



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

RELACIÓN ENTRE VARIABLES CLIMÁTICAS, CRECIMIENTO DE *PILGERODENDRON
UVIFERUM* Y CAMBIOS FRONTALES DEL GLACIAR LUCÍA EN EL MARGEN
SEPTENTRIONAL DE CAMPOS DE HIELO SUR (48°14'16"S y 73° 8'39"O)

Memoria para optar al título de Geógrafa
DANIELA CATALINA PARDO NORAMBUENA

Profesor Guía: Dr. José Miguel Araos Espinoza
Profesor Co-Guía: Dr. Juan Carlos Aravena Donaire

SANTIAGO – CHILE
2023

*A mis amados mami, papi y mamá,
por ser la inspiración detrás de este logro.
Esta memoria de título es para ustedes.*

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mi profundo agradecimiento a mis mentores, familia, amigos y seres queridos, su apoyo y orientación fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación.

Comenzar mencionando al profesor Juan Carlos Aravena, en donde todo comenzó con un terreno hacia Torres del Paine y le pregunté ¿profe necesita practicantes? A lo que él me respondió: Sí. Gracias profe por haberme aceptado e integrado al Laboratorio de Dendrocronología de la Universidad de Magallanes y darme la inmensa oportunidad de aprender. Así como también por integrar esta memoria de título en el proyecto ANID/BASAL FB210018, denominado “Centro Internacional Cabo de Hornos para Estudios de Cambio Global y Conservación Biocultural (CHIC)”.

A Isabella Aguilera, por su gran apoyo con las bases de datos, su voluntad en ayudarme, y estar pendiente de cada duda que me surgía. También por compartirme los datos de las cronologías utilizadas en esta memoria de título, los cuales fueron proporcionadas en el marco del proyecto ANID-Subdirección de Capital Humano/Doctorado Nacional/2021-21212335.

Al profesor José Araos, por su orientación, acompañamiento, consejos y por siempre estar presente a lo largo de todo este proceso.

Al equipo del Laboratorio de Dendrocronología UMAG. A Christian Bringas y Catalina Fernández, por todo lo enseñado, el acompañamiento, la paciencia, tiempo y dedicación, motivación y buena onda.

A mis amigos Camila Miranda y Hernán Pezoa, por su linda amistad y hacer de la estadía en Punta Arenas un buen recuerdo.

A mis amigas, Ámbar, Sofía, Francisca, Maura e Isidora por siempre estar presente en cada momento de mi vida.

A Matías por su cariño y apoyo en todo este proceso, por recordarme siempre lo inteligente que soy.

A mi amada familia, fuente de amor y apoyo, deseo expresar mi más sincera gratitud. A mi mami Olga Norambuena, mi papi Sergio Pardo y mi mamá Semira Pardo, por ser los pilares que han guiado mi camino. A mis tíos, María Olga, Alicia, Paula, Sergio, y mi hermana Camila Pardo, por su preocupación y constante apoyo, por enseñarme, educarme, por estar siempre presente en cada momento de mi vida. Sin duda esta memoria es un reconocimiento a ellos por sus esfuerzos en darme educación y apoyarme en todo lo que hago. Gracias por ser mi refugio y por llenar mi vida de amor y afecto incondicional.

RESUMEN

La región austral de Chile se presenta como un laboratorio natural único para investigaciones paleoclimáticas. El aislamiento geográfico y la mínima intervención humana permiten estudiar los ecosistemas en un estado más prístino. En la zona austral de Chile, la falta de información en algunos lugares debido a la ausencia de estudios o registros instrumentales limita las reconstrucciones climáticas, sin embargo ofrece la oportunidad de generar nuevos datos. La recopilación y generación de datos en esta región proporcionan perspectivas valiosas sobre cómo los ecosistemas responden a variables clave, incluidas las tendencias actuales del cambio climático.

La investigación propuesta consistió en tener una primera aproximación sobre el comportamiento de *Pilgerodendron uviferum* en los bosques ubicados en el margen septentrional de Campos de Hielo Sur, y el glaciar Lucía ante las variaciones de temperatura y precipitación. Para ello, se utilizaron dos cronologías de *P. uviferum* las cuales se correlacionaron con las variables climáticas mencionadas con anterioridad, a través de datos de reanálisis (ERA5-land) y modelados (CRU-TS). Luego, para conocer los cambios frontales del glaciar Lucía se delimitó el cuerpo de hielo y se estimó su longitud. Adicionalmente, para conocer si el glaciar Lucía responde al clima, se correlacionaron sus tasas de retroceso frontal con la temperatura y precipitación.

Los resultados indicaron que las tendencias de crecimiento de *P. uviferum* de los sitios de muestreo QUETRU y LEAL son positivas en función del crecimiento de ancho de anillos desde el 1980 hasta el año 2021. Se observó que las cronologías tienen un comportamiento similar en su patrón de crecimiento, sin embargo, hay pequeñas diferencias en ciertos periodos. Adicionalmente, se estimó que el aumento de temperatura y de precipitaciones de dos años previos, favorecen en el aumento y grosor de ancho de anillos y por consiguiente, su crecimiento.

En lo que respecta al glaciar Lucía, se observó que sigue el comportamiento de la mayoría de los glaciares de Patagonia que se encuentran en retroceso. Las correlaciones con las variables climáticas indicaron que el aumento de temperatura es proporcional al aumento en la tasa de retroceso frontal, mientras que la disminución de precipitaciones desfavorece al glaciar.

Palabras claves: Variabilidad climática – dendrocronología – dendroclimatología – *Pilgerodendron uviferum* – Glaciar Lucía

ABSTRACT

The southern region of Chile presents itself as a unique natural laboratory for paleoclimatic research. The geographical isolation and minimal human intervention allow the study of ecosystems in a more pristine state. However, the lack of information in some areas due to the absence of studies or instrumental records limits climatic reconstructions but also provides an opportunity to generate new data. Data collection and generation in this region offer valuable insights into how ecosystems respond to key variables, including current trends in climate change.

The proposed research aimed to provide an initial understanding of the behavior of *Pilgerodendron uviferum* in forests located on the northern margin of Campos de Hielo Sur and the Lucia Glacier in response to temperature and precipitation variations. Two *P. uviferum* chronologies were correlated with climatic variables using reanalysis data (ERA5-land) and models (CRU-TS). Additionally, the glacier's frontal changes were assessed by delineating the ice body and estimating its length. Correlations between Lucia Glacier's frontal retreat rates and temperature and precipitation were examined to determine its climate responsiveness.

Results indicated positive growth trends in *P. uviferum* at the QUETRU and LEAL sampling sites, reflected in ring-width growth from 1980 to 2021. Although the chronologies exhibited similar growth patterns, slight differences were observed in specific periods. Furthermore, an increase in temperature and precipitation from the previous two years was found to favor ring-width and thickness growth, consequently promoting overall tree growth.

Regarding the Lucia Glacier, it displayed the retreat behavior typical of many Patagonian glaciers. Correlations with climatic variables revealed that temperature increase is proportional to the frontal retreat rate, while decreased precipitation adversely affects the glacier.

Keywords: Climatic variability – dendrochronology – dendroclimatology – *Pilgerodendron uviferum* – Lucía glacier

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN	9
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTADO DEL ASUNTO	11
1.2.1. Planteamiento del problema.....	11
1.2.2. Estado del tema de investigación planteado.	12
1.2.2.1 Variabilidad climática en Patagonia	12
1.2.2.2. Variaciones glaciares recientes en Patagonia.....	13
1.2.2.3. Dendrocronología como <i>proxy</i> climático.....	14
1.2.2.4. Relación entre clima, anillos de crecimiento arbóreo y fluctuaciones glaciares.....	17
1.3 ÁREA DE ESTUDIO.....	19
1.3.1. Contexto climático	20
1.3.2. Contexto vegetacional.....	23
1.4 OBJETIVOS	24
1.4.1 Objetivo General.....	24
1.4.2 Objetivos Específicos	24
CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO.....	25
2.1 Dendrocronología.....	25
2.2. Dendroclimatología	26
2.3. Variaciones frontales del glaciar Lucía.....	27
2.4. Relaciones entre variables climáticas y cambios frontales del glaciar Lucía	30
CAPÍTULO 3: RESULTADOS	31
3.1. Dendrocronología.....	31
3.1.1 Cronología <i>Pilgerodendron uviferum</i> del sitio QUETRU	31
3.1.2. Cronología <i>Pilgerodendron uviferum</i> del sitio LEAL.....	33
3.2. Dendroclimatología	35
3.2.1. Correlación entre registros climáticos y cronología QUETRU	35
3.2.1.1. Temperatura.....	35
3.2.1.2 Precipitación	37
3.2.2. Correlación entre registros climáticos y cronología LEAL.....	38

3.2.2.1. Temperatura	38
3.2.2.2 Precipitación	39
3.3. Cambios frontales del glaciar Lucía.....	40
3.4. Relación entre variables climáticas y tasas de retroceso del glaciar Lucía	41
3.4.1. Relación entre temperatura y tasas de retroceso del glaciar Lucía.	42
3.4.2. Relación entre precipitación y tasas de retroceso del glaciar Lucía.	42
CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN	44
4.1 Tendencias de crecimiento de las cronologías de <i>Pilgerodendron uviferum</i> en los sitios QUETRU y LEAL.	44
4.2. Comparación de crecimiento arbóreo de <i>P. uviferum</i> con registros climáticos y forzantes climáticos de gran escala	46
4.2.1 Respuesta de anillos de crecimiento de <i>Pilgerodendron uviferum</i> a la temperatura.....	46
4.2.2 Respuesta de anillos de crecimiento de <i>Pilgerodendron uviferum</i> a la precipitación.....	47
4.2.3. Anillos de crecimiento de <i>Pilgerodendron uviferum</i> y forzantes climáticos de gran escala.	48
4.2.3.1. Relación entre Oscilación del Sur (ENSO) y cronologías QUETRU y LEAL	49
4.2.3.2. Relación entre Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y cronologías QUETRU y LEAL.....	50
4.2.3.3. Relación entre Modo Anular del Sur (SAM) y cronologías QUETRU y LEAL	51
4.3. Variabilidad climática y cambios frontales del glaciar Lucía	53
4.4. Relación entre clima, <i>Pilgerodendron uviferum</i> y glaciar Lucía	55
4.5. Limitantes de la investigación	56
4.5.1. Conjuntos de datos de reanálisis y modelados climáticos	56
4.5.2. Imágenes satelitales.....	56
5. Conclusiones	57
BIBLIOGRAFÍA.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de distribución de <i>Pilgerodendron uviferum</i> en Chile.	15
Figura 2. Línea temporal de investigaciones en donde se incorpora a <i>Pilgerodendron uviferum</i>	17
Figura 3. Localización del área de estudio	19
Figura 4. Localización estaciones Río Pascua Ante Junta Río Quetru y Lago O'Higgins con respecto a los sitios de muestreo y el glaciar Lucía	21
Figura 5. Valores de precipitación en las estaciones A. Río Pascua Ante Junta Río Quetru y B. Lago O'Higgins en Villa O'Higgins para el periodo 2003-2023.....	22
Figura 6. Valores de temperatura media en la estación A. Río Pascua Ante Junta Río Quetru y B. Lago O'Higgins en Villa O'Higgins para el periodo 2003-2023.....	22
Figura 7. Esquema metodológico utilizado en la memoria de título.....	25
Figura 8. Retroceso o avance (Δd) de un glaciar entre dos fechas	30
Figura 9. Cronología estándar del sitio QUETRU.....	32
Figura 10. Cronología truncada para las muestras del sitio QUETRU	33
Figura 11. Cronología estándar del sitio LEAL	34
Figura 12. Cronología truncada para las muestras del sitio LEAL.....	35
Figura 13. Relación entre la anomalía de la temperatura mínima y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de QUETRU de <i>P. uviferum</i>	36
Figura 14. Relación entre la anomalía de la temperatura media y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de QUETRU de <i>P. uviferum</i>	36
Figura 15. Relación entre la anomalía de la temperatura máxima y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de QUETRU de <i>P. uviferum</i>	37
Figura 16. Relación entre la anomalía de precipitación y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de QUETRU de <i>P. uviferum</i>	37
Figura 17. Relación entre la anomalía de la temperatura mínima y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de LEAL de <i>P. uviferum</i>	38
Figura 18. Relación entre la anomalía de la temperatura media y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de LEAL de <i>P. uviferum</i>	39
Figura 19. Relación entre la anomalía de la temperatura máxima y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de LEAL de <i>P. uviferum</i>	39
Figura 20. Relación entre la anomalía de precipitación y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de LEAL de <i>P. uviferum</i>	40

Figura 21. Cambios frontales del glaciar Lucía entre 1945 - 2021	40
Figura 22. Tasas de retroceso del glaciar Lucía entre los años 1945 - 2021	41
Figura 23. Relación entre tasas de retroceso frontal del glaciar Lucía y temperatura	42
Figura 24. Relación entre tasas de retroceso frontal del glaciar Lucía y precipitación.	43
Figura 25. Comparación de cronologías (truncadas) QUETRU y LEAL.	44
Figura 26. Correlación entre las cronologías QUETRU y LEAL.....	45
Figura 27. Relación entre Oscilación del Sur (ENSO) y <i>P. uviferum</i> del sitio QUETRU	49
Figura 28. Relación entre Oscilación del Sur (ENSO) y <i>P. uviferum</i> del sitio LEAL.....	50
Figura 29. Relación entre Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y <i>P. uviferum</i> del sitio QUETRU.....	51
Figura 30. Relación entre Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y <i>P. uviferum</i> del sitio LEAL	51
Figura 31. Relación entre Modo Anular del Sur (SAM) y <i>P. uviferum</i> del sitio QUETRU...	52
Figura 32. Relación entre Modo Anular del Sur (SAM) y <i>P. uviferum</i> del sitio LEAL	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Datos del glaciar Lucía.....	20
Tabla 2. Especificaciones de los sensores, satélites y resoluciones de las imágenes a trabajar según año.....	28
Tabla 3. Fórmula para el cálculo del NDSI según satélite	29
Tabla 4. Resultado COFECHA del sitio QUETRU.....	31
Tabla 5. Resultado COFECHA del sitio LEAL	34
Tabla 6. Largos máximos (km) del glaciar Lucía según año.....	41
Tabla 7. Áreas <i>km</i> ² del glaciar Lucía según año	53

CAPÍTULO 1. PRESENTACIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN.

La región austral de Chile representa un laboratorio natural único para realizar investigaciones paleoclimáticas debido a que es la única porción continental que intercepta los vientos del oeste del Hemisferio Sur (SWW, *Southern Westerly Winds*) lo que permite monitorear componentes clave del sistema climático. El clima de Patagonia está fuertemente condicionado por esos vientos, ya que controlan la cantidad y distribución de las precipitaciones (Garreaud et al., 2009). Adicionalmente, su aislamiento geográfico y la limitada intervención antrópica brinda la oportunidad de estudiar los ecosistemas en un estado más prístino.

Por lo tanto, la recopilación y la generación de datos en esta región puede ofrecer perspectivas invaluable sobre la manera en que los ecosistemas reaccionan ante variables cruciales, como las actuales tendencias del cambio climático. Los patrones de variación espacial y temporal en el clima del extremo sur de América del Sur pueden ser atribuidos en parte a la influencia de factores atmosféricos, topográficos y oceánicos (Roig & Villalba 2008).

Determinar el momento y la dirección de los cambios paleoclimáticos en las latitudes medias del sur es un requisito previo para comprender los mecanismos involucrados en la generación y propagación de cambios climáticos abruptos a escala hemisférica y global (Sagredo et al., 2011). Actualmente se está observando cómo se manifiestan con mayor intensidad los impactos que está generando el cambio climático en el sistema físico, natural y social, siendo estos los eventos meteorológicos extremos, las olas de calor más intensas, duraderas y frecuentes, los mega incendios, las sequías, el derretimiento de glaciares, entre otros.

En base a ello, esta investigación tiene la finalidad de describir la variabilidad climática en el margen septentrional de Campos de Hielo Sur (48°14'16"S y 73°8'39"O), a través del estudio de ancho de anillos de *Pilgerodendron uviferum*, y la respuesta del glaciar Lucía frente a estos cambios ambientales durante el periodo 1945 - 2021 AD. Dado que el comportamiento de los glaciares está controlado principalmente por las variaciones climáticas (Soteres, 2020) y la sensibilidad de los anillos de árboles responden a tales variaciones, se espera poder estudiar la interacción entre los tres componentes (clima, árboles y glaciar) y conocer su dinámica natural.

La presente memoria de título tiene como objetivo proporcionar nuevos datos para una región que ha sido escasamente explorada. Por un lado, se pretende incrementar la contribución dendrocronológica y dendroclimática de *Pilgerodendron uviferum*, así como comprender su respuesta a las variaciones climáticas en la zona. Por otra parte, se busca

realizar una primera aproximación al comportamiento del glaciar Lucía frente a las fluctuaciones de temperatura y precipitación.

Los alcances de la investigación en relación con el glaciar se limitarán exclusivamente a los cálculos de área y longitud. Esta restricción se justifica por el enfoque de estimar las variaciones en la extensión frontal del glaciar, con el propósito de comprender los cambios que experimenta en este aspecto. La intención subyacente es aportar información valiosa sobre una región poco estudiada, centrándose en aspectos clave que permitan una comprensión más profunda de *Pilgerodendron uviferum* y parte de la dinámica del glaciar Lucía. De este modo, se busca ser un aporte significativo para investigaciones futuras.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y ESTADO DEL ASUNTO.

1.2.1. Planteamiento del problema.

El planeta ha experimentado durante el Pleistoceno - Holoceno, fluctuaciones y cambios naturales de los patrones climáticos, en todas las escalas de tiempo. En una perspectiva de más largo plazo, y vinculado con las variaciones de temperatura, el clima de los últimos 800.000 años se ha caracterizado por la alternancia de fases de enfriamiento paulatino culminando en máximos glaciales y fases cálidas abruptas intercaladas, (Soteres, 2020) repercutiendo aquello en una transformación y variación recurrente del clima global.

Esta variabilidad climática responde, entre otras causas, a las modificaciones de parámetros de la órbita terrestre, tales como la excentricidad, oblicuidad del eje terrestre y precesión equinoccial (Rabassa, 2010). Producto de tales variaciones en el extremo sur de América del Sur, el Campo de hielo durante el Pleistoceno alcanzó su máxima extensión durante la última glaciación (Davies et al., 2020). Posteriormente, durante el Holoceno, los glaciares experimentaron avances y retrocesos que quedaron registrados en la geomorfología de los Andes Patagónicos (Mardones et al., 2011).

Las fluctuaciones glaciares de este Campo de Hielo crearon nuevas formas del relieve o destruyeron las ya existentes, en función de la dinámica glaciaria como respuesta a las variaciones climáticas. Así, los glaciares actúan como una de las fuerzas más poderosas que dan forma a nuestro paisaje local (Davies et al., 2020). Por su parte, el mapeo de estas geoformas resultantes es un método importante para estudiar el comportamiento de glaciares y campos de hielo en el pasado. Al mapear la distribución de los accidentes geográficos glaciares e investigar las relaciones espaciales entre diferentes formas de relieve glaciares, se puede reconstruir la extensión y determinar las dimensiones de antiguos cuerpos de hielo (Chandler, B.M.P., et al. 2018).

En ese sentido, en las investigaciones paleoclimáticas la geomorfología glacial viene a ser una herramienta para la reconstrucción y el estudio de la evolución climática en el pasado. De esta manera, se puede conocer cuáles son los mecanismos que controlan el clima y determinar cómo pueden variar en el tiempo (a escalas de miles de años) debido a la propia dinámica natural. Así también, es posible proyectar las posibles tendencias naturales a largo plazo de los cambios climáticos futuros. Por lo tanto, el análisis histórico de la variabilidad climática resulta fundamental para conocer su impacto a nivel multiescalar.

A escalas temporales menores, decadales y multianuales, los principales modos de variabilidad atmosférica en el hemisferio sur son la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO, *Pacific Decadal Oscillation*), Oscilación del Sur (ENSO, *El Niño-Southern Oscillation*), la Oscilación Antártica (AAO, *Antarctic Oscillation*) o también conocido como Modo Anular del Sur (SAM, *Southern Annular Mode*). Vale señalar que, si bien estos forzantes climáticos generan la alteración de las condiciones climáticas medias en el hemisferio sur, repercuten a escala global.

En la zona austral de Chile aún hay lugares que presentan vacíos o gaps de información, tanto por falta de estudios en la zona, o por la escasez de registros instrumentales, lo cual es una limitante para las reconstrucciones climáticas, pero a la vez brinda la oportunidad de generar nuevos datos, los que permiten establecer tendencias de la variabilidad del pasado, presente y futuro (García, et al. 2012). En función de lo anterior, para poder obtener datos con respecto a estos regímenes climáticos del pasado se utilizan diferentes indicadores que contienen una señal climática, la cual se calibra para obtener estimaciones cualitativas y cuantitativas de temperatura y precipitación, y eventualmente de otros factores ambientales (Bradley, 2015).

Tal es el caso de los anillos de crecimiento de los árboles, los que actúan como indicadores de las condiciones climáticas pasadas, contribuyendo a la reconstrucción de patrones climáticos y ayudando a comprender mejor la variabilidad climática a través del tiempo. Para llevar a cabo estudios dendroclimatológicos, es importante seleccionar especies arbóreas adecuadas con características que permitan una interpretación precisa de los anillos de crecimiento en relación con las condiciones climáticas. Así, el ciprés de las Guaytecas, científicamente conocido como *Pilgerodendron uviferum* es una especie importante en la dendroclimatología debido a su longevidad, la visibilidad de sus anillos de crecimiento anuales y su sensibilidad a las condiciones climáticas.

La presente memoria de título busca estudiar la relación entre la variabilidad climática, el ancho de anillos de *Pilgerodendron uviferum* y los cambios frontales del glaciar Lucía en la Región de Aysén. En función de la disponibilidad de datos y el horizonte temporal de la memoria, esta investigación pretende responder, a través de la convergencia de diferentes disciplinas tales como la dendrocronología, climatología y geomorfología glacial, si existe una relación entre los parámetros climáticos, arbóreos y el glaciar a estudiar, teniendo como premisa inicial que el aumento de temperatura favorece al crecimiento de *P. uviferum*, pero acelera el retroceso del glaciar Lucía.

La elección del área de estudio radica en que corresponde a una zona escasamente estudiada, pues en Patagonia septentrional aún existen vacíos espaciales y temporales en la reconstrucción del paisaje glaciar del Holoceno (Araos, 2016). En ese sentido, esta investigación busca aportar con la generación de nuevos datos. Por un lado, se busca ampliar la aplicación del estudio de las cronologías de *Pilgerodendron uviferum* que en la actualidad son una especie con un buen potencial dendroclimático que no ha sido lo suficientemente estudiada. Por otra parte, el glaciar Lucía es un cuerpo de hielo prácticamente inexplorado en materia investigativa.

1.2.2. Estado del tema de investigación planteado.

1.2.2.1. Variabilidad climática en Patagonia.

La Patagonia es una región extensa y diversa en el sur de América del Sur. Su área comprende desde los 35°S, hasta el extremo sur del continente en los 55°S (Fernández, 2012), incorporando las ligeras planicies y mesetas de Tierra del Fuego y la fracción más austral y distante de la Cordillera de los Andes, también conocida como Andes Fueguinos. La Patagonia occidental (chilena) es un angosto y complejo territorio que se extiende desde la costa del Pacífico hasta la cima de los Andes, alcanzando altitudes de alrededor de 1500 metros sobre el nivel del mar en estas latitudes (Garreaud et al., 2013).

De acuerdo con lo planteado por (Schneider and Gies, 2004), (Lara et al., 2005) y (Rasmussen et al., 2007), se destaca la relevancia intrínseca de la variabilidad climática en la Patagonia como un factor crucial que impulsa los cambios locales en la criósfera y la biósfera. Según Garreaud et al., (2009) las alteraciones en las precipitaciones y temperaturas vinculadas a la presencia de forzantes climáticos como la Oscilación del Sur, constituyen la principal fuente de variabilidad anual en la mayoría de las regiones de América del Sur. Además, aspectos de esta variabilidad climática en las latitudes medias y altas también encuentran explicación en el Modo Anular del Sur, con un índice que representa aproximadamente el 35% de la variabilidad total en la circulación atmosférica extratropical del Hemisferio Sur (Marshall, 2007 en Hadad, 2014).

En tal sentido, Villalba et al., (2003), evidenció un aumento de la temperatura en el período comprendido entre los años 1930 y 1990 en latitudes superiores a 46°S, mediante el uso de técnicas de reconstrucción climática basadas en anillos de árboles y datos de estaciones meteorológicas. Se observó que existe un incremento más pronunciado a medida que la latitud aumenta y que estas tendencias positivas en la temperatura se atribuyen principalmente a incrementos registrados en los meses de diciembre a febrero.

Por su parte, la precipitación en esta región se produce principalmente por perturbaciones incrustadas en el flujo occidental y está fuertemente modificada por los Andes australes (Garreaud et al., 2013). De manera más específica, Aravena & Luckman (2009), entre los 41° y 51°S encontraron una tendencia hacia la disminución de precipitaciones en Patagonia Central, mientras que Patagonia Austral (51°-53°S) no presentaría fluctuaciones importantes.

1.2.2.2. Variaciones glaciares recientes en Patagonia.

En los últimos 150 años, la tasa mundial de aceleración del retroceso de los glaciares ha sido ampliamente reconocida (Solomina et al., 2016), lo cual se evidencia también en el Campo de Hielo Patagónico Sur (CHS - *Southern Patagonian Icefield* - SPI). Los glaciares de los campos de hielo de la Patagonia norte y sur son predictores importantes de lo que se espera que ocurra en las próximas décadas en otras regiones glaciares de alta latitud, como la Península Antártica y el Ártico canadiense, que están experimentando el calentamiento más rápido del planeta (Mouginot & Rignot, 2015). Las condiciones

climáticas en el campo de hielo patagónico han afectado negativamente a todos los glaciares, con mayor o menor pérdida de hielo (Gari et al., 2018).

En el caso de Patagonia el incremento de las temperaturas ha tenido efectos reconocibles sobre la posición de la línea de nieve regional y, por ende, de la línea de equilibrio, forzando su elevación por más de 200 m durante los últimos 20 años en Patagonia, provocando una recesión generalizada de la mayoría de los glaciares patagónicos. (Rabassa, 2010). Un estudio elaborado por Rivera et al., (2000) señala que las variaciones recientes de los glaciares de Chile indican que hay un proceso de deglaciación en curso, el cual está afectando todo el país, con mayor énfasis en Patagonia desde el punto de vista del aporte en volumen equivalente en agua. Lo anterior se vincula con lo planteado por López et al., (2010) quienes determinaron que la mayoría de los glaciares de la Patagonia se han retirado, algunos de ellos de manera bastante dramática, durante la segunda parte del siglo XX.

El comportamiento de las masas de hielo se encuentra controlado por factores ambientales, climáticos y topográficos y responden también a aspectos más bien locales de cada sitio en el que se encuentren, influyendo esto sobre su balance de masa. La sensibilidad de los sistemas glaciares a las variaciones de temperatura y precipitación hacen de los mismos, importantes indicadores climáticos del pasado (Laugenie, 1982 en Mardones et al., 2011) debido a que registran información en su estructura interna y composición química, que refleja las condiciones ambientales en las cuales se formaron.

1.2.2.3. Dendrocronología como *proxy* climático.

En el estudio de los indicadores naturales de variaciones climáticas se han desarrollado y utilizado diversas fuentes *proxies* para inferir el clima del pasado y el comportamiento de los ecosistemas (sedimentos lacustres y marinos, análisis del polen, arrecifes coralinos, anillos de árboles, entre otros). De todos estos *proxies*, los anillos de crecimiento anual de especies arbóreas climáticamente sensitivas son una de las fuentes de mayor uso y confiabilidad para analizar el clima del pasado (Villanueva et al., 2011). Así, la dendrocronología según Gutiérrez (2009) se entiende como una disciplina científica dotada de un conjunto de principios, técnicas y métodos que permiten datar los anillos de crecimiento arbóreo, de resolución temporal anual, para fechar eventos y reconstruir condiciones ambientales pasadas.

En los árboles, la formación de anillos es muy sensible a las condiciones ambientales, de tal manera que es posible identificar la variabilidad climática y la composición de la atmósfera en periodos pasados, a través del registro de estos parámetros en los anillos ya formados (Castellano, 2017 en Fernández, 2021). Esto debido a que la temperatura y precipitación influyen directamente en las características físicas de los anillos (grosor y densidad). Así, el crecimiento de los anillos va a ser mayor cuando las condiciones climáticas sean más favorables. Debido a su gran aporte en estudios paleoambientales, la

dendrocronología ha dado paso al surgimiento de diferentes subcampos, tales como dendroecología, dendroglaciología, dendroclimatología, entre otras.

Una de las especies idóneas para realizar reconstrucciones climáticas y que aún ha sido poco explorado su potencial dendroclimático es *Pilgerodendron uviferum* (ciprés de las Guaytecas). *Pilgerodendron uviferum* (D.Don) Florín es una especie monoespecífica que se considera la conífera más austral del mundo, endémica del sur de Chile y Argentina. En Chile (figura 1) se distribuye desde la Región de los Ríos en los 40° latitud sur hasta la Región de Aysén y Magallanes, hasta los 55° latitud sur (Acuña, Díaz y González, 2012). *P. uviferum* crece en ambientes de turbera y depresiones con bajo escurrimiento, desde el nivel del mar hasta alturas de aproximadamente 800 metros (Roig, 1991).

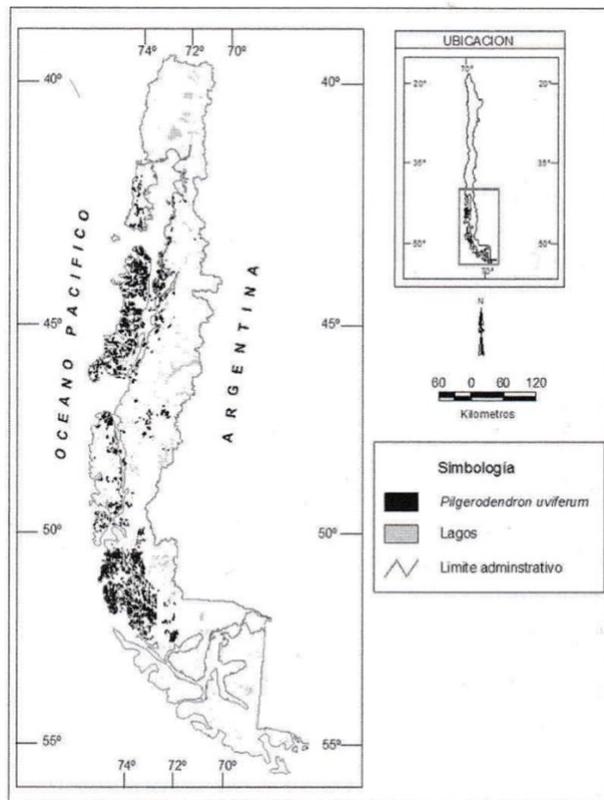


Figura 1. Mapa de distribución de *Pilgerodendron uviferum* en Chile. Fuente: Lara et al., 2013.

Se han llevado a cabo múltiples investigaciones que examinan los anillos de crecimiento de *Pilgerodendron uviferum*, analizando sus patrones de crecimiento en diversos contextos (figura 2). Roig (1991) utilizó cronologías de *P. uviferum* ubicadas en territorio chileno y argentino entre los 40° - 43°S con el fin de demostrar que es posible extraer información climática y ecológica de las cronologías de anchos de anillos derivadas de esta especie. Los principales resultados demostraron que la relación de la especie con el clima revela que aquellas cronologías ubicadas en el lado chileno están más relacionadas con las

precipitaciones estivales que con la temperatura y el comportamiento de las cronologías ubicadas en el lado argentino es inverso.

Posteriormente, Szeicz et al., (1997) utilizaron muestras de *Pilgerodendron uviferum* colectadas en sitios ubicados en el límite superior de los árboles (*treeline*) en áreas costeras de la Región de Aysén (45-46°S) con el fin de investigar las relaciones clima-crecimiento de los árboles en el bosque lluvioso patagónico norte del sur de Chile, produciendo así registros prolongados de anillos de árboles sensibles a la temperatura. La comparación de los registros de crecimiento radial con los datos climáticos de Puerto Aysén indicó que en el límite arbóreo *Pilgerodendron* demuestra una respuesta positiva significativa tanto a las temperaturas anualizadas como a las de finales del verano.

Luego, Aravena (2007) investigó la variabilidad climática en el sur de América del Sur (al sur de 40°S) durante los últimos 400 años utilizando datos instrumentales, anillos de árboles de *Pilgerodendron uviferum* y fluctuaciones de glaciares. Se obtuvo que las series de ancho de anillo están correlacionadas con la precipitación y adicionalmente, se desarrollaron dos reconstrucciones de lluvia regionales basadas en la correlación inversa entre el crecimiento radial de *Pilgerodendron* y la precipitación del noroeste y sur de la Patagonia.

Utilizando otro enfoque, Lara et al., (2008) emplearon registros de anillos de árboles de *Pilgerodendron uviferum* para reconstruir el caudal del río Puelo (Valdivia, Chile) en verano-otoño. Esta investigación constituye la primera de estas reconstrucciones desarrolladas en el dominio del Pacífico de América del Sur. En el mismo año, Bannister et al., estudiaron la estructura y dinámica de bosques de *Pilgerodendron uviferum* afectados por incendios en la Cordillera de la Costa de la Isla Grande de Chiloé.

Holz & Veblen (2012) desarrollaron registros históricos de incendios a través del estudio de anillos de árboles de *P. uviferum* y las cicatrices de incendios presentes en esta especie en el marco de los siniestros ocurridos en Patagonia occidental. Se examinó la sincronía en la actividad de los incendios para determinar el papel de la variabilidad climática regional en la promoción de los incendios, encontrándose con que hay un fuerte aumento en la actividad de los incendios forestales que coincide con las tendencias de calentamiento y sequía durante el siglo XX y con la variabilidad de la SAM. Se prevé que continúe en esta fase propicia para los incendios durante el siglo XXI.

En el año 2014, Guzmán et al., construyeron una cronología flotante de ancho de anillos de crecimiento, a partir de muestras de rodela de árboles muertos en pie de la especie *Pilgerodendron uviferum* colectadas en las cercanías del Lago Toro, en uno de los accesos al Parque Nacional Torres del Paine. Estimaron las edades absolutas de estos árboles conectando la referida cronología flotante, con cronologías de *P. uviferum* de edad conocida. Se pudo determinar que los árboles estudiados son contemporáneos y sugieren que la muerte del rodal se habría producido por incendios forestales recurrentes de baja intensidad lo que determinó una mortalidad paulatina que abarcó varias décadas en la segunda mitad del siglo XIX.

Holz et al., (2018) buscaron examinar si y cómo las respuestas del crecimiento radial de los árboles al clima han cambiado para las especies de coníferas más australes del mundo a lo largo de su distribución latitudinal, luego del rápido cambio climático en la segunda mitad del siglo XX. Se obtuvo como resultado que la respuesta de crecimiento radial del clima de *P. uviferum* fue muy variable en toda su distribución latitudinal. Hubo una asociación positiva a largo plazo entre el crecimiento radial y una mayor humedad en los bordes norte y sur de la distribución de esta especie y la relación opuesta para el centro de su distribución.

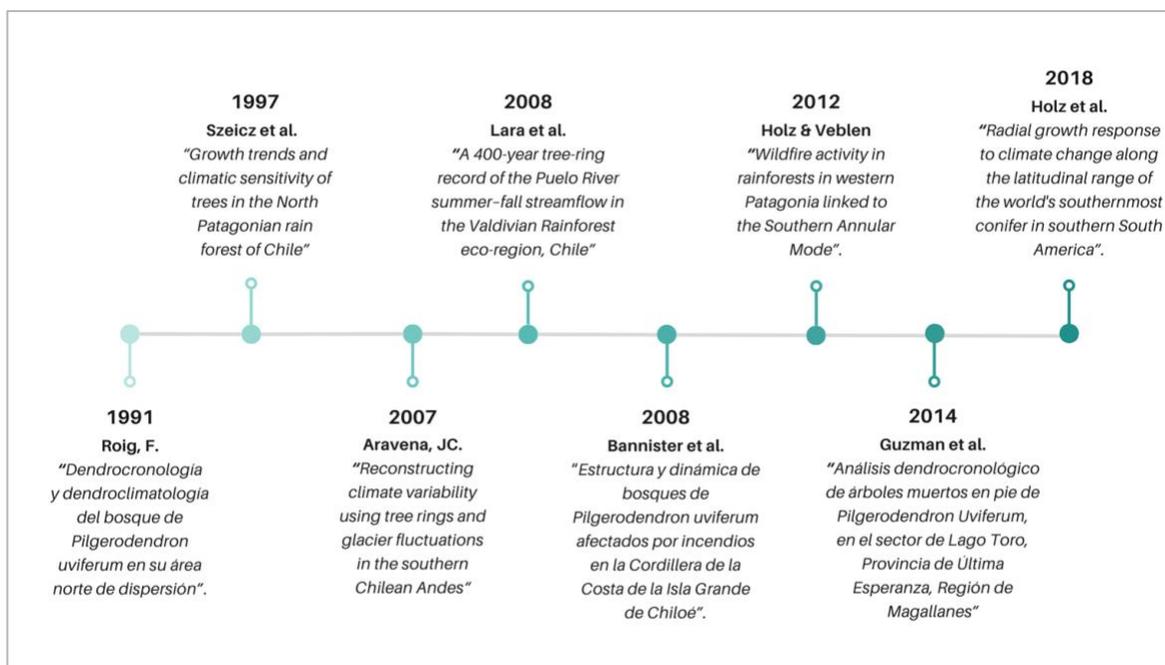


Figura 2. Línea temporal de investigaciones en donde se incorpora a *Pilgerodendron uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

1.2.2.4. Relación entre clima, anillos de crecimiento arbóreo y fluctuaciones glaciares.

Diversos investigadores han utilizado la dendrocronología para reconstruir el clima del pasado, para estudiar el comportamiento de los ecosistemas o para entender la dinámica glacial en función de las variaciones climáticas. Esto último debido a la relación indirecta entre glaciares y anillos de crecimiento arbóreo, dado por la respuesta que presentan ambos a la variabilidad climática. En un estudio realizado por Büntgen et al., (2016), se utilizó la dendrocronología para reconstruir las temperaturas de verano durante los últimos dos milenios y estimar la respuesta de los glaciares al cambio climático en los Alpes. El análisis de los árboles permitió elaborar una cronología de ancho de anillos y determinar la magnitud de los eventos glaciares pasados, lo que ayudó a comprender mejor la dinámica glacial y su relación con las variaciones climáticas.

Utilizando otro enfoque distinto al anterior, Reyes et al., (2006) elaboraron un estudio dendroglaciológico en base a árboles ubicados en las morrenas del glaciar *Kaskawulsh*, en

Canadá, para determinar la primera fecha calendario de un avance del glaciar, en la Pequeña Edad de Hielo en el noreste de las montañas de San Elías. Los resultados obtenidos en esta investigación señalaron que las fechas de los anillos de los árboles estudiados presentan una alta precisión temporal, en comparación con la mayoría de las estimaciones anteriores realizadas respecto a la actividad de los glaciares localizados en la zona de estudio.

Para comprender los cambios en la dinámica del glaciar Grey ubicado en Campos de Hielo Sur, Fernández (2021) utilizó dos cronologías de ancho de anillos de *Nothofagus pumilio* para correlacionar aquello con variables climáticas, con el fin de identificar el comportamiento o la respuesta del crecimiento radial de *Nothofagus pumilio* en áreas cercanas al glaciar. Los resultados de esta investigación demostraron que la respuesta de la especie al clima está fuertemente influenciada por los factores locales de los sitios de muestreo. Así también, se obtuvo que el aumento de las temperaturas máximas influye directamente en la disminución de la cobertura del glaciar.

Por su parte, en una investigación elaborada por Reynhout et al., (2022) enfocada en el estudio del paleoclima de la Isla Grande de Tierra del Fuego, que alberga una gran concentración de glaciares en la Cordillera Darwin, se utilizaron registros dendrocronológicos (ente otras técnicas de datación) con el fin de documentar la historia paleoglacial del glaciar Dalla Vedova. Los resultados indicaron que las técnicas dendrocronológicas empleadas brindan información sobre el ritmo de retroceso de los glaciares durante aproximadamente los dos últimos siglos, en donde las edades de los árboles estudiados presentan cierta correlación con dicho retroceso.

La incorporación de técnicas dendrocronológicas en esta investigación radica en la escasa disponibilidad de datos instrumentales en el área de estudio. Así, al utilizar las herramientas que proporciona esta disciplina se espera obtener una señal climática y estimar las variaciones de precipitación y temperatura en el área de estudio y conocer la respuesta del glaciar Lucía ante estos cambios ambientales. Debido a que la escala temporal de esta investigación es amplia, el aporte de la dendrocronología permitirá describir la variabilidad climática con una resolución anual para un periodo de 76 años.

1.3 ÁREA DE ESTUDIO.

El sector estudiado corresponde a una sección del margen norte del Campo de Hielo Sur (48°S, 73°O), área que comprende al glaciar Lucía y a un ecosistema boscoso de ciprés de las Guaytecas (*Pilgerodendron uviferum*) ubicado en la región de Aysén (figura 3). La elección del área de estudio radica en la escasez de investigaciones realizadas en la zona y por la valiosa información que pueden proporcionar los datos generados en esta investigación. Las cronologías de *Pilgerodendron uviferum* utilizadas constituyen a las primeras fechadas en la zona y con un amplio rango temporal. Adicionalmente, la cercanía de los bosques de *P. uviferum* al glaciar Lucía es un factor importante que motivó esta investigación ya que se encuentran a aproximadamente 30 kilómetros al sureste.

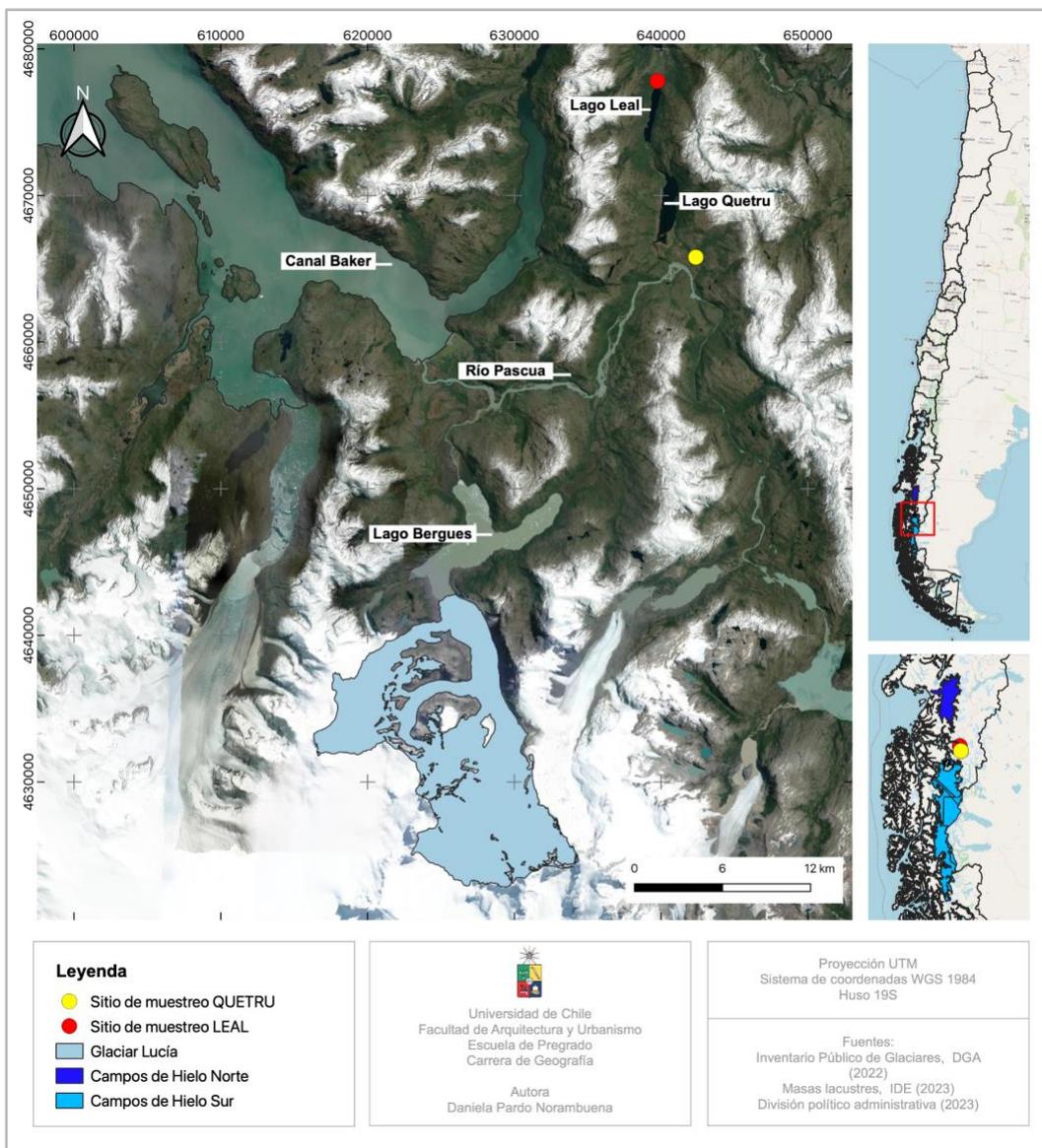


Figura 3. Localización del área de estudio. Se observa el glaciar Lucía y los sitios de muestreo QUETRU y LEAL. Fuente: Elaboración propia.

Por su parte, el glaciar Lucía actualmente corresponde a un cuerpo de hielo escasamente investigado y explorado. A través del Inventario Público de Glaciares (IPG) elaborado por la Unidad de Glaciología y Nieves (UGN) de la Dirección General de Aguas (DGA) se pudo recopilar información que caracteriza al glaciar. Vale señalar que los datos proporcionados por la entidad están actualizados hasta el año 2017. Como se observa en la tabla 1, dentro de las características del glaciar Lucía, se puede mencionar que es de tipo efluente y con una orientación norte, el cual drena hacia el Lago Bergues, y a su vez, este cuerpo de agua vierte sus aguas en el curso inferior del río Pascua.

Región	Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo
Provincia	Capitán Prat
Comuna	Tortel
Clasificación	Efluente
Área (km^2)	145,244
Perímetro	252,402
Orientación	Norte
Pendiente	14,125
Espesor	168,544
Volumen (km^3)	24,480
Equivalente en agua (km^3)	20,808

Tabla 1. Datos del glaciar Lucía. Fuente: Elaboración propia a partir del Inventario Público de Glaciares (IPG).

1.3.1. Contexto climático.

La Patagonia carece de una red meteorológica con suficiente densidad espacial y longitud de registros para describir adecuadamente la variabilidad y el cambio climático (Garreaud et al., 2013). Para demostrar lo anterior, se realizó una búsqueda de estaciones que se encontraran próximas al área de estudio (figura 4). En el explorador climático (<https://explorador.cr2.cl>, 2023) del Centro del Clima y la Resiliencia (CR2), se obtuvo la estación fluviométrica Río Pascua Ante Junta Río Quetru ($48^{\circ}15'92''S$, $70^{\circ}08'98''O$) y la estación meteorológica Lago O'Higgins en Villa O'Higgins ($48^{\circ}15'92''S$, $73^{\circ}08'89''O$) de la DGA.

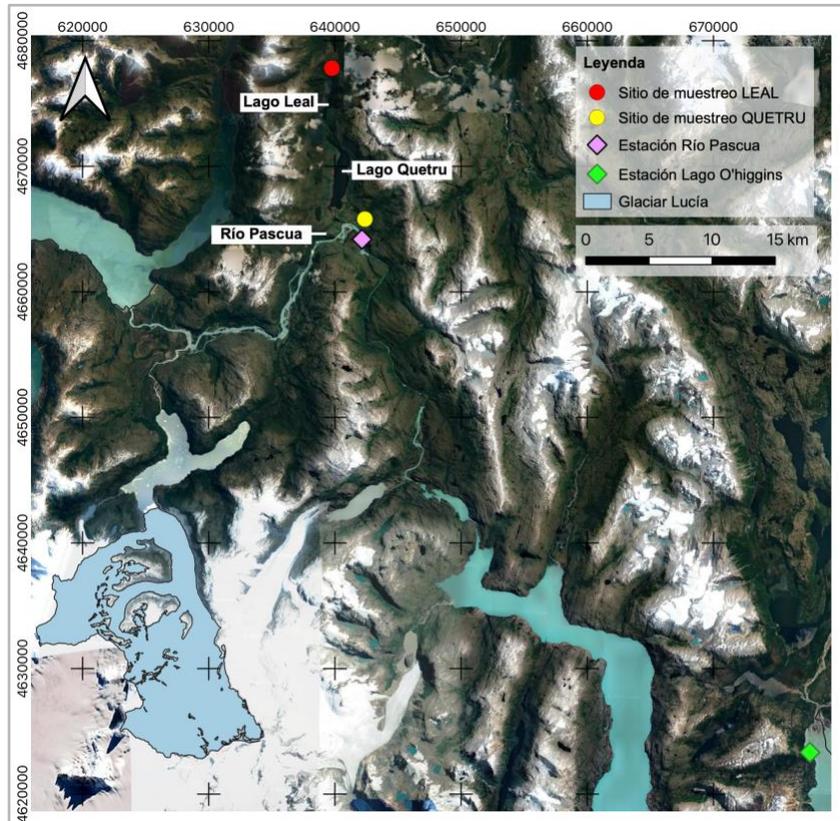


Figura 4. Localización estaciones Río Pascua Ante Junta Río Quetru y Lago O'Higgins con respecto a los sitios de muestreo y el glaciar Lucía. Fuente: Elaboración propia.

En la figura 5 se encuentran graficados los montos de precipitación registrados en las estaciones Río Pascua Ante Junta Río Quetru (figura 5 A) y Lago O'Higgins (figura 5 B) para el periodo 2003 - 2023. Como se puede observar, corresponden a datos que se encuentran registrados en un corto periodo (20 años) y hay años que presentan meses sin información. Para la temperatura (figura 6), hay aún más vacíos de información, habiendo ciertos intervalos de años que no cuentan con registros, como en el periodo 2007 - 2013 para Río Pascua Ante Río Quetru (figura 6 A) y 2008 - 2019 para la estación Lago O'Higgins (figura 6 B).



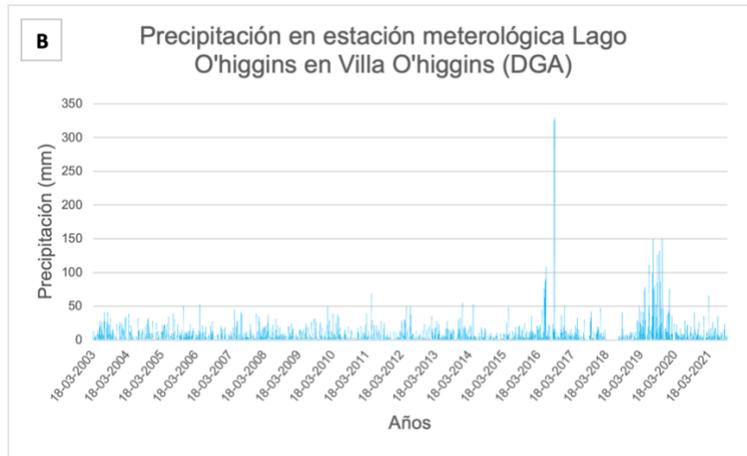


Figura 5. Valores de precipitación en las estaciones A. Río Pascua Ante Junta Rio Quetru y B. Lago O'Higgins en Villa O'Higgins para el periodo 2003-2023. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de CR2.

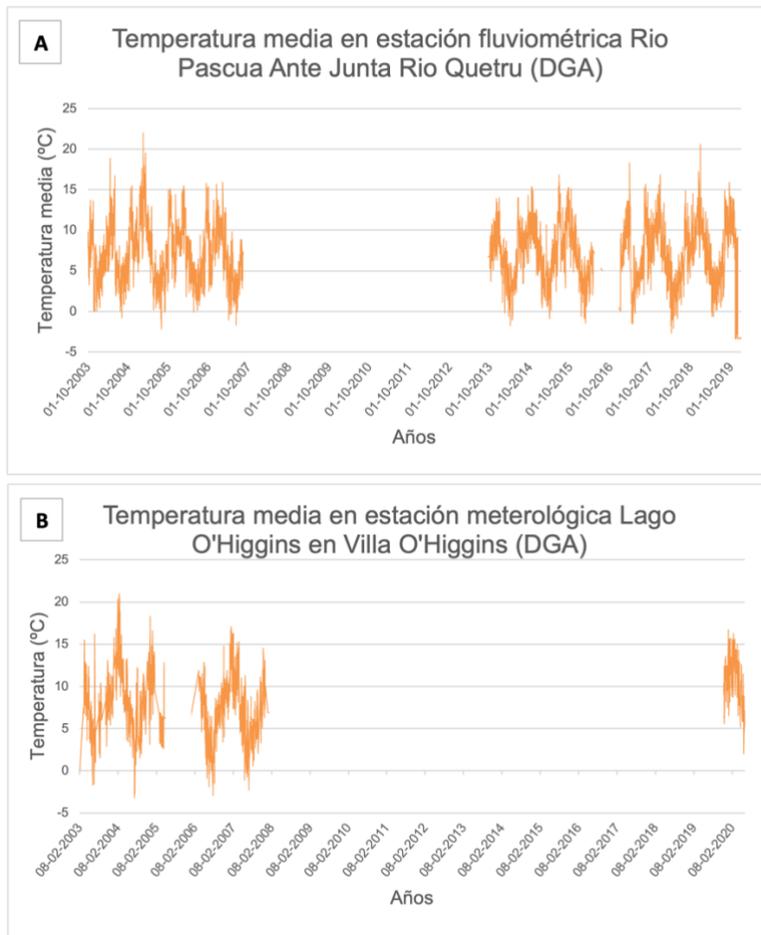


Figura 6. Valores de temperatura media en la estación A. Río Pascua Ante Junta Rio Quetru y B. Lago O'Higgins en Villa O'Higgins para el periodo 2003-2023. Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de CR2.

La región de Aysén se caracteriza por sus temperaturas bajas, vientos intensos y considerables montos de precipitación, los cuales experimentan cambios según el relieve y la influencia continental (BCN, sf.). Según la clasificación de Köppen, en el caso de Tortel, que es la comuna más cercana en donde se encuentra el área de estudio, se presenta un clima templado lluvioso (Cfc). Así también la proximidad de los campos de hielo al norte y sur de la comuna influyen considerablemente en los parámetros climáticos.

De este modo, el clima templado lluvioso frío (Cfc) corresponde a un clima templado frío, dado por las cercanías de las masas de nieve y con gran humedad, debido a la influencia oceánica. El verano es fresco a frío, con precipitaciones distribuidas homogéneamente que fluctúan alrededor de los 4.000 mm y 5.000 milímetros (Gastó et al., 1993). Por su parte, las temperaturas tienen una amplitud térmica diaria baja (Brockway, 1983).

1.3.2. Contexto vegetacional.

La vegetación del área está dominada por bosques siempreverdes, bosques deciduos y turberas (*Sphagnum spp*). Las especies que se encuentran aquí son representantes de la familia *Nothofagaceae* como *Nothofagus nítida*, *N. betuloides*, *N. pumilio*, *N. antártica*. También se distinguen *Pilgerodendron uviferum*, *Tepualia stipularis*, *Amomyrtus luma* y *Podocarpus nubigena*. Así también, entre los arbustos son abundantes las especies de *Lepidothamnus fonkii*, *Berberís microphylla* y diversas especies de *Escallonia*. En las zonas xéricas dominan arbustos como *Gaultheria mucronata*, *Colletia hystrix* y *Mulinum spinosum* (Reiche 1907, Gajardo 1994, Luebert y Pliscoff 2006 en Rodríguez et al., 2008).

Por su parte, las muestras de ciprés analizadas en esta investigación se recolectaron en dos sitios, los cuales se ubican en las proximidades del lago Quetru y lago Leal respectivamente, a 30 kilómetros del glaciar Lucía aproximadamente. Ambos lagos se localizan en la provincia de Capitán Prat, en la región de Aysén y corresponden a cuerpos de agua de tipo superficial. El lago Leal se encuentra ubicado a 7 kilómetros del lago Quetru y este último es afluente del río Pascua, ubicado en la cuenca de nombre homónimo de este último, por la que drena el lago O'Higgins.

1.4 OBJETIVOS.

1.4.1 Objetivo General.

Determinar la relación entre las variables climáticas, el ancho de anillos de *Pilgerodendron uviferum* y los cambios frontales del glaciar Lucía en el margen septentrional de Campos de Hielo Sur (48°14'16"S y 73° 8'39"O) durante el periodo 1945 - 2021 AD.

1.4.2 Objetivos Específicos.

1. Identificar la señal climática de dos cronologías de *Pilgerodendron uviferum*, mediante la comparación de crecimiento arbóreo con los registros de temperatura y precipitación obtenidos a partir de datos grillados.
2. Estimar los cambios frontales del glaciar Lucía desde 1945 AD hasta 2021 AD, mediante el análisis de fotografías aéreas y el procesamiento de imágenes satelitales Landsat.
3. Determinar la relación entre los parámetros climáticos (temperatura y precipitación) y los cambios frontales del glaciar Lucía.

CAPÍTULO 2: MARCO METODOLÓGICO

La metodología utilizada se estructuró en función de cada objetivo específico. En la figura 7 se resume de manera gráfica.

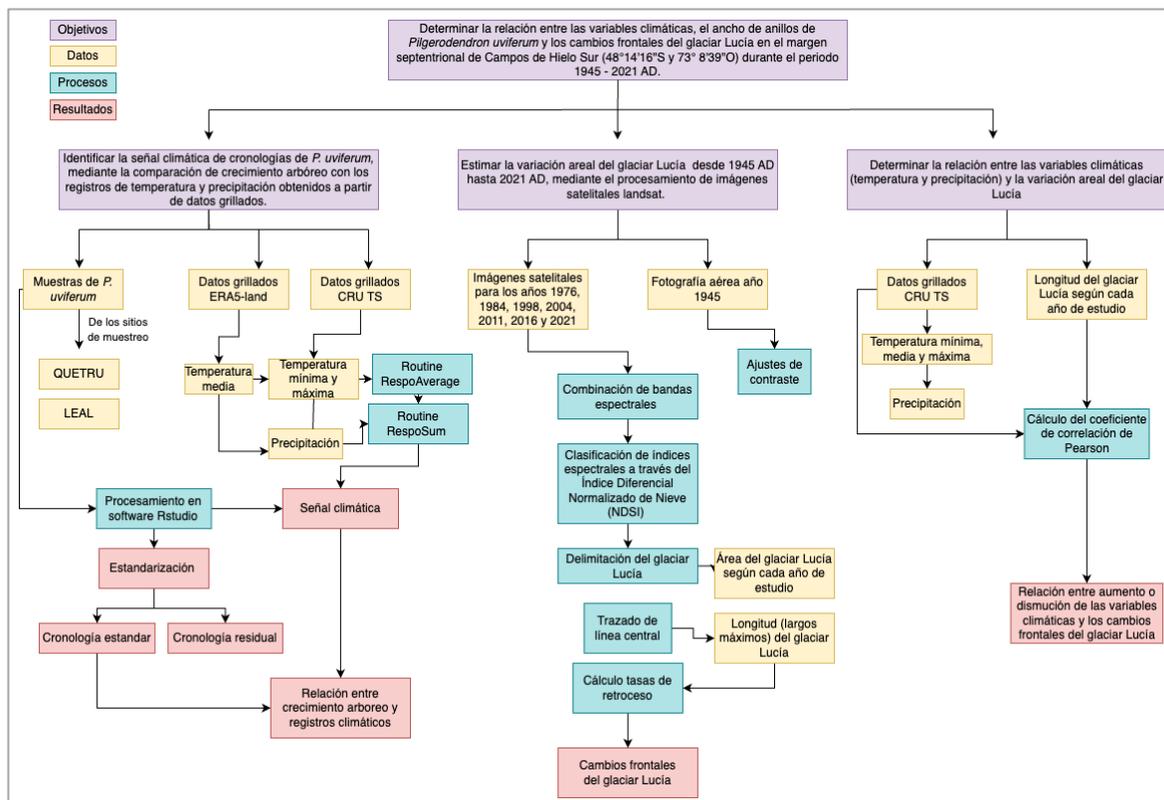


Figura 7. Esquema metodológico utilizado en la memoria de título. Fuente: Elaboración propia.

2.1. Dendrocronología.

La recolección de muestras y su posterior procesamiento se realizó en base a la metodología desarrollada por Stokes y Smiley (1968) y Fritts (1976). Esto consiste en lijar cada una de las muestras en una secuencia de lija más gruesa (grano 120) a más fina (grano 2000), para obtener una visibilidad óptima de la superficie a examinar e identificar mejor los anillos, facilitando así el cofchado visual para estimar la edad calendario inicial del árbol. Posteriormente, empleando una lupa estereoscópica *Nikon SMZ800* se marcaron y contaron los anillos de crecimiento hacia atrás, a partir del anillo más recientemente formado (de edad conocida) de manera que al llegar al último anillo se obtuvo la edad total del árbol.

Una vez obtenida la fecha inicial del árbol, se procedió a realizar la medición del ancho de los anillos con una precisión de 0,01 mm a través de un dendrómetro VELMEX. Las

mediciones se realizaron mediante el programa COFECHA (Holmes, 1983), que genera una cronología maestra a partir del promedio de las mediciones realizadas. Luego, la cronología resultante se trabajó estadísticamente en el programa R Studio, mediante el paquete de la librería del programa *Dendrochronology Program Library in R* (DpLR) (Bunn, 2008). El producto resultante consiste en una serie maestra y su respectiva estandarización.

Debido a que hay diversos factores que influyen tanto en el grosor como en la anatomía de los anchos de los anillos, se requiere atenuar el “ruido” producido por las variables mencionadas. Así, la estandarización consiste en ajustar la serie de crecimiento de cada árbol individual a una curva adecuada, de forma de remover los efectos producidos por la disminución del crecimiento del árbol con la edad o cambios en la geometría del árbol (Ruiz, 2020; Urrutia, 2002). En tal sentido, en esta investigación las cronologías QUETRU y LEAL fueron estandarizadas a través de tres métodos, los cuales fueron: curva exponencial negativa, *spline* y *mean*. Posteriormente, se compararon dichas estandarizaciones y se determinó cual es la que mejor se correlacionaba con las variables de temperatura y precipitación.

Además de las cronologías resultantes y las respectivas estandarizaciones que entrega *Dendrochronology Program Library in R*, se puede obtener la señal expresada de la población (EPS) la cual, en términos estadísticos, corresponde a una medida de confianza de señal común entre muestras (se puede expresar como una proporción de la varianza común a la varianza total de la cronología). Cuando esta alcanza un valor mayor a 0,85, significa que a partir de ese año la cronología posee fiabilidad, en otras palabras, desde ese año se considera adecuado reflejar una señal común de crecimiento (Wigley et al., 1984).

2.2. Dendroclimatología.

Debido a la falta de estaciones meteorológicas y a los gaps de información que presentan las existentes, se optó por utilizar datos de reanálisis y modelos estadísticos de temperatura y precipitación. Para la temperatura media y precipitación se utilizó ERA5-land, el cual corresponde a un conjunto de datos de reanálisis que proporciona una visión consistente de la evolución de las variables terrestres desde 1950 hasta la actualidad, con una resolución horizontal de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$ y una resolución nativa de 9 kilómetros.

Debido a que ERA5-land no incorpora los productos de temperaturas mínimas y máximas, se utilizaron modelos basados en observaciones de estaciones cercanas para conocer el comportamiento de estas variables. De este modo, se descargaron bases de datos provenientes de CRU TS versión 4.04. Estos conjuntos de datos de series temporales (TS) son variaciones mensuales del clima durante el último siglo, según lo producido por la Unidad de Investigación Climática (CRU) de la Universidad de East Anglia. Estos se calculan en cuadrículas de alta resolución ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$), que se basan en un archivo de

temperaturas medias mensuales proporcionado por más de 4.000 estaciones meteorológicas distribuidas por todo el mundo (Harris, 2019).

Ambas bases de datos fueron obtenidas a través de *KNMI Climate Explorer*, (<https://climexp.knmi.nl/>, 2023) la cual es una aplicación web para analizar datos climáticos estadísticamente. Posteriormente, se delimitó el cuadrante -48° -72° S que corresponde a las coordenadas del área de estudio y se utilizó el rango de datos correspondientes al periodo 1950 – 2021.

Una vez recopilados los datos climáticos, se procedió a trabajar con funciones de correlación entre las cronologías estándar y las anomalías mensuales de temperatura y precipitación de los datos grillados. Así, a través de las matrices *Routine RespoAverage* y *Routine RespoSum*, elaboradas por Masiokas (2005) se logró identificar las variables climáticas que tenían una mayor correlación con respecto a las cronologías estándar. Con esta herramienta fue posible analizar los datos en un rango temporal de 41 meses seleccionando el conjunto de datos en periodos móviles de 1 a 12 meses, comenzando en enero del segundo año calendario anterior (t-2) y terminando en mayo del año dendrocronológico actual para el hemisferio sur (t+1), por lo tanto, permiten considerar todas las combinaciones de meses posibles con un desfase de hasta 2 años.

Para estudiar la relación entre el crecimiento arbóreo y la temperatura, se utilizó la matriz *Routine RespoAverage*, que considera los datos mensuales de esta variable correspondiente a cada año y realiza el cálculo del promedio para las diferentes combinaciones de meses. Así, utilizando el coeficiente de Pearson como índice de correlación, se compararon los valores obtenidos con las cronologías de ancho de anillos y se escogieron las combinaciones de meses que presentaron los mejores coeficientes de correlación.

Por su parte, para relacionar el crecimiento del ciprés con la precipitación, se utilizó la herramienta *Routine RespoSum*. En ese paso metodológico se consideraron los datos mensuales de precipitaciones correspondientes a cada año y se calculó la sumatoria para las diferentes combinaciones de meses. Y al igual que en el caso de las temperaturas, en base al coeficiente de correlación de Pearson se escogieron aquellas combinaciones de meses que presentaron los mejores valores.

2.3. Variaciones frontales del glaciar Lucía.

La estimación de las variaciones frontales del glaciar Lucía se desarrolló en gran parte mediante el procesamiento y análisis de imágenes satelitales y fointerpretación. La primera imagen que se utilizó corresponde a una foto aérea del vuelo TRIMETROGON capturada en el verano de 1944-1945. La imagen se obtuvo a través del sitio web del Laboratorio de Glaciología (<https://glaciologia.cl/glaciares/zona-austral/glaciar-santa-lucia/>, 2023). Vale señalar que la imagen no se georreferenció y a través de ajustes de contraste,

se pudo estimar la posición relativa del glaciar para ese año visualizando las relaciones topográficas.

Las demás imágenes utilizadas en la investigación fueron obtenidas desde la plataforma USGS *Earth Explorer* del Servicio Geológico de Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>, 2023). En cuanto a la resolución temporal, inicialmente se estableció trabajar con imágenes que tuvieran fechas de capturas de a lo menos 5 años de diferencia entre ellas. No obstante, debido a la disponibilidad de datos que cumplieran con los criterios de selección, esto no se pudo realizar.

Además de la resolución temporal, otro criterio de selección correspondió a ciertos requisitos atmosféricos, ya que la presencia de nubes y otros fenómenos atmosféricos puede afectar la calidad de las imágenes. En tal sentido, se utilizó de referencia la temporada de captura, por lo que se seleccionaron imágenes obtenidas en el periodo estival (diciembre, enero, febrero y marzo), para evitar al máximo la presencia de cobertura nubosa y así delimitar el glaciar. De este modo, los años analizados corresponden a 1945, 1976, 1984, 1998, 2004, 2011, 2016 y 2021.

El detalle de cada imagen procesada se encuentra en la tabla 2 adjunta a continuación. Por su parte, el programa utilizado para el procesamiento de las imágenes y combinación de bandas espectrales fue Arcgis © desktop versión 10.8.

Fecha de imagen	Sensor	Satélite	Resolución espacial	Resolución espectral
25-02-1976	MSS (<i>Multispectral scanner</i>)	Landsat 1	80 metros	entre 0,6 a 1,1 μm
26-12-1984	TM (<i>Thematic Mapper</i>)	Landsat 5	30 metros	entre 0,45 y 2,35 μm
21-04-1998				
08-02-2004				
20-02-2011				
08-01-2016	OLI (<i>Operational Land Imager</i>)	Landsat 8	30 metros	entre 0,43 y 1,38 μm
30-01-2021				

Tabla 2. Especificaciones de los sensores, satélites y resoluciones de las imágenes a trabajar según año. Fuente: Elaboración propia en base a (Olave-Solar et al., 2008) y (Corrales, 2017).

Para diferenciar la capa de hielo y nieve del entorno circundante en las imágenes del satélite Landsat 5, se utilizó la combinación de banda RGB 3, 4 y 5 ya que corresponde a la mejor combinación para la distinción entre hielo y nieve (Tamouk, et al., 2013). Por su parte, en el caso de las imágenes capturadas por Landsat 8 se utilizó la combinación RGB (4, 3, 2) para resaltar la cobertura nival.

Se utilizaron combinaciones de bandas espectrales específicas para resaltar las características de estas superficies. Usando el canal rojo visible (banda 3) y dos de los canales infrarrojos, cercano (banda 4) y medio (banda 5), lo que permitió diferenciar la capa de hielo de nieve y del entorno circundante. Esto se debe a que la nieve y el hielo tienen

reflectancia espectral muy alta en el rojo visible y así también en las regiones de longitud de onda del infrarrojo cercano, y muy bajas reflectancia espectral en el infrarrojo medio.

Así también, para complementar el paso metodológico anterior, se utilizó una clasificación de índices espectrales, mediante el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), debido a su potencial para discriminar entre nieve, suelo, rocas y cobertura de nubes. Las bandas utilizadas según satélite para la aplicación de este índice se detallan en la tabla 3.

Satélite	Fórmula
Landsat 5 TM	$(B2 - B5) / (B2 + B5)$
Landsat 8 OLI	$(B3 - B6) / (B3 + B6)$

Tabla 3. Fórmula para el cálculo del NDSI según satélite. Fuente: Elaboración propia.

Se calcularon además las variaciones areales del glaciar (km^2) para obtener una referencia de la disminución de ellas en función de los años. Así, a través de una fotointerpretación se delimitó el glaciar Lucía para cada año de estudio.

Para obtener una aproximación de la delimitación de la cuenca glaciar, se utilizó como base el shape de Inventario de Glaciares (IPG 2022) elaborado por la Dirección General de Aguas (DGA). Adicionalmente, se utilizó el modelo de elevación digital (DEM) ALOS PALSAR obtenido desde *ASF Data Search* (<https://search.asf.alaska.edu/#/>, 2023).

Una vez montada la capa del modelo de elevación digital, se incorporaron las curvas de nivel, además de aplicar un sombreado (*hillshade*) para observar de mejor manera las laderas y divisorias de agua. De esta manera, se crearon polígonos en el software Arcgis © y se digitalizaron de forma manual. Las áreas de cada polígono se obtuvieron a través de la calculadora de campo del programa utilizado.

Luego, para estimar el retroceso frontal del glaciar Lucía, se utilizó la metodología propuesta por (Francou & Pouyaud, 2004), la que consiste en trazar dos segmentos paralelos tocando los puntos extremos del glaciar, de dirección perpendicular al eje principal del glaciar y medir la distancia (Δd) que separa esos segmentos (figura 8). Para ello se utilizaron los polígonos anteriormente creados y se calcularon las longitudes en metros.

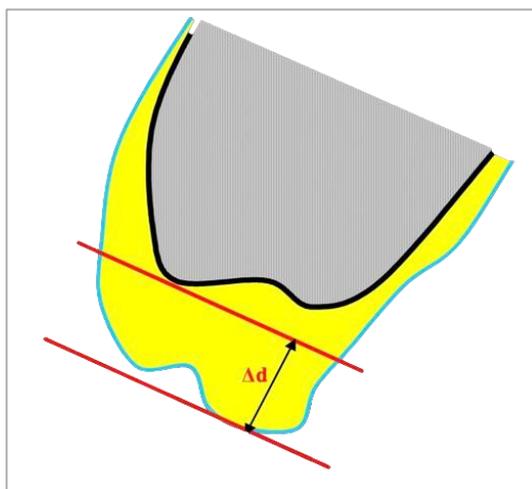


Figura 8. Retroceso o avance (Δd) de un glaciar entre dos fechas. Fuente: (Francou & Pouyaud, 2004).

Posteriormente, se procedió a calcular las tasas de retroceso frontal del cuerpo de hielo, formulando una ecuación de tal manera que se expresó la variación de distancia (Δd) dividido en el año final menos el año inicial del periodo.

$$\text{Tasa de retroceso para el periodo } t_2 - t_1 = \frac{\Delta d}{t_2 - t_1} \text{ m/año}$$

Donde:

Δd : Distancia (longitud) del glaciar entre dos años

t_2 : Año final del periodo

t_1 : Año inicial del periodo

2.4. Relaciones entre variables climáticas y cambios frontales del glaciar Lucía.

Para correlacionar las variables climáticas (temperatura y precipitación) con las tasas de retroceso del glaciar Lucía se recopilaron datos climáticos modelados basados en estaciones meteorológicas. De este modo, se utilizó el conjunto de datos provenientes de CRU TS versión 4.04 debido al rango temporal que presenta la base de datos (1901 – presente). Así, en base a la información disponible y para objetos de esta memoria de investigación, se consideraron datos correspondientes al periodo de 1945 – 2021. Por lo tanto, a través del índice de correlación de Pearson se determinó si existe o no una relación entre las variables estudiadas durante la escala temporal contemplada (76 años).

CAPÍTULO 3: RESULTADOS

3.1. Dendrocronología.

En este primer apartado, los archivos de mediciones de ancho de anillo corresponden a resultados previos obtenidos en el Laboratorio de Dendrocronología de la Universidad de Magallanes.

3.1.1 Cronología *Pilgerodendron uviferum* del sitio QUETRU.

En la tabla 4 se observa la cronología QUETRU elaborada por Bringas (2022), la que contiene un total de 22 muestras de *P. uviferum* y presenta un rango temporal de 558 años, comprendido entre 1464 y 2021. Así también, se observa una correlación de Pearson de 0,573, junto a una sensibilidad media de 0,278.

Número de datos	22
Serie maestra 1464 – 2021	558 años
Total anillos en toda la serie	8289
Total anillos fechados	8237
Intercorrelación	0,573
Sensibilidad media promedio	0,278
Segmentos con posibles problemas	0

Tabla 4. Resultado COFECHA del sitio QUETRU. Fuente: Elaboración propia a través de los datos proporcionados por el Laboratorio de Dendrocronología de la Universidad de Magallanes, 2023.

Posteriormente, tras analizar los resultados de las estandarizaciones realizadas a las cronologías y compararlas entre ellas, se obtuvo que para el sitio QUETRU la que mejor se ajusta a las variables climáticas a estudiar corresponde a la curva exponencial negativa. De este modo, en la figura 9 se visualiza la serie maestra QUETRU con la cronología estándar de índices de crecimiento arbóreo.

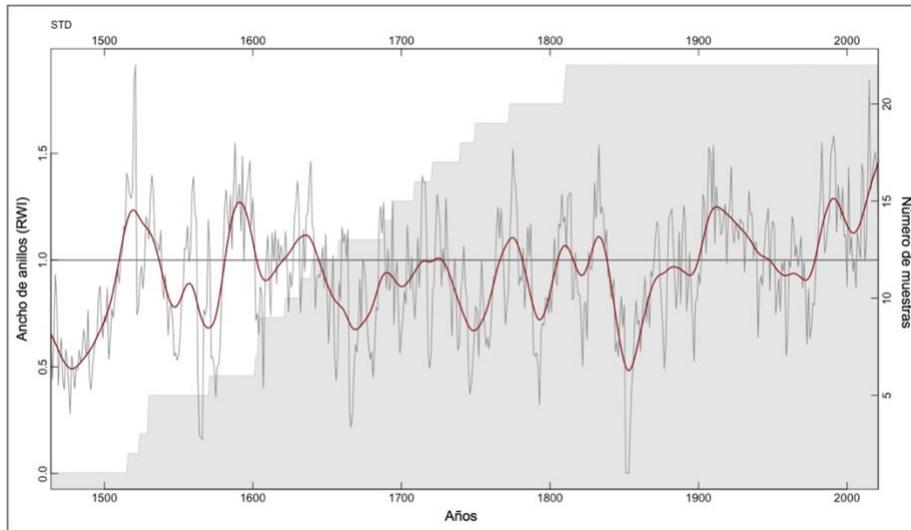


Figura 9. Cronología estándar del sitio QUETRU. En el eje Y izquierdo: índice de ancho de anillos, eje Y derecho: número total de muestras. En el eje X: años que abarca la cronología. Fuente: Elaboración propia.

La cronología estándar de índices de crecimiento arbóreo resultante contiene más de 5 muestras por año iniciando estas el año 1488. La figura 8 muestra que los valores del índice de crecimiento arbóreo han presentado un patrón de crecimiento variable, con fluctuaciones importantes desde el inicio y siguiendo una tendencia de crecimiento al final del periodo (2021).

Por su parte, para considerar desde qué año la cronología tiene una fuerte señal común, se utilizó la señal expresada de la población (EPS), la cual fue calculada a través de un rango de 50 años con una superposición de 25 años. De esta forma, la cronología QUETRU muestra que los valores mayores a 0,85 se presentaron a partir del año 1604. Esto se traduce en que desde dicho año la cronología tiene una buena estabilidad temporal y por lo tanto, es un periodo confiable con una fuerte señal de crecimiento común para los últimos 417 años.

En el gráfico superior de la figura 9 A, se encuentra la cronología estándar incluyendo la señal expresada por la población EPS (en gris los valores inferiores a 0,85), mientras que en la figura 9 B, se encuentra el corte de EPS >0,85 desde el año 1604, por lo tanto, en la parte inferior de la figura, se puede observar la serie maestra obtenida de las muestras de *Pilgerodendron uviferum*.

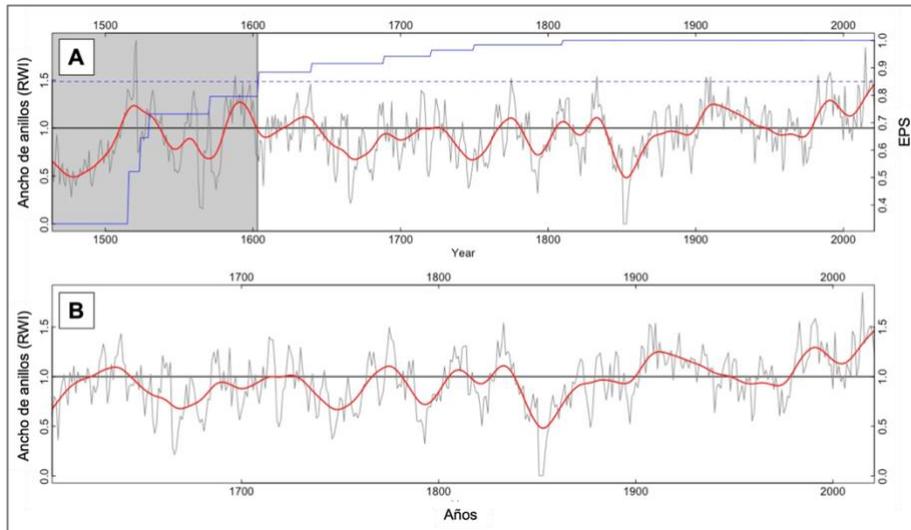


Figura 10. Cronología truncada para las muestras del sitio QUETRU. En el eje Y izquierdo el índice de ancho de anillos, en el eje Y derecho, la señal expresada por la población (EPS). En el eje X: años que abarca la cronología. Fuente: Elaboración propia.

De este modo, considerando que la cronología es confiable a partir del año 1604, es posible estimar que en general el ancho de anillos mantiene una tendencia bajo la media existiendo pequeños aumentos en ciertos períodos cercanos a 1780, 1810 y 1830. Ya desde el año 1900 se observa una tendencia al incremento en el índice de ancho de anillos, la cual disminuye nuevamente en 1930 para posteriormente volver a incrementar cerca del año 1980. Por su parte, desde el año 2007 se visualiza un claro aumento en el índice, lo cual se mantiene hasta el final del año del periodo a estudiar (2021).

3.1.2. Cronología *Pilgerodendron uviferum* del sitio LEAL.

En la tabla 5 se observan los datos de la cronología LEAL elaborada por Aravena (2007) y actualizada por Bringas (2022) en la cual se consideraron 77 muestras. Esta serie maestra posee un rango temporal de 585 años, abarcando desde 1437 a 2021 AD, con una intercorrelación entre las series determinada por un coeficiente de correlación de Pearson de 0,576 y una sensibilidad media de 0,244. En esta cronología se identificó un segmento con posibles problemas, sin embargo, esto corresponde a una baja correlación y no implica imprecisión en el resultado del cofechado.

Número de datos	77
Serie maestra 1437 – 2021	585 años
Total anillos en toda la serie	25952
Total anillos fechados	25915
Intercorrelación	0,576
Sensibilidad media promedio	0,240
Segmentos con posibles problemas	1

Tabla 5. Resultado COFECHA del sitio LEAL. Fuente: Elaboración propia a través de los datos proporcionados por el Laboratorio de Dendrocronología de la Universidad de Magallanes, 2023.

Para el sitio LEAL, la estandarización que mejor se ajustó correspondió a la curva exponencial negativa. Tal como se observa en la figura 11, la cronología estándar de índices de crecimiento arbóreo resultante contiene más de 20 muestras por año desde el origen, es decir, el año 1437. Los valores del índice de crecimiento arbóreo son variables y fluctúan mayormente por debajo de la media.

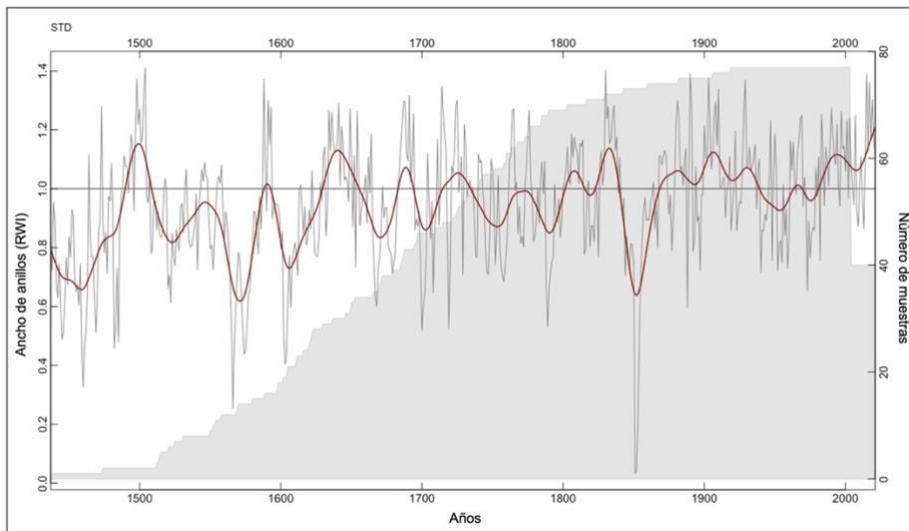


Figura 11. Cronología estándar del sitio LEAL. En el eje Y izquierdo: índice de ancho de anillos, eje Y derecho: número total de muestras. En el eje X: años que abarca la cronología. Fuente: Elaboración propia.

Para las muestras del sitio LEAL, la señal expresada por la población (EPS), permite estimar que a partir del año 1569, es decir, los últimos 452 años, existe una estabilidad temporal que expresa una fuerte señal para la cronología, con un valor de EPS sobre 0,85. En la figura 12 se observa la variabilidad del crecimiento radial del ciprés con intervalos cada 50 años.

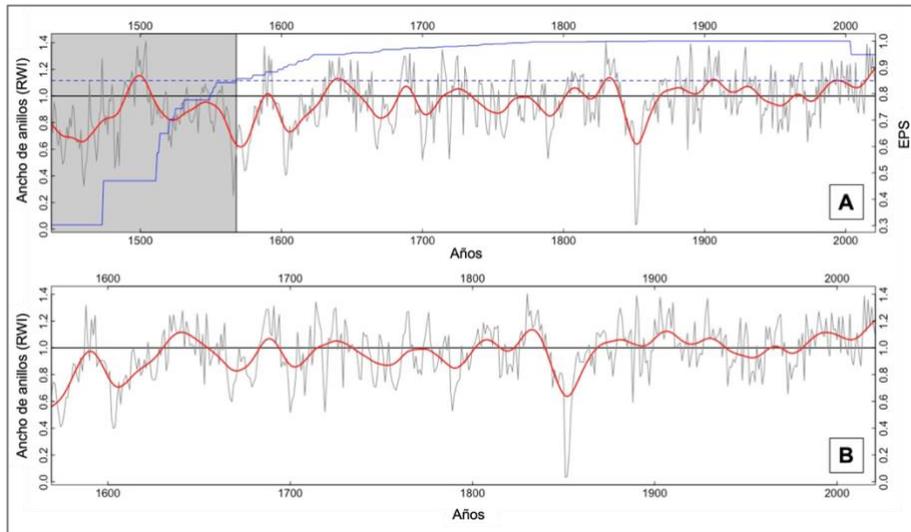


Figura 12. Cronología truncada para las muestras del sitio LEA. En el eje Y izquierdo el índice de ancho de anillos, en el eje Y derecho, la señal expresada por la población (EPS). En el eje X: años que abarca la cronología. Fuente: Elaboración propia.

3.2. Dendroclimatología.

A través del análisis de correlación de Pearson entre los parámetros climáticos obtenidos a partir de datos grillados (anomalías de temperatura mínima, media y máxima y anomalías de precipitación media mensual) con respecto a las cronologías estándar de *Pilgerodendron uviferum* de los sitios QUETRU y LEAL, se buscó determinar las variables climáticas que explican la mayor proporción de varianza en las series de crecimiento arbóreo de esta especie para los sitios de estudio.

3.2.1. Correlación entre registros climáticos y cronología QUETRU.

3.2.1.1. Temperatura.

Como bien se mencionó anteriormente, se utilizaron los conjuntos de datos de CRU TS para correlacionarlos con las temperaturas mínimas y máximas, mientras que para la temperatura media se utilizaron datos provenientes de ERA5-land.

Al analizar los resultados establecidos a través *Routine RespoAverage*, en donde se correlacionaron las variables de temperatura con la serie de crecimiento arbóreo QUETRU, y su posterior estandarización de curva exponencial negativa, se obtuvieron correlaciones positivas y significativas. Para las tres variables se visualizó que *Pilgerodendron uviferum* tiene una respuesta positiva ante las temperaturas de verano de dos años previos al periodo de crecimiento ($t-2$), esto debido a que las mayores correlaciones se obtuvieron en los

meses de enero y febrero. Por tanto, se observa una relación proporcional entre el aumento de temperatura y el crecimiento de los anillos en periodo estival.

a. Temperatura mínima.

En la figura 13 se observa la relación entre la cronología QUETRU y la temperatura mínima. El coeficiente de correlación de Pearson es de 0,53 para los meses de enero y febrero de dos años previos al año de crecimiento (t-2).

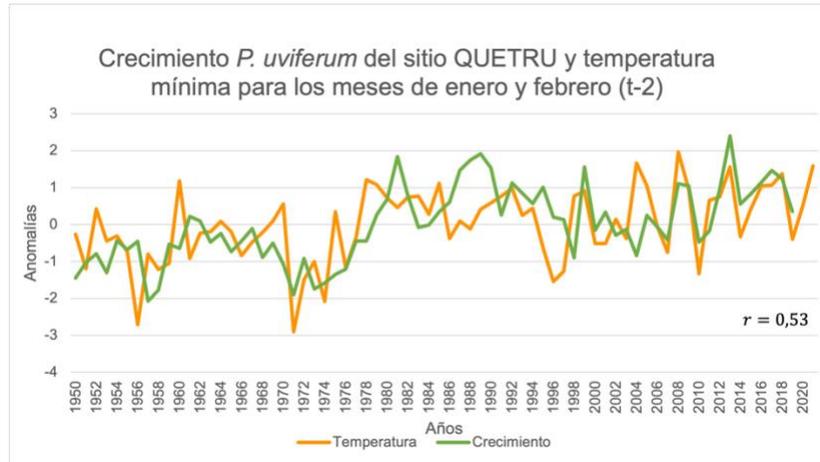


Figura 13. Relación entre la anomalía de la temperatura mínima y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de QUETRU de *P. uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

b. Temperatura media.

En lo que respecta al cruce de los datos de temperatura media extraídos de ERA5-land y la cronología QUETRU (figura 14) se obtuvo una correlación de 0,56, siendo en este sitio la correlación más alta de las tres variables de temperatura.

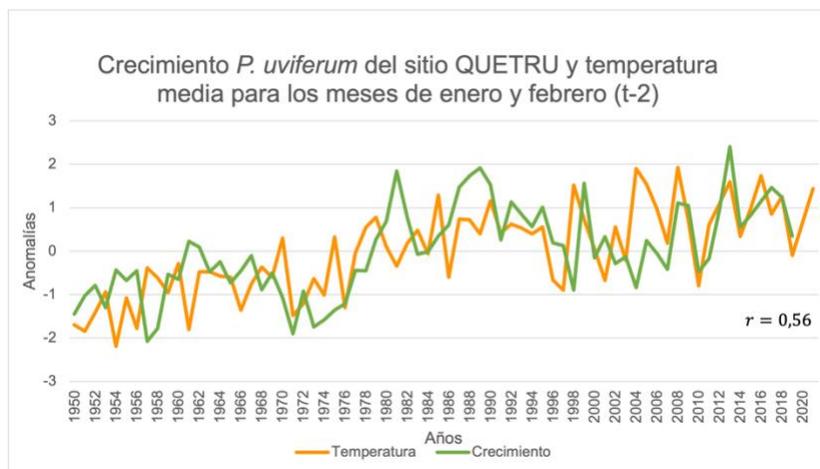


Figura 14. Relación entre la anomalía de la temperatura media y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de QUETRU de *P. uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

c. Temperatura máxima.

Por su parte, en la figura 15 se observa que la temperatura máxima y la cronología QUETRU presentan una correlación de 0,39, siendo esta la más baja de las tres variables de temperatura.

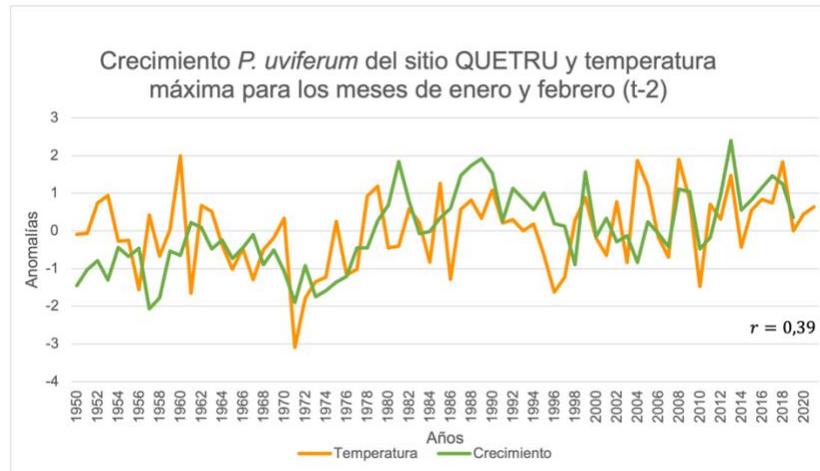


Figura 15. Relación entre la anomalía de la temperatura máxima y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de QUETRU de *P. uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.2 Precipitación.

A través del cálculo de coeficiente de Pearson entre los montos de precipitación y el crecimiento arbóreo, se estableció una correlación positiva de 0,41 (figura 16) para el periodo estival que comprende los meses de noviembre y diciembre de un año previo de crecimiento (t-1).

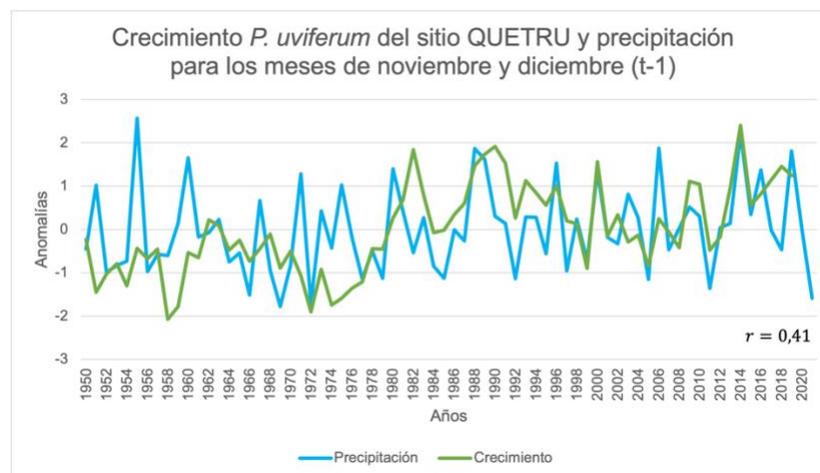


Figura 16. Relación entre la anomalía de precipitación y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de QUETRU de *P. uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2. Correlación entre registros climáticos y cronología LEAL.

3.2.2.1. Temperatura.

Al procesar las correlaciones establecidas en *Routine RespoAverage* entre las variables de temperatura y el sitio LEAL, se obtuvieron resultados similares que en el sitio QUETRU. Se identificaron las mayores correlaciones en el periodo estival, y a su vez, se determinó que los árboles localizados en el sitio LEAL responden a las temperaturas de verano de dos años de crecimiento previos (t-2).

a. Temperatura mínima.

En lo que respecta a la temperatura mínima, en *Routine RespoAverage* se estableció una correlación de 0,42 para la combinación de los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero dos años de crecimiento previos (t-2). La posterior estandarización y el cálculo de las anomalías de temperatura y crecimiento obtuvo una correlación de 0,40 (figura 17).

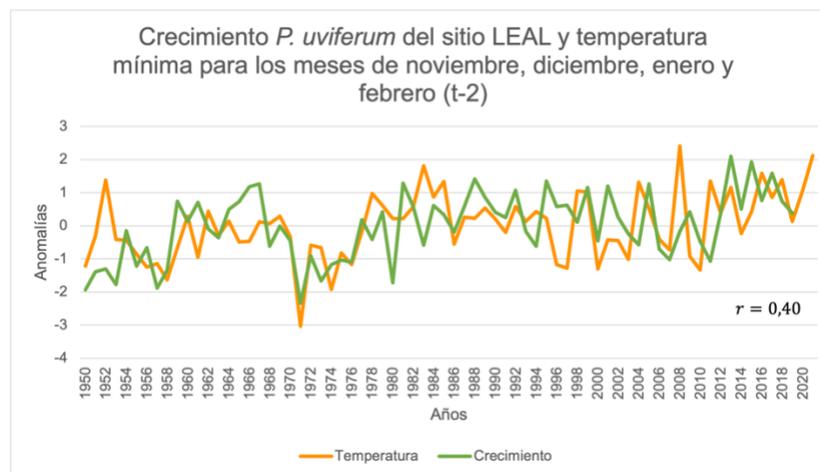


Figura 17. Relación entre la anomalía de la temperatura mínima y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de LEAL de *P. uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

b. Temperatura media.

En la temperatura media se obtuvo una correlación de 0,42 (figura 18) para los meses de enero y febrero de dos años previos al periodo de crecimiento. Al estandarizar las variables a analizar, se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de 0,40. Esto indica una relación proporcional entre el crecimiento de anillo y la temperatura, en donde al igual que el sitio QUETRU, los árboles de esta zona responden de manera positiva ante las temperaturas de verano dos años previas al periodo de crecimiento.

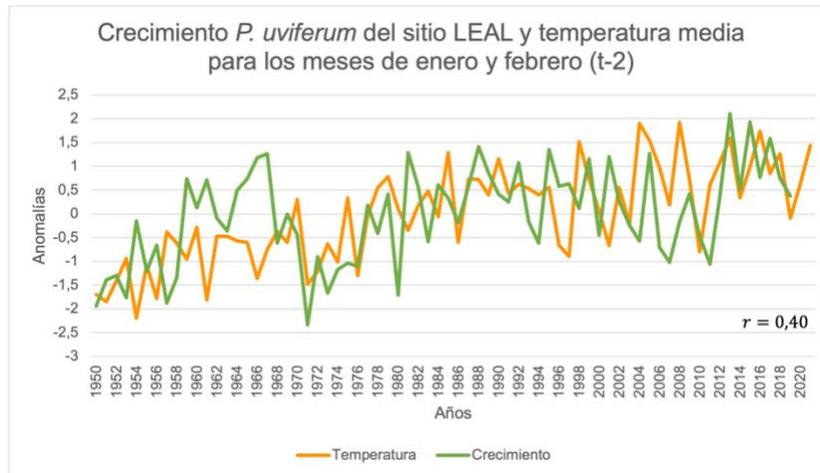


Figura 18. Relación entre la anomalía de la temperatura media y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de LEAL de *P. uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

c. Temperatura máxima.

Como se observa en la figura 19 la temperatura máxima registra una correlación de 0,37 para los meses de enero y febrero (t-2). Tras su respectiva estandarización, se estableció una correlación de 0,25 entre las anomalías de temperatura máxima y el ancho de anillos.

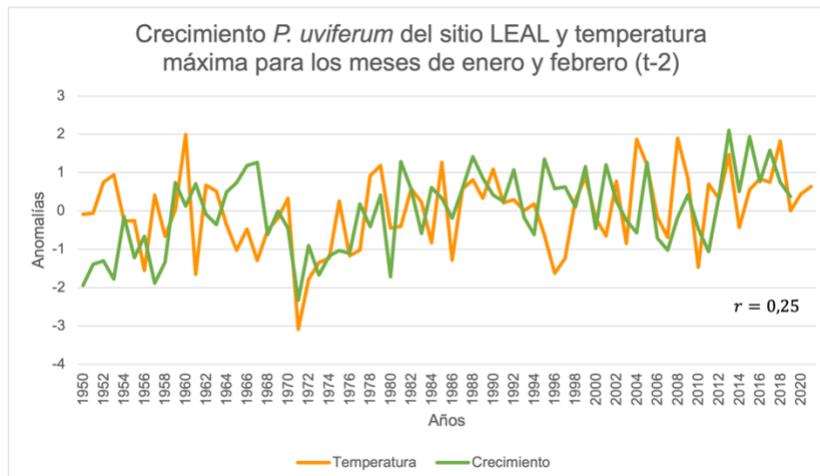


Figura 19. Relación entre la anomalía de la temperatura máxima y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de LEAL de *P. uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

3.2.2.2 Precipitación.

La relación entre la precipitación y el crecimiento de ancho de anillos de la cronología LEAL se estableció con una correlación de Pearson de 0,39 (figura 20) para los mismos meses que el sitio QUETRU, es decir, noviembre y diciembre de un año previo de crecimiento (t-1).

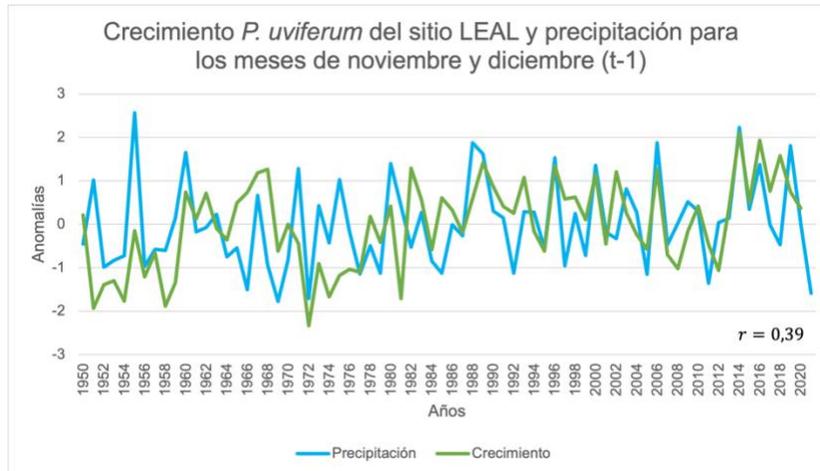


Figura 20. Relación entre la anomalía de precipitación y la cronología de ancho de anillos de crecimiento de LEAL de *P. uviferum*. Fuente: Elaboración propia.

3.3. Cambios frontales del glaciar Lucía.

En la figura 21 se observa la delimitación del glaciar Lucía asociada a cada año de estudio. En una primera instancia se ve como en el año 1945 el hielo ocupaba una mayor sección de las vertientes asociadas al valle, mientras que en el año 1976 exhibe una notable reducción del espesor en el margen frontal, abandonando parte de los flancos laterales que con anterioridad se encontraban cubiertos, evidenciando un adelgazamiento considerable en tal periodo.

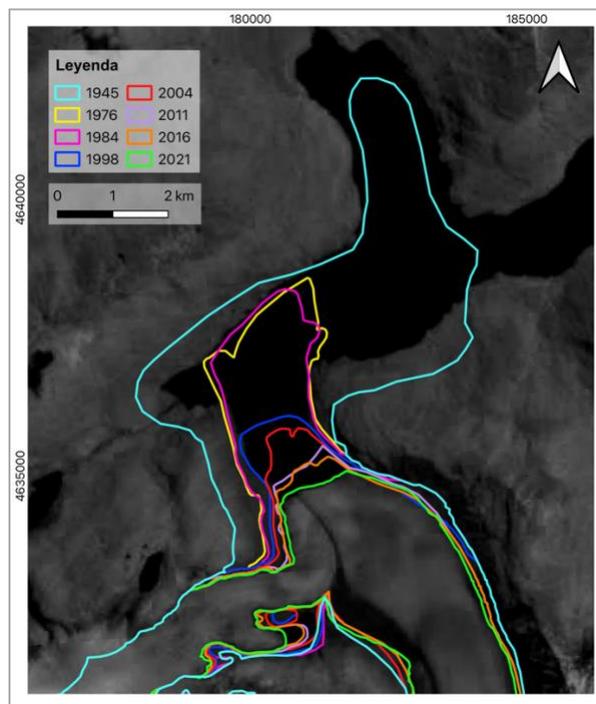


Figura 21. Cambios frontales del glaciar Lucía entre 1945 - 2021. Fuente: Elaboración propia.

Se estimaron los cambios frontales del glaciar Lucía para los periodos 1945, 1976, 1984, 1998, 2004, 2011, 2016 y 2021 a través de las longitudes del frente glaciar. Como se observa la tabla 6, en el periodo inicial de estudio el frente del glaciar Lucía presenta una longitud de 4377,73 metros, mientras que en el periodo 2016 – 2021 la longitud del frente corresponde a 139,39 metros. De este modo, se evidencia un retroceso de 8734,20 metros en una escala temporal de 76 años.

Periodo de años	Longitud (m)
1945 – 1976	4377,73
1976 – 1984	334,68
1984 – 1998	2700,67
1998 – 2004	256,23
2004 – 2011	811,78
2011 – 2016	113,72
2016 – 2021	139,39

Tabla 6. Longitudes de retroceso del glaciar Lucía según periodo. Fuente: Elaboración propia.

Luego, al realizar el cálculo de las tasas de retroceso frontal (metros/año) los resultados indican que el glaciar Lucía tiene una tendencia lineal negativa en la disminución de su frente (figura 22). Los periodos que más evidencian lo anterior son los de los años 1945 – 1976 con -141,22 m/a y 1984 – 1998 con -192,91 m/a. Mientras que de manera más reciente, el periodo de años comprendido entre 2011 y 2021 la tasa de retroceso frontal es de -50,62 m/a.

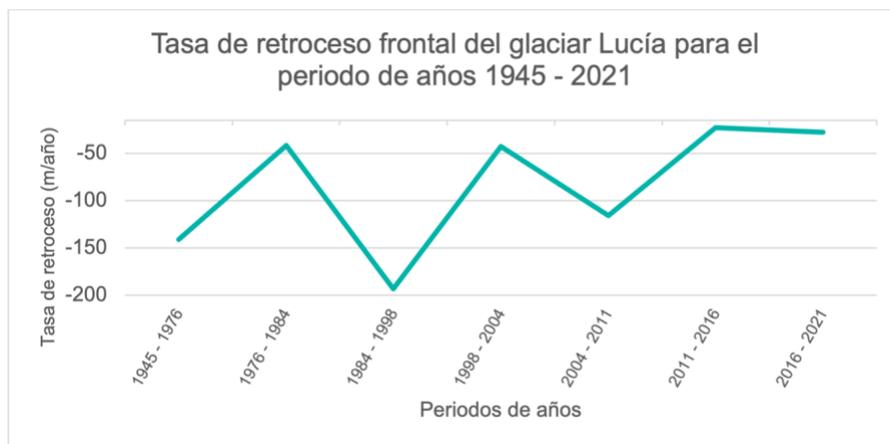


Figura 22. Tasas de retroceso del glaciar Lucía entre los años 1945 - 2021. Fuente: Elaboración propia en base a imágenes satelitales.

3.4. Relación entre variables climáticas y tasas de retroceso del glaciar Lucía.

Se determinó si existe relación entre las variables climáticas y las fluctuaciones frontales del glaciar Lucía para identificar la respuesta de este último ante el clima, y para ello se

aplicó el coeficiente de correlación de Pearson entre las variables mencionadas. Para correlacionar las tasas de retroceso con las variables climáticas, se calculó el promedio entre los periodos que se analizó el área del glaciar (1976 - 1984, 1984 - 1998, 1998 - 2004, 2004 - 2011, 2016 - 2021).

3.4.1. Relación entre temperatura y tasas de retroceso del glaciar Lucía.

Al correlacionar las tres variables de temperatura (mínima, media y máxima) con las tasas de retroceso frontal del glaciar Lucía se establecieron correlaciones significativas. Como se observa en la figura 23, para la temperatura mínima (figura 23 A) se obtuvo un coeficiente de Pearson de 0,59. Para la temperatura media (figura 23 B) se estableció una correlación de 0,58 y para la temperatura máxima 0,45 (figura 23 C). Esto permite estimar una asociación positiva entre estas dos variables, sugiriendo que a medida que la temperatura aumenta, la tasa de retroceso frontal del glaciar tiende a aumentar.

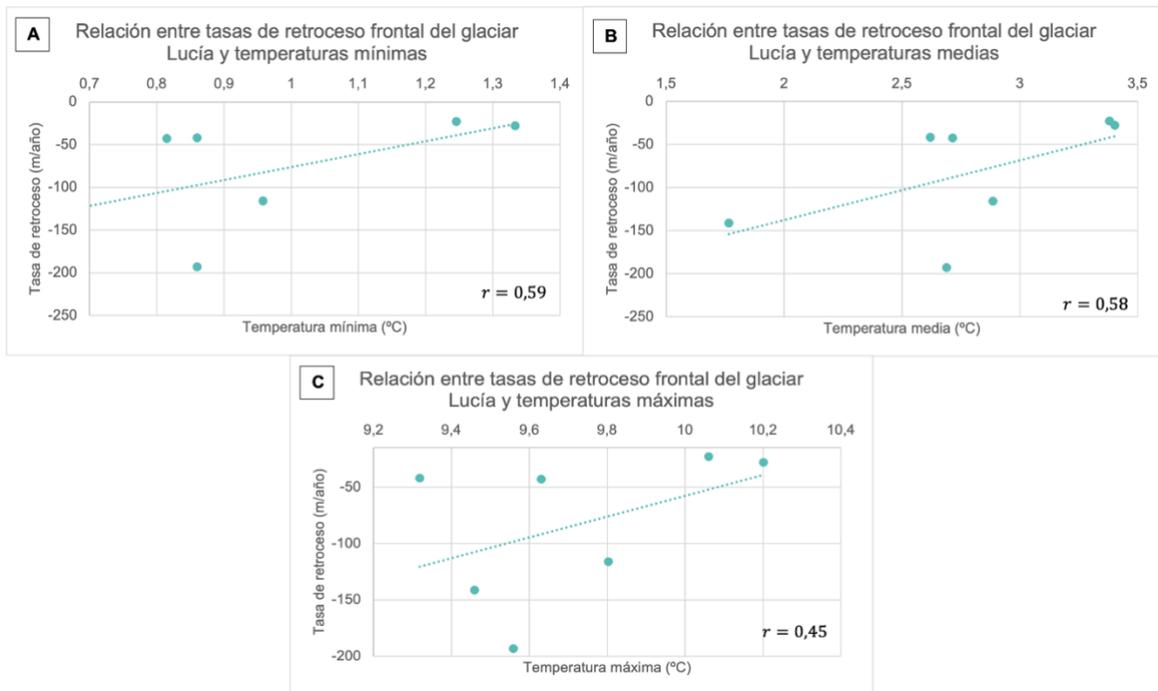


Figura 23. Relación entre tasas de retroceso frontal del glaciar Lucía y temperatura. Fuente: Elaboración propia.

3.4.2. Relación entre precipitación y tasas de retroceso del glaciar Lucía.

Se correlacionó la variable de precipitación media mensual con las tasas de retroceso del glaciar Lucía y se obtuvo un coeficiente de correlación de Pearson de $-0,30$ (figura 24). Este resultado permite estimar una correlación negativa entre estas dos variables e

implicaría que, a medida que la precipitación disminuye, la tasa de retroceso del glaciar tiende a aumentar.

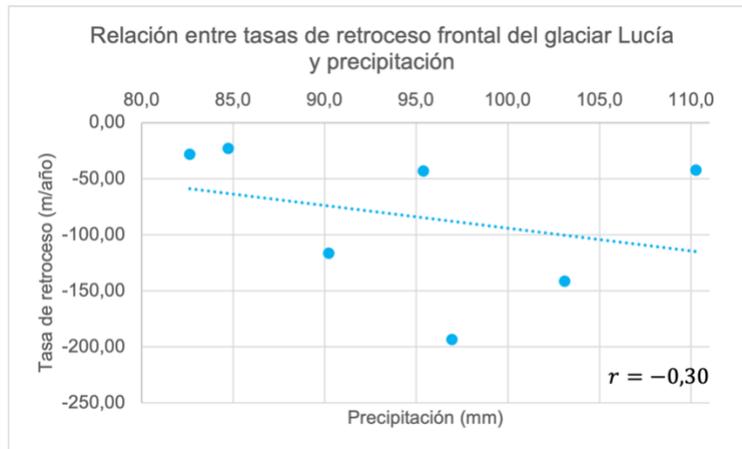


Figura 24. Relación entre tasas de retroceso frontal del glaciar Lucía y precipitación. Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO 4: DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

4.1 Tendencias de crecimiento de las cronologías de *Pilgerodendron uviferum* en los sitios QUETRU y LEAL.

Las cronologías de los sitios QUETRU y LEAL (figura 25), ubicados a aproximadamente 12 kilómetros de distancia (noreste) entre ellos, presentan ciertas similitudes y leves diferencias en sus patrones de crecimiento. En primer lugar, la señal expresada de la población (EPS) en el sitio QUETRU se registró en el año 1604, mientras que para LEAL es en el año 1569. La EPS indica la consistencia en la variabilidad temporal de los anillos de crecimiento, por lo que se puede deducir que la mayoría de los árboles experimentaron un aumento en el crecimiento en los años 1569 y 1604 respectivamente, debido a condiciones climáticas favorables, dando lugar a la formación de patrones similares de variabilidad en respuesta a condiciones climáticas comunes.

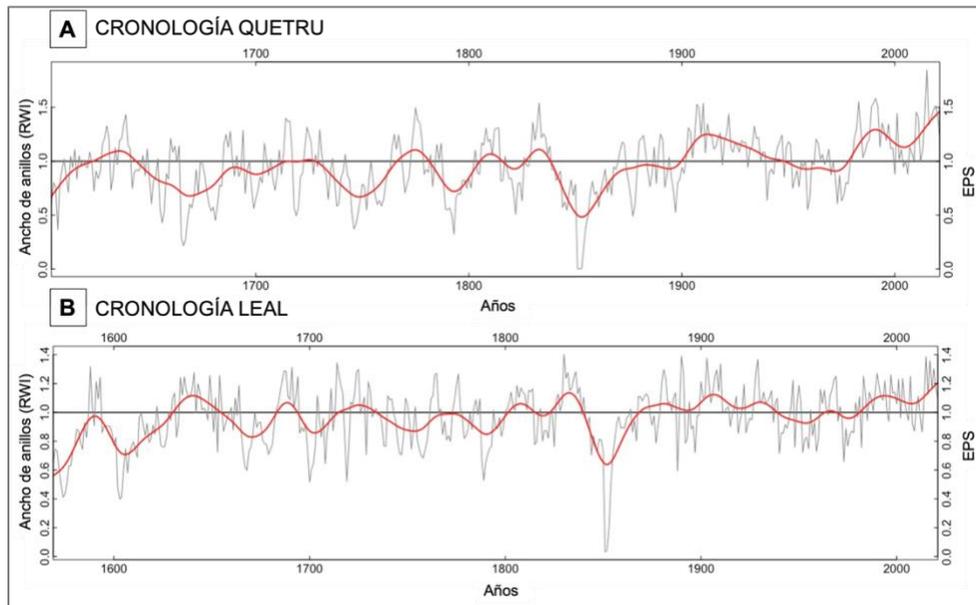


Figura 25. Comparación de cronologías (truncadas) QUETRU y LEAL. Fuente: Elaboración propia.

En cuanto al crecimiento de la cronología QUETRU, en el año 1604 comienza con un bajo crecimiento y posteriormente en el periodo 1610 - 1654 aumenta con índices que oscilan entre 1 y 0,7 aproximadamente. Luego, entre 1660 y 1840 se observan índices de crecimiento que fluctúan en torno a la media de la cronología. La figura 25 A muestra que, en la década de 1850 una perturbación dio lugar a un evidente disminución en el crecimiento de ancho de anillos teniendo un índice de 0,0027 para los años 1851 y 1852 y de 0,028 para el año 1853. Posteriormente, la cronología tiene un comportamiento de valores que se distribuyen por debajo y por encima de la media muestral durante el período 1860 - 1978. Ya desde el año 1980 el crecimiento de anillos ha ido aumentando progresivamente, con

un índice > 1,02 entre el periodo 1980 - 2021, y teniendo un *peak* de crecimiento de 1,85 para el año 2015.

Las series de crecimiento de la cronología LEAL comienzan con índices por debajo de la media desde el periodo 1569 - 1627. Posterior a ello, desde 1630 hasta 1840 la cronología presenta un comportamiento de ancho de anillos que oscila por debajo y por encima de la media con índices que van desde >0,54 y <1,34. En la década de 1850, al igual que la cronología QUETRU en los anillos de crecimiento se registra un decaimiento con índices de 0,03 para el año 1851 y 0,04 para el año 1852. Posteriormente, desde el año 1868 hasta el 1970 la cronología aumenta por sobre la media, manteniendo índices de crecimiento mayores a 0,8. Luego, desde el año 1986 se mantiene una tendencia al crecimiento hasta el año 2021.

Si bien los sitios de muestreo tienen una correlación de 0,61 entre ellos (figura 26), presentan patrones de crecimiento diferentes para ciertos periodos. Por ejemplo, entre los años 1632 y 1659 cuando en la cronología QUETRU se observa un decaimiento en el índice de crecimiento de ancho de anillos, la cronología LEAL se presenta de manera inversa, pues en ese periodo tiende a aumentar. Luego, entre los años 1718 - 1762 de igual manera se observa una disminución en el ancho de anillos del sitio QUETRU y un aumento en el sitio LEAL.

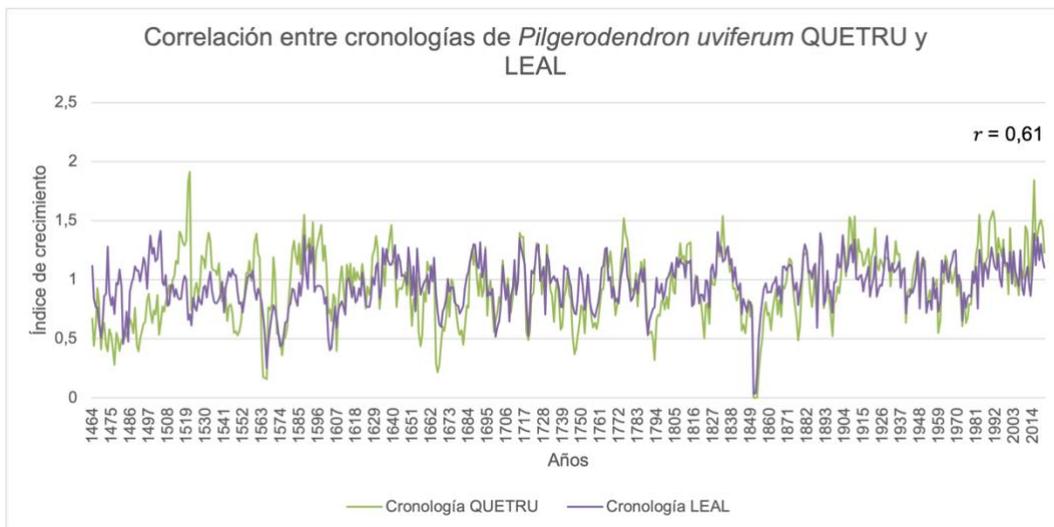


Figura 26. Correlación entre las cronologías QUETRU y LEAL. Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, en la década de 1850 ambas cronologías demuestran el notable decaimiento en el ancho de anillos, no obstante, si se comparan los índices de crecimiento de los años 1851 y 1852 de ambas cronologías, se puede observar que la cronología QUETRU es la que presenta valores de índices más bajos, por lo que se puede deducir que esta cronología es levemente más sensible a las variaciones climáticas en comparación con la cronología LEAL. Por su parte, ambas cronologías coinciden al mantener una tendencia al crecimiento

desde el año 1980 en adelante. En tal sentido, se sostiene un aumento en el ancho de anillos de al menos cuatro décadas para ambos sitios.

Al comparar las cronologías QUETRU y LEAL con otras investigaciones, se observa que en ciertos periodos presentan un comportamiento similar con la cronología de Río Pascua (PAS) elaborada por Aravena (2007). Esta serie maestra presenta un rango temporal que comprende los años 1510 – 2003, para la que igualmente se observa una marcada supresión del crecimiento alrededor de 1850, donde existen valores de amplitud positivos entre 1875 y 1950 y valores negativos después de 1950 hasta llegar al 2003. Esto último es contrario a las cronologías QUETRU y LEAL puesto que han demostrado una tendencia al aumento en el ancho de anillos al final del periodo. Sin embargo, también hay que considerar que el rango temporal de la cronología PAS no se superpone con los rangos temporales de QUETRU y LEAL, ya que se extiende hasta el año 2003, mientras que las cronologías aquí investigadas contienen registros hasta el año 2021.

Por lo tanto, respecto a las tendencias de crecimiento de *P. uviferum* de los sitios QUETRU y LEAL se obtuvo que ambas cronologías presentan una tendencia al aumento en el ancho de sus anillos desde el año 1980 y en particular, se ha incrementado aún más en el año 2014, en donde en el caso de QUETRU el aumento es levemente mayor con respecto a LEAL. De esta forma, que los sitios indiquen un aumento en el crecimiento de sus anillos desde 1980 AD hasta el presente (2021) puede vincularse a que durante este periodo se presentaron condiciones climáticas favorables para el crecimiento de los árboles en los sitios, lo cual dio lugar a anillos más gruesos y con un índice de crecimiento mayor.

4.2. Comparación de crecimiento arbóreo de *P. uviferum* con registros climáticos y forzantes climáticos de gran escala.

El potencial del *Pilgerodendron uviferum* queda en evidencia debido a la sensibilidad de esta especie a las variaciones climáticas. Los resultados obtenidos en esta investigación demuestran que es una especie idónea para estudios dendrocronológicos y dendroclimáticos. Su fácil muestreo, clara definición de sus anillos de crecimiento y aceptable relación con el clima convierten a esta especie en una buena fuente de información paleoclimática y paleoecológica.

4.2.1 Respuesta de anillos de crecimiento de *Pilgerodendron uviferum* a la temperatura.

Los resultados obtenidos respecto a la incidencia de la temperatura en el crecimiento de ancho de anillos de *Pilgerodendron uviferum* establecieron correlaciones positivas y significativas en ambos sitios para la época de verano, en los meses de enero y febrero de dos años previos de crecimiento (t-2). La mayor correlación se presentó con la variable de temperatura mínima, para la que se estableció una correlación de 0,53 para el sitio QUETRU y de 0,40 para el sitio LEAL. Esto indica una relación proporcional entre el aumento de temperatura y el aumento en el grosor de ancho de anillos.

En tal sentido, vale señalar que el *Pilgerodendron uviferum* presenta respuestas de crecimiento radial ante las variables climáticas de manera diferenciada en toda su distribución latitudinal (Holz et al., 2018). Por ejemplo, una investigación realizada por Roig (1991), entre los 40° y 43°S (en el sector norte de la dispersión de *P. uviferum*) demostró una correlación inversa entre el crecimiento radial y el aumento de la temperatura del verano en la temporada anterior a la formación del anillo. Mientras que la temperatura invernal está directamente correlacionada con el crecimiento de ancho de anillos. De este modo, los inviernos benefician el aumento en el índice de crecimiento en ese ambiente.

Por otra parte, los cambios climáticos en el sur de América del Sur entre los años 1950 y 1970 dieron lugar a diferentes respuestas en el crecimiento radial medio de *P. uviferum* en los límites sur, norte y en el centro de su área de distribución (Holz et al., 2018). Considerando lo anterior, las proyecciones de los modelos de cambio climático indican que las poblaciones de *Pilgerodendron* que tendrían mayores impactos negativos en su crecimiento son las que se encuentran más al norte de su distribución, es decir aquellas ubicadas en las regiones de Los Ríos y Los Lagos. Esto debido a que la disminución de las precipitaciones y el aumento de temperaturas afectarían su desarrollo, dada la condición de estrés hídrico derivada de la sequía que afecta a Chile central (Holz, 2018).

En contraparte, en los bosques lluviosos de los fiordos de la región de Aysén, el aumento de los cielos despejados de nubosidad y la disminución de las precipitaciones podría favorecer el crecimiento de *P. uviferum* debido a que las poblaciones que se encuentran circundantes a los campos de hielo, están sometidas a condiciones periglaciares que generan ambientes complejos para el crecimiento arbóreo, con bajas temperaturas y dominante nubosidad (por ende, ambientes con menor disponibilidad lumínica). Por tanto, un aumento de días soleados (menos lluvia y aún frío, pero más cálido en términos relativos) podría favorecer de manera significativa las tasas de crecimiento de los anillos de los árboles.

Según lo mencionado previamente, tiene sentido que las correlaciones en los bosques de los sitios QUETRU y LEAL sean positivas durante los meses de verano para las temperaturas moderadas (mínima y media). Estos bosques están ubicados a ≈ 30 kilómetros de los márgenes del glaciar Lucía, lo que sugiere que los árboles responden y generan mecanismos de adaptabilidad ante las condiciones climáticas que se dan en la zona circundante a la masa de hielo. En este sentido, un aumento de temperatura en este entorno podría favorecer el crecimiento de los árboles, influyendo así en el incremento del ancho de los anillos.

4.2.2 Respuesta de anillos de crecimiento de *Pilgerodendron uviferum* a la precipitación.

La relación obtenida entre el efecto de la precipitación sobre los bosques de *Pilgerodendron uviferum* sostiene una correlación positiva para los sitios QUETRU y LEAL para los meses

de noviembre y diciembre de un año previo. Diversas investigaciones han analizado la incidencia de la precipitación sobre esta especie obteniendo una relación significativa entre ambas variables. Roig y Boninsegna (1991) en un estudio sobre el crecimiento radial, basal, en altura y de las condiciones climáticas que afectan el desarrollo de *P. uviferum* en los 42° 30'S, encontraron una relación positiva entre el crecimiento radial de la especie y la precipitación de verano (diciembre a marzo) en tres estaciones meteorológicas de la isla de Chiloé.

Las correlaciones significativas entre precipitación y crecimiento arbóreo de la especie pueden explicarse debido a que *P. uviferum* está restringido a suelos anegados y con alta precipitación (Lara et al., 2013) y generalmente los bosques de ciprés prosperan en ambientes con altos niveles de humedad, por lo que las altas tasas precipitacionales son cruciales para mantener un entorno adecuado para su crecimiento. En tal sentido, su distribución se asocia a altas precipitaciones que superan los 2.000 mm anuales (Donoso 1981b; Martínez, 1981)

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la respuesta de los anillos de crecimiento de *P. uviferum* puede variar dependiendo del rango latitudinal en donde se encuentre. Aravena (2007) a través de un análisis de variabilidad espacial de una red de cronologías de *Pilgerodendron* distinguió cuatro patrones de variación del crecimiento de los árboles; un primer patrón asociado a las cronologías más australes; un segundo modo de patrón asociado a aquellas cronologías ubicadas cerca del Campo de Hielo Patagónico Sur (48° a 50°S); una tercera representada por sólo dos cronologías en Patagonia Central; y un cuarto modo representado por tres cronologías distribuidas a lo largo de la porción norte de la red *Pilgerodendron*. Se estableció una correlación negativa entre la precipitación del noreste de la Patagonia y el crecimiento radial de los bosques de *Pilgerodendron uviferum* más australes y aquello se explica por un régimen de precipitación desfasado entre el noroeste y el suroeste de la Patagonia asociado con las fluctuaciones de los principales procesos de circulación atmosférica en la región (Aravena, 2007).

4.2.3. Anillos de crecimiento de *Pilgerodendron uviferum* y forzantes climáticos de gran escala.

El crecimiento de *Pilgerodendron uviferum* ha demostrado un ritmo anual sensible a la estacionalidad de la precipitación y la temperatura, siendo útil para reconstrucciones climáticas (Lara et al., 2008). El crecimiento de los anillos de los árboles está relacionado con varios factores, incluidos los forzantes climáticos de gran escala (Oscilación del Sur (ENSO), Oscilación Decadal del Pacífico (*Pacific Decadal Oscillation* - PDO), Modo Anular del Sur (*Southern Annular Mode* - SAM). Estos forzantes climáticos pueden afectar las condiciones ambientales en las que crecen los árboles y, por lo tanto, influir en la formación de sus anillos de crecimiento.

Se buscó correlacionar los índices de crecimiento arbóreo con los modos de variabilidad climática mencionados. Los índices utilizados fueron obtenidos a través de KNMI *Climate Explorer*, (<https://climexp.knmi.nl/>, 2023) los cuales corresponden a datos recopilados por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA).

Es importante mencionar que las correlaciones expuestas aquí no implican causalidad, se presentan con el fin de demostrar que las variaciones de los patrones climáticos producidas por forzantes climáticos de gran escala pueden quedar registradas o no en el crecimiento de ancho de anillos, por lo que no se puede concluir que un evento de ENSO, PDO o SAM causen directamente un determinado patrón en el crecimiento de anillos de *Pilgerodendron uviferum*. Puede haber otros factores o procesos complejos involucrados.

4.2.3.1. Relación entre Oscilación del Sur (ENSO) y cronologías QUETRU y LEAL.

En función de lo anterior, se correlacionaron las series de crecimiento arbóreo de QUETRU y LEAL con índices de ENSO (3.4) correspondientes al periodo de años 1950 – 2019 (figuras 27 y 28). Los resultados obtenidos fueron de 0,40 y 0,33 respectivamente, para los meses de mayo y junio del año en curso de crecimiento (t_0). Los valores significativos pueden sugerir que hay una asociación positiva moderada entre el crecimiento de ancho de anillos de *Pilgerodendron uviferum* y los eventos de ENSO.

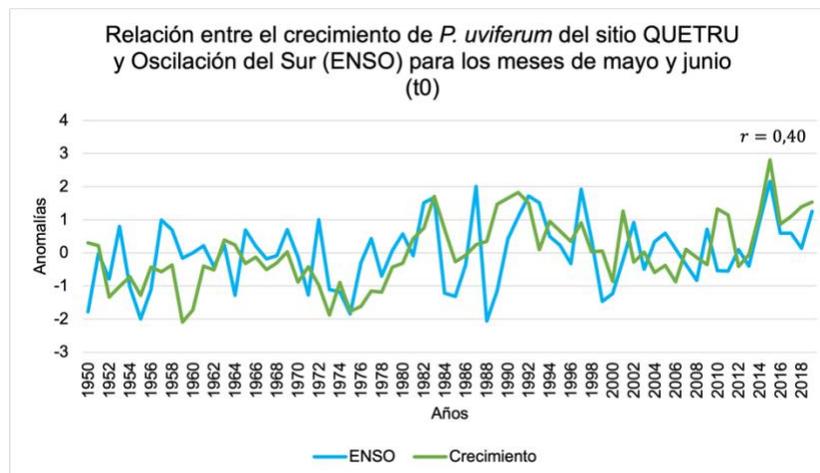


Figura 27. Relación entre Oscilación del Sur (ENSO) y *P. uviferum* del sitio QUETRU. Fuente: Elaboración propia.

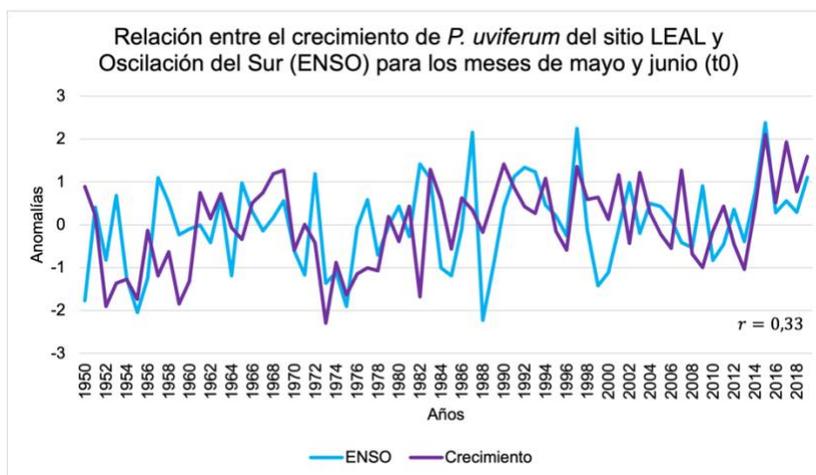


Figura 28. Relación entre Oscilación del Sur (ENSO) y *P. uviferum* del sitio LEAL. Fuente: Elaboración propia.

Según Jaques-Coper y Garreaud (2014) en los años 1976 y 1977 se registró un cambio de temperatura en la superficie del mar (TSM) de fría a cálida, y se llegó a la conclusión de que el modo de variabilidad interanual (ENSO) y el modo de oscilación interdecadal (PDO) parecieron incidir en la manifestación del cambio climático en los años 70's. En tal sentido, si se observan los gráficos adjuntos en donde se correlacionan los índices de ENSO con los de QUETRU y LEAL, se puede visualizar una superposición de los valores para tal periodo. Ocurre de manera similar para los periodos 1982 - 1983, 1997 - 1998 y 2014 - 2015 los cuales constituyen los episodios cálidos más importantes durante los últimos 38 años. Esto sugiere que probablemente haya cierta influencia de este modo de variabilidad en la zona de estudio.

Aliste (2016) analizó la relación entre dichos forzantes y la dendrocronología. Comparó una serie de crecimiento de *Fitzroya cupressoides* del sector Los Pabilos, Región de Los Lagos con ENSO y obtuvo una correlación no significativa, llegando solamente a valores inferiores a 0,2. Se determinó que los resultados sin correlaciones significativas con los índices del ENSO pueden vincularse a una menor influencia de esta señal en la latitud del área de estudio.

4.2.3.2. Relación entre Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y cronologías QUETRU y LEAL.

Como se mencionó con anterioridad, los autores Jaques-Coper y Garreaud (2014) atribuyen la variabilidad climática en el año 1977 a un cambio de fase en el PDO. En función de ello, se compararon las series de crecimiento arbóreo trabajadas en esta investigación con dicho forzante climático. Las comparaciones de las series de PDO con las cronologías de QUETRU y LEAL (figuras 29 y 30) establecen correlaciones de 0,32 y 0,34 respectivamente. En la cronología QUETRU se observó una significancia para los meses de abril y mayo de un año previo de crecimiento y en el sitio LEAL para los meses de

febrero, marzo y abril de dos años previos de crecimiento. En la cronología LEAL se puede observar de mejor manera el *peak* climático de los 70's asociado a cambio en la polaridad de la PDO.

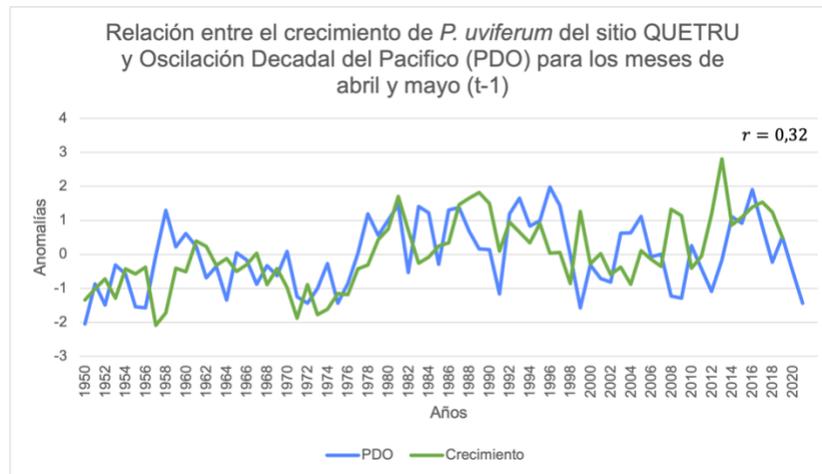


Figura 29. Relación entre Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y *P. uviferum* del sitio QUETRU. Fuente: Elaboración propia.

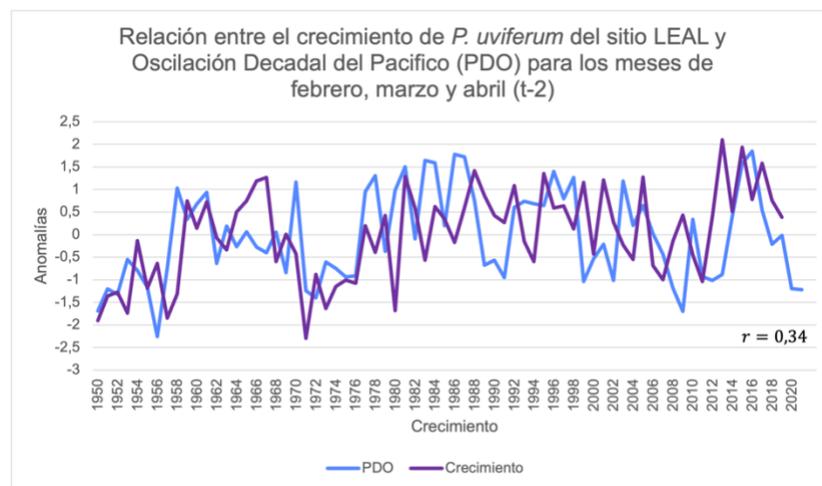


Figura 30. Relación entre Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y *P. uviferum* del sitio LEAL. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.3. Relación entre Modo Anular del Sur (SAM) y cronologías QUETRU y LEAL.

Según (Garreaud et al., 2009) SAM corresponde a uno de los forzamientos climáticos claves en el clima austral (40°S a 65°S). Desde 1950, en adelante este índice de variabilidad climática presenta una fase positiva determinando altas temperaturas y condiciones secas en latitudes medias (Garreaud et al., 2009). Los cambios en SAM pueden estar asociados con variaciones en las temperaturas y las precipitaciones, afectando el crecimiento de los árboles.

Conforme a lo anterior, se compararon los índices de SAM y las cronologías de *Pilgerodendron uviferum* de los sitios QUETRU y LEAL (figuras 31 y 32). Para la cronología QUETRU se obtuvieron correlaciones de 0,39 para el periodo de meses de octubre, noviembre, diciembre, enero, febrero y marzo de dos años previos de crecimiento (t-2). Mientras que en la cronología LEAL la correlación resultante es de 0,34 para los meses de mayo, abril, mayo, junio y julio de un año previo de crecimiento. La fase positiva de SAM indica un aumento de temperatura en las últimas décadas en el sector austral y el *P. uviferum* de los sitios QUETRU y LEAL han demostrado una respuesta positiva a dichas variaciones de temperatura, por lo que aquello puede explicar que las correlaciones con este forzante climático sean significativas y positivas.

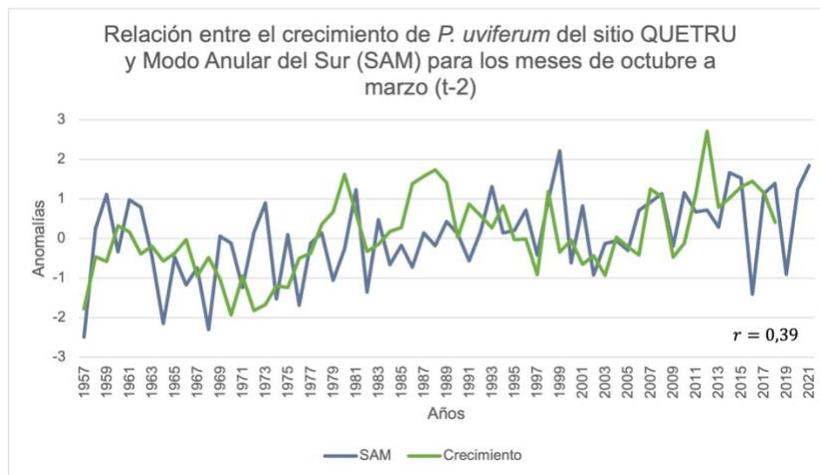


Figura 31. Relación entre Modo Anular del Sur (SAM) y *P. uviferum* del sitio QUETRU. Fuente: Elaboración propia.

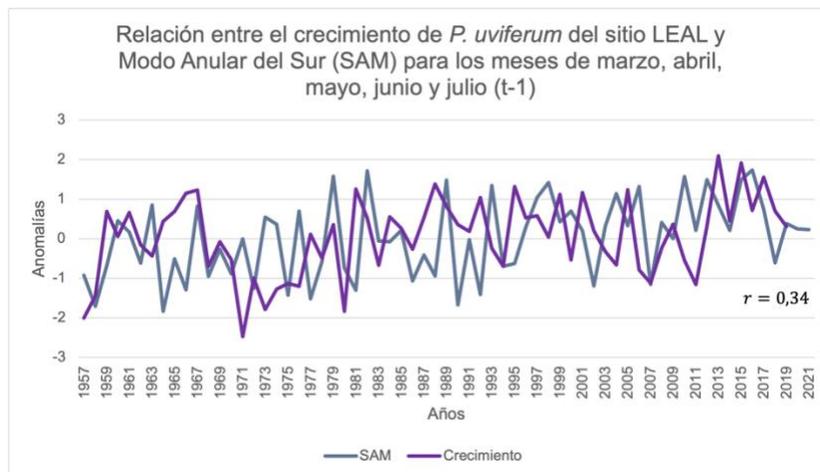


Figura 32. Relación entre Modo Anular del Sur (SAM) y *P. uviferum* del sitio LEAL. Fuente: Elaboración propia.

No todas la especies han demostrado que la presencia de SAM podría beneficiar en el crecimiento, pues en una investigación realizada por Ruiz (2020) los aumentos de temperatura han provocado una reducción en el ancho de anillos de las especies del género

Nothofagus, teniendo una correlación negativa en el periodo de crecimiento entre los meses de enero y abril del año en curso, entre los años 1957 y 2017. Situación similar ocurre con *Fitzroya cupressoides* (Aliste, 2016) en donde se obtuvo una correlación significativa entre el crecimiento radial y el índice Marshall, el cual correlacionó negativamente con valores de -0,33 abarcando un período de 8 meses desde junio a enero del año próximo.

4.3. Cambios frontales del glaciar Lucía y variabilidad climática.

En una primera instancia se estableció trabajar con las variaciones areales del glaciar Lucía (tabla 7). Sin embargo, a través del análisis y procesamiento de imágenes satelitales, en conjunto con modelos de elevación digital, se observó que en la parte alta del glaciar no se evidenciaban cambios significativos. Por lo tanto se optó por estudiar el retroceso frontal debido a que las fluctuaciones se concentran en el frente glaciar.

Año	Área (km ²)
1945	172,71
1976	157,73
1984	155,81
1999	150,53
2004	148,77
2011	147,08
2016	146,5
2021	144,47

Tabla 7. Áreas (km²) del glaciar Lucía según año. Fuente: Elaboración propia.

El glaciar Lucía ha mostrado un retroceso frontal de ≈ 9 kilómetros en un rango temporal de 76 años. Como se mencionó en el apartado de los resultados, los periodos que demuestran un mayor retroceso frontal corresponden a 1945 – 1976 con -141,22 m/a y 1984 – 1998 con -192,91 m/a. Las variaciones de distancia para el periodo 1945 – 1976 fueron de ≈ 4380 metros mientras que para el periodo 1984 – 1998 fue de ≈ 2700 metros. Por lo tanto, que este segundo periodo presente una tasa de retroceso más alta podría explicarse debido a que el rango anual entre esos años es de 14 años, mientras que el primer periodo es de 31 años.

Los 14 años comprendidos entre el periodo 1984 – 1998 pueden contener subperiodos de años en donde las tasas de retroceso sean anómalas y tales valores atípicos pueden alterar la media aritmética. Esto puede generar que el valor de la tasa de retroceso de este periodo (-192,91 m/a) no sea representativo debido a que no es una tasa de retroceso constante en esos 14 años.

A través del cálculo de las tasas de retrocesos frontales del glaciar Lucía, se pudo estimar que este cuerpo de hielo mantiene balances de masa negativos como la mayoría de los glaciares Patagónicos que se encuentran en retroceso, pues casi todos los glaciares de la

región han experimentado pérdidas de áreas significativas (Rivera, 2011). En el contexto general los glaciares independiente de su tamaño están mostrando comportamientos similares, unos más acelerados que otros, debido a que influyen diversos factores. En tal sentido y al comparar escalas y no procesos, el glaciar Lucía no presenta un retroceso tan abrupto como los glaciares Jorge Montt y O'Higgins, ubicados al oeste y sureste del glaciar Lucía respectivamente.

Conforme a lo anterior, se realizaron cálculos de correlación de Pearson entre las tasas de retroceso frontal y las variables climáticas de temperatura y precipitación para tener una primera aproximación respecto de si el glaciar Lucía responde a las variaciones climáticas. De esta manera, se obtuvieron correlaciones significativas, estableciendo 0,59 para temperatura y -0,30 para la precipitación.

Diversas investigaciones han buscado vincular las variaciones climáticas con las recesiones de los glaciares. Ruiz (2020) relacionó estos aspectos climáticos con las variaciones recientes del glaciar Tenerife (1945 – 2017) ubicado en los $51^{\circ}22'45.1''S$ y $72^{\circ}50'57.1''O$, a 50 kilómetros al noroeste de Puerto Natales. Los resultados mostraron una correlación estadísticamente significativa entre la tasa de retroceso del glaciar Tenerife y la precipitación de la estación Torres del Paine, con un valor de 0,91.

En un estudio realizado en una tesis de pregrado, Labarca (2022) halló correlaciones respecto a los cambios de área del glaciar Stoppani (Región de Magallanes y de la Antártica Chilena) y sus tasas de variación glaciar, con registros climáticos. Para las correlaciones de variaciones de área con precipitación se obtuvo como resultado una relación directa en la disminución de las precipitaciones y la disminución del hielo, generando un balance de masa negativo, mientras que con las temperaturas existe una relación inversa entre el aumento de dicha variable y el adelgazamiento glaciar.

Por su parte, la asociación entre las tasas de retroceso y los registros climáticos no obtuvieron correlaciones estadísticamente significativas. Situación similar ocurre con un estudio realizado por Fernández (2021) quien para el Glaciar Grey (Parque Nacional Torres del Paine) estableció correlaciones significativas de -0,66 y -0,64 entre las variables de temperaturas máximas y precipitaciones respectivamente, dando a conocer que la disminución en el área del glaciar presenta un nivel de asociación con los aumentos de temperaturas y el aumento de las precipitaciones. No obstante, en cuanto a las tasas de retroceso, no se observaron correlaciones estadísticamente significativas, ya que se obtuvo 0,24 para temperatura máxima y -0,03 con precipitaciones.

Vale señalar que las tasas de retroceso calculadas por Ruiz (2020), Fernández (2021) y Labarca (2022) se realizaron en función de las áreas (km^2) de los glaciares Tenerife, Grey y Stoppani respectivamente y no con las longitudes de retroceso frontal, como se hizo en esta investigación con el glaciar Lucía.

En ese sentido, la presente investigación permite inferir que el retroceso del glaciar Lucía en el periodo de 1945 – 2021 presenta un nivel de asociación con los parámetros climáticos, en donde a medida que aumenta la temperatura y disminuye la precipitación, las tasas de retroceso del glaciar tienden a aumentar, demostrando una respuesta del glaciar frente a estos cambios ambientales. Lo anterior sugiere que probablemente el glaciar tiene una respuesta sensible al calentamiento, mientras que los montos de precipitación pueden tener un efecto estabilizador en la masa de hielo. Los glaciares responden a diversos factores, y probablemente la sensibilidad a las variaciones climáticas que presenta el glaciar Lucía sea uno de los elementos influyentes en su retroceso.

La zona frontal del glaciar se encuentra en el Lago Bergues, y de acuerdo con Sugiyama et al. (2019), los glaciares que culminan en cuerpos de agua, retroceden más rápido que los glaciares terrestres dado a que se encuentran más propensos a la pérdida de grandes porciones de hielo por eventos de *calving*. Sin embargo, aunque en la actualidad el cambio climático afecta de forma negativa a todos los glaciares, los que terminan en lagos o fiordos, no responden linealmente a ese aumento de temperatura, pues su rápido o lento retroceso depende en gran medida de la batimetría, es decir, de la profundidad de la zona lacustre en la que terminen, explicó Rivera (2019).

Dentro de los otros aspectos que pueden influir en el retroceso de un glaciar se encuentra el tamaño, la latitud y el entorno terminal, los que ejercen los mayores controles sobre la contracción de los glaciares (Davis & Glasser, 2012). Así también, la orientación del glaciar incide en la exposición solar de este, donde los que tengan orientación norte se verán más afectados que los con orientación sur. Probablemente el glaciar Lucía presente tasas de retroceso asociadas a lo anteriormente mencionado.

4.4. Relación entre clima, *Pilgerodendron uviferum* y glaciar Lucía.

Esta investigación permitió estimar que la variabilidad climática en el margen septentrional de Campos de Hielo Sur, tiene efectos diferenciados en los bosques de *Pilgerodendron uviferum* y en el glaciar Lucía. Tal como se mencionó al comienzo, en donde se esperaba que el aumento de temperatura favoreciera al crecimiento de *P. uviferum*, pero acelerara el retroceso del glaciar Lucía. Se pudo obtener una aproximación de esto a través de las correlaciones entre clima – árbol y clima – glaciar.

En tal sentido, el crecimiento de ancho de anillos de *P. uviferum* responde positivamente a las temperaturas de verano, mientras se estima que el glaciar Lucía tiene una relación proporcional entre el aumento de temperatura y el aumento en sus tasas de retroceso frontal.

4.5. Limitantes de la investigación.

4.5.1. Conjuntos de datos de reanálisis y modelados climáticos.

Como se demostró anteriormente, los datos instrumentales disponibles en las estaciones meteorológicas ubicadas en las inmediaciones del área de estudio no presentan una continuidad temporal, lo que dificulta el procesamiento y posterior análisis para realizar reconstrucciones climáticas. De este modo, se optó por utilizar datos de reanálisis y modelos climáticos, los cuales pueden ofrecer una aproximación y comprensión de la dinámica de las variables climáticas.

Sin embargo, hay que considerar los alcances de estos conjuntos de datos, ya que si bien proporcionan estimaciones de las condiciones meteorológicas para un instante de tiempo en el pasado, están sujetas a ciertos limitantes. Dentro de ellos se encuentra la resolución espacial y temporal, lo que puede afectar en la representación precisa de variaciones climáticas a pequeña escala y variaciones temporales de corto plazo.

También puede haber presencia de sesgos climáticos y errores de modelado, ya que al no ser datos instrumentales dependen de modelos numéricos del clima, y cualquier error en estos modelos se reflejará en los datos de reanálisis. Además, puede haber sesgos climáticos, especialmente en regiones con poca cobertura observacional. En tal sentido, al utilizar metodologías basadas en reanálisis y modelos climáticos hay que considerar que estos conjuntos de datos pueden contener cierto grado de incertidumbre.

4.5.2. Imágenes satelitales.

Las imágenes satelitales Landsat son una herramienta valiosa para el monitoreo de la Tierra y la observación de cambios ambientales a lo largo del tiempo. Sin embargo, también presentan ciertas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar y utilizar estos datos. Algunas de las limitantes que se presentaron en el marco de esta investigación, corresponden en primer lugar a la resolución espacial. Como se mencionó anteriormente, Landsat 1 tiene una resolución espacial de 80 metros, mientras que la resolución de Landsat 5 y 8 es de 30 metros. Lo anterior no permite identificar elementos con un gran nivel de detalle.

Por otra parte, hay limitaciones en relación con las condiciones atmosféricas, ya que las nubes y aerosoles, pueden afectar la calidad de las imágenes, en donde la cobertura nubosa puede obstruir la vista de la superficie terrestre en esas áreas. Otro factor es el intervalo de tiempo entre imágenes, si bien Landsat proporciona una serie temporal de datos, el intervalo entre las tomas de imágenes en algunos periodos es discontinuo, habiendo vacíos de información satelital en algunas temporadas. Esto puede limitar la capacidad para monitorear cambios rápidos o eventos climáticos específicos.

5. Conclusiones

En esta memoria de título se logró obtener una visión inicial acerca del comportamiento e interacción entre las variables climáticas (temperatura y precipitación), el crecimiento de *Pilgerodendron uviferum* y los cambios frontales del glaciar Lucía, en una zona carente de datos y, por consiguiente, con escasas investigaciones desarrolladas. Este estudio contribuye significativamente al incremento del registro de los anillos de crecimiento de *P. uviferum* en términos dendrocronológicos. Además, ofrece una valiosa oportunidad para comprender el comportamiento de esta especie, considerando que presenta respuestas climáticas diversas según su distribución espacial.

Inicialmente, se evidenció un patrón de crecimiento positivo de *P. uviferum* en los bosques de QUETRU y LEAL durante las últimas cuatro décadas, registrando un incremento constante en el ancho de los anillos en el periodo más reciente de la cronología. La tendencia al incremento del crecimiento radial puede asociarse a la influencia de las temperaturas de verano (enero y febrero) de dos años previos al periodo de crecimiento, así como también con el impacto de las precipitaciones durante el verano del año anterior al crecimiento.

En ese sentido, lo anterior describe una relación proporcional entre el aumento de temperatura y precipitación y el ancho de anillos. No obstante, se evidencia una correlación más pronunciada con las temperaturas mínimas y medias. Esta tendencia posiblemente se debe a que los bosques de *P. uviferum* analizados en este estudio, al estar ubicados en las cercanías del margen septentrional de Campos de Hielo Sur (y particularmente a 30 kilómetros al suroeste del glaciar Lucía), podrían experimentar un crecimiento radial favorecido y beneficiar su dinámica natural en la medida que se den temperaturas moderadas.

En cuanto al glaciar Lucía, se estudió sus cambios frontales en el periodo 1945 – 2021, a través del análisis de una fotografía aérea y el procesamiento de imágenes satelitales capturadas por Landsat 1, 5 y 8. De este modo, se estimó un retroceso frontal de casi 10 kilómetros en un rango temporal de 76 años. Al obtener las tasas de retroceso del glaciar Lucía, se correlacionaron con las variables climáticas obtenidas a partir de datos grillados (CRU TS) para determinar el nivel de asociación entre dichos aspectos. Los resultados demostraron que sí existiría una respuesta del glaciar frente a los aumentos de temperatura y el aumento de su retroceso.

Si bien se sostiene una relación estadísticamente significativa entre ambas variables, esta investigación no permite establecer una relación de causalidad y por lo tanto no es posible afirmar que el glaciar Lucía se encuentre en retroceso debido al incremento de temperaturas. Esto es debido a que los glaciares responden a diversos factores de escala local, por lo que si bien la temperatura puede influir en los cambios que experimenta el glaciar, hay más componentes del sistema natural que tienen efectos sobre la masa de

hielo. Es por ello que para obtener mayor precisión se sugiere utilizar metodologías como el cálculo de la altitud de la línea de nieve (ALN) o línea de equilibrio (ELA).

Finalmente, se estableció una relación distintiva entre clima – dendrocronología y clima – glaciar. Se observó que el incremento de las temperaturas favorecería el crecimiento del *Pilgerodendron uviferum*, pero afectaría negativamente al glaciar. Aunque uno de los objetivos primordiales de este estudio era proporcionar las primeras aproximaciones sobre la interacción de estos componentes, se aspira, en una perspectiva futura, a continuar desarrollando e incorporando más herramientas, instrumentos y técnicas para comprender de manera más precisa la dinámica del sistema natural que se tiene como objeto de estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- Aliste, D. (2016). Desarrollo de una cronología de ancho de anillos para *Fitzroya cupressoides* ((Molina) Johnston) y su relación con la variabilidad climática, en la Cordillera de la Costa, sector Los Pabilos, Región de Los Lagos, Chile. [Tesis de Pregrado]. Universidad Austral, Valdivia, Chile. <http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2016/fifa414d/doc/fifa414d.pdf>
- Araos J. (2016). Glacial geomorphology and paleoglacial behavior estimation in Sierra Baguales (50° S): Paleoclimatic factors that controlled glacier variations within the pleistocene - holocene regional context. Disponible en <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/142482>
- Aravena J.C. (2007) Reconstructing climate variability using tree rings and glacier fluctuations in the Southern Chilean Andes. Ph.D. dissertation, Univ. of Western Ontario, London, Ontario.
- Aravena, J.C., & Luckman, B. (2009). Spatio-temporal rainfall patterns in Southern South America. *International Journal of Climatology*, 29, 2106-2120.
- Bannister, Jan R, Le Quesne, Carlos E, & Lara, Antonio. (2008). Estructura y dinámica de bosques de *Pilgerodendron uviferum* afectados por incendios en la Cordillera de la Costa de la Isla Grande de Chiloé. *Bosque (Valdivia)*, 29(1), 33-43. <https://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002008000100004>.
- Biblioteca Nacional de Chile. (s.f). Clima y vegetación Región de Aysén. Recuperado el 12 de octubre de 2023. <https://www.bcn.cl/siit/huestropais/region11/clima.htm>.
- Bradley, R. S. (2015). *Paleoclimatology: reconstructing climates of the Quaternary*. Elsevier Inc., Oxford, UK.
- Bringas, C. (2022). Informe cronología de QUETRU. Laboratorio de Dendrocronología. Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile.
- Bringas, C. (2022). Informe cronología de LEAL. Laboratorio de Dendrocronología. Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile.
- Brockway, M. (1983). Geología del área del río Pascua y consideraciones geotécnicas para el proyecto del embalse en el sector de sus angosturas, Región de Aysén. Tesis para optar al Título de Geólogo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. 174 p.
- Bunn, A. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia* 26 (2), 115-124. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2008.01.002>

- Büntgen, Ulf & Myglan, Vladimir & Ljungqvist, Fredrik & McCormick, Michael & Di Cosmo, Nicola & Sigl, Michael & Jungclauss, Johann & Wagner, Sebastian & Krusic, Paul & Esper, Jan & Kaplan, Jed & Vaan, Michiel & Luterbacher, Jürg & Wacker, L. & Tegel, Willy & Kirilyanov, AV. (2016). Cooling and societal change during the Late Antique Little Ice Age from 536 to around 660 AD. *Nature Geoscience*, 9. 10.1038/ngeo2652.
- Chandler, B.M.P., et al. (2018). Glacial geomorphological mapping: A review of approaches and frameworks for best practice. *Earth-Science Reviews* 185, 806–846.
- CR2. (2023). Explorador climático. <http://explorador.cr2.cl/>
- Davies et al., (2020). The Evolution of the Patagonian Ice Sheet from 35 ka to the Present Day (PATICE). *Earth-Science Reviews*.
- Davies, B., & Glasser, N. (2012). Accelerating shrinkage of Patagonian glaciers from the Little Ice Age (AD 1870) to 2011, *Journal of Glaciology*, 58, 1063–1084.
- Dirección General de Aguas (DGA), 2022. METODOLOGÍA DEL INVENTARIO PÚBLICO DE GLACIARES, SDT N°447, 2022. Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas Unidad de Glaciología y Nieves.
- Donoso, C. 1981b. Ecología forestal. El bosque y su medioambiente. Editorial Universitaria, Santiago., Chile, 370 pp.
- Fernandez, S. R. (2012). Climate change and patagonian ice fields in Chile: A review. *Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium*, 3(1).
- Fernández, C. (2021). Cambios del área del glaciar Grey, Parque Nacional Torres del Paine, y su estudio a través de la climatología y la dendrocronología. [Tesis de pregrado]. Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Francou, B., Pouyaud B. and 12 others, (2004). Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos. Versión 1, Great Ice, IRD, France: 238pp.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree-ring and climate*. London, England: Academic Press.
- García, Juan & Kaplan, Mike & Hall, Brenda & Schaefer, J. & Vega, Rodrigo & Schwartz, Roseanne & Finkel, R.. (2012). Glacier expansion in southern Patagonia throughout the Antarctic cold reversal.
- Gari, J., Ortone-Lois, A., Pilato, G., Macote-Yparraguirre, E. & Cook, L. (2018). Estimación de la velocidad de desplazamiento del hielo en el glaciar Upsala mediante imágenes

SAR, IX Congreso de la Ciencia Cartográfica, 24-26 de octubre, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.

- Garreaud, R. D., Vuille, M., Compagnucci, R., & Marengo, J. (2009). Present-day south american climate. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 281(3-4), 180-195.
- Garreaud, R., P. Lopez, M. Minvielle, and M. Rojas, (2013): Large-Scale Control on the Patagonian Climate. *J. Climate*, 26, 215–230, <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00001.1>.
- Gastó, J., Fernando, D. (1993). Clasificación de ecorregiones y determinación de sitio y condición. Manual de aplicación a municipios y predios rurales.
- Gutiérrez, E. (2009). La dendrocronología: métodos y aplicaciones. https://www.researchgate.net/publication/228769173_La_dendrocronologia_metodos_y_aplicaciones
- Guzmán, M., Soto, P., & Aravena, JC. (2014). Análisis dendrocronológico de árboles muertos en pie de la especie *Pilgerodendron Uviferum* Florin (Ciprés de las Guaitecas), en el sector de Lago Toro, Provincia de Última Esperanza, Región de Magallanes. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 42(2), 5-16. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2014000200001>.
- Hadad, M. (2014). Efecto del clima en los anillos de crecimiento de *Araucaria araucana* en el norte de la Patagonia Argentina. *Ecosistemas* 23(3): 109- 111. Doi.: 10.7818/ECOS.2014.23-3.15
- Harris, I.C. (2019). Climatic Research Unit (CRU): Time-series (TS) datasets of variations in climate with variations in other phenomena v4. Centre for Environmental Data Analysis, . <http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/3587430e588b491e8a795664466a27d1>
- Holz, Andrés & Veblen, Thomas. (2012). Wildfire activity in rainforests in western Patagonia linked to the Southern Annular Mode. *International journal of wildfire*. 21. 114. 10.1071/WF10121.
- Holz, A., Hart, S., Williamson, G., Veblen, T., Aravena, J.C. (2018). Radial growth response to climate change along the latitudinal range of the world's southernmost conifer in southern South America. *Journal of Biogeography*. 45. 10.1111/jbi.13199.
- Holz, A. (2018). El cambio climático favorecería a los cipreses de las Guaitecas que crecen en Aysén. *Cambio Climático Chile*. <https://www.cambioclimaticochile.cl/2018/05/el-cambio-climatico-les-haria-bien-a-los-cipreses-de-las-guaitecas-que-crecen-en-aysen/>.

- Holmes, R. (1983). Computer-assisted quality control in tree-ring dating and measurement. *Tree Ring Bulletin*, 43, 69-75.
- Jacques-Coper, M., & Garreaud, R. (2014). Characterization of the 1970s climate shift in South America. *International Journal of Climatology*. 35. 10.1002/joc.4120.
- Jesus, A. (2020). Variaciones superficiales de los glaciares de la Sierra Nevada entre los años 1973-2020 mediante imágenes satelitales. [Tesis de pregrado]. Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
- Labarca, N. (2022). Análisis comparativo entre la dinámica del glaciar Stoppani (54°44'S 69°02'W), crecimiento de *Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.) Krasser y registros climáticos. Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. [Tesis de pregrado]. Universidad Alberto Hurtado, Santiago, Chile.
- Lara, A., R. Villalba, A. Wolodarsky-Franke, J. C. Aravena, B. H. Luckman, and E. Cuq, (2005): Spatial and temporal variation in *Nothofagus pumilio* growth at tree line along its latitudinal range (358409–558S) in the Chilean Andes. *J. Biogeogr.*, 32, 879–893.
- Lara, A., Bannister, J., Donoso, C., Rovere, A., Soto, D., Escobar, B., Premoli, A. (2013). *Pilgerodendron uviferum* (D. Don) Florin.
- Lara, A., Villalba, R., Urrutia, R. (2008). A 400-year tree-ring record of the Puelo River summer–fall streamflow in the Valdivian Rainforest eco-region, Chile. *Climatic Change*. 86. 331-356. 10.1007/s10584-007-9287-7.
- Lopez, P., P. Chevallier, V. Favier, B. Pouyaud, F. Ordenes, and J. Oerlemans, (2010): A regional view of fluctuations in glacier length in southern South America. *Global Planet. Change*, 71, 85–108.
- Mardones, M., González, L., King, R., & Campos, E. (2011). Variaciones glaciales durante el Holoceno en Patagonia Central, Aisén, Chile: evidencias geomorfológicas. *Andean geology*, 38(2), 371-392
http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-71062011000200007&lng=es&tlng=es.
- Martínez, O. (1981). Flora y fitosociología de un relicto de *Pilgerodendron uvifera* (D. Don) Florín en el Fundo San Pablo de Tregua. *Bosque* 4 (1): 3-11.
- Maturana, J., Bello, M., Manley, M. (2004). Antecedentes históricos y descripción del fenómeno El Niño, Oscilación del Sur. El Niño-La Niña 1997-2000. Sus Efectos en Chile. CONA, Chile, Valparaíso. pp. 13-27.

- Mouginot, J., & Rignot, E. (2015). Ice motion of the Patagonian Icefields of South America: 1984-2014. *Geophysical Research Letters*, 42(5), 1441-1449. <https://doi.org/10.1002/2014GL062661>
- Olave-Solar C., Santana A., Butorovic N., Acuña P. (2008). Variabilidad térmica en la Región nororiental de la Península de Brunswick, Magallanes, Chile, empleando datos landsat. *Anales Instituto Patagonia (Chile)*. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-686X2008000200001>.
- Rabassa, J. (2010). El cambio climático global en la Patagonia desde el viaje de Charles Darwin hasta nuestros días. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 67(1), 139-156. http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S000448222010000400014&lng=es&tIng=es.
- Rasmussen, L., H. Conway, and C. Raymond, (2007): Influence of upper air conditions on the Patagonia icefields. *Global Planet. Change*, 59, 203–216.
- Reynhout S., Kaplan M., Sagredo E., et al. (2022) Holocene glacier history of northeastern Cordillera Darwin, southernmost South America (55°S). *Quaternary Research*. 2022;105:166-181. doi:10.1017/qua.2021.45
- Reyes, A., Luckman, B., Smith, D., Clague, J., Dorp, R. (2006). Tree-Ring Dates for the Maximum Little Ice Age Advance of Kaskawulsh Glacier, St. Elias Mountains, Canada. *Arctic*. 59. 14-20. 10.14430/arctic359.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Rivera, A., Casassa, G., Acuña, C. & H. Lange. (2000). Variaciones recientes de glaciares en Chile. *Revista Investigaciones geográficas*, 34, 25-52.
- Rivera, A., Koppes, M., Bravo, C., and Aravena, J. C. (2011). Little Ice Age advance and retreat of Glaciar Jorge Montt, Chilean Patagonia, *Clim. Past*, 8, 403–414, <https://doi.org/10.5194/cp-8-403-2012>, 2012.
- Rivera, A. (2019). Científicos comprueban retroceso de Glaciar Grey en casi 19 kms². Nuevo poder. <https://www.nuevopoder.cl/cientificos-comprueban-retroceso-de-glaciar-grey-en-casi-19-kms2/>.
- Rodríguez R., Marticorena A., Teneb E. (2008) Plantas Vasculares De Los Rios Baker y Pascua, Region De Aisen, Chile. *Gayana Bot.* <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432008000100006>.

- Roig F., (1991). Dendrocronología y dendroclimatología del bosque de *Pilgerodendron uviferum* en su área norte de dispersión. *Bol la Soc Argentina Botánica* 27:217–234.
- Roig F., Boninsegna J. (1991) Estudios sobre el crecimiento radial, basal, en altura y de las condiciones climáticas que afectan el desarrollo de *Pilgerodendron uviferum*. *Rev Chil Hist Nat* 64:53–63.
- Roig, F., Villalba, R. (2008). Understanding Climate from Patagonian Tree Rings. *Developments in Quaternary Sciences*. 11. 411-435. [https://doi.org/10.1016/S1571-0866\(07\)10021-X](https://doi.org/10.1016/S1571-0866(07)10021-X).
- Ruiz, P. (2020). Relaciones entre clima, anillos de árboles y dinámica glaciaria en el Monte Tenerife, Provincia de Última Esperanza. [Tesis de magíster]. Universidad de Magallanes, Punta Arenas, Chile.
- Sagredo, Esteban & Villa-Martínez, Rodrigo & Kaplan, M.R. & Kubik, P.W. & Stern, Charles. (2011). Fluctuations of the Última Esperanza ice lobe (52°S), Chilean Patagonia, during the last glacial maximum and termination 1. *Geomorphology*. 125. 92-108. [10.1016/j.geomorph.2010.09.007](https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2010.09.007).
- Schneider, C., and D. Gies, (2004): Effects of El Niño-Southern Oscillation on southernmost South America precipitation at 53°S revealed from NCEP–NCAR reanalyses and weather station data. *Int. J. Climatol.*, 24, 1057–1076.
- Solomina, O. N., Bradley, R. S., Jomelli, V., Geirsdottir, A., Kaufman, D. S., Koch, J., McKay, N. P., Masiokas, M., Miller, G., Nesje, A., Nicolussi, K., Owen, L. A., Putnam, A. E., Wanner, H., Wiles, G., & Yang, B. (2016). Glacier fluctuations during the past 2000 years. *Quaternary Science Reviews*, 149, 61–90. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2016.04.008>
- Soteres, R. (2020). Anatomía de las Fluctuaciones Glaciales en Patagonia Norte Durante la Última Terminación Glacial. [Tesis doctoral]. Pontificia Universidad Católica de Chile. <https://repositorio.uc.cl/dspace/items/54a13b83-bfbc-4bd7-ae5f-6d036340b470>
- Stokes, M., and Smiley, T. (1968). *An Introduction to Tree-Ring Dating*. The University of Chicago Press.
- Sugiyama, S., Minowa, M. & Schaefer, M. (2019). Underwater ice terrace observed at the front of Glaciario Grey, a freshwater calving glacier in Patagonia. *Geophysical Research Letters*, 46, 2602–2609. <https://doi.org/10.1029/2018GL081441>.

- Szeicz. (1997). Growth trends and climatic sensitivity of trees in the North Patagonian rain forest of Chile. *Canadian Journal of Forest Research*. 27(7): 1003-1014. <https://doi.org/10.1139/x97-048>.
- Tamouk, Jamshid & Lotfi, Nasser & Farmanbar, Mina. (2013). Satellite image classification methods and Landsat 5TM bands.
- Unidad de Investigación Climática de la Universidad de East Anglia; Jones, PD; Harris, IC (2019): Unidad de Investigación Climática (CRU): Conjuntos de datos de series temporales (TS) de variaciones en el clima con variaciones en otros fenómenos v4. Centro de Análisis de Datos Ambientales. <http://catalogue.ceda.ac.uk/uuid/3587430e588b491e8a795664466a27d1>.
- Urrutia, R. (2002). Desarrollo de una cronología de anchos de anillos para alerce (*Fitzroya cupressoides*) y reconstrucción de la historia de incendios en el área de Abtao, Parque Nacional Chiloé, X Región. [Tesis de Pregrado]. Pontificia Universidad Católica, Santiago, Chile.
- Villalba, R., Lara, A., Boninsegna, J.A., Masiokas, M., Delgado, S., Aravena, J.C., Roig, F.A., Schmelter, A., Wolodarsky, A. and Ripalta A. (2003). Large-scale temperature changes across the Southern Andes: 20th century variations in the context of the past 400 years. *Climatic change* 59, 177-232.
- Villanueva D., J., J. Cerano P., D.W. Stahle, B.H. Luckman, M.D. Therrell I., M.K. Cleaveland y P.Z. Fulé. (2011). La dendrocronología y reconstrucciones paleoclimáticas en el norte-centro de México. : M. Caballero, B. Ortega G., comp. Escenarios de cambio climático: Registros del Cuaternario en América Latina I. UNAM, Instituto de Geofísica, Dirección General de Publicaciones y Fomento Editorial. México, D.F. p:47-72.
- Wigley, T. M. L., Briffa, K. R., & Jones, P. D. (1984). On the Average Value of Correlated Time Series, with Applications in Dendroclimatology and Hydrometeorology. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, 23(2), 201–213. https://www.ltrr.arizona.edu/~ellisqm/outgoing/dendroecology2014/readings/Wigley%20et%20al.%201984_EPS.pdf