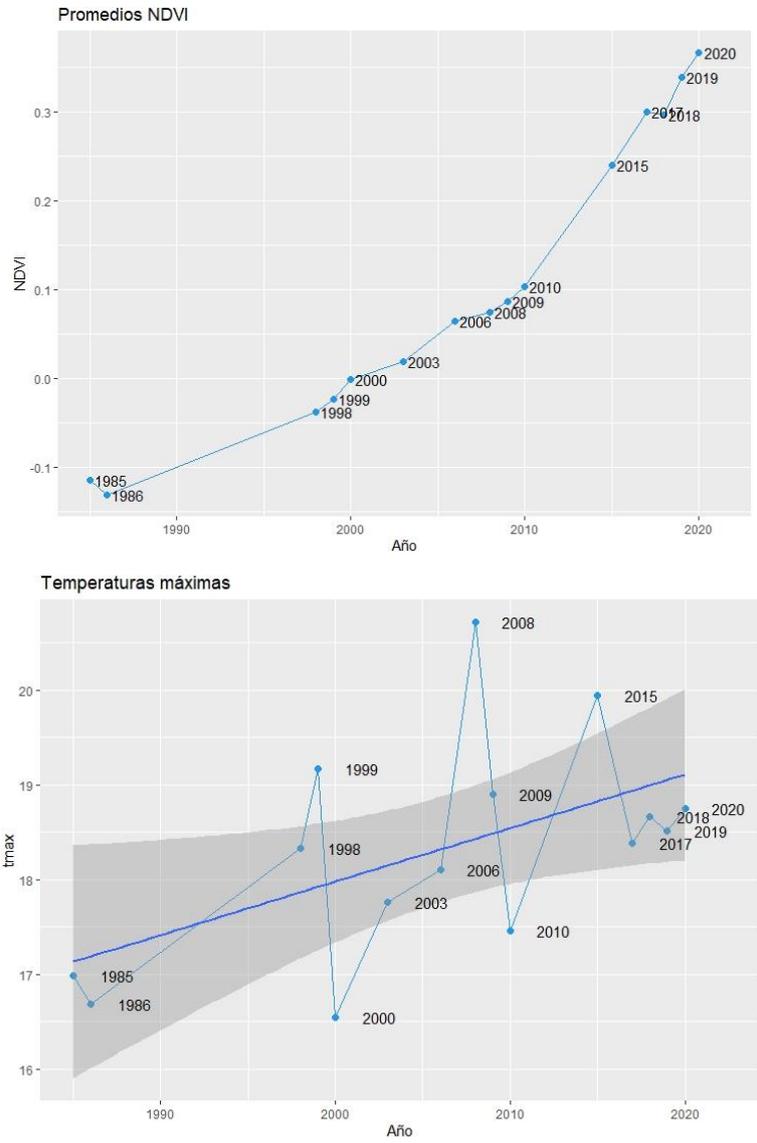
Año	NDVI	tmax	tmin	pp
1985	-0.11461	16.98539	3.545452	136.234
1986	-0.13067	16.68869	3.302543	126.0101
1998	-0.03753	18.33019	4.012167	74.08668
1999	-0.02371	19.16541	4.256681	73.2439
2000	-0.00108	16.54822	3.327265	113.7293
2003	0.019273	17.76384	3.976861	87.38566
2006	0.064661	18.0995	4.128957	170.2194
2008	0.074201	20.7106	5.137186	69.86153
2009	0.087126	18.89574	3.941237	83.47949
2010	0.103576	17.46269	3.989358	125.8839
2015	0.24002	19.94451	4.208085	44.53189
2017	0.300541	18.38649	4.407157	127.0658
2018	0.297175	18.6662	4.101152	115.2551
2019	0.339544	18.50788	3.375584	68.82348
2020	0.36656	18.7536	4.294286	92.36287

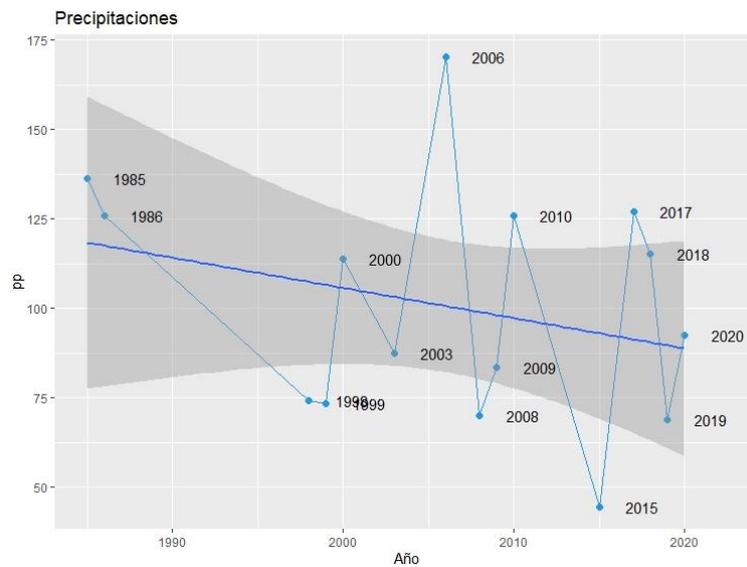
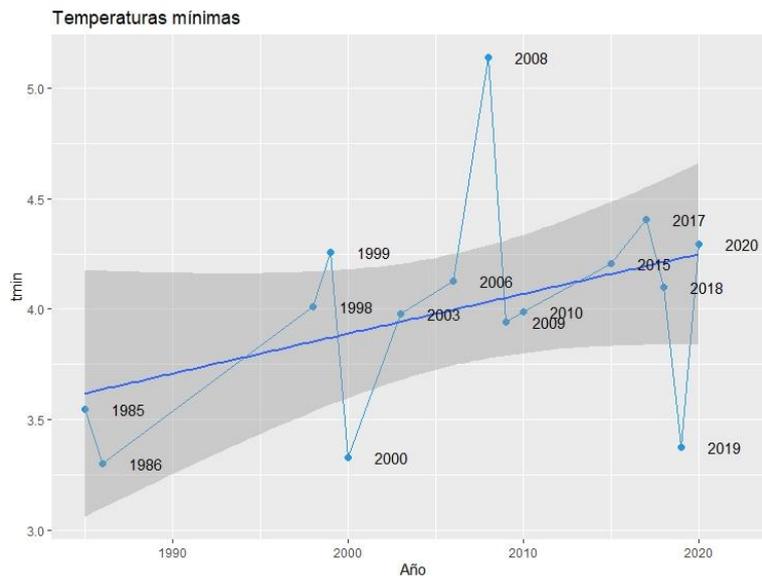
Fuente: Elaboración propia (2022).

Teniendo en total 15 años como referencia para estos cálculos. Cabe destacar que el delta final del índice NDVI es de 0.48117, asociándolo como un promedio final a la muestra de la nube de puntos trabajada anteriormente.

El comportamiento individual de las variables se representa de la siguiente manera:

Figura 24: Comportamiento temporal, a nivel individual, de variables expuestas en figura 22.

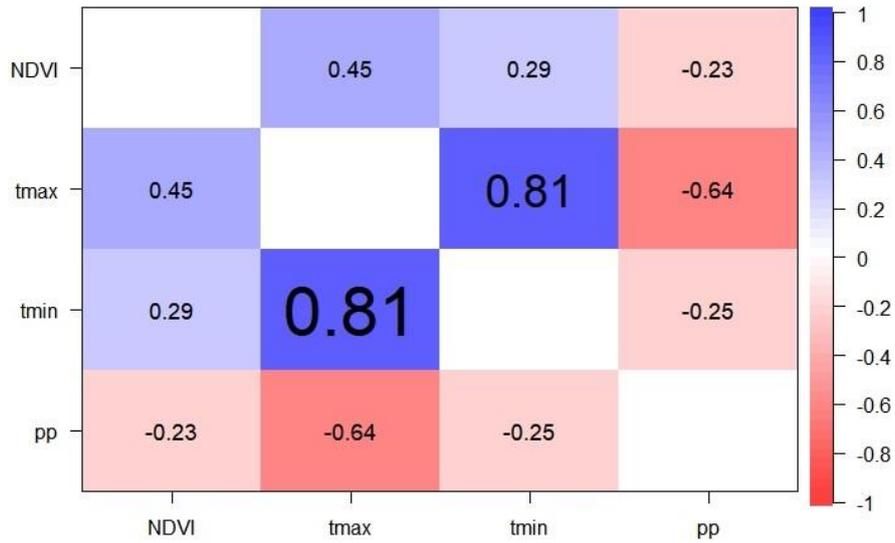




Fuente: Elaboración propia (2022).

Donde en conjunto a los valores de NDVI, el comportamiento de las temperaturas mínimas y máximas durante los veranos tiene tendencias al alza. Al contrario de estas variables, las precipitaciones han ido descendiendo. Se debe considerar también el comportamiento general de estas variables expuestas en la figura 4, donde los gráficos de temperatura muestran una muy leve tendencia al alza, y las precipitaciones se mantienen casi sin alterar, pero con un comportamiento muy inestable a lo largo de los años presentando grandes montos en algunos períodos en comparación a otros. Posteriormente, se cruzaron estas variables y se buscaron correlaciones entre NDVI y datos climatológicos:

Figura 25: Correlaciones entre NDVI y climatología del área de estudio. Datos utilizados en figura 22.



Fuente: Elaboración propia (2022).

Donde se muestra una correlación más fuerte en las temperaturas máximas que con las mínimas, caso contrario a las precipitaciones que responde a una correlación levemente negativa.

Dado que este análisis tiene un carácter mayormente estacional, hay que analizar los años donde se tomaron en cuenta las variables climáticas para este experimento respecto a las oscilaciones atmosféricas que presentan mayor incidencia en la zona, tales como ENSO y SAM. Los índices de aquellas oscilaciones para los meses de enero, febrero y marzo, presentan el siguiente comportamiento en los años analizados:

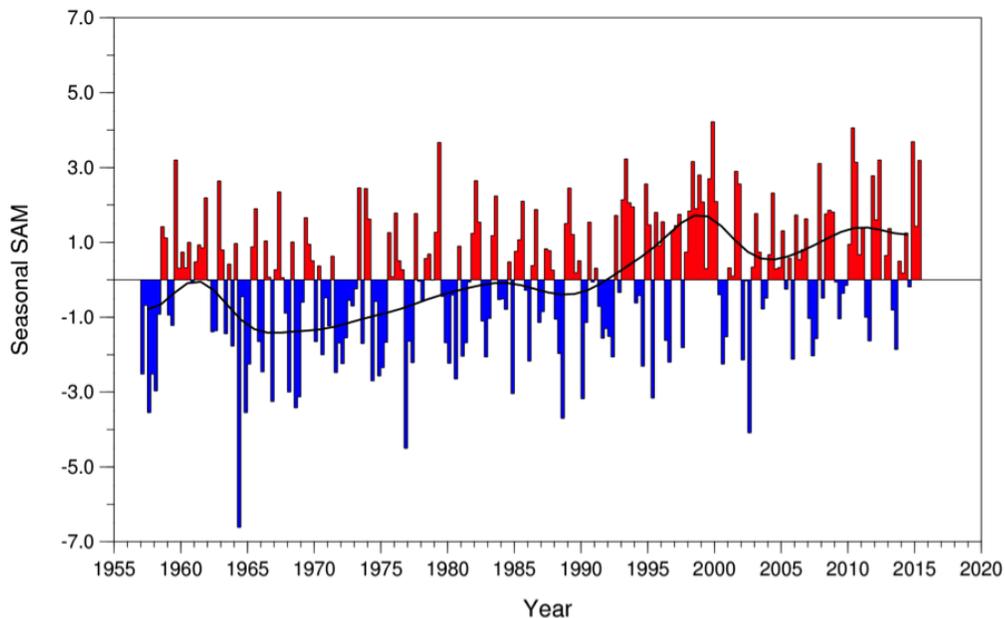
Figura 26: Fases positivas y negativas de ENSO y SAM en meses de E-F-M (promedios).

ENSO	SAM
0.93	-0.82
0.23	-1.92
-3.93	3.17
2.23	0.47
2	2.21
-0.6	-0.52
1.93	0.12
3.23	1.42
1.86	3
-1.76	0.82
-0.73	2.38
1.7	-1.25
3.4	1.23
-0.96	0.79
0	0.75

Fuente: Elaboración propia (2022).

Desde donde podemos concluir que las tendencias positivas de SAM son recurrentes en gran parte de los veranos analizados, atribuyendo esta tendencia a un alza de las temperaturas mostrado en la figura 4 y la figura xx; en conjunto con una mayor amplitud de precipitaciones. El comportamiento general de SAM se ilustra en la siguiente figura, la cual nos muestra también desde 1985 una tendencia hacia fases positivas de esta oscilación, concurrente con la amplitud de las precipitaciones mostradas en la figura 4.

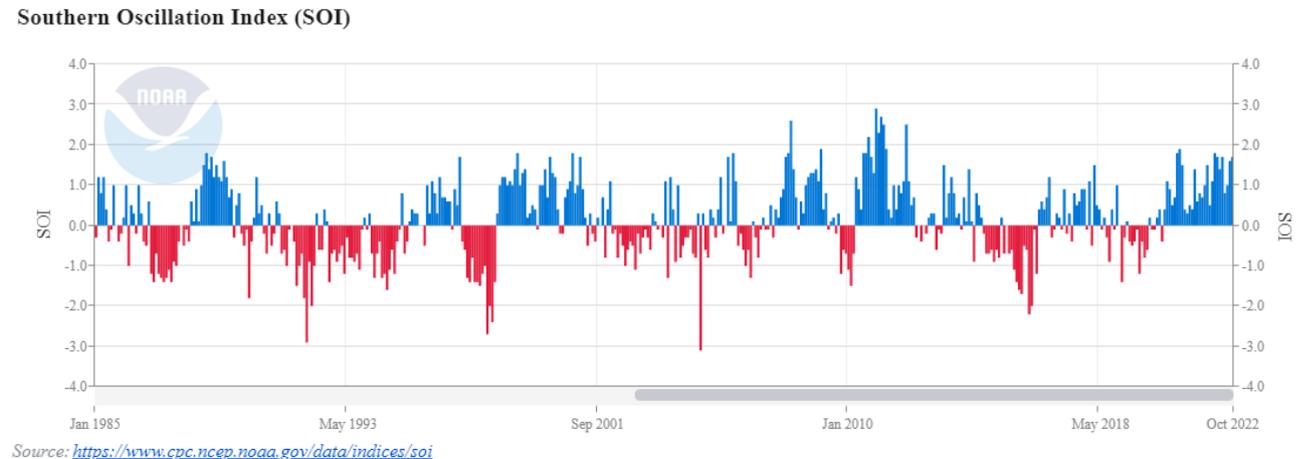
Figura 27: Comportamiento general de SAM (1955-2018).



Fuente: NCAR (2022) en base a Marshall (2003).

Pasando al análisis de ENSO, nos muestra una predominancia levemente remarcada en las fases positivas de esta oscilación, teniendo su explicación según el trabajo de Garreaud (2009) ilustrada en la figura 13 su correlación positiva con las temperaturas. Al mismo tiempo, su comportamiento general desde 1985 a la actualidad nos muestra una tendencia a las fases positivas de ENSO, marcando esta nombrada tendencia desde 1998 hasta la actualidad.

Figura 28: Comportamiento general de SOI-ENSO (1985-2022).



Fuente: NOAA (2022).

Dicho esto, y analizando los comportamientos estacionales de las imágenes y generales tanto de las oscilaciones atmosféricas como también de las variables climáticas escogidas, es que se puede inferir que las temperaturas han jugado un rol fundamental en el área de estudio tanto por el retroceso de los glaciares, como también por el crecimiento y avance de la vegetación en estas zonas deglaciadas; agregando además respecto al avance vegetacional como una causalidad directa que tiene el comportamiento de estas variables sobre la cobertura.

Capítulo 5: Discusión y conclusiones

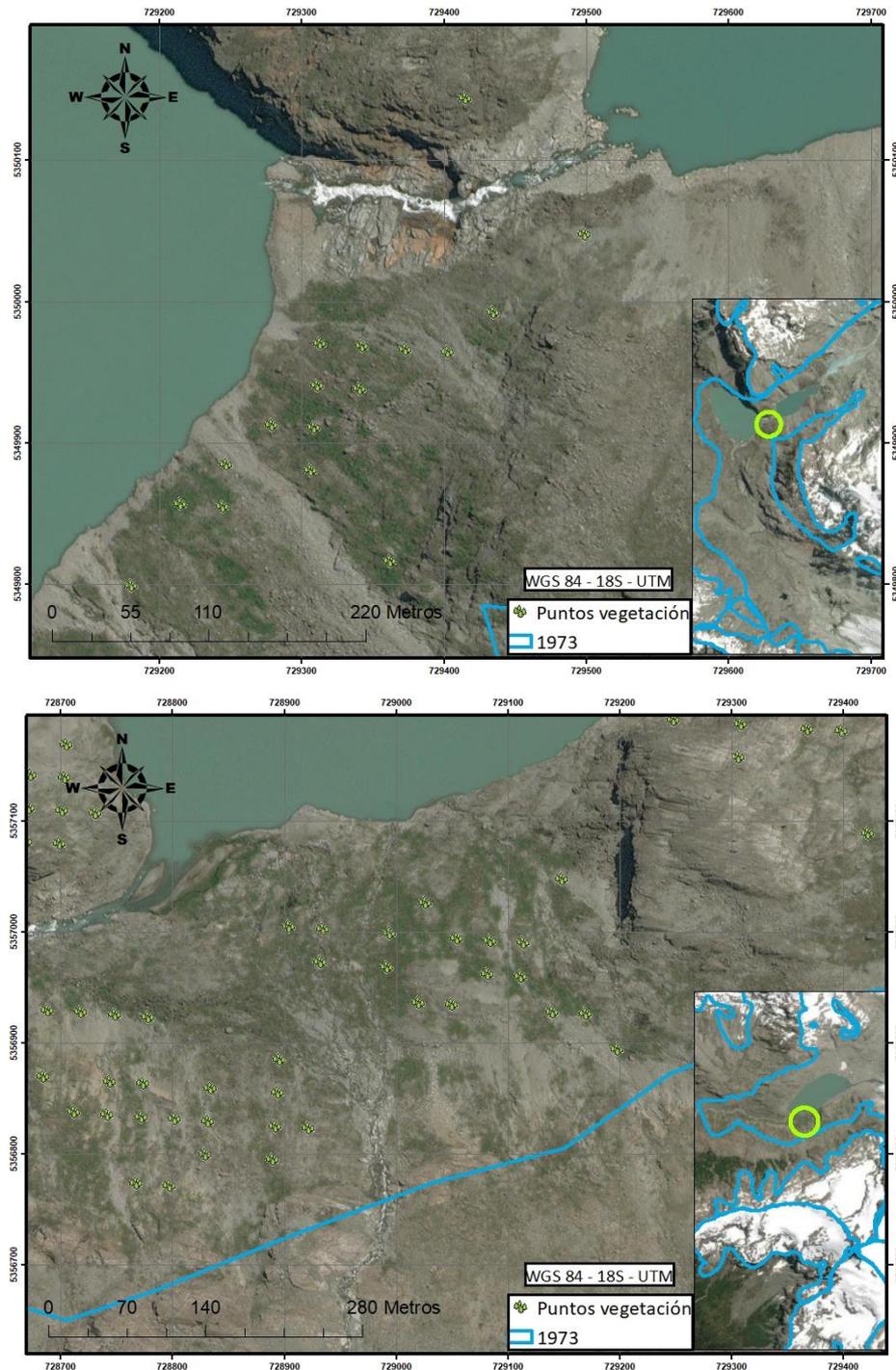
La metodología aplicada para el estudio de este fenómeno nos permitió en primer lugar, rectificar que efectivamente procesos de colonización vegetal ocurre en las zonas altas de cuencas al menos en el Parque Nacional Hornopirén, pero que también, abre la posibilidad de que este fenómeno esté ocurriendo en gran parte de Chiloé continental (o también llamada la Patagonia Verde), en zonas tales como Parque Nacional Pumalín, Parque Nacional Corcovado, o en otras cordilleras de la Provincia de Palena; debido a las características climáticas, topográficas y bióticas similares a Hornopirén.

La adición de los aspectos de terreno que fueron incluidos en trabajos como el de Lambert et al. (2020) si bien no pudieron establecer correlaciones claras con las tendencias de crecimiento, desde el aspecto descriptivo se pudo notar la concentración de estos puntos a zonas de radiación solar media a alta (dentro del rango de la muestra del DEM), además de la concentración de valores medios-bajos de ITH. Estos factores son incidentes al momento de ir a terreno y corroborar las especies que estén presente en estos puntos, ya que si bien, pueden no estar acordes a los requerimientos fisiológicos de su especie, se añade a la discusión que estas comunidades, tipo forestal o piso vegetacional, según se pueda corroborar, se esté adaptando a estas condiciones como respuesta de este ecosistema a los impactos del cambio climático.

Por otra parte, si bien Mann Kendall es una herramienta para la detección de zonas con mayor tendencia, en este caso no responde de forma idónea para analizar tramos de bajo crecimiento, leve crecimiento, o alto crecimiento vegetal. Se debe considerar que la colonización primaria también involucra aspectos como formación de suelos los cuales, para zonas deglaciadas de Patagonia, involucra procesos que se han desarrollado sobre roca descubierta o sobre depósitos fluviales, glaciales o volcánicos (considerar la cercanía del Volcán Yates) recientes; lo que, por ende, esta sería una zona con suelos muy jóvenes en términos edáficos (Pfeiffer et al., 2010); por lo que para analizar cambios por tramos, se sugeriría realizar este mismo test pero bajo periodos de tiempo más acotados o utilizar otro test estadístico analizando tendencias directas de NDVI.

En contraste a lo explicado anteriormente, este test visualmente mostró resultados acordes en base a lo mostrados en las figuras 22 y 23 donde se compara con valores brutos promedios de NDVI de los puntos en zonas deglaciadas, visualizando una notoria alza de los valores hasta llegar a cifras cercanas a 0.4; lo que sería de gran interés hasta que fase de crecimiento vegetal (dependiendo de la especie) este test detectó para la escala temporal trabajada. De todas formas, los descubrimientos expuestos en este trabajo refuerzan el hecho que Mann-Kendall detecta tendencias de crecimiento o decrecimiento de vegetación (De Beurs & Henebry, 2005) y que en particular para el índice NDVI, también ha mostrado resultados significativos como en Han et al., (2013), y Das (2021).

Figura 29: Vistas a distintas resoluciones de puntos filtrados de test Mann Kendall sobre zonas vegetadas (mapa base de ArcGis como imagen de referencia)



Fuente: Elaboración propia, imagen provista por Esri (2022).

Por otra parte, la descripción a mayor detalle sobre la vegetación que estaría colonizando estas zonas hacen estrictamente necesario que a esta metodología, se le agregaran trabajos de campo para en primer lugar, corroborar in situ las zonas donde efectivamente creció vegetación. En segundo lugar, herramientas como imágenes desde vehículos aéreos no tripulados, estudios de dendrocronología y registros de guías locales o antiguos visitantes de la zona, sería una fuente

de información valiosa no solo para caracterizar el ecosistema de este lugar, si no para realizar una reconstrucción climática y también glaciológica de la zona, y así poder también identificar porqué estos glaciares retrocedieron tan bruscamente en el lapso de tiempo estudiado, sumado a la evolución misma de este ecosistema que va avanzando a lo largo del valle, qué especies son las que están predominando en estas zonas, y que tipo de bosque se estará formando estas áreas.

Por otra parte, y sumado a lo descrito en el párrafo anterior, es necesario en la comprensión de cualquier ecosistema una observación como un todo, y entender que sus partes están íntimamente relacionadas entre sí (Di Salvo et al., 2009) lo que por ende, factores como tipos de suelos, velocidad de vientos, humedad relativa del aire, las formaciones y estructuras geológicas que componen estas montañas; deben ser considerados para un entendimiento íntegro de este ecosistema, para posteriormente construir un relato sobre lo que ha ocurrido durante los últimos años en estas inexploradas zonas de Hornopirén.

Este mismo relato es de vital importancia no sólo para aspectos académicos, ya que como esta zona no ha presentado muchos estudios recientes (en comparación a regiones cercanas al Mocho-Choshuenco, Campos de Hielo, o Cordillera de Darwin); los nuevos fenómenos naturales con ocurrencia producto del cambio climático tendrán que ser considerados dentro de la elaboración de planes de manejo de áreas protegidas, e instrumentos de planificación territorial. Este mismo trabajo es prueba que en zonas como Hornopirén, están ocurriendo procesos biofísicos a gran velocidad en zonas casi inexploradas en su totalidad, convirtiendo este lugar en un excelente laboratorio natural para las ciencias ambientales y las ciencias de la tierra.

Figura 30: Fotografía de zona frontal del glaciar “El Navegante” (sin fecha).



Fuente: Cisternas & Paredes (2020). Captura tomada por Rodrigo Condeza.

Bibliografía

- Alencar da Silva Alves, K., & Silva Nóbrega, R. (2017). *TENDENCIA PLUVIOMETRICA Y CONCENTRACIÓN ESTACIONAL DE PRECIPITACIÓN EN LA CUENCA HIDROGRÁFICA DEL RÍO MOXOTÓ – PERNAMCUCO – BRASIL*. *Revista Geográfica De América Central*, 1(58), 295 - 313. <https://doi.org/10.15359/rgac.58-1.12>
- Barcaza, G., Nussbaumer, S., Tapia, G., Valdés, J., García, J., Videla, Y., . . . Arias, V. (2017). *Glacier inventory and recent glacier variations in the Andes of Chile, South America*. *Annals of Glaciology*, 58(75pt2), 166-180. doi:10.1017/aog.2017.28.
- Beven, K.J. and Kirkby, M.J. (1979) *A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Basin Hydrology. Un modèle à base physique de zone d'appel variable de l'hydrologie du bassin versant*. *Hydrological Sciences Bulletin*, 24, 43-69.
- <http://dx.doi.org/10.1080/02626667909491834>
- Bravo Lechuga, C. (2014). *Condiciones climáticas y neoglaciación durante el holoceno medio en latitudes medias del hemisferio sur*. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/116407>
- Cisternas, J. (2016). *COLONIZACIÓN DE MORRENAS EN GLACIAR MOSCOS, REGIÓN DE AYSÉN, CHILE*. Universidad Austral de Chile: Tesis para optar al grado de magíster en ciencias. Disponible en <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2016/egc579c/doc/egc579c.pdf>
- Cisternas, S., & Paredes, P. (2020). *Glacier Variations for the Last Seven Decades in Response to the Climatic Trends, Northern Patagonia, Chile*. In *AGU Fall Meeting Abstracts (Vol. 2020, pp. C038-0015)*.
- CONAF. (1991). *Plan de manejo del Parque Nacional Hornopirén*. Corporación Nacional Forestal, Región de Los Lagos: Ministerio de Agricultura. Chile. 165 pp.
- CONAF-INFOR, . (1997). *Monografía de Lengua - Nothofagus pumilio*. Chile: Corporación Nacional Forestal
- CONAF. (2020). *Catastro de Recursos Vegetacionales, Región de Los Lagos. Sistema de Información Territorial CONAF: Ministerio de Agricultura*. Recuperado de <https://sit.conaf.cl>
- Di Salvo, A., Romero, N., & Briceño, J. (2009). *Estudio de los ecosistemas desde la perspectiva de la complejidad*. *Multiciencias*, 9(3), 242-248.
- Dollenz, Orlando & Henriquez, Juan & Domínguez, Erwin. (2011). *La vegetación de las geoformas proglaciares en los glaciares Balmaceda, Tyndall, Taraba y Ema, Magallanes, Chile*. *Anales del Instituto de la Patagonia*. 40. 7-17. 10.4067/S0718-686X2012000200001.
- Domínguez, Erwin & Pisano, Edmundo & Dollenz, Orlando. (1999). *COLONIZACIÓN VEGETAL EN EL ÁREA PERIGLACIAR DEL GLACIAR NUEVA ZELANDIA, CORDILLERA DARWIN DE TIERRA DEL FUEGO, CHILE.. Anales Instituto Patagonia, Serie Cs. Nat. (Chile)*. 27. 7-16.
- Donoso, Claudio & Lara, Antonio & Escobar, Bernardo & Premoli, Andrea & Souto, Cintia. (2004). *Fitzroya cupressoides (Molina) I.M. Johnst*. Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/259147676_Fitzroya_cupressoides_Molina_IM_Johnst
- ESRI. (2022). *Radiación solar de áreas (Spatial Analyst)*. *Herramientas de ArcGis Pro* Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/tool-reference/spatial-analyst/area-solar-radiation.html>

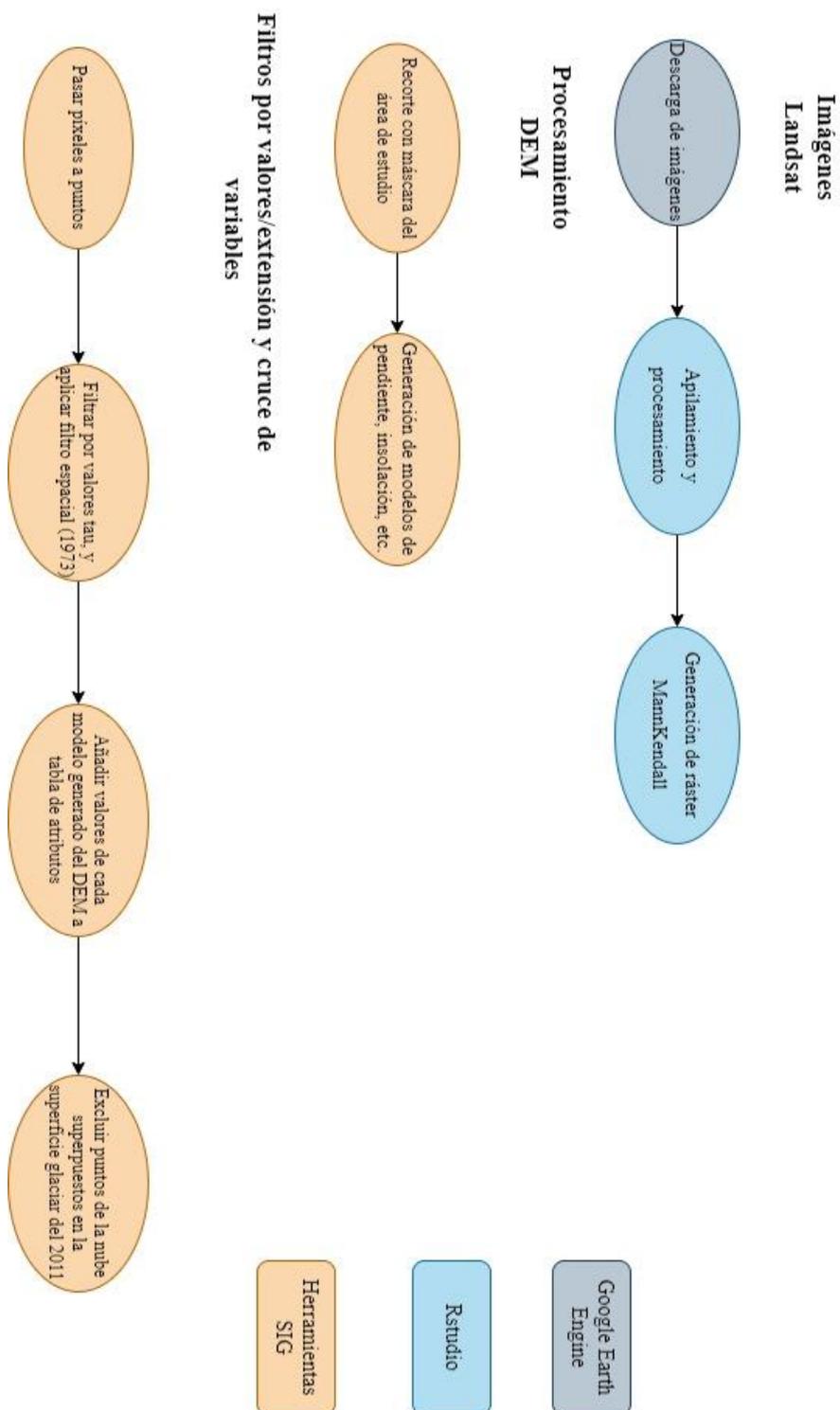
- ESRI. (2022). *Cómo funciona acumulación de flujo. Referencia de la herramienta* Recuperado de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.9/tool-reference/spatial-analyst/how-flow-accumulation-works.html>
- Farías-Barahona, D., S. Vivero, G. Casassa, M. Schaefer, F. Burger, T. Seehaus, P. Iribarren-Anaconda, F. Escobar & M. Braun 2019. “Geodetic Mass Balances and Area Changes of Echaurren Norte Glacier (Central Andes, Chile) between 1955 and 2015“. *Remote sensing* 11, 260, doi:10.3390/rs11030260
- Fischer, A., Fickert, T., Schwaizer, G., Patzelt, G., & Groß, G. (2019). *Vegetation dynamics in Alpine glacier forelands tackled from space. Scientific Reports*, 9(1), 1–13. <http://doi.org/10.1038/s41598-019-50273-2>.
- Gallay, Michal. (2013). GALLAY, M. (2013). *Section 2.1.4: Direct Acquisition of Data: Airborne laser scanning. In: Clarke, L.E & Nield, J.M. (Eds.) Geomorphological Techniques (Online Edition). British Society for Geomorphology; London, UK.*
- Garcia Gonzales, Erick & Llellish, Miguel. (2011). *Estimación espacial de la evapotranspiración usando imágenes de satélite Landsat y el modelo SEBAL en el humedal Paraíso, Huacho Spatial estimation of evapotranspiration by Landsat satellite images and the SEBAL model in the Paraíso wetland, Huacho. Revista Peruana Geo-atmosférica.* 73-81.
- Garreaud, Rene. (2009). *The Andes Climate and Weather. Adv. Geosci.* 22. 3-11. 10.5194/adgeo-22-3-2009.
- Goswami S, Gamon J, Vargas S, Tweedie C. 2015. *Relationships of NDVI, Biomass, and Leaf Area Index (LAI) for six key plant species in Barrow, Alaska. PeerJ PrePrints* 3:e913v1 <https://doi.org/10.7287/peerj.preprints.913v1>
- Ipinza, R., Barros, S., De la Maza, . C. L., Jofré, P., & González, J. (2021). *Bosques y Biodiversidad. Ciencia & Investigación Forestal*, 27(1), 101–132. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.2021.475>
- Kendall, M. G. (1975). *Rank correlation methods. Charles Griffin. Lon-don.* p.120.
- Kinnard C., P. Ginot, A. Surazakov, S. MacDonnell, L. Nicholson, N. Patris, A. Rabatel, A. Rivera, F. Squeo (2020): “*Mass Balance and Climate History of a High-Altitude Glacier, Desert Andes of Chile*”. *Front. Earth Sci.* <https://doi.org/10.3389/feart.2020.00040>
- Knoflach, B., Ramskogler, K., Talluto, M., Hofmeister, F., Haas, F., Heckmann, T., Pfeiffer, M., Piermattei, L., Ressler, C., Wimmer, M. H., Geitner, C., Erschbamer, B., & Stötter, J. (2021). *Modelling of Vegetation Dynamics from Satellite Time Series to Determine Proglacial Primary Succession in the Course of Global Warming—A Case Study in the Upper Martell Valley (Eastern Italian Alps). Remote Sensing*, 13(21), 4450. <https://doi.org/10.3390/rs13214450>.
- Körner, Christian. (2012). *Alpine Treelines: Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits.* 10.1007/978-3-0348-0396-0.
- Lambert CB, Resler LM, Shao Y, et al. (2020) *Vegetation change as related to terrain factors at two glacier forefronts, Glacier National Park, Montana, U.S.A.. Journal of Mountain Science* 17(1). <https://doi.org/10.1007/s11629-019-5603-8>
- Llambí, Luis & Melfo, Alejandra & Gamez, Luis & Pelayo, Roxibell & Cárdenas, Mariana & Rojas, Cherry & Torres, Jesús & Nerio, Ramírez & Hernandez, Jesus. (2021). *Vegetation Assembly, Adaptive Strategies and Positive Interactions During Primary Succession in the Forefield of the Last Venezuelan Glacier. Frontiers in Ecology and Evolution.* 9. 657755. 10.3389/fevo.2021.657755.
- Luebert F., Pliscoff P. (2004). *CLASIFICACIÓN DE PISOS DE VEGETACIÓN Y ANÁLISIS DE RE ECOLÓGICA DE Á LA PROTECCIÓN PRESENTATIVIDAD REAS PROPUESTAS PARA EN LA ECORREGIÓN. Chile: World Wildlife Fund.* 174 pp.

- Luebert, F., Pliscoff, P. (2017). *Catastro de Pisos Vegetacionales (shapefile)*. IDE Chile. Ministerio de Bienes Nacionales Recuperado de [Pisos vegetacionales de Luebert y Pliscoff 2017](#)
- Luebert, F., Pliscoff, P. (2019). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile (3rd ed.)*. Editorial Universitaria. <https://bookshelf.vitalsource.com/books/9789561126497>
- Mann, H. B. (1945). *Nonparametric tests against trend*. *Econometrica* 13, 245-259.
- Marshall GJ. 2003. *Trends in the Southern Annular Mode from observations and reanalyses*. *Journal of Climate*, 16: 4134–4143.
- Muñoz, F. (2020). *Guía técnica para caracterizar bosques adultos del tipo forestal Siempreverde degradados y de referencia en las regiones de Los Ríos y Los Lagos*. Chile: Universidad de Concepción. 16 pp.
- National Centers for Environmental Information. (2022). *Southern Oscillation Index (SOI)*. NCEP NOAA. National Oceanic Atmospheric Administration Recuperado de <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/soi>
- Paul, Frank & Mölg, Nico. (2014). *Hasty retreat of glaciers in Northern Patagonia from 1985 to 2011*. *Journal of Glaciology*. 60. 10.3189/2014JoG14J104.
- Pooley, F. (1993). *Características biogeográficas del bosque nativo Chileno y su clasificación*. *Historia y Geografía*, (10), 1-15. Recuperado de http://biblioteca-digital.ucsh.cl/greenstone/collect/revista1_old/index/assoc/HASH01ee/f3b9b05e.dir/Caracteristicas%20biogeograficas%20del%20bosque%20nativo%20chileno.pdf
- Pfeiffer, Marco & Mascayano, C. & Aburto, F.. (2010). *Soils of Chilean Patagonia in Glacial and Periglacial Environments*. *Eurasian Soil Science*. 43. 1430-1438. 10.1134/S106422931013003X.
- Promis, Alvaro, Cruz, Gustavo, Reif, Albert, & Gärtner, Stefanie. (2008). *NOTHOFAGUS BETULOIDES (MIRB.) OERST 1871 (FAGALES: NOTHOFAGACEAE) FORESTS IN SOUTHERN PATAGONIA AND TIERRA DEL FUEGO*. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 36(1), 53-68. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2008000100005>
- Reinthaler J.; Paul F.; Granados H.; Rivera A. & Huggel C. (2019) : “Area changes of glaciers on active volcanoes in Latin America between 1986 and 2015 observed from multi-temporal satellite imagery” *Journal of Glaciology*, doi.org/10.1017/jog.2019.30.
- Rivera, A. and F. Bown (2013) : “Recent glacier variations on active ice capped volcanoes in the Southern Volcanic Zone (37°-46°S), Chilean Andes” *Journal of South American Earth Sciences*, 45: 345-356.
- Rivera, A; Bravo, C. and G. Boub (2017) : “Climate Change and land ice” In: D. Richardson et al. (eds). *The International Encyclopedia of Geography*. Wiley, DOI: 10.1002/9781118786352.wbieg0538.
- Ruta de Los Parques de la Patagonia. (2018). *Parque Nacional Hornopirén*. . Fundación Rewilding Chile Recuperado de <https://www.rutadelosparques.org/parque-nacional-hornopiren/>
- Sanoff, C., Muller, M. (2010). *La Gestión del Agua, la Seguridad Hídrica y la Adaptación al Cambio Climático: Efectos Anticipados y Respuestas Esenciales*. TEC Background papers: Global Water Partnership Comité Técnico (TEC). Recuperado de <https://mirocan.org/public/documents/outils/uploaded/B3eojyno.pdf>
- Schlatter, J. (1994). *Requerimientos de sitio para la lenga, Nothofagus pumilio (Poepp. et Endl.) Krasser*. *BOSQUE*, 15(2), 3-10. doi:10.4206/bosque.1994.v15n2-01

- Scheiter, M., Schaefer, M., Flández, E., Bozkurt, D., and R. Greve 2021. “The 21st-century fate of the Mocho-Choshuenco ice cap in southern Chile”. *The Cryosphere*, 15, 3637–3654, <https://doi.org/10.5194/tc-15-3637-2021>.
- Segovia, A., Cassasa, G., Espinoza, A., Huenante, J., Buglio, S. (2022). DIRECCIÓN GENERAL DE AGUAS INVENTARIO PÚBLICO DE GLACIARES (IPG2022): Metodología, avances y resultados preliminares Título de la presentación [Presentación de conferencia SOCHICRI 2022].
- Sørensen, R., Zinko, U., and Seibert, J.: On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 10, 101–112, <https://doi.org/10.5194/hess-10-101-2006>, 2006.
- Tovar, C., Carril, A. F., Gutiérrez, A. G., Ahrends, A., Fita, L., Zaninelli, P., Flombaum, P., Abarzúa, A. M., Alarcón, D., Aschero, V., Báez, S., Barros, A., Carilla, J., Ferrero, M. E., Flantua, S. G., Gonzáles, P., Menéndez, C. G., Pérez-Escobar, O. A., Pauchard, A. ... Hollingsworth, P. M. (2022). Understanding climate change impacts on biome and plant distributions in the Andes: Challenges and opportunities. *Journal of Biogeography*, 00, 1–23. <https://doi.org/10.1111/jbi.14389>
- Valenzuela, J. (2022). Cambios observados en la cobertura vegetal del Parque Nacional Hornopirén en respuesta a la retracción de masas glaciares y el cambio climático, mediante el uso de sensores remotos y observaciones atmosféricas. Centro de Estudios Científicos (CECs): Informe de práctica profesional
- WGMS 2017. *Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015)*. Zemp, M., Nussbaumer, S. U., Gärtner-Roer, I., Huber, J., Machguth, H., Paul, F., and Hoelzle, M. (eds.), ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 244 pp., publication based on database version: doi:10.5904/wgms-fog-2017-10.

Anexos

Anexo 1: Diagrama de flujo de trabajo para elaboración de nubes de puntos finales.



Fuente: Elaboración propia. (2022)

Anexo 2: Repositorio de códigos usados para descarga y procesamiento de imágenes Landsat utilizadas para el trabajo.

<https://github.com/iamjoaquin/MEMORIA/tree/main>

Elaboración propia. (2022)