



UNIVERSIDAD DE CHILE

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS ESCUELA
DE PREGRADO**

MEMORIA DE TITULO

**ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO DE *NOTHOFAGUS GLAUCA* EN
BOSQUES DE LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES, REGIÓN DEL MAULE.**

SALVADOR DAMIÁN ORELLANA MÁRQUEZ

**Santiago, Chile
2026**



UNIVERSIDAD DE CHILE

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS ESCUELA
DE PREGRADO**

MEMORIA DE TITULO

**ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO DE *NOTHOFAGUS GLAUCA* EN
BOSQUES DE LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES, REGIÓN DEL MAULE.**

**DENDROCHRONOLOGICAL ANALYSIS OF *NOTHOFAGUS GLAUCA* IN FORESTS
OF THE CAUQUENES RIVER BASIN, MAULE REGION.**

SALVADOR DAMIÁN ORELLANA MÁRQUEZ

**Santiago, Chile
2026**



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONOMICAS ESCUELA DE
PREGRADO

MEMORIA DE TITULO

ANÁLISIS DENDROCRONOLÓGICO DE *NOTHOFAGUS GLAUCA* EN
BOSQUES DE LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES, REGIÓN DEL MAULE.

Memoria para optar al título Profesional de
Ingeniero en Recursos Naturales Renovables

SALVADOR DAMIÁN ORELLANA MÁRQUEZ

PROFESORES GUÍAS

Álvaro Gutiérrez Ilabaca
Ingeniero Forestal, Dr.

6,7

Mauricio Galleguillos Torres
Ingeniero Agrónomo, Dr.

6,6

PROFESORES EVALUADORES

Luis Morales S.
Profesor de Cs. Naturales y Física, Dr.

6,6

Marcela Medel M.
Ingeniera Agrónoma, Enóloga, M.S. Dra.

7,0

COLABORADOR

Vinci Urra
Ing. Forestal, Magister.

Santiago, Chile
2026

DEDICATORIA Y AGRADECIMIENTOS

Agradecer al Instituto de Ecología y Biodiversidad (IEB), que apoyó y financió esta investigación a través del Proyecto ANID PIA/BASAL FB210006.

A mi familia y amistades, que me apoyaron en estos años de universidad.

Finalmente, a mis profesores y al equipo de Bosque Ciencia, por enseñarme y guiarme en este proceso.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
Objetivos	5
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos	5
MATERIALES Y MÉTODOS	6
Área de estudio.....	6
Preparación de materiales.....	7
Recolección de tarugos	7
Preparación de tarugos.....	8
Medición e intercorrelación de anillos.....	8
Caracterización del crecimiento radial y desarrollo de cronologías de crecimiento	9
Relación de crecimiento con variables climáticas e hidrológicas	10
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	12
Caracterización de crecimiento radial y cronologías de crecimiento.....	12
Relación de crecimiento radial con variables climáticas e hidrológicas	17
Implicancias para el estado de conservación de <i>N. glauca</i>	23
CONCLUSIONES	26
BIBLIOGRAFÍA	27

RESUMEN

Los ecosistemas mediterráneos de Chile central son altamente vulnerables al cambio climático y la presión antrópica. Durante la última década se ha evidenciado un déficit del recurso hídrico en la región del Maule que ha puesto en duda la funcionalidad y estabilidad de los bosques. En este contexto, este estudio se centra en *Nothofagus glauca* (hualo), una especie caducifolia endémica y vulnerable que domina la cuenca del Río Cauquenes. Su crecimiento radial, estrechamente vinculado a la disponibilidad hídrica estacional, la convierte en un bioindicador clave del estrés ambiental. Mediante un análisis dendrocronológico, se buscó identificar una señal climática común en la especie y cuantificar su respuesta a las variables climáticas e hidrológicas cambiantes. Se analizaron 46 árboles de tres sitios contrastantes, procesando las series de anillos de crecimiento con CooRecorder, CDendro, COFECHA y RStudio. Los resultados mostraron una señal común fuerte ($EPS > 0,85$ a partir de 1974) y una tendencia general de decaimiento en el crecimiento radial. Estos resultados preliminares demostraron que efectivamente el estudio del ancho de anillos es posible en el hualo, evidenciando que existe un crecimiento que responde de manera sincrónica a las variables ambientales e hidrológicas. Se identificó un quiebre en la humedad del suelo y en la precipitación acumulada anual desde 2006, el cual parece influir directamente en dicho crecimiento, sumado a que las temperaturas aumentan cada año y el caudal cada vez se hace menor. El análisis de función-respuesta reveló que las variables climáticas e hidrológicas tuvieron mayor relevancia durante la temporada de crecimiento. La humedad del suelo sería una variable clave que responde positivamente al aumento de la precipitación y el caudal, pero que se ve reducida por las temperaturas cada vez más cálidas debido al aumento de presión de vapor. En conclusión, la disponibilidad hídrica es el factor determinante del crecimiento radial de hualo en esta cuenca, por lo que el déficit hídrico actual representa una amenaza crítica para el desarrollo natural de esta especie vulnerable.

Palabras clave: Crecimiento radial, Cuenca del Río Cauquenes, *Nothofagus glauca*

ABSTRACT

The Mediterranean ecosystems of central Chile are highly vulnerable to climate change and human pressure. Over the past decade, a water resource deficit has become evident in the Maule region, calling into question the functionality and stability of the forests. In this context, this study focuses on *Nothofagus glauca* (hualo), an endemic and vulnerable deciduous species that dominates in the Cauquenes River Basin. Its radial growth, closely linked to seasonal water availability, makes it a key bioindicator of environmental stress. Using dendrochronological analysis, we sought to identify a common climatic signal in the species and quantify its response to changing climatic and hydrological variables. We analyzed 46 trees from three contrasting sites, processing the growth ring series with CooRecorder, CDendro, COFECHA, and RStudio. The results showed a strong common signal ($\text{EPS} > 0.85$ starting in 1974) and a general trend of decline in radial growth. These preliminary results demonstrated that the study of ring width is effectively possible in hualo, evidencing that there is growth that responds synchronously to environmental and hydrological variables. A break in soil moisture and annual accumulated precipitation was identified starting in 2006, which appears to directly influence this growth, compounded by the fact that temperatures are increasing every year and streamflow is decreasing. The response-function analysis revealed that climatic and hydrological variables were most relevant during the growing season. Soil moisture appears to be a key variable that responds positively to increases in precipitation and streamflow, but is reduced by increasingly warmer temperatures due to rising vapor pressure. In conclusion, water availability is the determining factor for the radial growth of hualo in this basin, therefore, the current water deficit poses a critical threat to the natural development of this vulnerable species.

Key words: Radial growth, Cauquenes River Basin, *Nothofagus glauca*

INTRODUCCIÓN

Los bosques cumplen funciones ecosistémicas esenciales para el bienestar del planeta, contribuyendo a la salud humana, sustentando culturas indígenas, reduciendo riesgos naturales, conservando la biodiversidad, regulando el clima y actuando como relevantes sumideros de carbono que mitigan el cambio climático (Watson et al., 2018). En particular, los bosques mediterráneos se encuentran entre los ecosistemas más amenazados por el cambio climático, cuyos impactos están afectando la provisión de servicios ecosistémicos, siendo la sequía y el cambio de uso de suelo las principales presiones, las cuales se proyecta que se intensificarán en el futuro (Peñuelas et al., 2017). En este escenario, Chile central adquiere mayor relevancia al ser uno de los hotspots prioritarios del mundo para la conservación de la biodiversidad mundial, debido a su aislamiento geográfico que eleva la riqueza y endemismo de la región (Armesto & Arroyo, 2007).

Chile central constituye un caso representativo de la vulnerabilidad de los ecosistemas mediterráneos frente al déficit hídrico y la presión antrópica. Esta región enfrenta una crisis ambiental sin precedentes impulsada por el cambio climático y sus condiciones locales que la hacen altamente vulnerable. Desde el 2010 se extiende el fenómeno de “megasequía”, resultando en una reducción de las precipitaciones de entre un 20% y 80%, con la consecuente disminución de caudales, escorrentía, humedad del suelo y aguas subterráneas (Bobadilla et al., 2024; Jana et al., 2019; Nuñez & Verbist, 2018), mostrando un escenario de déficit hídrico en la zona centro sur del país (Alvarez-Garretón et al., 2021). Este escenario de sequía, atribuida a la presión antrópica (Nuñez & Verbist, 2018), ha elevado la frecuencia e intensidad de incendios forestales, especialmente en los ecosistemas mediterráneos (González et al., 2011). En la región del Maule, este patrón climático compromete la estabilidad y funcionalidad de los ecosistemas nativos fragmentados y desplazados por plantaciones exóticas (e.g., *Pinus radiata*), debido a que estas tienden a disminuir el recurso hídrico en las cuencas mediterráneas (Galleguillos et al., 2021a). Un caso reconocido es la cuenca del río Cauquenes, donde se proyecta una disminución del caudal de hasta un 46.2% para el 2050, asociada a la reducción de precipitaciones, aumento de temperaturas y cambios de uso de suelo (Galleguillos et al., 2021b).

En los bosques mediterráneos pueden existir distintos grupos forestales, en donde en Chile central se encuentra el grupo del bosque maulino, presentando distintas especies de *Nothofagus*, teniendo especies del tipo siempreverdes y caducifolias (Armesto & Arroyo, 2007). En la cuenca del río Cauquenes domina el bosque caducifolio de *Nothofagus glauca* (hualo), especie endémica de los bosques mediterráneos de Chile, categorizada como vulnerable (Barstow et al., 2017), y con una distribución que abarca desde la Cordillera de la Costa hasta la de Los Andes (Muñoz et al., 2013). Como especie caducifolia, su crecimiento radial está estrechamente vinculado a la disponibilidad hídrica estacional, lo que le confiere un alto potencial como bioindicador en condiciones de estrés ambiental (Campelo et al., 2023; Santelices et al., 2020), y si bien presenta una gran variabilidad intraespecífica que

podría conferirle cierta resiliencia (Santelices et al., 2020), su productividad, vigor y resistencia a plagas está condicionada al régimen hídrico local (Altmann, 2013).

La humedad del suelo adquiere una importancia fundamental para el crecimiento radial de las especies arbóreas mediterráneas, debido a que suelos con mayor disponibilidad de agua tendrían una menor competencia entre especies, además de mejores respuestas frente al estrés por sequías debido a mejoras en resiliencia y recuperación (Chakraborty et al., 2021; Zolles et al., 2025). La humedad del suelo puede verse influenciada por el caudal (Sophocleous, 2002), de manera que este puede tener una alta correlación con el crecimiento radial, como se ha visto en otras especies de *Nothofagus* (Lara et al., 2015), lo que valida el uso del caudal como una señal integradora de la disponibilidad hídrica a escala de cuenca (Galleguillos et al., 2021a). Asimismo, otras especies del género han mostrado sensibilidad frente al aumento de temperaturas y disminución de precipitaciones, teniendo como resultado una reducción en el crecimiento radial de las especies (Venegas-González et al., 2018a).

A pesar de la evidencia científica respecto a estas variables climáticas (temperaturas y precipitaciones) e hidrológicas (caudal y humedad del suelo), existe un vacío en el conocimiento de la capacidad de adaptación real de hualo en la cuenca del río Cauquenes en el escenario actual de megasequía, fragmentación de paisaje e invasión de *Pinus radiata* (Bustamante & Simonetti, 2005; Santelices et al., 2020). Esta incertidumbre se extiende al ámbito de los efectos de legado, los cuales permanecen inexplorados para el hualo, poniendo en duda cómo el estrés hídrico acumulado trastocaría el crecimiento radial de la especie, en donde las reservas de carbono son clave para el crecimiento y las circunstancias de estrés en temporadas anteriores podrían influenciar significativamente en el crecimiento radial (Altmann, 2013; Hartmann & Trumbore, 2016). En consecuencia, surge la necesidad de investigar cómo la variabilidad climática e hidrológica, en un periodo de menor disponibilidad hídrica, puede generar tendencias y alterar los patrones sobre el crecimiento radial de hualo en esta zona amenazada.

Para abordar este vacío, la dendrocronología permite, a través del análisis de los anillos de crecimiento, analizar las respuestas interanuales de los árboles a los factores ambientales limitantes del pasado, dependiendo de cómo influye el entorno ambiental durante la estación de crecimiento del árbol (Fritts, 1976). Distintas especies de *Nothofagus* en los bosques mediterráneos del país han demostrado tener una alta sensibilidad en el crecimiento vinculado a las variaciones ambientales interanuales (Fajardo & Piper, 2011; Urrutia-Jalabert et al., 2021; Venegas-González et al., 2019), lo que permite una reconstrucción de las variables ambientales pasadas (Camarero et al., 2024). Sumado a esto, cada ecosistema responde de manera diferente a la variabilidad climática debido a las diferencias de sensibilidad, vulnerabilidad y adaptabilidad entre especies (Gao et al., 2018; Zhang et al., 2021), por lo que sería de interés conocer cómo se ven afectados estos ecosistemas a causa de la variabilidad climática y la hidrológica. De este modo, el hualo en este escenario de sequía representa un caso de estudio para examinar la aplicabilidad del campo de la dendrocronología y así caracterizar las respuestas de los bosques mediterráneos de la región del Maule frente a la variabilidad climática e hidrológica, generando información clave que

podría utilizarse en proyecciones de persistencia y en el apoyo de toma de decisiones en el contexto actual de cambio climático.

Por lo tanto, este estudio propone analizar los patrones de crecimiento radial de hualo en relación con las variables climáticas e hidrológicas en la cuenca del río Cauquenes, región del Maule. Frente a esto, la pregunta guía del estudio es: ¿Cuál es la relación entre los patrones de crecimiento radial de *Nothofagus glauca* con las variables climáticas e hidrológicas de los bosques en la cuenca del río Cauquenes?

Objetivos

Objetivo general

- Analizar los patrones de crecimiento radial de *Nothofagus glauca* en relación con la variabilidad climática e hidrológica de la cuenca del río Cauquenes en la región del Maule.

Objetivos específicos

- Caracterizar el crecimiento radial de *Nothofagus glauca* a través del desarrollo de cronologías de crecimiento.
- Relacionar el crecimiento radial de *Nothofagus glauca* con variables climáticas e hidrológicas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en la cuenca del río Cauquenes, específicamente en las comunas de Chanco y Cauquenes, ambas pertenecientes a la región del Maule en el área correspondiente a la cuenca del río Cauquenes (Figura 1).

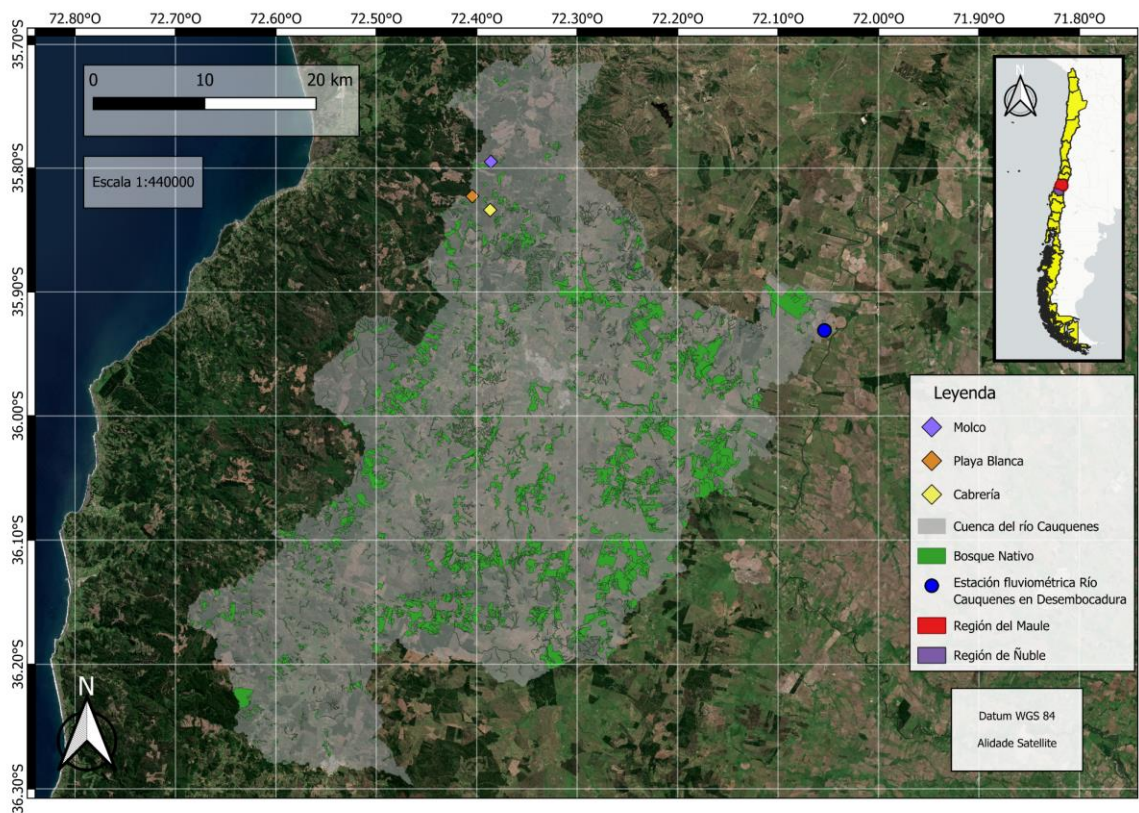


Figura 1: Área de estudio en la cuenca del río de Cauquenes, principalmente ubicada en la región del Maule (al norte) y una fracción en la región del Ñuble (al sur). Sitios de estudio ubicados en zona noroeste de la cuenca, mientras que la estación fluviométrica se localiza en zona noreste. Vegetación de bosque nativo fragmentado en el extenso de la cuenca.

El clima corresponde al tipo mediterráneo subhúmedo (Alvarez-Garretton et al., 2018; Di Castri & Hajek, 1976), el cual se caracteriza por un periodo frío y lluvioso y un periodo seco y cálido (Bouatrous et al., 2022). Esta zona posee un clima con precipitaciones que rondan entre los 600 y 900 mm al año en su periodo de invierno, mientras que para el periodo de verano la temperatura más alta supera los 22°C, considerándose así desde 1980 con una

clasificación de Köppen de Csb, lo que se traduce en un clima templado con veranos cálidos y secos (Beck et al., 2018; Proyecto CHI², 2025).

La cuenca del río Cauquenes abarca principalmente parte de la Cordillera de la Costa y la depresión intermedia, siendo administrada por las comunas de Cauquenes y Chanco en la región del Maule y Quirihue en la región Ñuble (Proyecto CHI², 2025). La cobertura que posee esta cuenca está dominada por matorrales y plantaciones forestales (43% cada una), seguido por áreas áridas (10%) y bosque nativo (3%) (Galleguillos et al., 2021a).

El área de estudio corresponde al Bosque Caducifolio Mediterráneo Costero de *Nothofagus glauca* - *Azara petiolaris*, encontrándose en un estado de conservación en peligro crítico (CR - Critically Endangered) (Ministerio del Medio Ambiente, 2026). La formación vegetal pertenece a bosque caducifolio y se distribuye entre laderas orientales de la cordillera de la costa de la región del Maule y el norte del Biobío (Luebert & Pliscoff, 2006; Ministerio del Medio Ambiente, 2026). Entre las especies dominantes del área de estudio se encuentra el hualo, sin embargo, la perturbación y degradación de los bosques caducifolios favorece la colonización de especies esclerófilas que impedirían la regeneración del bosque original (Ministerio del Medio Ambiente, 2026).

Se seleccionaron como sitios de muestreo tres bosques de hualo ubicados en los sectores de Molco, Cabrería y Playa Blanca, siendo el primero perteneciente a la comuna de Chanco y los dos últimos correspondientes a la comuna de Cauquenes (Figura 1). El criterio de elegibilidad se basó principalmente en instrumentar sitios situados en zonas de bosque nativo de la cuenca, con el fin de que la variación del ancho de anillos se vea afectada de mayor manera por razones climáticas e hidrológicas y evitar factores externos que puedan alterar el crecimiento radial.

Preparación de materiales

Recolección de tarugos

Para lograr los objetivos propuestos, el Laboratorio de Dinámica de la Vegetación, del Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables de la Universidad de Chile, extrajo tarugos de árboles de la especie hualo en el mes de diciembre del año 2024. La extracción se realizó con barrenos Pressler, específicamente en las localidades de Molco, Playa Blanca y Cabrería. Se recolectaron un total de 26 tarugos (13 árboles) en Molco, 71 (37 árboles) en Playa Blanca y 32 (16 árboles) en Cabrería, teniendo al menos dos muestras de cada árbol, lo que permitió seleccionar la más representativa y así analizar la secuencia de anillos desde la corteza hasta el centro (Fritts, 1976).

La selección de tarugos se realizó con el criterio de que el diámetro a la altura del pecho

(DAP) fuera mayor a 15 cm en Molco y Playa Blanca, y de 8.9 cm para Cabrería debido a la estructura de rodal propia del sitio. En todos los casos se priorizaron ejemplares vivos y sanos, restringiendo la inclusión de individuos enfermos y descartando por completo aquellos ejemplares muertos. Este criterio de selección proporciona la obtención de series de incremento representativas del crecimiento de *Nothofagus glauca* en el área de estudio para los análisis posteriores.

Preparación de tarugos

Los tarugos fueron montados en un soporte de madera, realizando posteriormente un corte longitudinal, humedeciendo la parte superior del tarugo para facilitar el corte y dejar expuesta la superficie transversal en cada tarugo (Fritts, 1976). Luego se realizó un lijado con una granulometría ascendente de un grano grueso a un grano fino, es decir, desde un grano de 500 o 600 a 800 para finalmente terminar con 1000 o 1200, con el fin de poder ver los anillos de crecimiento de manera más clara y poder realizar su respectivo conteo y medición (Fritts, 1976).

Medición e intercorrelación de anillos

Se digitalizaron los tarugos en una alta resolución (2400 o 3200 DPI según tamaño de la muestra), lo cual es recomendado para identificar de mejor manera los anillos (Maxwell & Larsson, 2021). Una vez hecho el escáner, con las imágenes resultantes se midieron los anchos de los anillos con el software CooRecorder, que permitió realizar la medición de la anchura de los anillos y además controlar la datación cruzada de forma preliminar (Maxwell & Larsson, 2021).

Para cada conjunto de muestras, según su lugar de recolección, se realizó una correlación cruzada para todas las muestras de cada grupo a través del software CDendro, pudiendo visualizar qué ejemplares mostraron una mejor correlación dentro de cada sitio. Posteriormente, se ingresaron uno a uno los archivos en el programa COFECHA, el cual se utilizó para evaluar la correlación cruzada realizada anteriormente, obteniendo recomendaciones para resolver desfases cronológicos encontrados, los cuales pueden deberse a causa de distintos anillos falsos o anillos ausentes, o simplemente a la falta de un tramo del tarugo (Grissino-Mayer, 2001). Se tomaron en cuenta las sugerencias dadas por COFECHA descritas en el resultado de cada tarugo, las cuales indicaron el grado de error en una datación específica que podría ser causa de un desfase, anillo ausente o falso, etc. (Grissino-Mayer, 2001). Se verificaron las imágenes digitales y, en caso de ser necesario, fueron revisadas a través de lupa y, en caso de ser pertinente, se corrigió la datación correspondiente. Así, se ingresaron nuevamente a COFECHA para verificar que los anillos estuvieran marcados de manera correcta en cada muestra. De esta manera, se realizó un proceso reiterativo de CooRecorder, CDendro y COFECHA, buscando obtener una datación cruzada consistente

de las muestras a través de la creación de una cronología maestra y una constante revisión de las modificaciones realizadas.

Caracterización del crecimiento radial y desarrollo de cronologías de crecimiento

Previo al desarrollo de las cronologías de crecimiento radial de hualo en la cuenca del río Cauquenes, se aplicó el método de estandarización de exponencial negativa modificada mediante la función `detrend` (`method = ModNegExp`) del paquete de R `dplR` (Bunn et al., 2025). Este enfoque conservador permite remover la tendencia de crecimiento biológico y capturar de mejor manera la sensibilidad del crecimiento radial al clima de la cuenca, ajustando una curva exponencial o un modelo lineal según la naturaleza de los datos (Assefa et al., 2025; Bunn, 2008; Ols et al., 2023). De manera adicional, se integró una cronología de los datos brutos para observar el crecimiento de anillos año tras año con un `spline` (solo para visualización) de 67% (Cook & Kairiukstis, 1990), de manera que se pueda identificar el periodo de rápido crecimiento juvenil y el periodo de equilibrio en un estado ya de maduración (Cook, 1985).

Con esta información previa, se utilizó la función `rwi.stats.running` de `dplR` (Bunn et al., 2025) para obtener el valor de la señal poblacional expresada (EPS) en distintas ventanas de tiempo, obteniendo las ventanas de años en que la cronología de la cuenca cuenta con el estándar de mayor a 0,85 para que fuera considerada de calidad (Buras, 2017; Wigley et al., 1984), descartando así los años que no cumplen con la calidad deseada.

Para caracterizar las cronologías, se calcularon algunos estadísticos descriptivos abarcando los años obtenidos que cumplen con el requisito de EPS, recortando la cronología en función de las ventanas de años obtenidas. A través del paquete de `dplR` (Bunn et al., 2025), se aplicó la función `sens1` para obtener la sensibilidad media; para la intercorrelación media se utilizó `interseries.cor`; y por último `rwi.stats` para obtener el `Rbar_tot`, la relación señal-ruido (SNR) y el EPS. La sensibilidad media indica la variabilidad interanual o señal climática que varía entre 0 y 1, en donde si todos los anillos tuvieran el mismo ancho, la sensibilidad sería igual a 0 (Speer, 2010). El `Rbar_tot` o correlación media indica la correlación promedio con todas las series posibles (Cook et al., 2000), y de manera similar la intercorrelación indica cómo se relaciona una serie de anillos con la cronología maestra de su sitio (Speer, 2010). El SNR indica la proporción entre la varianza climática y la señal que proviene de factores externos (ruido) (Villanueva-Díaz et al., 2018).

Se integró la función `bai.out` de `dplR` (Bunn et al., 2025), pudiendo estimar la incremento de área basal cada año, observando tendencias que puedan estar relacionadas con alteraciones de crecimiento por edad o perturbaciones climáticas (Biondi & Qeadan, 2008; LeBlanc & Raynal, 1990; Visser, 1995), a la cual se le integró un `spline` (solo para visualización) con ventana de 34 años, equivalente al 67% de años (Cook & Kairiukstis, 1990) para suavizar la serie y tener una mejor comprensión de las tendencias. Finalmente, a partir de los anchos de

anillos de la cuenca y su posterior estandarización exponencial negativa modificada, se generaron dos tipos de cronologías: (1) una cronología estándar que preserva las señales de baja frecuencia y refleja cómo el crecimiento de un año depende tanto del clima actual como de condiciones previas. y (2) una cronología residual que muestra las señales de alta frecuencia (Moya & Lara, 2011) que aísla la parte del crecimiento explicada por el clima del mismo año, eliminando memoria biológica. El análisis de ambas cronologías permite observar sincronías y tendencias comunes entre sitios.

Relación de crecimiento con variables climáticas e hidrológicas

Las condiciones climáticas e hidrológicas pueden ser factores determinantes al estimular o limitar el crecimiento radial de las especies arbóreas (Oogathoo et al., 2024; Stockton & Jacoby, 1976). Para relacionar el crecimiento radial de hualo con la variabilidad climática, se emplearon los datos obtenidos de CR2MET correspondientes a cada sitio de estudio. Se utilizaron las variables de promedio mensual para la temperatura máxima y mínima, y el acumulado mensual de precipitación para el periodo 1960-2021 (Boisier, 2023). En cuanto a la hidrografía de la cuenca, se consideró el caudal medio mensual del río Cauquenes en la estación en Desembocadura para el periodo 1986-2020, recuperado de CAMELS-CL, además de un promedio mensual de la humedad del suelo entre los años 1974 y 2023. De esta forma, las bases de datos se obtuvieron del explorador climático del (CR)2, salvo la humedad del suelo, la cual se obtuvo desde ERA5-Land (Muñoz, 2019), producto que tiene ventajosos resultados de la zona y otorga múltiples profundidades (Nuñez-Ibarra et al., 2025). Para el análisis de la humedad de suelo se utilizó la media mensual en un perfil de 0 a 255 cm, permitiendo conocer la relación entre el crecimiento radial y de humedad del suelo en zona de raíces.

Para revisar la situación actual de la cuenca en el contexto de déficit hídrico, se graficaron las precipitaciones acumuladas anuales, las temperaturas máximas medias anuales, el caudal medio anual y la humedad del suelo anual para identificar tendencias en el periodo del estudio. Para complementar las gráficas del clima, se realizó una prueba de Pettitt a través de `pettitt.test` del paquete de R `trend` (Pohlert, 2023) para identificar posibles puntos de quiebre de las variables en el periodo de estudio (Pettitt, 1979). Esta prueba permite encontrar puntos de quiebre en variables climáticas e hidrológicas (Hurtado et al., 2020; Mersin et al., 2022). Sobre esta base, se trazaron líneas de tendencia para observar el comportamiento de las variables antes y después de dichos puntos de inflexión.

Debido a la existencia de vacíos en los registros en los datos del caudal de la estación río Cauquenes en Desembocadura, se realizó una imputación multivariada por ecuaciones encadenadas a través de la función `mice` del paquete de R `mice` (van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2011) para completar las series de datos faltantes, con el fin de evitar que entorpecieran el uso de funciones posteriores. La función `mice` genera series de datos faltantes a partir de una matriz con los datos climáticos y de humedad del suelo del intervalo de años a trabajar, de manera que se preservaron las relaciones comunes entre variables,

permitiendo su uso en distintos contextos, incluidos los hidrológicos (Oliveira et al., 2021; van Buuren & Groothuis-Oudshoorn, 2011).

Para los análisis posteriores y con el fin de evitar errores, se realizó una transformación del año calendario de las variables hacía un año basado en la temporada de crecimiento, debido a que, para el hemisferio sur, se recomienda que las series de anillos se retrasen aproximadamente 6 meses, pudiendo variar según la especie y el área de estudio (Büntgen & Oppenheimer, 2020). Para el caso de estudio, las precipitaciones en Chile central tienen mayor relevancia desde mayo (Venegas-González et al., 2018a, 2019), por lo que se le restaron 4 meses a cada mes para que la temporada de crecimiento concordara con el año calendario, de manera que el año iniciara en mayo y finalizara en abril.

Finalmente, se llevó a cabo un análisis de función-respuesta mediante la cronología residual de la cuenca y a través de la función dcc de la librería treeclim (Zang & Biondi, 2015). Esta función utiliza remuestreo bootstrap estacionario para obtener estimaciones robustas en función de la correlación y así determinar qué meses son importantes en relación con la variable a analizar (Altman et al., 2025; Zang & Biondi, 2013, 2015). El análisis función-respuesta considera tanto la temporada de crecimiento como la temporada anterior, debido a que el crecimiento radial se puede ver condicionado por las condiciones climáticas e hidrológicas de ambas temporadas (Fritts, 1976). De esta manera, se determinó en qué meses específicos las condiciones ambientales e hidrológicas ejercen un mayor control sobre el crecimiento de la especie.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización de crecimiento radial y cronologías de crecimiento

En total se utilizaron 46 árboles de *Nothofagus glauca* recolectados en 3 sitios. Se seleccionaron las muestras más representativas y que mejor correlacionaran en el software CDendro para conformar la cronología a nivel de cuenca, buscando una representatividad entre parcelas. La muestra final se distribuyó con 16 árboles para Cabrería, 12 para Molco y 18 para Playa Blanca (Cuadro 1).

Cuadro 1. Estadígrafo de crecimiento radial para el periodo cubierto por cada cronología cuando $EPS > 0,85$ (1974-2023).

Sitio	Árboles	Largo de años promedio	Sensibilidad media	Rbar_tot	Intercorrelación media	SNR
Cabrería	16	29,8	0,37	0,49	0,66	6,8
Molco	12	48,4	0,30	0,35	0,55	6,4
Playa Blanca	18	40,8	0,30	0,41	0,65	11,2
Cuenca	46	39	0,33	0,34	0,60	17,8

Para esta ventana de años (1974-2023), la sensibilidad media tuvo un valor entre 0,2 y 0,4 para cada sitio, mientras que para la cuenca se obtuvo un valor de 0,33, lo que indica que tiene una sensibilidad suficiente para un análisis climático (Speer, 2010). Para el Rbar_tot o correlación media de sitio, el mayor valor lo consiguió Cabrería con 0,49, mientras que la cuenca se obtuvo 0,34. Por su parte, la intercorrelación media de la cuenca se obtuvo un valor de 0,60, por lo que, si comparamos estos valores con otros estudios del género de *Nothofagus*, estos se encuentran dentro de los rangos esperados (Álvarez et al., 2015; Lara et al., 2001; Santelices-Moya et al., 2022; Schneider-Valenzuela et al., 2025; Suarez, 2010). Respecto al SNR, todos los sitios lograron un valor sobre 6, permitiendo que el valor del EPS sea mayor al umbral teórico de 0,85 para la cuenca, logrando así valores confiables y de calidad a nivel de cuenca (Buras, 2017; Wigley et al., 1984).

El valor EPS alcanzó el umbral de 0,85 desde la ventana de 1974–2003, manteniéndose posteriormente sobre 0,85 y estable junto al Rbar_tot (Cuadro 2). En consecuencia, se utilizó el periodo desde 1974 hasta 2023 para realizar los análisis dendrocronológicos, garantizando que los resultados fueran considerados confiables y de calidad a partir de ese periodo.

Cuadro 2. Ventana móvil de 30 años y 25 de solape para Rbar_tot y EPS a nivel de cuenca del río Cauquenes.

Primer año - Último año	Árboles	Rbar_tot	EPS	Calidad de cronología
1959 - 1988	34	0,32	0,60	Débil
1964 - 1993	37	0,28	0,78	Débil
1969 - 1998	44	0,24	0,79	Débil
1974 - 2003	46	0,33	0,86	Confiable
1979 - 2008	46	0,36	0,92	Confiable
1984 - 2013	46	0,32	0,93	Confiable
1989 - 2018	46	0,30	0,92	Confiable
1994 - 2023	46	0,36	0,93	Confiable

La Figura 2 muestra el promedio del crecimiento radial, evidenciando una disminución progresiva en el crecimiento radial de árboles a lo largo de los años, reflejando así un rápido crecimiento en el ancho de anillos en edades más jóvenes. Al alcanzar la madurez, el crecimiento disminuiría gradualmente con el tiempo, siendo similar a lo que ocurre en otros ecosistemas de bosques jóvenes (Hara, 2018; Lundqvist et al., 2018).

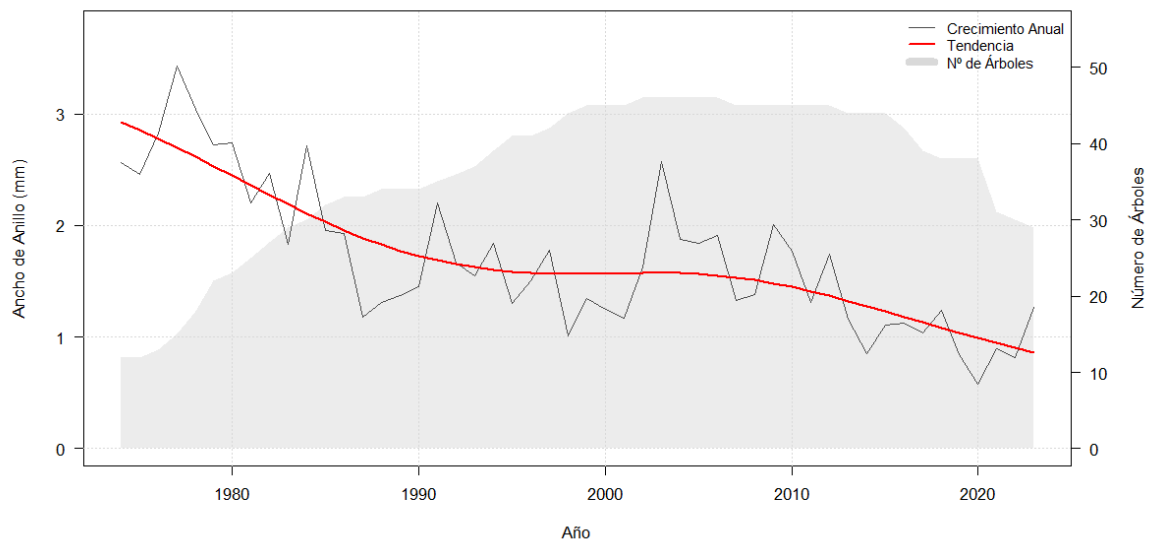


Figura 2. Serie maestra de ancho de anillos de la cuenca del río Cauquenes. La línea negra corresponde al promedio del crecimiento radial anual, mientras que la línea roja corresponde a la tendencia con un spline de 34 años. El número de árboles de cada año se representa en el área sombreada.

En cuanto al incremento del área basal (Figura 3), se evidenció una dinámica fluctuante a lo largo del periodo de estudio. Se observa una marcada disminución en la tasa de crecimiento

en la década de 1980 y levemente en 2010. La reducción del crecimiento radial de 1980 podría ser ocasionada por el término de la etapa de crecimiento inicial, la que puede durar alrededor de 20 años, iniciando una etapa en que la competencia intensificada por recursos trae consigo una disminución sustancial del crecimiento hasta que se vuelva a estabilizar (Binkley et al., 2002; West, 2024). Respecto al sutil descenso en 2010 del BAI, está coincide con la megasequía en el territorio de Chile central, la que repercutiría en la disminución del incremento del área basal de bosques nativos en la zona de estudio (Garreaud et al., 2017), sugiriendo alteraciones provocadas por las temperaturas más cálidas y la disminución de precipitaciones (Walter et al., 2016).

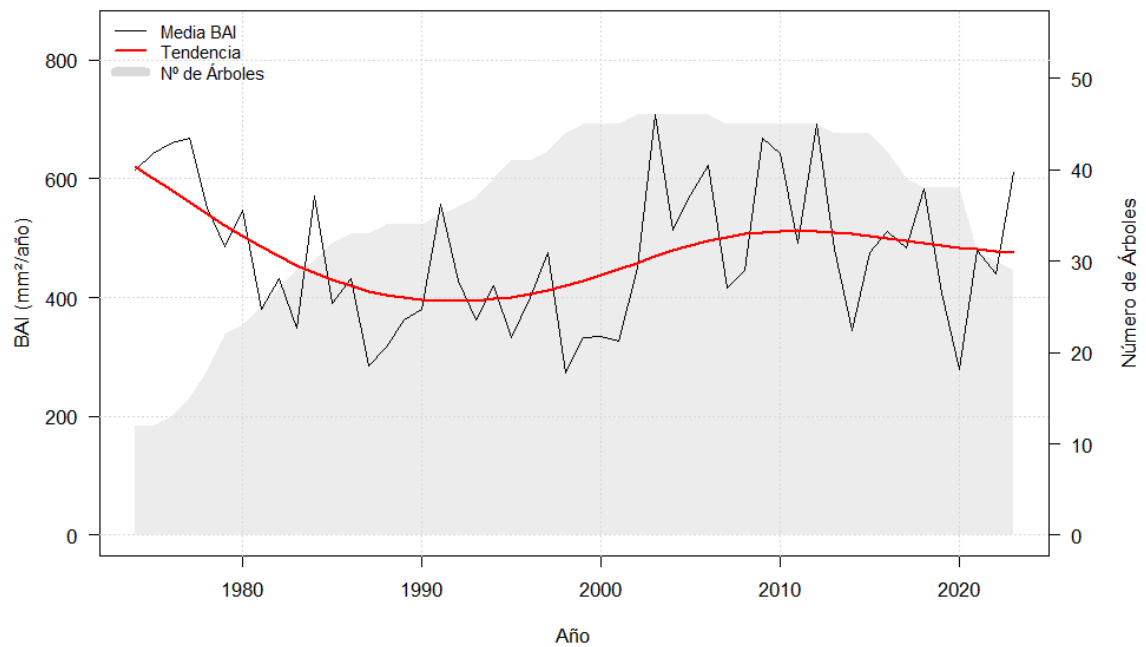


Figura 3. Serie de incremento anual de área basal (BAI) de la cuenca. La línea negra corresponde al crecimiento del área basal anual, mientras que la línea roja corresponde a la tendencia con un spline de 34 años. El número de árboles de cada año se representa en el área sombreada.

Sin embargo, estas señales están influenciadas por la memoria biológica, por lo que su estandarización es clave para avalar las cronologías influenciadas por efectos climáticos. Por lo que se realizó la estandarización de exponencial negativa modificada debido a la naturaleza de los datos, los cuales evidenciaron un rápido crecimiento de hualo en sus etapas iniciales que disminuiría gradualmente.

La consistencia de los datos obtenidos se puede ver reflejada en las cronologías estandarizadas (Figura 4), ya que se evidencia una historia común entre los 3 sitios

individuales, tanto en la cronología estándar (señales de baja frecuencia que exhiben variaciones de largo plazo) (Figura 4A) como en la cronología residual (señales de alta frecuencia que resaltan variaciones de corto plazo) (Figura 4B) (Fritts, 1976; Moya & Lara, 2011). Sin embargo, el sitio de Cabrería expresa los patrones de crecimiento de manera acentuada, probablemente debido a su sensibilidad media mayor (expuesta en el Cuadro 2). Además, tal como se ve en el cuadro 2, se logra apreciar cómo la sincronía de las cronologías entre sitios aumenta a medida que pasan los años e incrementa el número de árboles (Figura 4C).

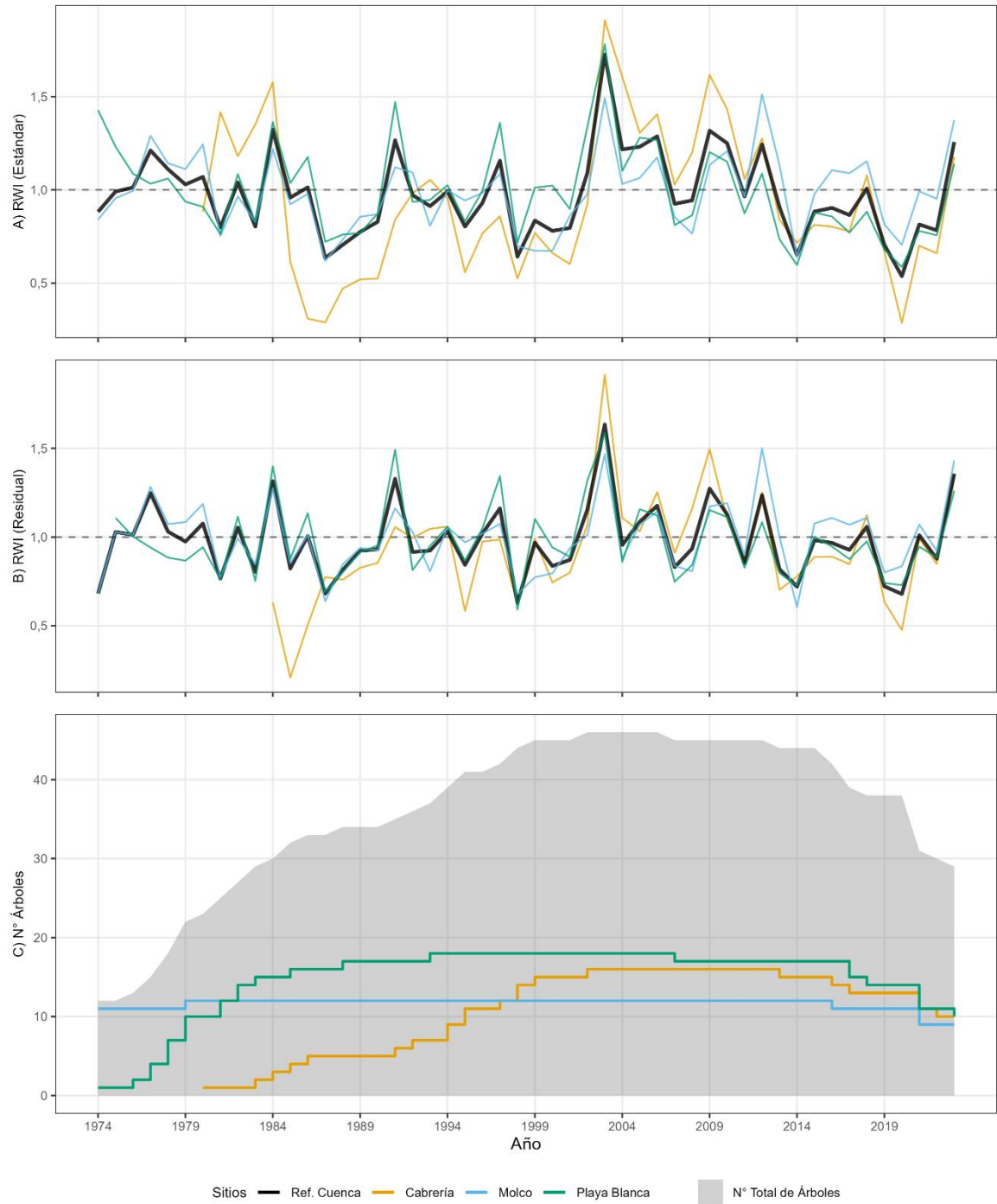


Figura 4: Cronologías estandarizadas con el método de ModNegExp, en donde A) muestra la cronología estándar de la cuenca sobrepuesta con las cronologías de cada sitio, mientras que B) muestra la cronología residual de la cuenca sobrepuesta con las cronologías de cada sitio. También se incluye en C) el número de árboles por cada sitio, mostrando el total de muestras en un área sombreada.

En la cronología estándar y residual, el sitio de Cabrería, debido a que es un bosque joven, presenta patrones de crecimiento más notorios en comparación al resto de sitios, reflejando una sensibilidad mayor que da como resultado respuestas más intensas a fenómenos climáticos positivos y negativos (e.g., años lluviosos, años secos) (Alfaro-Sánchez et al., 2019; Balaguer-Romano et al., 2025), mientras que el resto de sitios, al poseer árboles de mayor edad, estos no son tan sensibles a los fenómenos climáticos y por ende sus respuestas a estos son atenuadas. En la cronología estándar coincide la tendencia que se muestra en el BAI, en donde hubo una disminución en el crecimiento radial de los árboles (en 2004, consolidándose desde el 2010), probablemente fortalecida por la megasequía que afecta a Chile central. En cuanto a la cronología residual, esta muestra distintos picos que mostrarían variaciones anuales que se deberían a efectos en la variabilidad climática e hidrológica de la cuenca que provocan estos incrementos y disminuciones en el crecimiento radial (e.g., El Niño, La Niña).

Relación de crecimiento radial con variables climáticas e hidrológicas

La sequía que afecta a la zona central del país trae consigo una disminución considerable de las precipitaciones, tendencia que se ha ido agudizando con el paso de los años. Las precipitaciones (Figura 5) tuvieron un periodo de relativa estabilidad en el primer periodo (1974-2005), sin embargo, se identificó un punto de quiebre significativo en 2006 ($p=0,024$), viéndose reducidas considerablemente las precipitaciones del 2006 en adelante (disminución de aproximadamente 2,1 mm por año). En contraste, las temperaturas máximas (Figura 6) muestran una tendencia significativa en el alza de temperaturas máximas con un aumento estimado de 0,009 °C por año. Esto se traduce en una elevación de 0,4 °C en el promedio de las máximas entre 1974 y 2022.

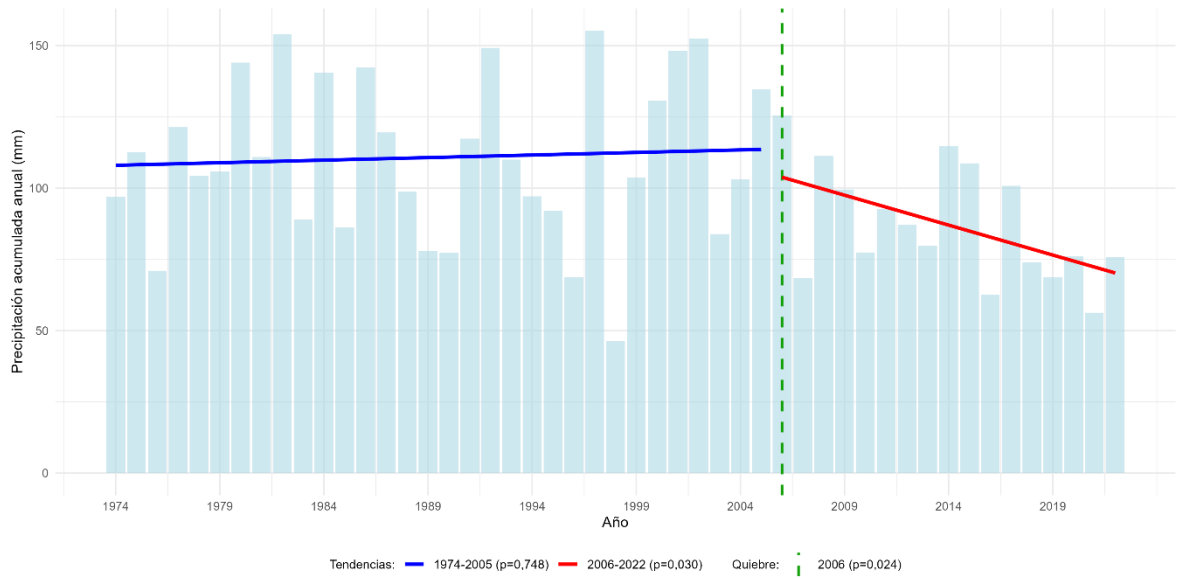


Figura 5: Precipitación acumulada anual de 1974 a 2022 en mm. Se incluye año de quiebre en 2006 resultante de la prueba de Pettitt. La línea de tendencia azul muestra un leve aumento entre 1974 y 2005, mientras que la línea roja muestra una disminución significativa entre 2006 y 2022 ($m=-2,101$).



Figura 6: Temperatura máxima media anual de 1974 a 2022 en °C. Aumento de temperatura significativo visualizado en línea de tendencia ($m=0,009$).

Respecto al caudal (Figura 7) y al volumen de humedad del suelo (Figura 8), se observó una disminución significativa para ambas variables. El caudal presenta una disminución significativa desde 1986 hasta 2019. Respecto a la humedad del suelo, esta viene decreciendo en su contenido volumétrico de agua en el suelo de manera insignificante desde 1974. Sin embargo, al igual que las precipitaciones, estas presentan un quiebre significativo en el 2006 ($p=0,001$), para posteriormente disminuir significativamente su nivel de humedad del suelo cada año (reduciendo el contenido volumétrico de agua en el suelo en un $0,002 \text{ m}^3/\text{m}^3$ por año).

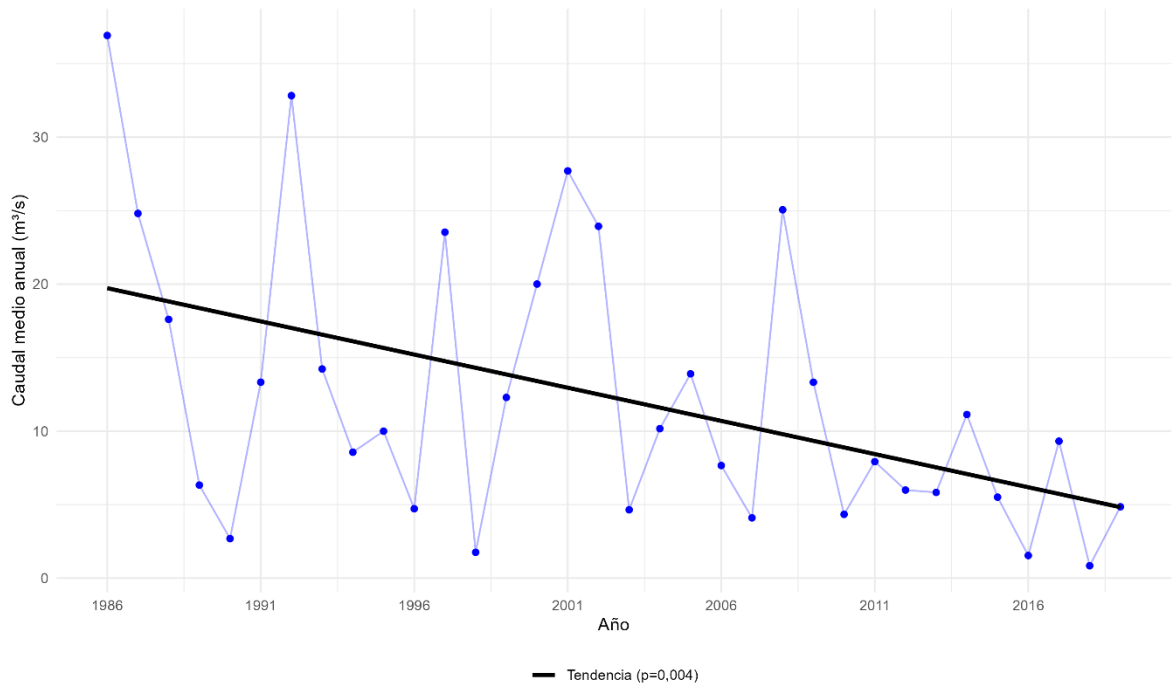


Figura 7: Caudal medio anual de 1986 a 2019 en m^3/s . Disminución de caudal significativo visualizado en línea de tendencia ($m=-0,451$).

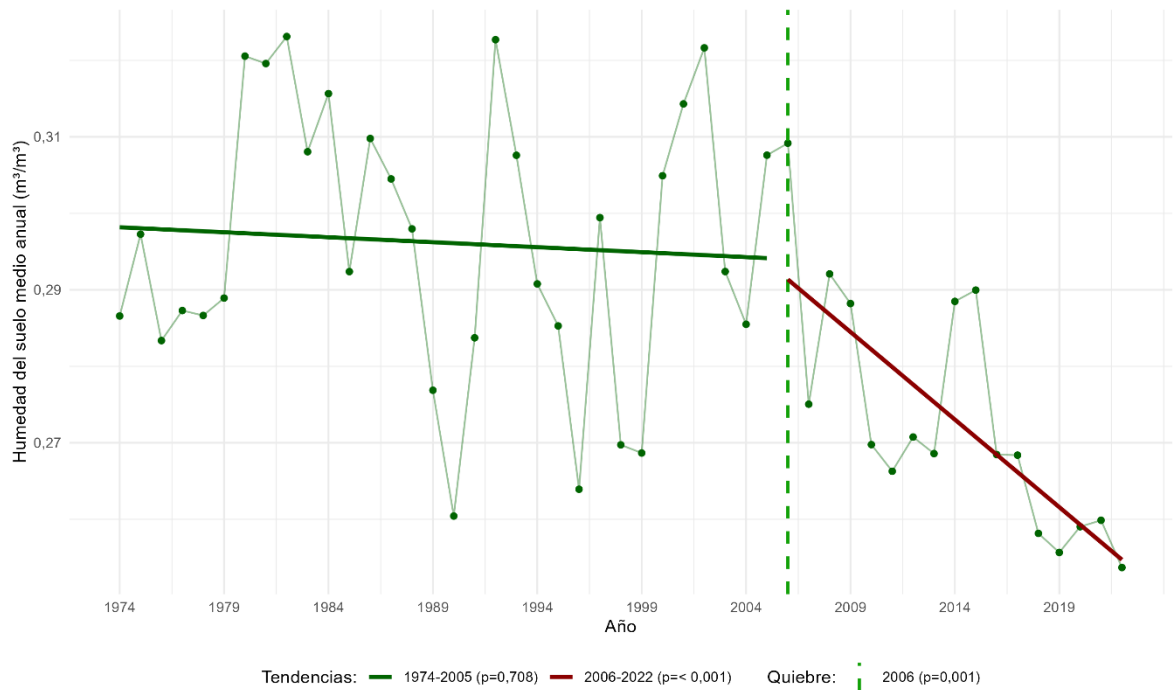


Figura 8: Humedad del suelo media anual de 1974 a 2022 en m^3/m^3 . Se incluye año de quiebre en 2006 resultante de la prueba de Pettitt. La línea de tendencia verde muestra un leve descenso entre 1974 y 2005, mientras que la línea café muestra una disminución significativa entre 2006 y 2022 ($m=-0.002$).

Las tendencias de este estilo son potencialmente perjudiciales ya que una fuerte disminución de lluvias podría traer consecuencias en el crecimiento radial de las especies de *Nothofagus glauca*, y como se ha visto en otras especies del género, estas han visto un menor crecimiento ante el déficit de precipitaciones (Santelices-Moya et al., 2022; Venegas-González et al., 2018a). Respecto a las temperaturas máximas, el continuo aumento de estas puede potenciar efectos negativos en el crecimiento radial del hualo (Matskovsky et al., 2021; Urrutia-Jalabert et al., 2021). En relación a la humedad del suelo, esta tiene un nexo importante con el caudal debido a la continuidad hidrológica y su importancia en la recarga de aguas subterráneas de la cuenca (Sophocleous, 2002), por lo que la disminución de ambas variables (sumado a las temperaturas más cálidas y la disminución de precipitaciones), podrían tener repercusiones negativas los niveles de humedad del suelo y el crecimiento radial del hualo (Lara et al., 2015).

El análisis función-respuesta (Figura 9) reveló que la temperatura máxima (Figura 9A) es significativa en los meses de noviembre y diciembre del año de crecimiento, indicando que, al aumentar esta variable, el crecimiento radial es menor (coeficiente de -0,25 y -0,39 respectivamente), pudiendo significar que una mayor temperatura en esos meses disminuye el crecimiento radial. Por otro lado, la temperatura mínima (Figura 9B) en septiembre de la

temporada de crecimiento tuvo una correlación positiva (coeficiente: 0,21), mientras que en diciembre de la misma temporada tuvo una correlación negativa (coeficiente: -0,28).

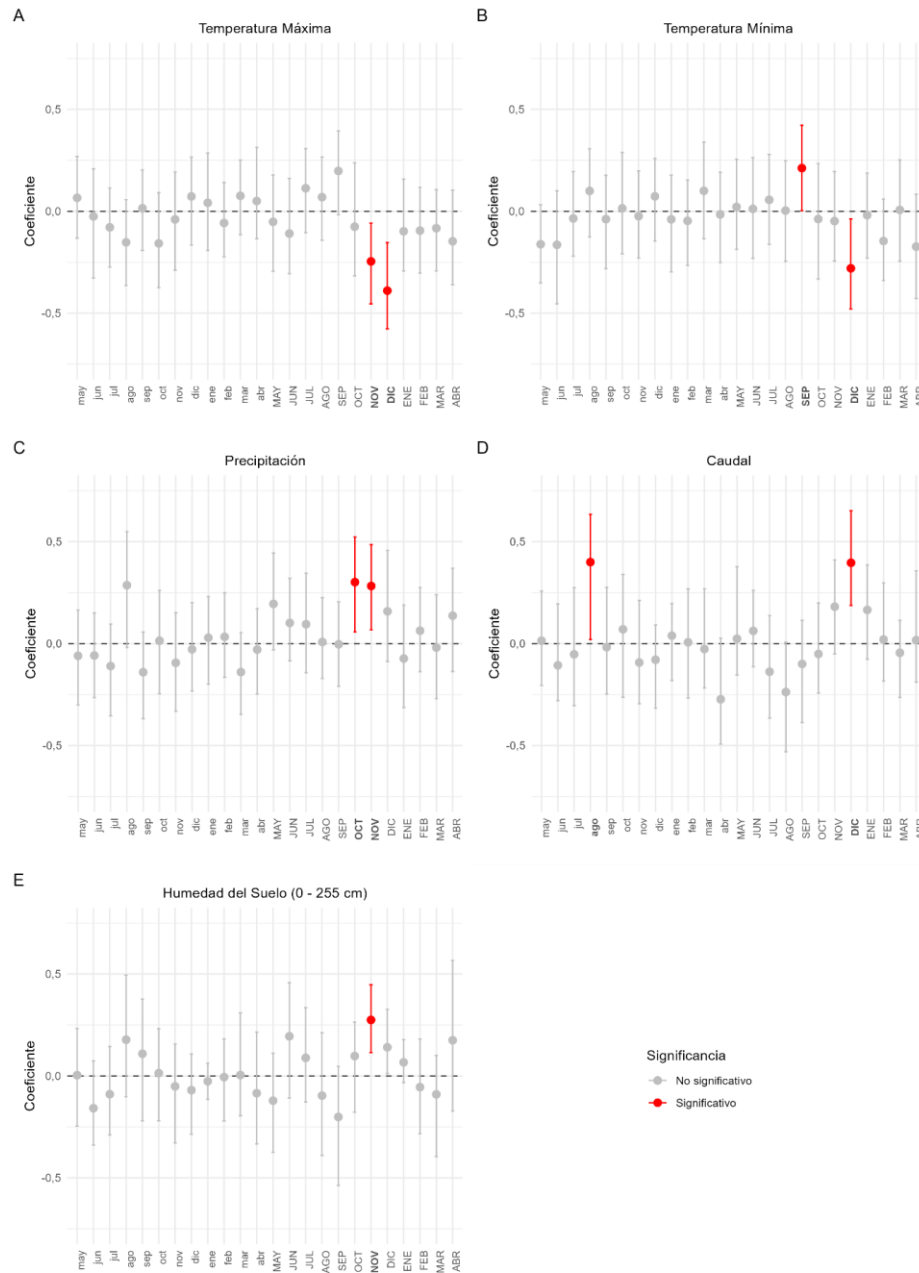


Figura 9: Gráficos función-respuesta de variables ambientales y variables hidrológicas con el crecimiento radial. Las variables se encuentran separadas en: A) Temperatura máxima media mensual; B) Temperatura mínima media mensual; C) Precipitación mensual acumulada; D) Caudal medio mensual; E) Humedad del Suelo (0 - 255 cm) media mensual. Líneas rojas indican valores significativos, mientras que las grises corresponden a valores no significativos, las cuales denotan el coeficiente y su intervalo de confianza.

La correlación negativa de las temperaturas máximas sugieren que el calor excesivo de fines de primavera e inicios de verano inducen un mayor déficit de presión de vapor y por ende una disminución de la disponibilidad de agua para las plantas, limitando el crecimiento de árboles tal como se ha observado en estudios previos en otros bosques mediterráneos (Rita et al., 2020; Urrutia-Jalabert et al., 2015; Urrutia-Jalabert et al., 2021; Vicente-Serrano et al., 2015). Respecto a la correlación positiva de la temperatura mínima en septiembre, esta puede deberse a que en este mes comienza la primavera, y las temperaturas más cálidas de la noche durante este periodo permite la formación de células nuevas del cambium vascular, debido a que las especies arbóreas, por lo general crecen en la noche (01:00 – 06:00), impulsando el crecimiento radial del árbol (Begum et al., 2013; Zweifel et al., 2021). Por otro lado, la correlación negativa de las temperaturas mínimas del mes de diciembre estaría estrechamente relacionada con la significancia de la temperatura máxima en este mismo mes, por lo que su aumento promueve la evapotranspiración del bosque y, por ende, un menor crecimiento del hualo (Venegas-González et al., 2018a).

Para las precipitaciones (Figura 9C), los meses de octubre y noviembre de la temporada de crecimiento tuvieron una correlación positiva con el crecimiento radial (coeficiente de 0,30 y 0,28 respectivamente), induciendo que las precipitaciones en los meses de primavera promueven el crecimiento radial de hualo del mismo año. El caudal, como se ve en la Figura 9D, tuvo una correlación positiva en el mes de agosto de la temporada anterior al crecimiento (coeficiente: 0,40) y en diciembre de la temporada de crecimiento (coeficiente: 0,41). Sin embargo, el coeficiente de agosto de la temporada previa al crecimiento presenta un rango amplio en la dispersión de datos, situando el límite inferior levemente sobre el 0, sugiriendo que su efecto podría no ser constante.

Centrándose en la recarga hídrica en el año de crecimiento, la precipitación comprende una correlación positiva en los meses de primavera para otros bosques del género (Venegas-González et al., 2018a), otorgándole sentido a la significancia de la precipitación. Por otro lado, para el caudal y su significancia en invierno de la temporada previa de crecimiento puede deberse a que la presencia de humedad en el suelo el año anterior puede tener un efecto potenciador en el crecimiento de los árboles (Gou et al., 2025). En relación al año previo al crecimiento, este induce a las recargas de aguas subterráneas de la cuenca (atribuido al caudal de invierno), generando un almacenamiento de agua y proporcionando un sustento para el crecimiento de raíces en primavera que podrían ser utilizadas a futuro por el hualo, por lo que el crecimiento radial se vería menos afectado por el estrés hídrico de primavera (Gou et al., 2025; Sophocleous, 2002; Zhao et al., 2023).

En periodos de estrés (e.g., sequía) el árbol puede priorizar la acumulación de reservas de carbono, priorizando así la supervivencia en situaciones adversas y llevar a segundo plano el crecimiento radial, utilizando así sus nutrientes en mecanismos de defensa y almacenamiento

(Hartmann & Trumbore, 2016). Las reservas de carbono quedarían almacenadas y podrían ser utilizadas en la temporada de crecimiento posterior debido a los efectos de legado (Fritts, 1976), y sumado a su condición de caducifolio, estas reservas pueden ser críticas para la temporada siguiente (Altmann, 2013). De este modo, las precipitaciones de primavera quedarían almacenadas en diversas zonas de la cuenca para liberarse progresivamente en verano (Alvarez-Garreton et al., 2021). Esto permitiría un mayor suministro del recurso hídrico que elevaría la disponibilidad de aguas subterráneas de la cuenca, aumentando la humedad del suelo y permitiéndole a las raíces de los árboles de la cuenca alcanzar de mejor manera el agua disponible (Naumburg et al., 2005). De este modo, las variables de precipitación y caudal se denotarían como importantes aportes a la humedad del suelo de la cuenca.

En cuanto a la humedad del suelo (Figura 9E), se identificó una correlación positiva significativa con el crecimiento radial, ubicada en el mes de noviembre de la temporada de crecimiento (coeficiente: 0,27). En relación a lo que ocurre en primavera de la temporada de crecimiento, la humedad del suelo es un factor que limita la producción de madera temprana, siendo así relevante para el crecimiento radial (Camarero et al., 2021, 2022; Pompa-García, 2022), el cual podría ser promovido por el caudal, debido a que es un aporte en fines de primavera e inicios de verano que favorece la humedad del suelo y se ha visto como un aporte positivo al crecimiento de anillos en otros estudios de la cuenca (Sophocleous, 2002; Urrutia et al., 2011). Tanto la alta humedad del suelo como las temperaturas más cálidas durante la noche de primavera pueden beneficiar el crecimiento radial, sin embargo, el aumento de temperaturas máximas induce la evaporación de agua del suelo, reduciendo la humedad del mismo y conduciendo a una disminución del crecimiento radial (Camarero et al., 2021; Pompa-García, 2022).

Implicancias para el estado de conservación de *N. glauca*

Las variables climáticas e hidrológicas son de gran relevancia para el crecimiento radial del hualo en la cuenca del Río Cauquenes. Las variables reguladoras de la disponibilidad hídrica se ven reducidas cada año, mientras que las temperaturas son cada vez más cálidas. La recarga hídrica es un aporte importante para la humedad del suelo en la temporada de crecimiento, especialmente en fines de primavera e inicios de verano (Bonada et al., 2022), por lo que la disminución de las variables de precipitación, caudal y humedad del suelo podrían desencadenar graves efectos en su crecimiento radial y eventualmente alterar su distribución, debido a la importancia que tiene la disponibilidad hídrica en su desarrollo (Campelo et al., 2023; Santelices et al., 2020). A su vez, el aumento de temperaturas reduciría significativamente la humedad superficial del suelo debido a la evapotranspiración, limitando

la disponibilidad hídrica a la cual pueden acceder los bosques y reduciendo consigo el crecimiento radial (Xu et al., 2013).

Con las condiciones actuales, el crecimiento radial tendrá un incremento cada vez menor en caso de continuar con estas tendencias climáticas e hidrológicas. El ancho de anillos y el BAI tienen disminuciones en la tendencia de su crecimiento a partir del 2004, en donde se consta que, a partir de 2006, las tendencias de precipitación y humedad del suelo tuvieron un quiebre significativo, manteniendo un estrés hídrico en la cuenca y por consiguiente una tendencia a la baja del crecimiento radial.

En este estado de estrés hídrico de la cuenca, el hualo responde positivamente a la humedad del suelo de noviembre y a las precipitaciones de noviembre y diciembre, por el contrario, las temperaturas máximas más cálidas de primavera afectan negativamente al crecimiento de la especie. Frente a esto resulta clave priorizar el monitoreo del hualo en el periodo de primavera, debido a que en esta etapa se reactivan los procesos fisiológicos y el crecimiento del árbol (Pizarro et al., 2019).

La protección de estos bosques es de gran importancia debido a la megasequía que afecta a esta región, agravado por la presión antrópica, incendios forestales y fragmentación del paisaje (Burgos et al., 2008; González et al., 2011; Nuñez & Verbist, 2018). Las consecuencias del déficit hídrico que enfrentan los bosques de la cuenca pueden terminar en un crecimiento lento, la pérdida de vigor y la mortalidad (Garreaud et al., 2017). La respuesta de los sitios de Molco y Playa Blanca fueron similares en gran parte de la cronología, respondiendo a una señal común con una intensidad similar, mientras que en relación a los bosques jóvenes que obtuvieron una sensibilidad mayor (sitio de Cabrería), sus efectos frente al déficit hídrico podrían dificultar el desarrollo de esta especie, debido a que tienen respuestas más intensas frente a la baja disponibilidad del recurso hídrico, por lo que se les debería prestar especial atención a bosques jóvenes de hualo para su conservación (Alfaro-Sánchez et al., 2019; Balaguer-Romano et al., 2025; Venegas-González, 2018b).

Aunque se tuvo una representación de la cuenca de 3 sitios, se recomienda el análisis con una mayor cantidad de muestras y una mayor representatividad de sitios, buscando representar una extensión considerable de la cuenca, en donde podrían haber bosques de hualo que no respondan de la misma manera que el resto a la sequía debido a que distintos sistemas podrían responder de diferente manera al tener distintas características (Zhang et al., 2021).

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian una señal común y coherente entre sitios de la cuenca del río Cauquenes. Siendo una cronología pionera del hualo, se confirma un crecimiento sincrónico entre individuos, reflejando en las cronologías de crecimiento una adecuada calidad y consistencia estadística, validando su uso como un indicador de variabilidad ambiental. La relación observada entre el crecimiento radial y las variables

climáticas e hidrológicas sugiere que la disponibilidad hídrica (regulada por la precipitación, el caudal y la humedad del suelo) es un factor clave en la dinámica de crecimiento de hualo, mientras que el aumento de temperaturas en la temporada de crecimiento tendería a limitarlo. La variable que más relevancia tuvo fue la humedad del suelo en la temporada de crecimiento, la cual se vería constantemente influenciada por la interacción entre la precipitación, el caudal y las temperaturas máximas.

CONCLUSIONES

A partir del desarrollo de esta cronología pionera, se demostró que hubo un crecimiento sincrónico que permite validar el uso del ancho de anillos de *Nothofagus glauca* como indicador de variabilidad ambiental. Se halló una disminución constante en el crecimiento radial con el paso de los años, pero a partir del 2004, la reducción del crecimiento se vuelve más evidente en la disminución del ancho de anillos. Esta reducción se consolida con más fuerza a partir del 2006, año de punto de quiebre en que las precipitaciones y la humedad del suelo tuvieron una disminución significativa en sus niveles, siendo variables de gran importancia para el crecimiento radial del hualo

Se encontró una sincronía común para el crecimiento radial entre los 3 sitios de estudio, aunque el sitio de Cabrería respondía de manera más intensa ante las variables climáticas e hidrológicas, probablemente a causa de que es un bosque más joven que el resto. De todos modos, los datos estadísticos a nivel de cuenca dieron resultados que denotan calidad en la cronología a nivel de cuenca, por lo que se plasmó una respuesta coordinada en el crecimiento de anillos frente a los cambios de las variables climáticas e hidrológicas. Las variables climáticas e hidrológicas que se correlacionaron positivamente tuvieron mayor importancia en la temporada de crecimiento. La humedad del suelo fue clave para el crecimiento radial, influenciada por las precipitaciones y el caudal que recargaría las aguas subterráneas de la cuenca, mientras que el aumento de temperaturas mínimas, vinculado a temperaturas más cálidas durante la noche, son factores relevantes en la época de primavera que favorecen a la actividad fisiológica y el crecimiento de *Nothofagus glauca*. Por el contrario, el aumento de temperaturas máximas en primavera y verano afectó negativamente al crecimiento radial, induciendo que este aumento incrementó el estrés hídrico del bosque.

En conclusión, los resultados confirman que el crecimiento radial está ligado a la variabilidad climática e hidrológica, evidenciando el peligro en que se encuentra el hualo en el escenario climático actual. Ante este panorama y al estrés hídrico percibido en la cuenca, se recomienda el estudio de esta especie en una mayor extensión, con el fin de identificar posibles variaciones espaciales en el crecimiento y detectar posibles áreas que sean óptimas para el desarrollo de la especie. Asimismo, debido al estrés hídrico sostenido en el tiempo, surge la necesidad de implementar estrategias de gestión forestal y de recursos hídricos para amortiguar los efectos de la megasequía que pone en peligro al hualo y que se acrecienta con el escenario climático actual.

BIBLIOGRAFÍA

- Alfaro-Sánchez, R., Jump, A. S., Pino, J., Díez-Nogales, O., & Espelta, J. M. (2019). Land use legacies drive higher growth, lower wood density and enhanced climatic sensitivity in recently established forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 276–277, 107630. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107630>
- Altman, J., Altmanova, N., Fibich, P., Korznikov, K., & Fonti, P. (2025). Advancing dendrochronology with R: an overview of packages and future perspectives. *Frontiers in Ecology and Evolution, Volume 13-2025*. <https://doi.org/10.3389/fevo.2025.1593675>
- Altmann, S. H. (2013). Crown condition, water availability, insect damage and landscape features: are they important to the Chilean tree *Nothofagus glauca* (Nothofagaceae) in the context of climate change? *Australian Journal of Botany*, 61(5), 394–403. <https://doi.org/10.1071/BT13015>
- Alvarez-Garreton, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., & Vis, M. (2021). Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 25(1), 429–446. <https://doi.org/10.5194/hess-25-429-2021>
- Alvarez-Garreton, C., Mendoza, P. A., Boisier, J. P., Addor, N., Galleguillos, M., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., Puelma, C., Cortes, G., Garreaud, R., McPhee, J., & Ayala, A. (2018). The CAMELS-CL dataset: catchment attributes and meteorology for large sample studies – Chile dataset. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 22(11), 5817–5846. <https://doi.org/10.5194/hess-22-5817-2018>
- Álvarez, C., Veblen, T. T., Christie, D. A., & González-Reyes, Á. (2015). Relationships between climate variability and radial growth of *Nothofagus pumilio* near altitudinal treeline in the Andes of northern Patagonia, Chile. *Forest Ecology and Management*, 342. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2015.01.018>
- Armesto, J. J., & Arroyo, M. T. K. (2007). The Mediterranean Environment of Central Chile. En *The Physical Geography of South America*. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195313413.003.0019>
- Assefa, S., Ventura, M., Bravo, F., Giberti, G. S., Olivar, J., Bielak, K., Tonon, G., & Wellstein, C. (2025). Pure and mixed Scots pine forests showed divergent responses to climate variation and increased intrinsic water use efficiency across a European-wide

climate gradient. *European Journal of Forest Research*, 144(4), 875–892.
<https://doi.org/10.1007/s10342-024-01731-8>

Balaguer-Romano, R., de Cáceres, M., & Espelta, J. M. (2025). Second-Growth Forests Exhibit Higher Sensitivity to Dry and Wet Years than Long-Existing Ones. *Ecosystems*, 28(1), 6. <https://doi.org/10.1007/s10021-024-00953-6>

Barstow, M., Rivers, M. C., & Baldwin, H. (2017). *Nothofagus glauca*. *The IUCN Red List of Threatened Species 2017: e.T32034A2809142*.
<https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2017-3.RLTS.T32034A2809142.en>

Beck, H. E., Zimmermann, N. E., McVicar, T. R., Vergopolan, N., Berg, A., & Wood, E. F. (2018). Present and future Köppen-Geiger climate classification maps at 1-km resolution. *Scientific Data*, 5(1), 180214. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.214>

Begum, S., Nakaba, S., Yamagishi, Y., Oribe, Y., & Funada, R. (2013). Regulation of cambial activity in relation to environmental conditions: understanding the role of temperature in wood formation of trees. *Physiologia Plantarum*, 147(1), 46–54.
<https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.2012.01663.x>

Binkley, D., Stape, J. L., Ryan, M. G., Barnard, H. R., & Fownes, J. (2002). Age-related Decline in Forest Ecosystem Growth: An Individual-Tree, Stand-Structure Hypothesis. *Ecosystems*, 5(1), 58–67. <https://doi.org/10.1007/s10021-001-0055-7>

Biondi, F., & Qeadan, F. (2008). A Theory-Driven Approach to Tree-Ring Standardization: Defining the Biological Trend from Expected Basal Area Increment. *Tree-Ring Research*, 64(2), 81–96. <https://doi.org/10.3959/2008-6.1>

Bobadilla, A., Stehr, A., & Toro, N. (2024). Evaluation of climate-change impacts on the temporal and spatial behaviour of drought in South-Central Chile. *Hydrological Sciences Journal*, 69(2), 165–184. <https://doi.org/10.1080/02626667.2023.2288217>

Boisier, J. P. (2023). *CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile. (v2.5) [Data set]*. Zenodo.
<https://doi.org/10.5281/zenodo.7529682>

Bonada, A., Amoroso, M. M., Gedalof, Z., Srur, A. M., & Gallo, L. (2022). Effects of climate on the radial growth of mixed stands of *Nothofagus nervosa* and *Nothofagus obliqua* along a precipitation gradient in Patagonia, Argentina. *Dendrochronologia*, 74, 125961. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.125961>

Bouatrous, A., Harbaoui, K., Karmous, C., Gargouri, S., Souissi, A., Belguesmi, K., Cheikh Mhamed, H., Gharbi, M. S., & Annabi, M. (2022). Effect of Wheat

Monoculture on Durum Wheat Yield under Rainfed Sub-Humid Mediterranean Climate of Tunisia. *Agronomy*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/agronomy12061453>

Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115–124. <https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2008.01.002>

Bunn, A., Korpela, M., Biondi, F., Campelo, F., Klesse, S., Mérian, P., Qeadan, F., & Zang, C. (2025). dplR: Dendrochronology Program Library in R. In *CRAN: Contributed Packages*. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.dplR>

Büntgen, U., & Oppenheimer, C. (2020). The importance of “year zero” in interdisciplinary studies of climate and history. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(52), 32845–32847. <https://doi.org/10.1073/pnas.2018103117>

Buras, A. (2017). A comment on the expressed population signal. *Dendrochronologia*, 44, 130–132. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.03.005>

Burgos, A., Grez, A. A., & Bustamante, R. O. (2008). Seed production, pre-dispersal seed predation and germination of *Nothofagus glauca* (Nothofagaceae) in a temperate fragmented forest in Chile. *Forest Ecology and Management*, 255(3), 1226–1233. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.032>

Bustamante, R. O., & Simonetti, J. A. (2005). Is *Pinus radiata* invading the native vegetation in central Chile? Demographic responses in a fragmented forest. *Biological Invasions*, 7(2), 243–249. <https://doi.org/10.1007/s10530-004-0740-5>

Camarero, J. J., Campelo, F., Colangelo, M., Valeriano, C., Knorre, A., Solé, G., & Rubio-Cuadrado, Á. (2022). Decoupled leaf-wood phenology in two pine species from contrasting climates: Longer growing seasons do not mean more radial growth. *Agricultural and Forest Meteorology*, 327, 109223. <https://doi.org/10.1016/J.AGRFORMET.2022.109223>

Camarero, J. J., Colangelo, M., Gazol, A., Valeriano, C., Ortega, M. A., & Silla, F. (2024). Responses to drought of two Mediterranean ring-porous, deciduous species: Searching for climate smart trees and shrubs. *Forest Ecology and Management*, 572, 122282. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122282>

Camarero, J. J., Valeriano, C., Gazol, A., Colangelo, M., & Sánchez-Salguero, R. (2021). Climate differently impacts the growth of coexisting trees and shrubs under semi-arid mediterranean conditions. *Forests*, 12(3). <https://doi.org/10.3390/f12030381>

Campelo, F., Rubio-Cuadrado, Á., Montes, F., Colangelo, M., Valeriano, C., & Camarero, J. J. (2023). Growth phenology adjusts to seasonal changes in water

availability in coexisting evergreen and deciduous mediterranean oaks. *Forest Ecosystems*, 10, 100134. <https://doi.org/10.1016/j.fecs.2023.100134>

Chakraborty, T., Reif, A., Matzarakis, A., & Saha, S. (2021). How does radial growth of water-stressed populations of european beech (*Fagus sylvatica* l.) trees vary under multiple drought events? *Forests*, 12(2). <https://doi.org/10.3390/f12020129>

Cook, E. R. (1985). A Time Series Analysis Approach to Tree Ring Standardization. En *School of Renewable Natural Resources: PhD*. <https://lrr.arizona.edu/content/time-series-analysis-approach-tree-ring-standardization>

Cook, E. R., Buckley, B. M., D'Arrigo, R. D., & Peterson, M. J. (2000). Warm-season temperatures since 1600 BC reconstructed from Tasmanian tree rings and their relationship to large-scale sea surface temperature anomalies. *Climate Dynamics*, 16(2), 79–91. <https://doi.org/10.1007/s003820050006>

Cook, E. R., & Kairiukstis, L. A. (1990). Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences. *Methods of dendrochronology: applications in the environmental sciences*. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-7879-0>

Di Castri, F., & Hajek, E. R. (1976). *Bioclimatología de Chile*. Vicerrectoría Académica, Universidad Católica de Chile. <https://bibliotecadigital.infor.cl/handle/20.500.12220/159>

Fajardo, A., & Piper, F. I. (2011). Intraspecific trait variation and covariation in a widespread tree species (*Nothofagus pumilio*) in southern Chile. *New Phytologist*, 189(1), 259–271. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03468.x>

Fritts, H. C. (1976). Tree Rings and Climate. En *Tree Rings and Climate*. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-268450-0.x5001-0>

Galleguillos, M., Gimeno, F., Puelma, C., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., & Rojas, M. (2021a). Disentangling the effect of future land use strategies and climate change on streamflow in a Mediterranean catchment dominated by tree plantations. *Journal of Hydrology*, 595, 126047. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126047>

Galleguillos, M., Gimeno, F., Puelma, C., Zambrano-Bigiarini, M., Lara, A., & Rojas, M. (2021b). *Disponibilidad hídrica en la cuenca del río Cauquenes ante el cambio climático y diferentes coberturas de suelo*. <https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2021/04/Policy-brief-CR2-Disponibilidad-h%C3%ADrica-en-la-cuenca-del-r%C3%ADo-Cauquenes.pdf>

- Gao, J., Jiao, K., & Wu, S. (2018). Quantitative assessment of ecosystem vulnerability to climate change: methodology and application in China. *Environmental Research Letters*, 13(9), 094016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aadd2e>
- Garreaud, R. D., Alvarez-Garreton, C., Barichivich, J., Boisier, J. P., Christie, D., Galleguillos, M., LeQuesne, C., McPhee, J., & Zambrano-Bigiarini, M. (2017). The 2010–2015 megadrought in central Chile: impacts on regional hydroclimate and vegetation. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(12), 6307–6327. <https://doi.org/10.5194/hess-21-6307-2017>
- González, M. E., Lara, A., Urrutia, R., & Bosnich, J. (2011). Cambio climático y su impacto potencial en la ocurrencia de incendios forestales en la zona centro-sur de Chile (33° - 42° S). *Bosque (Valdivia)*, 32, 215–219. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002011000300002>
- Gou, X., Zhang, T., Yu, S., Shang, H., Zhang, R., Qin, L., Liu, K., Jiang, S., Guo, D., Fan, Y., Abudurehman, R., & Zhang, H. (2025). Greater moisture impacts on radial growth of *Larix sibirica* in the eastern Altay Mountains since the 1990s. *International Journal of Biometeorology*, 69(1), 95–107. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02795-2>
- Grissino-Mayer, H. D. (2001). Evaluating Crossdating Accuracy: A Manual and Tutorial for the Computer Program COFECHA. *Tree-Ring Research*. <http://hdl.handle.net/10150/251654>
- Hara, E. (2018). Within and Between-Tree Variation in Growth Ring Width of *Pinus oocarpa* Wood. *International Journal of Environmental Sciences & Natural Resources*, 13(1). <https://doi.org/10.19080/ijesnr.2018.13.555854>
- Hartmann, H., & Trumbore, S. (2016). Understanding the roles of nonstructural carbohydrates in forest trees - from what we can measure to what we want to know. *The New phytologist*, 211(2), 386–403. <https://doi.org/10.1111/NPH.13955>;WGROU:STRING:PUBLICATION
- Hurtado, S. I., Zaninelli, P. G., & Agosta, E. A. (2020). A multi-breakpoint methodology to detect changes in climatic time series. An application to wet season precipitation in subtropical Argentina. *Atmospheric Research*, 241, 104955. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOSRES.2020.104955>
- Jana, P., Torrejón, F., Araneda, A., & Stehr, A. (2019). Drought periods during 18th century in central Chile (33°S): A historical reconstruction perspective revisiting Vicuña Mackenna's work. *International Journal of Climatology*, 39(3), 1748–1755. <https://doi.org/10.1002/joc.5884>

Lara, A., Aravena, J. C., Villalba, R., Wolodarsky-Franke, A., Luckman, B., & Wilson, R. (2001). Dendroclimatology of high-elevation *Nothofagus pumilio* forests at their northern distribution limit in the central Andes of Chile. *Canadian Journal of Forest Research*, 31(6). <https://doi.org/10.1139/x00-208>

Lara, A., Bahamondez, A., González-Reyes, A., Muñoz, A. A., Cuq, E., & Ruiz-Gómez, C. (2015). Reconstructing streamflow variation of the Baker River from tree-rings in Northern Patagonia since 1765. *Journal of Hydrology*, 529, 511–523. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.12.007>

LeBlanc, D. C., & Raynal, D. J. (1990). Red spruce decline on Whiteface Mountain, New York. II. Relationships between apical and radial growth decline. *Canadian Journal of Forest Research*, 20(9), 1415–1421. <https://doi.org/10.1139/x90-187>

Luebert, F., & Plischoff, P. (2006). *Sinopsis bioclimática y vegetal de Chile*. <https://books.google.cl/books?id=Q6TQdlb6bEwC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>

Lundqvist, S.-O., Seifert, S., Grahn, T., Olsson, L., García-Gil, M. R., Karlsson, B., & Seifert, T. (2018). Age and weather effects on between and within ring variations of number, width and coarseness of tracheids and radial growth of young Norway spruce. *European Journal of Forest Research*, 137(5), 719–743. <https://doi.org/10.1007/s10342-018-1136-x>

Matskovsky, V., Venegas-González, A., Garreaud, R., Roig, F. A., Gutiérrez, A. G., Muñoz, A. A., le Quesne, C., Klock, K., & Canales, C. (2021). Tree growth decline as a response to projected climate change in the 21st century in Mediterranean mountain forests of Chile. *Global and Planetary Change*, 198, 103406. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2020.103406>

Maxwell, R. S., & Larsson, L.-A. (2021). Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. *Dendrochronologia*, 67, 125841. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2021.125841>

Mersin, D., Tayfur, G., Vaheddoost, B., & Safari, M. J. S. (2022). Historical Trends Associated with Annual Temperature and Precipitation in Aegean Turkey, Where Are We Heading? *Sustainability (Switzerland)*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/su142013380>

Ministerio del Medio Ambiente. (2026). *Sistema De Información Y Monitoreo De Biodiversidad*. Ecosistema terrestre “Bosque caducifolio mediterráneo costero de *Nothofagus glauca* - *Azara petiolaris*”. <https://simbio.mma.gob.cl/Ecosistemas/Details/52>

- Moya, J., & Lara, A. (2011). Cronologías de ancho de anillos de queñoa (*Polylepis tarapacana*) para los últimos 500 años en el Altiplano de la región de Arica y Parinacota, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 32, 165–173. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002011000200007>
- Muñoz, F., Muñoz, C., Uribe, M., Martín, M. Á., Molina, J. R., Herrera, M. Á., Álvarez, J. B., & Martín, L. M. (2013). Composición, estructura y diversidad de poblaciones de *Nothofagus glauca* ubicadas en la zona mediterránea de Chile. *Gayana Botánica*, 70(1), 82–91. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-66432013000100009>
- Muñoz, S. J. (2019). *ERA5-Land monthly averaged data from 1950 to present*. Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS). <https://doi.org/10.24381/cds.68d2bb30>
- Naumburg, E., Mata-gonzalez, R., Hunter, R. G., McLendon, T., & Martin, D. W. (2005). Phreatophytic Vegetation and Groundwater Fluctuations: A Review of Current Research and Application of Ecosystem Response Modeling with an Emphasis on Great Basin Vegetation. *Environmental Management*, 35(6), 726–740. <https://doi.org/10.1007/s00267-004-0194-7>
- Núñez, J., & Verbist, K. (2018). *Atlas de sequías de América Latina y el Caribe*. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265894>
- Núñez-Ibarra, D., Zambrano-Bigiarini, M., & Galleguillos, M. (2025). From grid to ground: How well do gridded products represent soil moisture dynamics in natural ecosystems during precipitation events? *EGUsphere*, 2025, 1–44. <https://doi.org/10.5194/egusphere-2025-2606>
- Oliveira, L., Lima, H., Rodrigues, S., Carvalho, E., & Torres, L. (2021). Multiple imputation to fill in missing data in soil physico-hydric properties database. *REVISTA CIÊNCIA AGRONÔMICA*. <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200079>
- Ols, C., Klesse, S., Girardin, M. P., Evans, M. E. K., DeRose, R. J., & Trouet, V. (2023). Detrending climate data prior to climate–growth analyses in dendroecology: A common best practice? *Dendrochronologia*, 79, 126094. <https://doi.org/10.1016/J.DENDRO.2023.126094>
- Oogathoo, S., Duchesne, L., Houle, D., Kneeshaw, D., & Bélanger, N. (2024). Precipitation and relative humidity favours tree growth while air temperature and relative humidity respectively drive winter stem shrinkage and expansion. *Frontiers in Forests and Global Change, Volume 7-2024*. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2024.1368590>

Peñuelas, J., Sardans, J., Filella, I., Estiarte, M., Llusia, J., Ogaya, R., Carnicer, J., Bartrons, M., Rivas-Ubach, A., Grau, O., Peguero, G., Margalef, O., Pla, S., Stefanescu, C., Asensio, D., Preece, C., Daijun, L., Verger, A., Barbeta, A., & Terradas, J. (2017). Impacts of Global Change on Mediterranean Forests and Their Services. *Forests*, 8, 463. <https://doi.org/10.3390/f8120463>

Pettitt, A. N. (1979). A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Applied Statistics*, 28(2). <https://doi.org/10.2307/2346729>

Pizarro, R., Caribbean, U. O. M. and R. B. for S. in L. A. and the, Sangüesa, C., Vallejos, C., Mendoza, R., Pino, J., Berríos, Á., Ibáñez, A., Castillo, B., Bernal, A., García, P., Arumi, J. L., & Iroumé, A. (2019). *Antecedentes de la relación masa forestal y disponibilidad hídrica en Chile*. UNESCO. https://unesdoc.unesco.org/notice?id=p::usmarcdef_0000370891

Pohlert, T. (2023). trend: Non-Parametric Trend Tests and Change-Point Detection. In *CRAN: Contributed Packages*. <https://doi.org/doi.org/10.32614/CRAN.package.trend>

Pompa-García, M., Camarero, J. J., Valeriano, C., & Vivar-Vivar, E. D. (2022). Climate sensitivity of seasonal radial growth in young stands of Mexican conifers. *International Journal of Biometeorology*, 66(8), 1711–1723. <https://doi.org/10.1007/s00484-022-02312-3>

Proyecto CHI². (2025). *Río Cauquenes en Desembocadura*. Proyecto de colaboración internacional entre Chile y China (PCI CONICYT Chile - NSFC China) NSFC190018. <https://chi2.ufro.cl/Cauquenes/>

Rita, A., Camarero, J. J., Nolè, A., Borghetti, M., Brunetti, M., Pergola, N., Serio, C., Vicente-Serrano, S. M., Tramutoli, V., & Ripullone, F. (2020). The impact of drought spells on forests depends on site conditions: The case of 2017 summer heat wave in southern Europe. *Global Change Biology*, 26(2). <https://doi.org/10.1111/gcb.14825>

Santelices, R., Vergara, R., Cabrera, A., Espinoza, S., & Silva, P. (2020). Variación intra-específica en *Nothofagus glauca* una especie endémica de los bosques mediterráneos de Chile. *Bosque (Valdivia)*, 41, 221–231. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002020000300221>

Santelices-Moya, R., Gibson-Carpintero, S., Cabrera-Ariza, A., Santini-Junior, L., & Venegas-González, A. (2022). Reduced Rainfall Variability Reduces Growth of *Nothofagus alessandrii* Espinosa (Nothofagaceae) in the Maule Region, Chile. *Forests*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/f13081184>

Schneider-Valenzuela, I., Muñoz, A. A., Christie, D. A., Klock-Barría, K., Solari, M. E., Madariaga-Burgos, M., Urrutia-Jalabert, R., Aguilera-Betti, I., Ancapichún, S., Venegas-González, A., & González, M. E. (2025). Woody legacies of railroad ties from the Southern Atacama Desert used to strengthen *Nothofagus obliqua* tree-ring chronologies from Northern Patagonia. *Scientific Reports*, 15(1), 16110. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-93018-0>

Sophocleous, M. (2002). Interactions between groundwater and surface water: the state of the science. *Hydrogeology Journal*, 10(1), 52–67. <https://doi.org/10.1007/s10040-001-0170-8>

Speer, J. (2010). *Fundamentals of Tree Ring Research*. https://books.google.cl/books/about/Fundamentals_of_Tree_Ring_Research.html?id=59ZOEAAQBAJ&redir_esc=y

Stockton, C. W., & Jacoby, G. C. (1976). *Long-term Surface-water Supply and Streamflow Trends in the Upper Colorado River Basin: Based on Tree-ring Analyses*. Institute of Geophysics and Planetary Physics, University of California. <https://books.google.cl/books?id=bRqG0AEACAAJ>

Suarez, M. L. (2010). Tree-ring records from *Nothofagus dombeyi*: A preliminary chronology network in Northern Patagonia, Argentina. *Dendrochronologia*, 28(2). <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.11.001>

Urrutia, R. B., Lara, A., Villalba, R., Christie, D. A., Le Quesne, C., & Cuq, A. (2011). Multicentury tree ring reconstruction of annual streamflow for the Maule River watershed in south central Chile. *Water Resources Research*, 47(6). <https://doi.org/10.1029/2010WR009562>

Urrutia-Jalabert, R., Barichivich, J., Rozas, V., Lara, A., Rojas, Y., Bahamondez, C., Rojas-Badilla, M., Gipoulou-Zuñiga, T., & Cuq, E. (2021). Climate response and drought resilience of *Nothofagus obliqua* secondary forests across a latitudinal gradient in south-central Chile. *Forest Ecology and Management*, 485, 118962. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2021.118962>

Urrutia-Jalabert, R., Rossi, S., Deslauriers, A., Malhi, Y., & Lara, A. (2015). Environmental correlates of stem radius change in the endangered *Fitzroya cupressoides* forests of southern Chile. *Agricultural and Forest Meteorology*, 200(6), 209–221. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.10.001>

van Buuren, S., & Groothuis-Oudshoorn, K. (2011). mice: Multivariate Imputation by Chained Equations in R. *Journal of Statistical Software*, 45(3), 1–67. <https://doi.org/10.18637/jss.v045.i03>

- Venegas-González, A., Juñent, F. R., Gutiérrez, A. G., & Filho, M. T. (2018a). Recent radial growth decline in response to increased drought conditions in the northernmost *Nothofagus* populations from South America. *Forest Ecology and Management*, 409, 94–104. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.11.006>
- Venegas-González, A., Juñent, F. R., Gutiérrez, A. G., Peña-Rojas, K., & Filho, M. T. (2018b). Efecto de la variabilidad climática sobre los patrones de crecimiento y establecimiento de *Nothofagus macrocarpa* en Chile central. *Bosque (Valdivia)*, 39, 81–93. <http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002018000100081>
- Venegas-González, A., Roig, F., Peña-Rojas, K., Hadad, M., Aguilera Betti, I., & Muñoz, A. (2019). Recent Consequences of Climate Change Have Affected Tree Growth in Distinct *Nothofagus macrocarpa* (DC.) FM Vaz & Rodr Age Classes in Central Chile. *Forests*, 10, 653. <https://doi.org/10.3390/f10080653>
- Vicente-Serrano, S. M., Camarero, J. J., Zabalza, J., Sangüesa-Barreda, G., López-Moreno, J. I., & Tague, C. L. (2015). Evapotranspiration deficit controls net primary production and growth of silver fir: Implications for Circum-Mediterranean forests under forecasted warmer and drier conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.02.017>
- Villanueva-Díaz, J., Elizondo, M., Paredes, J., Avalos, J., Martínez-Sifuentes, A., & Rosales-Mata, S. (2018). Red dendrocronológica de pino triste (*Pinus lumholtzii* B.L. Rob. & Fernald) en la Sierra Madre Occidental para reconstrucción de lluvia estacional. *Madera y Bosques*, 24. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2421530>
- Visser, H. (1995). Note on the Relation Between Ring Widths and Basal Area Increments. *Forest Science*, 41(2), 297–304. <https://doi.org/10.1093/forestscience/41.2.297>
- Walter, C., Pérez, C. A., & Thomas, F. M. (2016). Weather or weathering? Growth of *Nothofagus dombeyi* on volcanic soils differing in nitrogen and phosphorus concentrations. *Journal of Plant Ecology*, 9(5), 596–607. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtv079>
- Watson, J. E. M., Evans, T., Venter, O., Williams, B., Tulloch, A., Stewart, C., Thompson, I., Ray, J. C., Murray, K., Salazar, A., McAlpine, C., Potapov, P., Walston, J., Robinson, J. G., Painter, M., Wilkie, D., Filardi, C., Laurance, W. F., Houghton, R. A., ... Lindenmayer, D. (2018). The exceptional value of intact forest ecosystems. *Nature Ecology & Evolution*, 2(4), 599–610. <https://doi.org/10.1038/s41559-018-0490-x>

West, P. W. (2024). A review of the growth behaviour of stands and trees in even-aged, monospecific forest. *Annals of Forest Science*, 81(1), 34.
<https://doi.org/10.1186/s13595-024-01250-x>

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 & Applied Meteorology*, 23(2). [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1984\)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1984)023<0201:OTAVOC>2.0.CO;2)

Xu, W., Yuan, W., Dong, W., Xia, J., Liu, D., & Chen, Y. (2013). A meta-analysis of the response of soil moisture to experimental warming. *Environmental Research Letters*, 8(4), 044027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/8/4/044027>

Zang, C., & Biondi, F. (2013). Dendroclimatic calibration in R: The bootRes package for response and correlation function analysis. *Dendrochronologia*, 31(1), 68–74.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2012.08.001>

Zang, C., & Biondi, F. (2015). treeclim: an R package for the numerical calibration of proxy-climate relationships. *Ecography*, 38(4), 431–436.
<https://doi.org/10.1111/ecog.01335>

Zhang, L., Gao, J., Tang, Z., & Jiao, K. (2021). Quantifying the ecosystem vulnerability to drought based on data integration and processes coupling. *Agricultural and Forest Meteorology*, 301–302, 108354.
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2021.108354>

Zhao, Z., Jiang, Y., Yuan, S., Cui, M., Shi, D., Xue, F., Cai, J., & Kang, M. (2023). Inconsistent response times to precipitation and soil moisture in *Picea crassifolia* growth. *Dendrochronologia*, 77, 126032.
<https://doi.org/10.1016/j.dendro.2022.126032>

Zolles, A., Vospernik, S., & Schöler, S. (2025). Effects of soil parameters of radial stem growth of four spruce stands in Austria. *Frontiers in Forests and Global Change*, Volume 8-2025. <https://www.frontiersin.org/journals/forests-and-global-change/articles/10.3389/ffgc.2025.1523834>

Zweifel, R., Sterck, F., Braun, S., Buchmann, N., Eugster, W., Gessler, A., Häni, M., Peters, R. L., Walthert, L., Wilhelm, M., Ziemińska, K., & Etzold, S. (2021). Why trees grow at night. *New Phytologist*, 231(6), 2174–2185.
<https://doi.org/10.1111/nph.17552>