



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA

ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA

ANÁLISIS DEL PATRÓN DE DEFOLIACIÓN MASIVA POR
Ormiscodes amphimone* EN BOSQUES DE *Nothofagus pumilio
UBICADOS LA REGIÓN DE AYSÉN

Memoria para optar el Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ANAÍS Jael CÁRDENAS HERMOSILLA

Profesor Guía: Sr. Álvaro Gutiérrez Ilabaca. Ingeniero Forestal. Doctor en Ciencias
Naturales

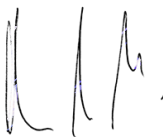
Santiago, Chile 2024

**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES Y DE LA
CONSERVACIÓN DE LA NATURALEZA
ESCUELA DE CIENCIAS FORESTALES
DEPARTAMENTO DE SILVICULTURA Y CONSERVACIÓN DE LA
NATURALEZA**

**ANÁLISIS DEL PATRÓN DE DEFOLIACIÓN MASIVA POR
Ormiscodes amphimone EN BOSQUES DE *Nothofagus pumilio*
UBICADOS LA REGIÓN DE AYSÉN**

Memoria para optar el Título
Profesional de Ingeniero Forestal

ANAÍS Jael CÁRDENAS HERMOSILLA

Calificaciones:	Nota	Firma
Prof. Guía Sr. Álvaro Gutiérrez Ilabaca	7,0	
Prof. Consejero Sr. Álvaro Promis Baeza	7,0	

*A mis amados padres, hermanos y pareja,
Su amor y apoyo han sido pilares fundamentales en este viaje académico.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que me orientaron y apoyaron en la elaboración de esta memoria de título. A mi familia, pareja y amigos por su incondicional apoyo, generosa contención y profundo amor, que fueron fundamentales para llevar a cabo este proyecto. Agradezco a mis compañeros forestales por sus palabras de aliento y solidaridad. Quiero expresar gratitud a mi profesor Guía, Álvaro Gutiérrez, por su confianza, paciencia y sabiduría, así como a Vinci Urra por su enseñanza y comprensión. También, agradezco al profesor consejero, Al profesor Álvaro Promis, por sus valiosas correcciones. Al proyecto N° 1211924 : “A Spatiotemporal Assessment Of Major Disturbances On Chilean Vegetation Phenology, Productivity And Resilience Using 40 Years Of Continuous Remote Sensing Record”, y al Instituto de Ecología y Biodiversidad, ANID PIA/BASAL FB210006, que financian esta investigación. Por último, agradezco al bosque, fuente de vida e inspiración, que no solo ha motivado mi elección de estudiar esta carrera, sino que continúa impulsándome a explorar y descubrir respuestas a cada pregunta que mi curiosidad plantea.

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODO	4
2.1. Área de estudio	4
2.2 Procesamiento de muestras sin medir y construcción de cronologías de crecimiento .	5
2.3 Relación de la sincronía de los eventos de defoliación con eventos climáticos.....	7
2.4 Relación de eventos de defoliación con variables de sitio y estructurales	8
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	9
3.1 Cronología de crecimiento	9
3.2 Patrón histórico de defoliación.....	9
3.3.1 Análisis Índice de sequía	13
3.3.2 Análisis de días grado	15
3.4 Relación de eventos de defoliación con variables de sitio y estructurales	16
3.4.1 Análisis de componentes principales (PCA).	18
3.4.2 Modelo de regresión negativa binomial.....	20
4. CONCLUSIONES	21
5. BIBLIOGRAFÍA	22

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Estadística descriptiva de cronología de crecimiento.....	9
Cuadro 2. Correlación entre la cantidad de árboles defoliados en los años de defoliación masiva con las variables estudiadas. (*P<.05 y **P<.01). Los años representan el número de árboles defoliados en cada evento distribuido por parcela. La cantidad de eventos masivos indica cuantos eventos masivos se identificaron por parcela.....	17
Cuadro 3. Significancias para los coeficientes del modelo de regresión negativa binomial, utilizando como variable respuesta el porcentaje de árboles defoliados por parcela. Las variables independientes corresponden a la pendiente, elevación, densidad, días grado y área basal. Códigos: “****” Muy altamente significativo (P value < 0,001), “***” Altamente significativo (0,001< P value < 0,01), “**” Significativo (0.01< P value <0.05), “.” Casi significativo (0.05< P value <0.1) y “ ” No significativo.	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Patrón anormal de la anatomía de la madera en anillos de crecimiento de <i>Nothofagus pumilio</i> que han sido afectados por <i>Ormiscodes amphimone</i> . El anillo blanco está indicado por la flecha blanca, y el anillo angosto o ausente en el año siguiente está indicado por la flecha gris. Imagen perteneciente a Gutiérrez <i>et al.</i> (2020).....	2
Figura 2. Área de estudio. Zona norte (1), Zona centro (2) y Zona sur (3). Parcelas con colores que diferencian el grado de anomalía en el índice de vegetación, donde encontramos parcelas con grado I en color verde sin brotes de defoliación), grado II en color amarillo (1 o 2 brotes) y grado III en color rojo (tres o más brotes) (Gutiérrez <i>et al.</i> , 2020).	4
Figura 3. Climograma área de estudio, las líneas corresponden al promedio de temperaturas máximas (a) y mínimas (b), que se clasifican por zona, donde el color azul representa a la Zona Norte, verde Zona Centro y rojo Zona Sur.	5
Figura 4. Patrón histórico de defoliación en los bosques de la región de Aysén. En el eje Y1, en color negro se observa el porcentaje de árboles con señal de defoliación para cada año. En el eje Y2, el área gris sombreada indica la cantidad de árboles involucrados por año. La línea discontinua destaca el umbral de defoliación masiva de 11,4%.	10
Figura 5. Porcentaje de árboles atacados en cada evento masivo para las áreas estudiadas (A). Diagrama de caja del porcentaje de árboles atacados (B).....	11
Figura 6. Cronología regional (A), Cronología Zona norte (B), Cronología Centro (C) y Cronología Sur (D) de índice de ancho de anillo (IAA) estandarizadas con el método de spline. Las curvas verde y rojas representan la tendencia con un filtro de 30 años. Las líneas discontinuas corresponden a los eventos de defoliación masiva 1880, 1963, 1967, 1983, 2012, 2013 y 2015.....	13

Figura 7. Arriba gráficos de potencia Cross-wavelet (A, B, C) entre número de árboles defoliados y Índice de sequía (scPDSI) por zona, para un periodo de 1860 a 2015. Las líneas verticales punteadas indican los años de defoliación masiva que han afectado cada zona. Donde: Norte (2015, 2013, 2012), Centro (2015, 2013, 2012, 1983, 1967, 1963, 1880), y Sur (2015, 2013, 2012, 1983, 1963, 1880). Las líneas negras encierran la señal significativa con un 0,95 de umbral de confianza. Los colores indican la potencia de la señal en función de la escala a la derecha del gráfico. El cono de influencia indica donde es confiable el análisis. Abajo gráficos análisis de épocas superpuestas de desviaciones estadísticamente significativas (D, E, F) de scPDSI para los eventos de defoliación en un periodo de dos años, donde 0 representa el año de defoliación y -1 es el año anterior. Las barras indican los valores medios de desviación, donde los colores rojos son significativos ($p\text{-value} < 0.05$). 14

Figura 9. Análisis PCA para las variables en estudio (flechas de carga, color rojo oscuro), y su relación con las parcelas (puntos). Entre las variables se encuentran los eventos de defoliación (Año 2015, 2013, 2012, 1983, 1967, 1963, 1880), que corresponden a la cantidad de árboles defoliados por evento en cada parcela. En color verde se destacan las parcelas de la zona norte, en color rojo claro las parcelas de la zona centro y en color azul las parcelas de la zona sur. 19

RESUMEN

Los bosques, esenciales para la preservación de la biodiversidad y el equilibrio ecológico, se ven desafiados por la creciente frecuencia de eventos masivos de defoliación causados por insectos, un fenómeno principalmente atribuido al cambio climático. Esta problemática resulta en una degradación del bosque, amenazando la salud y sostenibilidad a lo largo plazo de estos ecosistemas. En la Región de Aysén, en particular en los bosques de *Nothofagus pumilio*, se han documentado recientemente casos de defoliación masiva causados por *Ormiscodes amphimone*, lo cual ha afectado extensas áreas. Actualmente, existen muchas interrogantes para terminar de comprender los desencadenantes de los ataques. Por lo que esta investigación se enfoca en abordar las incógnitas empleando métodos dendrocronológicos para reconstruir el patrón de defoliación en bosques de *N. pumilio*, distribuidos en tres zonas distintas (Norte, Centro y Sur) de la Región de Aysén, abarcando el periodo desde 1860 hasta 2015. Para llevar a cabo la reconstrucción, se realizó un análisis wavelet de multiresolución (MRA), sumado a la remoción de la señal climática en la cronología de crecimiento. Adicionalmente, se investigó la relación de los eventos de defoliación masiva con la variación climática (Temperatura media diaria e Índice de severidad de sequía de Palmer auto-calibrado) y variables de sitio (Pendiente, Área basal, Densidad de árboles, Diámetros promedio, Elevación). Este enfoque busca proporcionar una comprensión más completa de los factores que contribuyen en los eventos de defoliación masiva. Se identificaron siete eventos de defoliación masiva (1880, 1967, 1963, 1983, 2012, 2013, 2015), de los cuales se destacan los años 1983, 2012 y 2015, ya que obtuvieron 30,4%, 51,1% y 33,5% árboles defoliados de un total de 741 árboles muestreados, afectando principalmente a las zonas centro y sur de la región. Por otro lado, se determinó que el aumento de la sequía y la temperatura, están influenciando de manera significativa en los ataques masivos de defoliación. En el caso de las variables de sitio, la elevación y la densidad de árboles tienen un efecto sobre las defoliaciones masivas. Es decir, bosques ubicados en sitios menos elevados y/o con mayores densidades de árboles presentan condiciones que favorecen los ataques de *Ormiscodes amphimone* en la región de Aysén. Los resultados contribuyen a una mayor comprensión de la relación entre *O. amphimone* y *N. pumilio*, indicando extensas defoliaciones influenciadas por condiciones de sitio y climáticas favorecedoras.

Palabras clave: *Nothofagus pumilio*, *Ormiscodes amphimone*, temperatura media, Índice de Severidad de Sequía de Palmer auto-calibrado, Densidad, Elevación.

ABSTRACT

ANALYSIS OF THE PATTERN OF MASS DEFOLIATION BY *Ormiscodes amphimone* IN FORESTS OF *Nothofagus pumilio* LOCATED IN THE REGION OF AYSÉN

Forests, essential for the preservation of biodiversity and ecological balance, are defianced by the increasing frequency of massive defoliation events, a phenomenon mainly attributed to climate change. This problem results in forest degradation, threatening the long-term health and sustainability of these ecosystems. In the Aysén region, particularly in *Nothofagus pumilio* forests, cases of massive defoliation caused by *Ormiscodes amphimone* have been documented recently, affecting large areas. Currently, there are many questions to understand the triggers of the attacks. Therefore, this research focuses on addressing the unknowns using dendrochronological methods to reconstruct the pattern of defoliation in forests of *N. pumilio*, distributed in three different areas (North, Central and South) of the Aysén region, covering the period from 1860 to 2015. To carry out the reconstruction, a multiresolution wavelet analysis (MRA) was carried out, in conjunction with the removal of the climatic signal in the growth chronology. Additionally, the relationship of mass defoliation events with climatic variation (mean temperature and self-calibrated Palmer Drought Severity Index) and site variables (slope, basal area, tree density, average diameters, elevation) is investigated. This holistic approach seeks to provide a more complete understanding of the factors contributing to mass defoliation events. Seven mass defoliation events were identified (1880, 1967, 1963, 1983, 2012, 2013, 2015), of which 1983, 2012 and 2015 stand out, as they obtained 30.4%, 51.1% and 33.5% defoliated trees out of a total of 741 trees sampled, mainly affecting the central and southern areas of the region. On the other hand, it was determined that the increase in drought and temperature are significantly influencing the massive defoliation attacks. In the case of site variables, elevation and tree density have an effect on massive defoliation. That is, forests located at lower elevations and/or with higher tree densities present conditions that favor *Ormiscodes amphimone* attacks in the Aysen region. The results contribute to a better understanding of the relationship between *O. amphimone* and *N. pumilio*, indicating extensive defoliations influenced by favorable site and climatic conditions.

Keywords: *Nothofagus pumilio*, *Ormiscodes amphimone*, mean temperature, Self-calibrated Palmer Drought Severity Index, Density, Elevation.

1. INTRODUCCIÓN

Los bosques del mundo son esenciales para la vida, albergan una gran diversidad de plantas y animales, también son el generador del aire que requieren los seres vivos. Éstos protegen los suelos y las aguas, contribuyendo a la estabilización del clima (ONU, 2011). La estructura de la comunidad vegetal y la función del ecosistema, están muy influenciadas por la frecuencia y la severidad de las perturbaciones naturales (Landres *et al.*, 1999). En este contexto, los brotes de insectos se encuentran entre las perturbaciones naturales más importantes en los paisajes boscosos (Raffa *et al.*, 2008). Por otro lado, la Región de Aysén es una de las regiones de mayor importancia del país, debido a que posee 4.398.745,5 hectáreas de bosque nativo, lo cual representa un 41% de la superficie total de la región, y un 30% de la superficie total nacional de bosque nativo (CONAF & UACH, 2012). La zona está constituida por una amplia variedad de ecosistemas, así como una rica biodiversidad acuática y terrestre. Es posible encontrar paisajes inalterados o lugares donde las actividades humanas no han dejado rastros en los ciclos naturales (INFOR, 2014). Entre ellos encontramos bosques patagónicos de *Nothofagus pumilio*, la cual es una especie de amplia distribución, y la mayor parte de esta superficie son bosques monoespecíficos, haciéndola una especie de alta susceptibilidad a defoliadores (Bauerle *et al.*, 1997).

Los brotes masivos de insectos están catalogados como uno de los disturbios más relevantes, ya que la dinámica natural del brote esta alterada, desarrollándose a escalas espaciales mucho mayores de lo habitual, que terminan perjudicando al ecosistema (Chávez *et al.*, 2019). En los últimos 30 años, los brotes masivos de *O. amphimone*, una de las especies de *Ormiscodes* más extendidas en el sur de Sudamérica, han aumentado en frecuencia en muchos bosques de *N. pumilio*, probablemente debido al calentamiento climático (Paritsis & Veblen 2011; Gutiérrez *et al.*, 2020), el cual produce variaciones en la dinámica de los insectos defoliadores, lo que se traduce en pérdida de la sanidad de los boques (Bauerle *et al.*, 1997), generando cambios en la estructura forestal y procesos ecosistémicos, así como en la biodiversidad de toda la comunidad (Paritsis *et al.*, 2009). La reducción de precipitaciones sumado al aumento de la temperatura, parecen estar propiciando el aumento en la frecuencia de defoliaciones (Gutiérrez *et al.*, 2020; Paritsis, 2020; Estay *et al.*, 2023). La temperatura es el factor climático que más influye en los insectos herbívoros (Garibaldi & Paritsis, 2012), ya que con mayores temperaturas los insectos comen más y eso repercute sobre las plantas que consumen. Por lo que, en base a los pronósticos del cambio climático, que prevén un aumento de la temperatura y una disminución en la precipitación en la Patagonia (Gibson *et al.*, 2022), es probable que la ocurrencia de brotes poblacionales de *O. amphimone* se incremente en los bosques dominados por *N. pumilio* durante este siglo (Guerrero, 2021; Paritsis, 2021; Estay *et al.*, 2023).

Los eventos masivos de defoliación por *O. amphimone* se han registrado dentro de toda la región, siendo el área más afectada la del valle del río Furioso, cerca de Mallín Grande

(Gutiérrez *et al.*, 2020). En esta zona se determinó que los eventos de defoliación han aumentado en frecuencia en la última década, desarrollándose cuatro eventos desde el año 2000, en los años 2008, 2011, 2012 y 2015, donde este último resultó ser el más extenso (Gutiérrez *et al.*, 2020). Estos años coinciden con el aumento de la temperatura a partir del año 2000 en la zona (Olivares *et al.*, 2019). Estay *et al.* (2023) detectaron satelitalmente nuevos brotes de defoliación por *O. amphimone* en bosques de *N. pumilio* en la misma zona, en los años 2017, 2019 y 2022. Los últimos dos eventos se describen como bosques extremadamente defoliados, registrando una superficie atacada de 55.193 ha y de 62.344 ha, respectivamente, clasificando como los mayores brotes de insectos reportados en la Patagonia en este siglo (Estay *et al.*, 2023).

El ataque de *Ormiscodes* ocurre en el estado larval del insecto, el cual se alimenta de las hojas, llegando a defoliar completamente a los árboles atacados (Paritsis, 2021). Estas emergen durante la primavera, alimentándose de las hojas hasta el verano. El daño producido es más intenso en las primeras fases de la defoliación, el cual se concentra en los meses de enero y febrero (Estay *et al.*, 2019; Paritsis, 2020). Esta situación genera un daño a nivel celular, debido a que hay una reducción significativa del tejido fotosintético, lo que se traduce en una disminución de la capacidad de almacenaje de carbono, reduciendo el crecimiento en la temporada siguiente (Piper *et al.*, 2015, Figura 1). Es por esto que la anatomía anormal presente en los anillos de crecimiento se utiliza para determinar la fecha del evento de defoliación. Estos se caracterizan por poseer un color blanco la temporada de la defoliación, seguido de un micro anillo o anillo ausente la temporada siguiente (Paritsis *et al.*, 2009).



Figura 1. Patrón anormal de la anatomía de la madera en anillos de crecimiento de *Nothofagus pumilio* que han sido afectados por *Ormiscodes amphimone*. El anillo blanco está indicado por la flecha blanca, y el anillo angosto o ausente en el año siguiente está indicado por la flecha gris. Imagen perteneciente a Gutiérrez *et al.* (2020).

Los ataques producidos por *O. amphimone* generalmente no matan a *N. pumilio*, probablemente debido a su corta duración (Carrillo & Cerda, 1987). Sin embargo, se ha sugerido que, si la recuperación al ataque no es completa, la defoliación contribuye a la muerte regresiva parcial de la copa (Veblen *et al.*, 1996). Además, las defoliaciones frecuentes pueden hacer que estos bosques sean más susceptibles al estrés subsiguiente, como la sequía, que puede provocar una mortalidad generalizada de los árboles (Suárez *et al.*, 2004). Es importante destacar que *O. amphimone* además de alimentarse de *N. pumilio*,

también se alimenta de otras especies arbóreas nativas de los géneros *Nothofagus*, *Populus*, *Prunus*, *Juglands*, entre otras (Angulo *et al.*, 2004). Pero a pesar de lo descrito anteriormente, sólo se han descrito brotes importantes de *Ormiscodes* en bosques de *N. pumilio* (Estay *et al.*, 2023).

La defoliación masiva sumado a las condiciones más secas y cálidas, evidencian un aumento de la vulnerabilidad de los bosques de *N. pumilio* de la Región de Aysén (Gibson, 2020), evidenciando la preocupación por los mismo, donde en la actualmente existen muchas interrogantes. Paritsis & Veblen (2011) indican que las condiciones climáticas particulares previas parecen ser importantes para los brotes masivos, sin embargo, es probable que otros factores desconocidos contribuyan a la dinámica entre *N. pumilio* y *O. amphimone*. El bosque tiene un microclima muy diferente al clima general de la zona, el cual puede variar dependiendo de las características de los bosques (Aussenac, 2000), como edad, densidad de árboles, topografía del área (pendiente y orientación), incluso la clase de suelos, ya que todas estas variaciones permiten diferencias en los flujos de aire, temperaturas y contenidos de humedad dentro del bosque (Uribe, 1981; Geiger *et al.*, 2003). Por lo que estas diferencias de los bosques podrían tener una influencia en los brotes de defoliación, explicando la incidencia de ataque en los diferentes bosques de *N. pumilio* dentro de la misma región. De esta problemática surge la necesidad de comprender qué eventos climáticos (variabilidad climática en un periodo determinado), características de sitio y estructurales, podrían estar relacionadas con los eventos de defoliación que se producen los bosques patagónicos de *N. pumilio* en la Región de Aysén. Por lo que en esta investigación, se analizará y comparará, mediante métodos dendrocronológicos, el disturbio de *O. amphimone* en los bosques de *N. pumilio* en diferentes sectores de la Región de Aysén.

OBJETIVOS

Objetivo general

Analizar los eventos de defoliación de *Nothofagus pumilio* causados por *Ormiscodes amphimone* en la Región de Aysén.

Objetivos específicos

- Reconstruir el patrón histórico de defoliación de *Ormiscodes amphimone* en los bosques de *Nothofagus pumilio*.
- Relacionar la sincronía de los eventos de defoliación con eventos climáticos.
- Relacionar los eventos de defoliación c

2. MATERIALES Y MÉTODO

2.1. Área de estudio

La investigación se llevó a cabo en tres zonas (Figura 2), en las que se ubican bosques de *Nothofagus pumilio* distribuidos en la Región de Aysén.

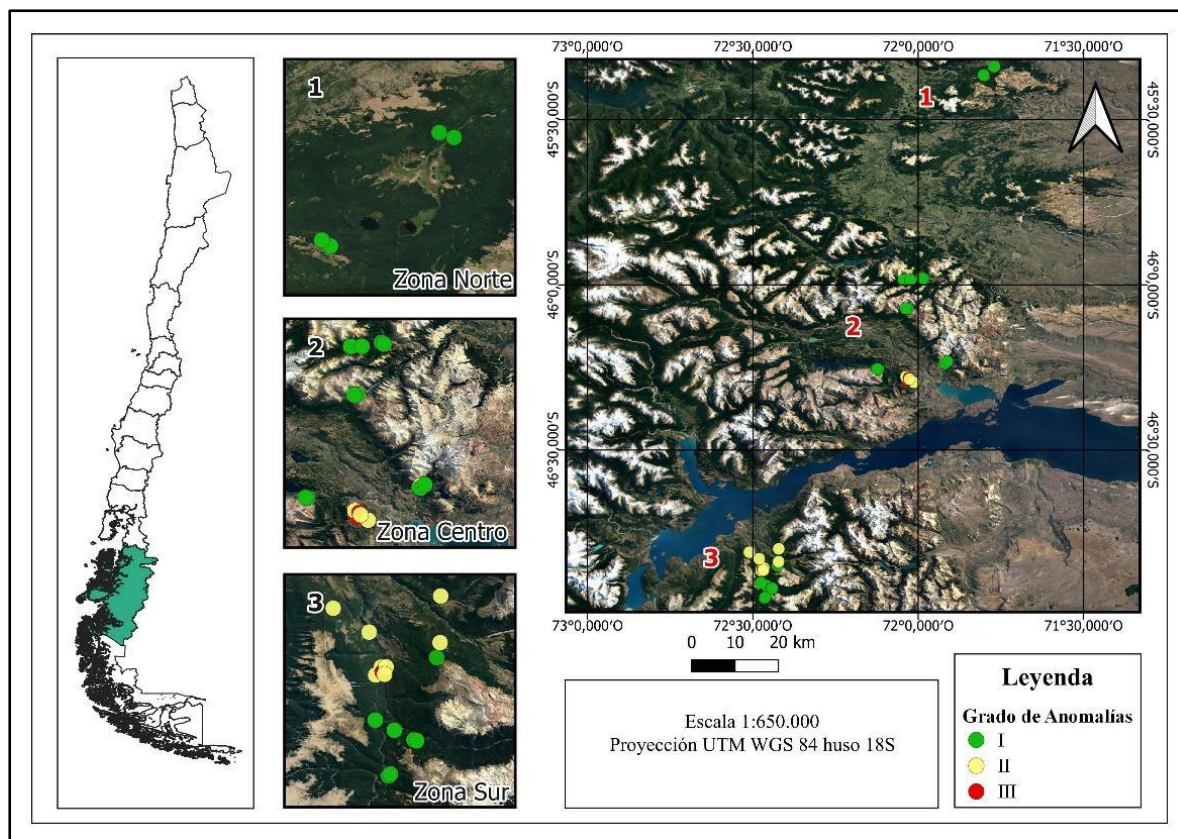


Figura 2. Área de estudio. Zona norte (1), Zona centro (2) y Zona sur (3). Parcelas con colores que diferencian el grado de anomalía en el índice de vegetación, donde encontramos parcelas con grado I en color verde (sin brotes de defoliación), grado II en color amarillo (1 o 2 brotes) y grado III en color rojo (tres o más brotes) (Gutiérrez *et al.*, 2020).

El área de estudio presenta temperaturas máximas (Figura 3A) que oscilan entre 17,4°C y 2,6°C entre las tres zonas, donde la Zona Centro presenta las mayores temperaturas. En el caso de la temperatura mínima (Figura 3B), ésta oscila entre 3,4°C y -7,3°C entre zonas, donde la Zona Norte presenta las menores temperaturas.

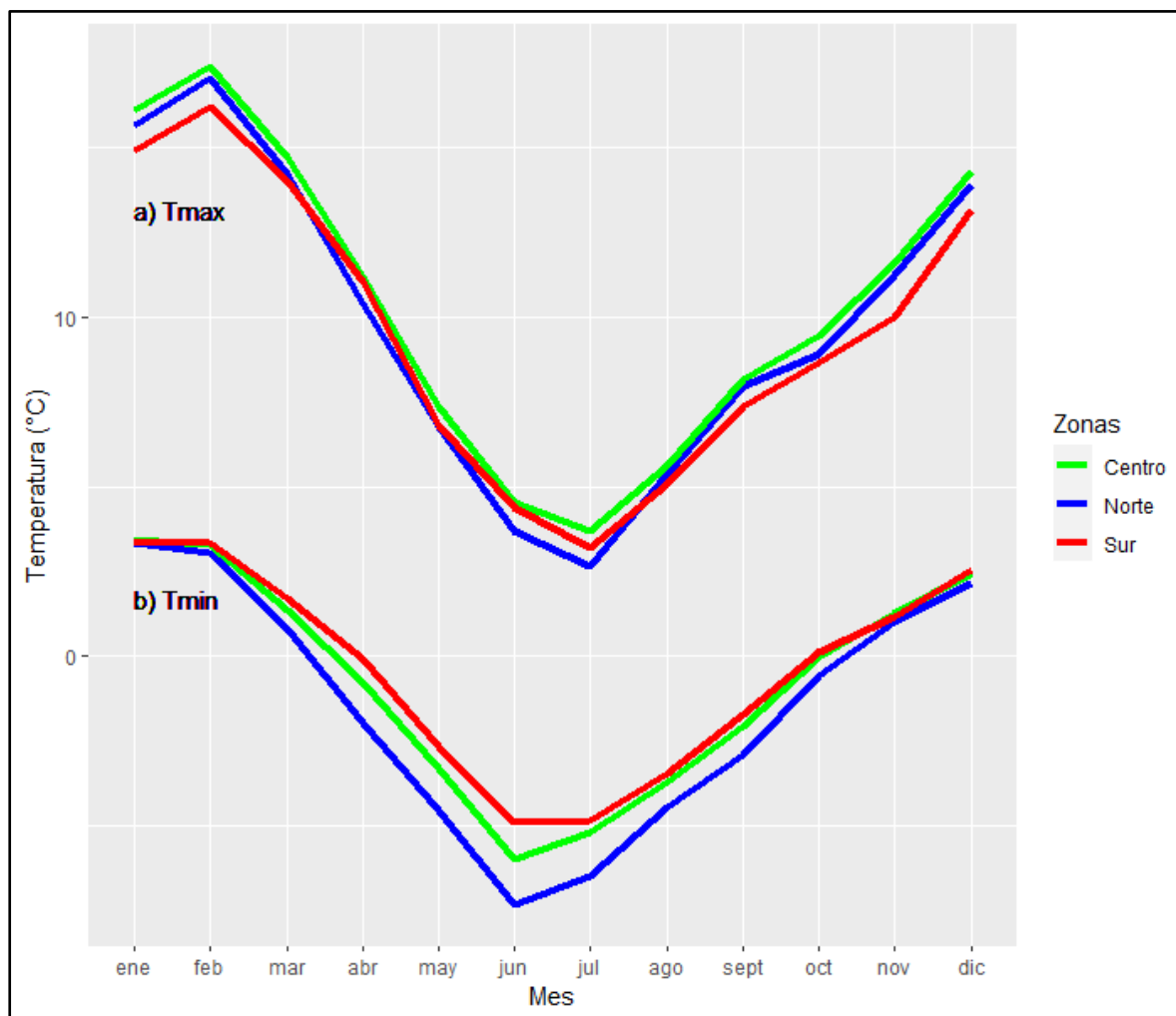


Figura 3. Climograma de las áreas de estudio. Las líneas corresponden al promedio de temperaturas máximas (a) y mínimas (b), que se clasifican por zona, donde el color azul representa a la Zona Norte, verde Zona Centro y rojo Zona Sur. (Gutiérrez *et al.* 2020)

2.2 Procesamiento de muestras sin medir y construcción de cronologías de crecimiento

El Laboratorio de Dinámica de la Vegetación – Bosque Ciencia del Departamento de Ciencias Ambientales y Recursos Naturales Renovables de la Universidad de Chile- realizó los muestreos de los bosques de *N. pumilio* durante la temporada de verano 2017, 2018, 2019 y 2020, mediante parcelas circulares de 500 m² con un radio de 12,6 m. En las cuales se realizó una toma de datos a todos los individuos, que consideró la medición del diámetro a la altura del pecho (DAP), condición, posición en el dosel (emergente, dominante, codominante, intermedio y bajo dosel), forma y signos de daños por insectos. Finalmente, se realizó la extracción de dos tarugos de incremento por individuo presente en las parcelas, utilizando la sonda de Pressler (Grissino, 2003). De este muestreo se seleccionaron 741 árboles pertenecientes a 36 parcelas, utilizando un tarugo por árbol, 673 tarugos medidos y

68 tarugos sin medir. Los tarugos faltantes fueron procesados, donde en primera instancia, se cortaron las muestras de manera transversal, utilizando un micrótopo de deslizamiento horizontal, para luego ser lijadas. Esto con el fin de obtener una mejor visualización de los anillos (Stokes & Smiley, 1968; Henry & Swan, 1974). Más tarde, se realizó una primera visualización bajo una lupa estereoscópica, con el objetivo de buscar zonas complejas y que posiblemente no se puedan ver bien una vez escaneado. Finalmente, se escanearon todos los tarugos a 2400 puntos por pulgada para su posterior medición, utilizando un escáner Epson V600 de alta resolución.

a) Medición y cofechado

Para determinar y fechar los anillos de crecimiento, se utilizó la convención del anillo del árbol del hemisferio sur, que asigna un anillo anual al calendario en el cual el árbol comienza a crecer (Schulman, 1956). El crecimiento anual de los anillos de cada tarugo fue medido mediante el software Cdendro. Esta etapa es apoyada por el software COFECHA, utilizado para obtener la intercorrelación entre las mediciones de cada tarugo, el cual determina la similitud entre tarugos y una serie maestra generada a partir de los mismos tarugos. Esto permitió realizar un control de calidad (Holmes *et al.*, 1986), y evitar errores por anillos ausentes (Roig & Zevallos, 2009).

b) Reconstrucción de patrón histórico de defoliación

Debido a las reducciones de crecimiento generadas por los defoliadores (Speer *et al.*, 2001, Paritsis, 2009), es posible identificar los años de disturbios. Las defoliaciones de *Ormiscodes amphimone* duran una sola temporada de crecimiento (t_0), por lo que la disminución del crecimiento se puede observar en el anillo de la siguiente temporada ($t+1$). Este se puede expresar mediante un anillo muy estrecho o ausente (Speer *et al.*, 2001; Paritsis *et al.*, 2009). En este caso se utilizaron dos métodos detectores, el Análisis Wavelets de multirresolución (MRA) y el análisis “Host versus Regional radial Growth” (Flower *et al.*, 2014). El primer método MRA, corresponde a un conjunto de herramientas para determinar la distribución de energía dentro de una serie de datos (Torrence & Compo, 1998). Para esto se examina la señal de tiempo y frecuencia utilizando funciones transformadoras (Wavelets), que descomponen la serie de tiempo (Addison, 2002), mediante el paquete Waveslim (Whitcher, 2020). Este análisis se aplicó a las series no estandarizadas, con el fin de determinar pulsos o señales intermitentes en intervalos muy pequeños como las reducciones en el crecimiento radial (Gutiérrez *et al.*, 2020). El método consiste en realizar una descomposición de las series para cada uno de los árboles mediante el algoritmo piramidal de Mallat (1989). Utilizando la señal descompuesta se realizó un bootstrap de cada serie para identificar si los cambios detectados en las series no se esperaban por azar ($p < 0,05$; 1.000 iteraciones, Gutiérrez *et al.*, 2020), y de esta manera detectar reducciones estadísticamente significativas en el crecimiento radial de las series. Para el segundo método, se utilizó la cronología regional de *N. pumilio* de Gibson (2020), la cual fue construida a partir de tres sitios de distintos sectores dentro de la región de Aysén (entre 45-47°S y 71-73°O). Esta cronología se enfocó

en obtener representar arboles sensibles a la variabilidad climática. Para esto se utilizaron bosques cercanos al límite arbóreo, y donde no se han registrado eventos de defoliación en los últimos 20 años (Gutiérrez *et al.*, 2020). Este método consiste en remover la señal de eventos climáticos extremos de las series de crecimiento de las parcelas, utilizando la cronología regional y mediante el paquete *dfoliarR* (Guiterman *et al.*, 2020). De esta manera, se sustrae la señal climática regional de las series de cada zona, lo que genera un índice residual “growth suppression index” (GSI, Guiterman *et al.*, 2020), que sirve para identificar reducciones de crecimiento sin la influencia climática, y por lo tanto son inducidas por defoliaciones (Swetnam *et al.*, 1985; Paritsis, 2020). La ecuación utilizada fue para calcular GSI fue:

$$GSI(i) = H(i) - (R(i) - \text{mean}(R) \text{sd}(H) / \text{sd}(R))$$

Donde $H(i)$ corresponde a las series de cada zona para el año “i”, $R(i)$ es la cronología regional al año (i), mean es el promedio del índice de ancho de anillo (IAA) de la cronología regional para el periodo en común, $\text{sd}(H)$ y $\text{sd}(R)$ son la desviación estándar de los IAA para el periodo estimado de las zonas afectadas y la cronología regional respectivamente. Mediante estos análisis se determinó la defoliación sólo cuando ambos métodos coincidieron. Además, se definió un umbral del 11,4% de árboles defoliados para clasificar la defoliación como masiva, el cual coincide con el valor mínimo de porcentaje de árboles defoliados en los años que ya han sido confirmados por otros autores para distintos sectores de la región de Aysén en Chile (Gutiérrez *et al.*, 2020; Urra, 2021; Estay *et al.*, 2023), y a la misma latitud en la Patagonia Argentina (Paritsis *et al.*, 2011).

2.3 Relación de la sincronía de los eventos de defoliación con eventos climáticos

Se utilizaron datos climáticos que pueden tener una relación con el ciclo de vida de *O. amphimone*, como las temperaturas, las que fueron extraídas del explorador CR2MET, para más tarde ser utilizadas para el cálculo de días grado que permite identificar los días donde la temperatura promedio se encuentra sobre una temperatura base referencial (Murray, 2008). Las temperaturas más altas aceleran el desarrollo de los insectos ectotermos, lo que a su vez incrementa la tasa metabólica, es decir, necesitan más alimento y eso repercute sobre las plantas que consumen (Garibaldi & Paritsis, 2012). Dado que las temperaturas altas en primavera y verano pueden estar afectando la magnitud o severidad de los eventos de defoliación (Guerrero, 2021), se decidió utilizar en el análisis la temperatura media diaria con un valor base de 12°C, para los meses de octubre a marzo. Garibaldi & Paritsis (2012) indican que la frecuencia de herbívora aumenta considerablemente sobre los 12°C para los meses más cálidos en bosques andino-patagónicos, resultando en un consumo entre 50-90% de las hojas, concluyendo que la herbívora con mayores temperaturas medias es más elevada. También se empleó en el análisis, el Índice de Severidad de Sequía de Palmer auto calibrado (scPDSI) recopilado del explorador de atlas de sequías de Sudamérica (SADA), debido a la influencia del contenido de humedad en copas y hojarasca, que resulta importante para los estados de huevo y pupa respectivamente, que se depositan en estas áreas (Serra *et al.*, 2022).

Siguiendo los patrones estacionales de desarrollo del insecto se decidió incluir la oscilación térmica, ya que altas y bajas de temperatura pueden aumentar o disminuir el rendimiento del insecto (Garibaldi & Paritsis, 2012). En primer lugar, utilizando las variables climáticas mencionadas, se realizó un análisis de correlación de Pearson (Pearson, 1895), para descartar las variables no ortogonales. Luego, utilizando las variables seleccionadas, se realizó un análisis Cross-wavelet del paquete biwavelet (Gouhier *et al.*, 2013) con el objetivo de conocer si existe una relación entre las variables climáticas y los eventos de defoliación que se detectaron. También, se efectuó un análisis de época superpuesta (SEA) utilizando el paquete dplR (Bunn *et al.*, 2021), lo que determinará significancias estadísticas entre eventos discretos auto correlacionados y una serie de datos (Hernández, 2002). Esto permite conocer las condiciones climáticas asociadas a los eventos de defoliación (Ellis & Flower, 2017).

2.4 Relación de eventos de defoliación con variables de sitio y estructurales

Los bosques cuentan con una serie de datos que fueron tomados en terreno junto a la recolección de los tarugos de incremento. Utilizando las variables de sitio (Pendientes, Elevación) y estructurales (Área basal, Diámetros promedio, Densidad de árboles) se realizó un análisis de correlación de Pearson (Pearson, 1895), con el propósito de conocer el comportamiento de las defoliaciones y las variables seleccionadas, sumando las variables climáticas que resultaron más importantes en el análisis climático. Después, con el objetivo de comprender más profundamente la relación entre las características de los bosques y la ocurrencia de eventos masivos se utilizó un análisis de componentes principales (PCA), involucrando las variables estructurales y la cantidad de árboles defoliados por eventos masivos. Finalmente, se seleccionaron las variables con mayor influencia en los eventos de defoliación, para realizar un análisis basado en un modelo de regresión negativa binomial, el cual se utiliza para abordar situaciones en las que la distribución de probabilidad de la variable dependiente no se ajusta bien a la distribución normal. Una distribución binomial de probabilidad discreta describe el número de éxitos en una secuencia fija de ensayos independientes, cada uno con dos posibles resultados: éxito o fracaso. Este modelo se selecciona específicamente en casos de sobre dispersión en los datos, donde la variabilidad observada es mayor de lo esperado según un modelo de distribución de Poisson (Alcaide, 2015). El objetivo fue realizar un último filtro a las variables y determinar cuales corresponden a las más importantes que pueden influir en la defoliación en los diferentes bosques *N. pumilio*, comprendiendo mejor las relaciones entre las variables de sitio y la ocurrencia de brotes masivos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Cronología de crecimiento

Para las series analizadas se obtuvo una intercorrelación de 0,403 (Cuadro 1), este valor indica la similitud entre las series analizadas. De la misma manera, se obtuvo una sensibilidad media de 0,331, que representa la variación relativa en el crecimiento de un año a otro (Fritts, 1976). Los datos más fiables de la cronología ($EPS \geq 0,85$; Fritts, 1976) se encuentran en el periodo de 1860 a 2017, por lo que la mayoría de los árboles estudiados presentan estos años en su crecimiento.

Cuadro 1. Estadística descriptiva de cronología de crecimiento.

Variables	Series Región Aysén
N° de series	741
Intercorrelación (r^2 Pearson)	0,403
Periodo	1679 – 2017
Cantidad de años	339
Ancho medio del anillo (1/100 mm)	122
Periodo con $EPS \geq 0,85$	1860 – 2017
Sensibilidad media	0,338

3.2 Patrón histórico de defoliación

La incidencia de eventos de defoliación por *O. amphimone* está presente repetitivamente a lo largo de los años estudiados (Figura 4), esto habla de la relación que ha existido entre ambas especies a lo largo de los años. Dentro del periodo analizado, se han encontrado siete años con defoliación masiva, donde el año 1880 corresponde al más antiguo registrado. Posteriormente, se observa un periodo aproximado de 70 años consecutivos entre 1890 y 1960 en el que las defoliaciones se mantienen bajo el umbral de 11,4% de árboles defoliados. Sin embargo, a partir de este último año en adelante, existe un visible aumento en la cantidad de individuos con señal de defoliación, con tres casos en particular que destacan del resto, correspondiente a los años 1983, 2012, y 2015. Entre los cuales el año 2012 presenta la mayor cantidad de individuos defoliados, con 329 árboles con señal de defoliación, lo que corresponde a un 51,1% de los árboles presentes en ese año. En el caso de los años 1983 y 2015, ambos resultaron con una cantidad que ronda los 200 individuos con señal de defoliación, lo que corresponde a un 30,4% y 33,5% respectivamente del total de individuos. La defoliación presente en el año 2015 es la que registra una de las mayores extensiones dentro de la literatura (Gutiérrez *et al.*, 2020). Es importante notar que en esta investigación, las defoliaciones registradas para 2015 pueden estar subestimadas, ya que un 65% de las

series analizadas no registran el año posterior 2015 en su crecimiento, interrumpiendo la temporada de crecimiento de *N. pumilio*. Esto se explica por el año de recolección de algunas de las muestras y el método de detección utilizado.

Los resultados indican que cuatro de los siete años detectados (1963, 1983, 2012, 2015) coinciden con los eventos de brotes confirmados dentro de la región por otros autores (Estay *et al.*, 2019; Gutiérrez *et al.*, 2020; Urra, 2021).

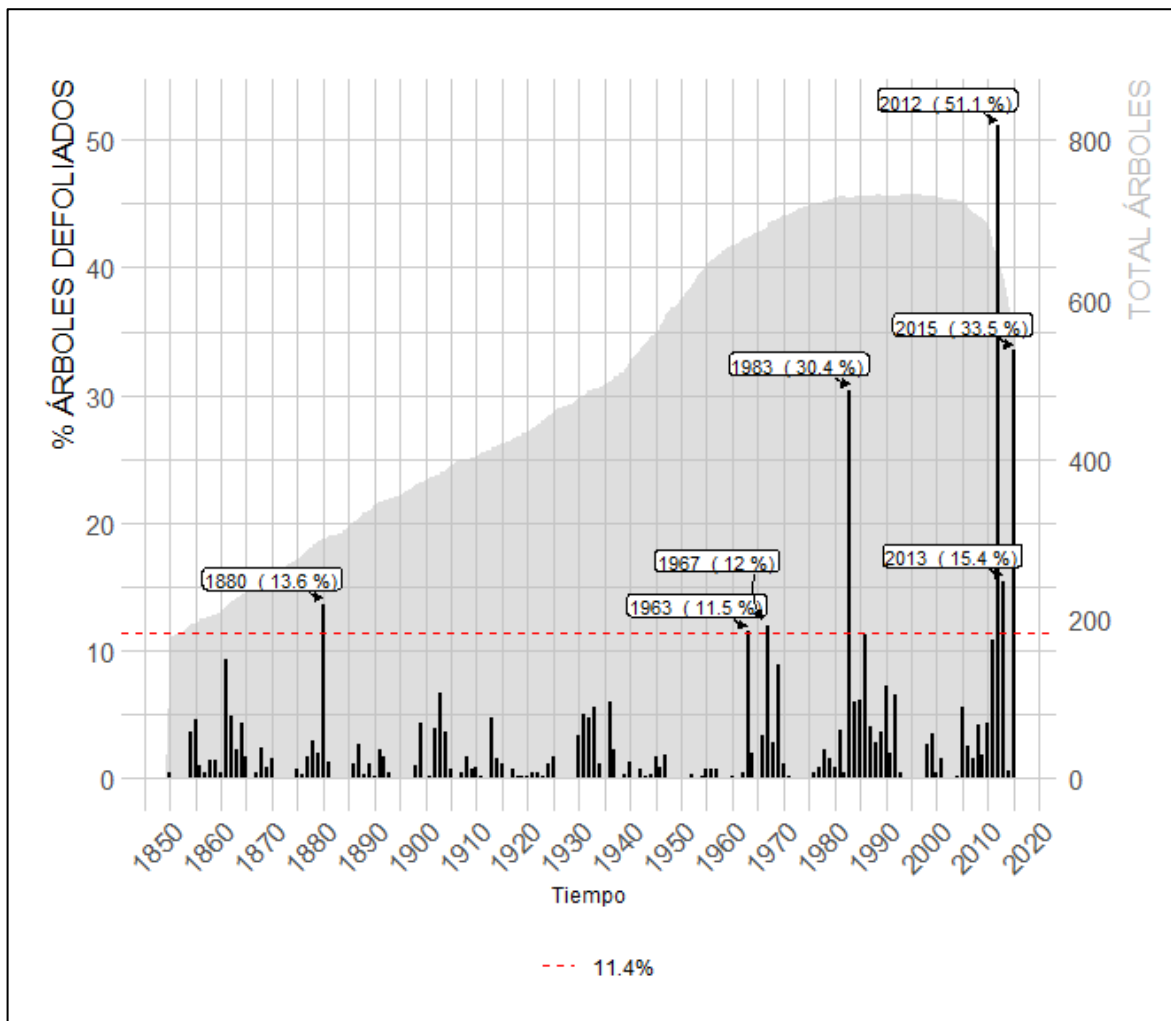


Figura 4. Patrón histórico de defoliación en los bosques de la región de Aysén. En el eje Y1, en color negro se observa el porcentaje de árboles con señal de defoliación para cada año (N° árboles atacados en un año determinado $\times$ 100 / árboles presentes ese año). En el eje Y2, el área gris sombreada indica la cantidad de árboles involucrados por año. La línea discontinua destaca el umbral de defoliación masiva de 11,4%.

Al observar la distribución de los ataques en las áreas estudiadas (Figura 5), se destaca que el ataque está presente dentro de toda el área de estudio, pero en distinta proporción. En el

caso de las parcelas de la zona norte de la región, son las que presentan la menor proporción de árboles afectados para todos los años de defoliación masiva, incluso para el año 1983 no se detectaron defoliaciones en el sector, sin embargo, hay que destacar que en esta zona solo se están analizando dos parcelas, lo cual indica una menor variabilidad en comparación a las otras dos zonas.

De la misma manera, el evento de 2012 es el que más ha afectado la zona norte, registrando solo ocho árboles con defoliación de 49 árboles totales, lo que corresponde a un 16,3%. Por otro lado, las parcelas de la zona centro concentraron la mayor proporción de defoliación en los años 2012 y 2015, con 185 y 142 árboles, que corresponden al 43,94% y 33,7% respectivamente de los árboles totales en cada año. Finalmente, en las parcelas de la zona sur, se destacan los años 1983 y 2012, con 149 y 136 árboles, que representan el 54,98% y 50,18% respectivamente.

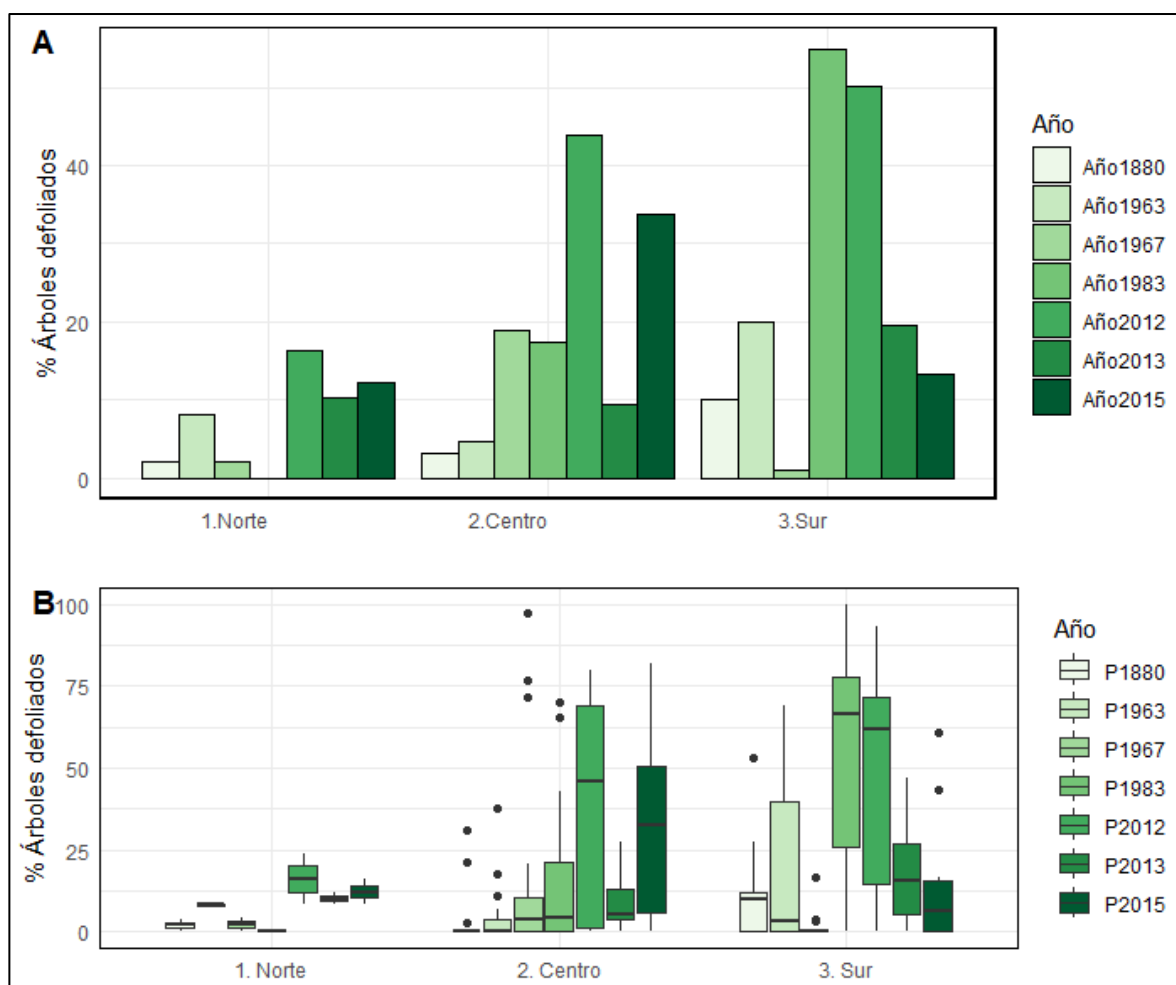


Figura 5. Porcentaje de árboles atacados en cada evento masivo para las áreas estudiadas (A). Diagrama de caja del porcentaje de árboles atacados (B).

Estos resultados indican que los años con mayor frecuencia de defoliaciones dentro del área de estudio, corresponden a 1983 en la zona sur, 2012 en la zona centro y sur, y 2015 en la zona centro. De estos resultados se excluye la zona norte, ya que ninguno de los siete eventos registrados ha tenido un mayor impacto en el área. Finalmente, los resultados indican un aumento de la proporción de árboles defoliados que incrementa de norte a sur.

En la Figura 6, se puede comparar la cronología de crecimiento regional (Gibson, 2020), con las tres zonas involucradas en el estudio (Norte, Centro y Sur), observando que las disminuciones de crecimiento en los eventos masivos encontrados no ocurren en la cronología regional (Figura 6a, eventos masivos indicados en línea vertical segmentada), por lo que la disminución de índice de ancho de anillo (IAA) en los años detectados no son de influencia climática, confirmando la efectividad de los métodos de detección. En el caso de los eventos de 1880 y 1963, obtuvieron 13,6% y 11,5% de árboles defoliados, los que se concentraron principalmente en la zona centro y sur (Figura 5), produciendo disminuciones de Índice de ancho de anillo (IAA, Figura 6) similares, con 0,96 y 0,78 en 1880, así como 0,94 y 0,7 en 1963, para la zona centro (Figura 6C) y sur (Figura 6D) respectivamente. Después, el evento masivo de 1967 resultó ser el menos extenso de todos, ya que afectó solamente a la zona centro, produciendo una disminución de IAA, llegando a 0,8. De la misma manera, el porcentaje de árboles defoliados en el evento de 1983 es de 17% y 54% de los árboles analizados en la zona centro y sur respectivamente, estos valores se ven reflejados en las cronologías, con disminuciones de crecimiento que reflejan la intensidad del ataque, llegando a 0,8 y 0,4 de IAA respectivamente. Situación similar ocurre con la defoliación del año 2012, también con una proporción semejante de 16%, 43% y 50% de árboles defoliados, con 0,9, 0,5 y 0,3 de IAA para la zona norte (Figura 6B), centro y sur respectivamente. Los resultados de índice de ancho de anillo coinciden con los resultados de árboles defoliados por zona (Figura 5).

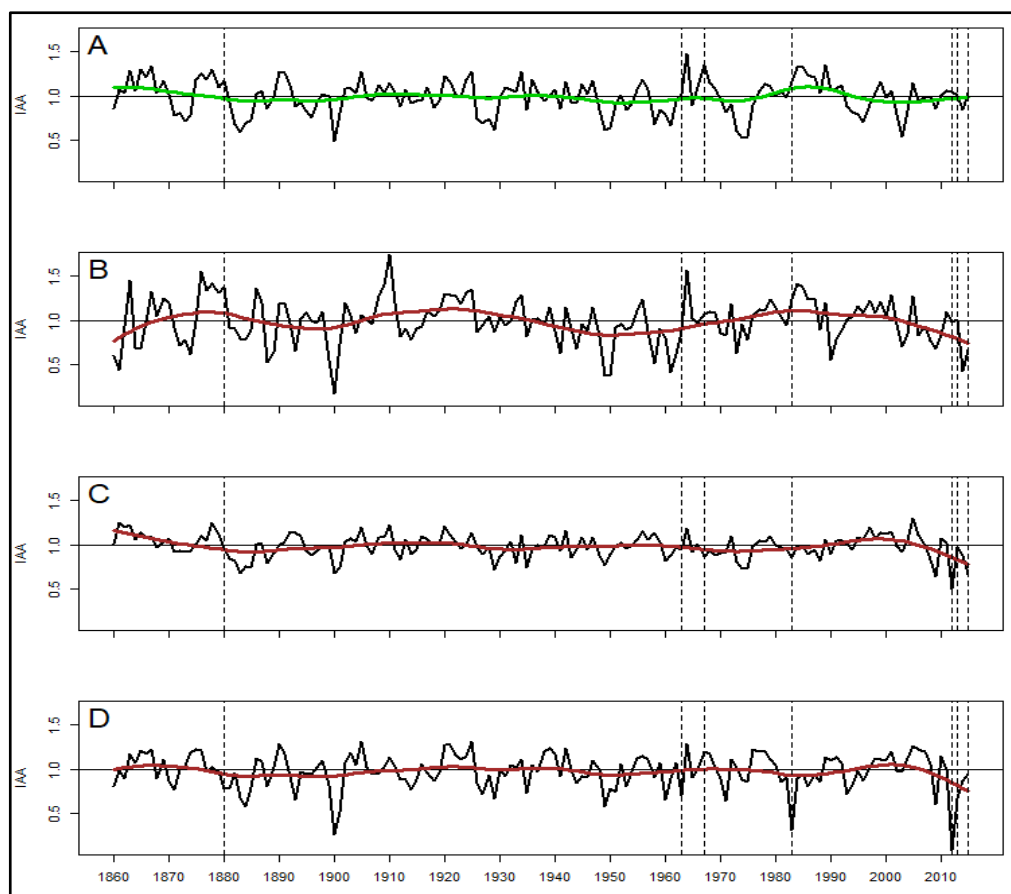


Figura 6. Cronología regional (A), Cronología Zona Norte (B), Cronología Centro (C) y Cronología Sur (D) de índice de ancho de anillo (IAA) estandarizadas con el método de spline. Las curvas rojas y verde representan la tendencia con un filtro de 30 años. Las líneas discontinuas corresponden a los eventos de defoliación masiva 1880, 1963, 1967, 1983, 2012, 2013 y 2015.

3.3 Relación entre eventos de defoliación y variabilidad climática

3.3.1 Análisis Índice de sequía

Los gráficos A, B y C de la Figura 7, corresponden a los resultados del análisis Cross wavelet para la zona norte, centro y sur respectivamente. Este análisis detecta correlaciones entre series, en este caso, entre la serie de árboles defoliados y la serie de índice de sequía. En el caso de la zona norte, este análisis no permite relacionar los eventos ocurridos en esta zona, debido a que estos años ocurren fuera del cono de influencia. A pesar de esto, existe una correlación significativa entre el número de árboles afectados y el índice de sequía en la zona centro y sur para los eventos de 1880, 1963, 1967. En 1983, no existe un aumento de sequía en el mismo año, pero puede estar influenciado por los años de sequía anteriores. En el caso de los eventos más nuevos (2012, 2013 y 2015), estos se encuentran fuera del cono de

influencia que determina si los datos son confiables. Por otro lado, los gráficos D, E, F, muestran los resultados del análisis SEA, para la zona norte, centro y sur, respectivamente. Este análisis identifica la desviación de la media de los valores del Índice de sequía, analizando cinco años antes de los eventos de defoliación masiva (los eventos detectados se ubican en el valor cero de las abscisas). Este análisis dio como resultado una desviación significativa entre cinco y cuatro años antes del evento de defoliación, para la zona norte, centro y sur. Lo que indica periodos de mayor sequía entre cinco y cuatro años antes del evento masivo. Por lo tanto, existen patrones de sequía previos que podrían estar gatillando en la magnitud de los ataques.

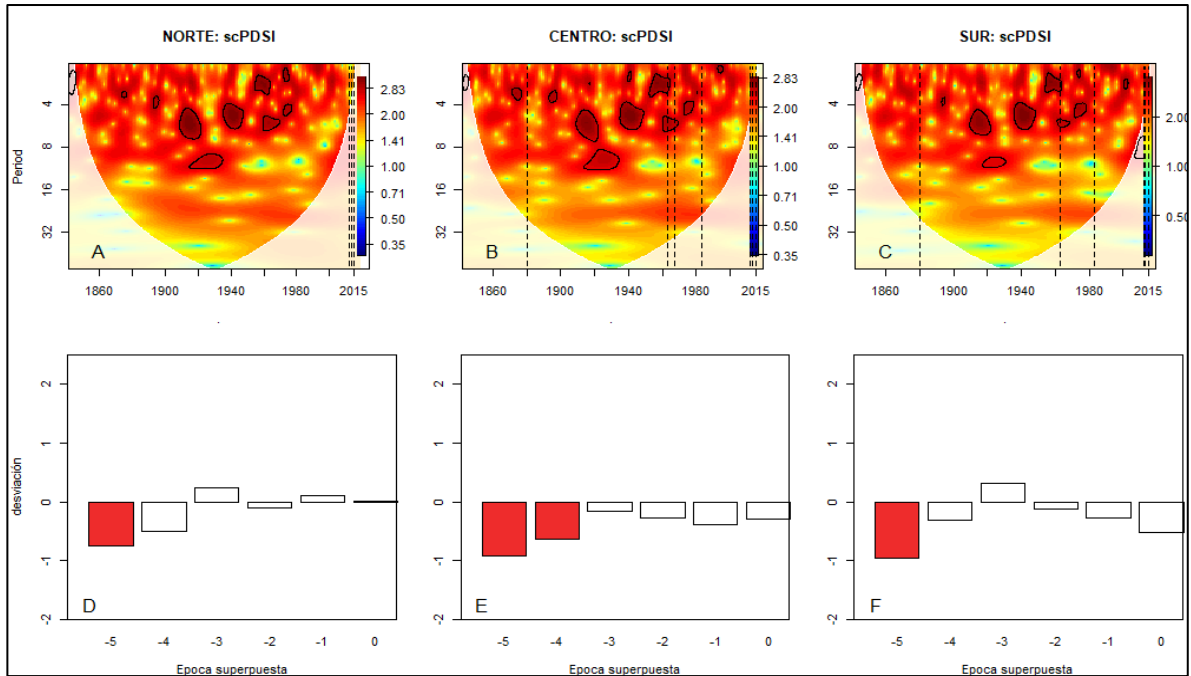


Figura 7. Cross-wavelet (A, B, C) entre número de árboles defoliados y Índice de sequía (scPDSI) para la zona norte, centro y sur respectivamente, en un periodo de 1860 a 2015. Las líneas verticales punteadas indican los años de defoliación masiva que han afectado cada zona. Donde: Norte (2015, 2013, 2012), Centro (2015, 2013, 2012, 1983, 1967, 1963, 1880), y Sur (2015, 2013, 2012, 1983, 1963, 1880). Las líneas negras encierran la señal significativa con un 0,95 de umbral de confianza. Los colores indican la potencia de la señal en función de la escala a la derecha del gráfico. El cono de influencia indica donde es confiable el análisis. (D, E, F) Análisis de épocas superpuestas (SEA) de desviaciones estadísticamente significativas de scPDSI para los eventos de defoliación en un periodo de cinco años, donde 0 representa el año de defoliación y -1 es el año anterior. Las barras indican los valores medios de desviación, donde los colores rojos son significativos (P- value<0.05).

3.3.2 Análisis de días grado

El periodo analizado para los días grado es más corto (1979-2015), por lo que el análisis se limita a los eventos de 1983, 2012, 2013 y 2015, pero estos tres últimos, se muestran fuera del cono de confianza del análisis Cross wavelet (Figura 8; A, B, C). Sin embargo, las zonas que participaron del evento de 1983 (Centro y Sur), presentaron una correlación significativa entre el número de árboles defoliados y los días grados en este año. Encontrando un aumento de días grado en los meses de octubre a marzo de 1983-1984, por lo que el aumento de la temperatura media diaria en los meses más cálidos, inciden en el ataque masivo. De la misma manera, el análisis SEA (Figura 8; D, E, F), identifica la desviación de la media de los valores de los días grado, analizando dos años antes de los eventos de defoliación masiva (los eventos masivos se ubican en el valor cero de las abscisas). El resultado indica para el periodo analizado una desviación positiva relevante entre el aumento de la temperatura media diaria en los meses de octubre a marzo en los años de defoliación masiva. Esta situación ocurre en las tres zonas, con desviaciones anormales de 1,19, 1,04 y 0,95 para la zona norte, centro y sur, respectivamente. Esto significa que existieron aumentos de temperatura en los mismos periodos de defoliación.

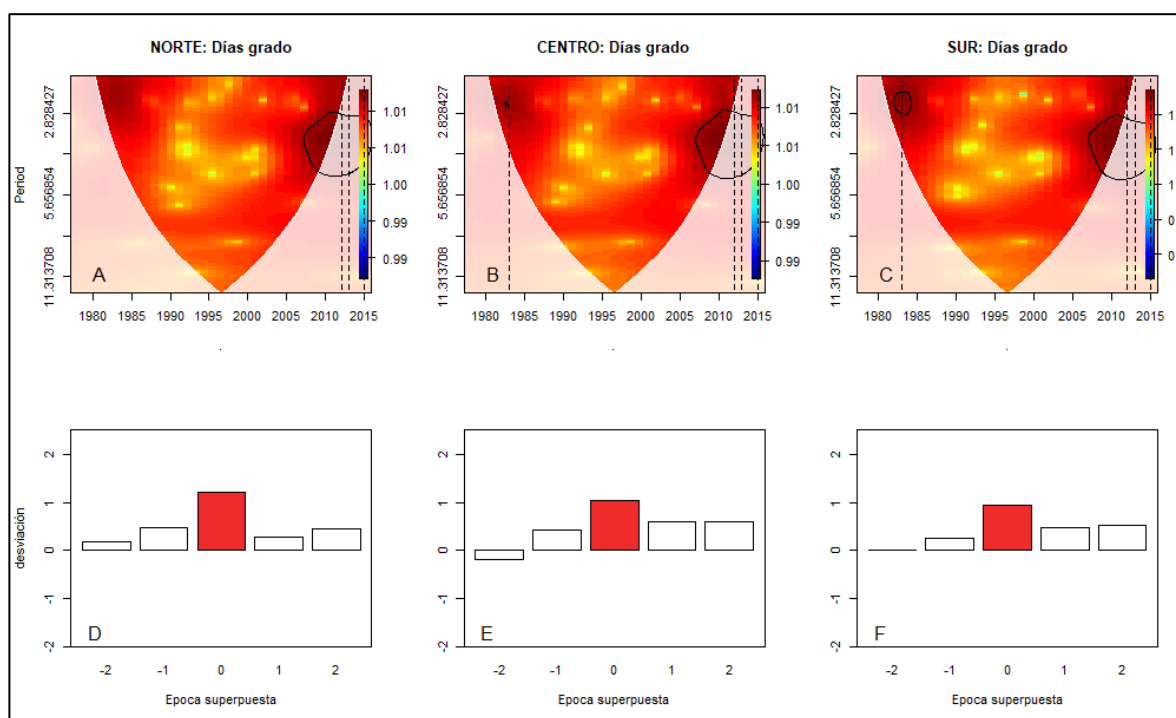


Figura 8. A, B y C muestran gráficos de potencia Cross-wavelet entre cantidad de árboles defoliados y días grado por zona, para un periodo de 1979 a 2015. Las líneas verticales punteadas indican los años de defoliación masiva que han afectado cada zona. Donde: Norte (2015, 2013, 2012), Centro y Sur (2015, 2013, 2012, 1983). Las líneas negras encierran la señal significativa con un 0,95 de umbral de confianza. Los colores indican la potencia de la señal en función de la escala a la derecha del gráfico. El cono de influencia indica donde es confiable el análisis. D, E, F muestran análisis SEA de desviaciones estadísticamente

significativas de días grado para los eventos de defoliación en un periodo de dos años, donde 0 representa el año de defoliación y -1 es el año anterior. Las barras indican los valores medios de desviación, donde los colores rojos son significativas (P - value < 0,05).

El análisis climático muestra que los eventos de sequía relevantes, y temperaturas medias diarias sobre los 12°C en los meses más cálidos, están influyendo sobre la ocurrencia de brotes masivos. Esto se traduce en un feedback positivo entre las variables climáticas analizadas y los eventos de defoliación. Estos resultados coinciden con la literatura (Paritsis & Veblen, 2011; Gutiérrez *et al.*, 2020), y se sabe que el aumento de la sequía y las altas temperaturas están fuertemente relacionadas con el cambio climático (Garreaud, 2018), sin embargo, el efecto que tiene el aumento de la sequía en los brotes de insectos, no se ha determinado con exactitud.

En el caso del efecto que tienen mayores temperaturas sobre la ocurrencia de brotes masivos, se explica debido a que las larvas de *O. amphimone* que se alimentan de *N. pumilio*, emergen y se alimentan en los meses más cálidos. Donde las altas temperaturas se acercan a la temperatura óptima de desarrollo de los insectos ectotermos en zonas templadas, acelerando la tasa metabólica y los ciclos de estados larvales, lo que se traduce en un aumento de poblaciones y consumos (Paritsis & Veblen, 2011; Garibaldi & Paritsis, 2012).

3.4 Relación de eventos de defoliación con variables de sitio y estructurales

El análisis de correlaciones (Cuadro 2), indica que las pendientes obtuvieron una correlación positiva significativa con un coeficiente entre 0,38 y 0,53, con la cantidad de árboles defoliados en los eventos de 2015, 2012 y 1967. Esto sugiere que un mayor número de árboles defoliados ocurrió en estos años, en las parcelas con mayor pendiente. Esto puede ocurrir debido a que la pendiente puede influir entre la conectividad de las copas de los árboles, obteniéndose estructuras de dosel que podrían estar permitiendo una mejor movilidad entre árboles para el insecto defoliador. Otra explicación, podría ser que en las pendientes existe un mayor escurrimiento superficial del recurso hídrico y pérdida de biomasa, que influyen sobre el microclima del bosque (Geiger *et al.*, 2003), lo que podría indicar niveles de humedad y/o temperatura, que interfieren en los ciclos de desarrollo de *O. amphimone*. También, existe una diferencia entre pendientes con distintas exposiciones, lo cual también se debe considerar, ya que la exposición a la luz solar constante tiene una repercusión en el bosque, que podría tener efectos sobre la defoliación.

Cuadro 2. Correlación entre la cantidad de árboles defoliados en los años de defoliación masiva con las variables estudiadas. (*P - value < 0,05 y **P - value < 0,01). Los años representan el número de árboles defoliados en cada evento distribuido por parcela. La cantidad de eventos masivos indica cuantos eventos masivos se identificaron por parcela.

Variables	2015	2013	2012	1983	1967	1963	1880	Cantidad de eventos
Pendiente	0,53**	-0,14	0,38*	0,03	0,40*	-0,11	-0,16	0,16
Área Basal	-0,20	0,45**	0,13	0,39*	-0,03	0,49**	0,28	0,18
Diámetros promedios	-0,49**	-0,18	-0,47**	-0,15	-0,13	-0,10	-0,04	-0,16
Densidad de árboles	0,52**	0,26	0,51**	0,11	0,15	0,10	0,04	0,13
Elevación	0,07	-0,29	-0,25	-0,35	0,37*	-0,29	-0,24	-0,36*
Índice de sequía	-0,41*	0,28	-0,13	0,19	-0,32	0,25	0,13	0,10
Días grado	0,32	0,04	0,35	0,31	0,62**	0,00	0,24	0,34

El área basal puede significar mayores densidades de árboles o árboles más grandes (Mateucci *et al.*, 1982). Esta variable obtuvo una correlación positiva y significativa con el número de árboles defoliados entre parcelas para los eventos de 2013, 1983 y 1963, con un coeficiente entre 0,39 y 0,49. Esto indica que una mayor cantidad de árboles defoliados ocurrió en parcelas con mayor área basal. También, el diámetro promedio obtuvo correlaciones significativas y negativas con los eventos de 2015 y 2012. Esto quiere decir que las parcelas con diámetros más pequeños resultaron con un mayor número de árboles afectados. Además, la densidad de árboles obtuvo correlaciones positivas y significativas con los mismos eventos 2015 y 2012, con 0,52 y 0,51 respectivamente. Por lo que, las parcelas con mayores densidades, mayor área basal y diámetros más pequeños resultaron con más árboles defoliados. Estas características describen a bosques con árboles más juntos, que se traduce en diámetros más pequeños debido a la competencia generada. Es posible que la cercanía entre las copas de los árboles permita una mejor movilidad para el insecto defoliador. Así mismo, la estructura del bosque produce un microclima que puede estar favoreciendo al desarrollo de *O. amphimone*. Por otro lado, la elevación correlacionó significativamente con el número de eventos, con un coeficiente de -0,36, lo que indica que parcelas con menores elevaciones, resultaron con una mayor cantidad de árboles defoliados. Esto último es explicado por Guerrero (2021), indicando que temperaturas más bajas de las zonas más elevadas, afectan los estados de desarrollo del *O. amphimone*, produciendo menos brotes.

En el caso de las variables climáticas, estas obtuvieron correlaciones importantes solo con uno de los eventos, lo cual puede ocurrir debido a que los datos utilizados para este análisis no son las series climáticas, si no que corresponden a los promedios, por lo tanto son un único

dato por parcela. Además, los datos utilizados en el índice de sequía tienen una resolución muy amplia (datos de tres píxeles para las tres zonas), por lo que las parcelas comparten este dato por zona, lo que produce una limitación en el análisis. Sin embargo, esta variable correlacionó significativamente con el evento del año 2015, con un coeficiente de -0,45, donde el Índice de Severidad de Sequía de Palmer auto-calibrado (scPDSI), a medida que es más negativo representa una mayor sequía. Por lo tanto, este resultado indica que las parcelas con mayor sequía, presentaron un mayor número de árboles defoliados en el evento 2015, coincidiendo con los resultados del análisis Cross-wavelet y SEA (Figura 7). Finalmente, los días grado correlacionaron significativamente con el evento del año 1967, con un coeficiente de 0,62. La interpretación señala que parcelas con mayor cantidad de días con una temperatura media diaria sobre los 12°C, resultan con un mayor número de árboles defoliados, coincidiendo con el análisis Cross-wavelet y SEA (Figura 8).

Las correlaciones no fueron uniformes entre los eventos, esto puede ocurrir debido a que los datos de las variables estructurales fueron tomados en la actualidad (2017, 2018, 2019 y 2020), por lo que el estado cambiante del bosque no se está considerando. Esto puede explicar la falta de correlación significativa en el año 1880. Sin embargo, los eventos masivos que mejor correlacionan con las variables resultaron ser los que afectaron la mayor cantidad de árboles (2015 y 2012), además de ser años cercanos a la toma de datos.

3.4.1 Análisis de componentes principales (PCA).

Con respecto al análisis PCA (Figura 9), se realizó utilizando todas las variables de sitio, excluyendo el índice de sequía, debido a la resolución de los datos. El análisis PCA revela que los primeros dos componentes principales explican una proporción importante de la varianza total en los datos. El primer componente principal explica un 34% de la varianza, mientras que el segundo componente principal agrega un 20,7%, lo que da un total de 54,7% de varianza explicada. Las variables más influyentes en el primer componente principal son “N eventos”, que indica la cantidad de eventos masivos ocurridos por parcela, con un coeficiente de carga de 0,40, seguido por la cantidad de árboles defoliados en el año 2012, 1983, 2013, 1880 con coeficientes de 0,39, 0,37, 0,32 y 0,29 respectivamente. En el caso del segundo componente principal, las variables más influyentes son la cantidad de árboles defoliados en 2015, 1963, 1967, las pendientes y la densidad de árboles, con coeficientes de carga de 0,40, 0,31, 0,30, 0,38, y 0,27. Por lo que, los resultados sugieren que la combinación de árboles defoliados, las pendientes y la densidad de árboles, están capturando la mayor parte de la estructura subyacente en los datos. Además de lo anterior, se observa que los eventos de defoliación tienen una tendencia hacia la izquierda, donde se observan dos agrupaciones. Primero, en el área negativa están los eventos 2015, 2012 y 1967, encontrándose principalmente parcelas de la zona centro. En dirección contraria aumentan los diámetros y en la misma dirección, aumenta la densidad de árboles, los días grado y pendientes. Por lo que estos eventos explican en mayor medida el comportamiento de estas variables. Después, la segunda agrupación en el área negativa se encuentran los eventos de 2013, 1983, 1963 y 1880, junto al área basal y en dirección contraria a la elevación, lo que sugiere que estos eventos explican en mayor medida la disminución de defoliación con el

aumento de la elevación (Guerrero, 2021). En este caso, las parcelas que están presentes en esta área son en su mayoría de la zona sur. Esto indica que los eventos masivos de 2015, 2012 y 1967, podrían estar mayormente influenciados de manera positiva por las variables densidad de árboles, días grado, pendiente y negativamente por diámetros. Por otro lado, los eventos de 2013, 1983, 1963 y 1880, estarían siendo más condicionados positivamente por las variables área basal y elevación. En el caso de las parcelas de la zona norte, estas no destacan como un grupo separado, si no que se mantienen en conjunto a las parcelas que presentan la menor cantidad de árboles defoliados.

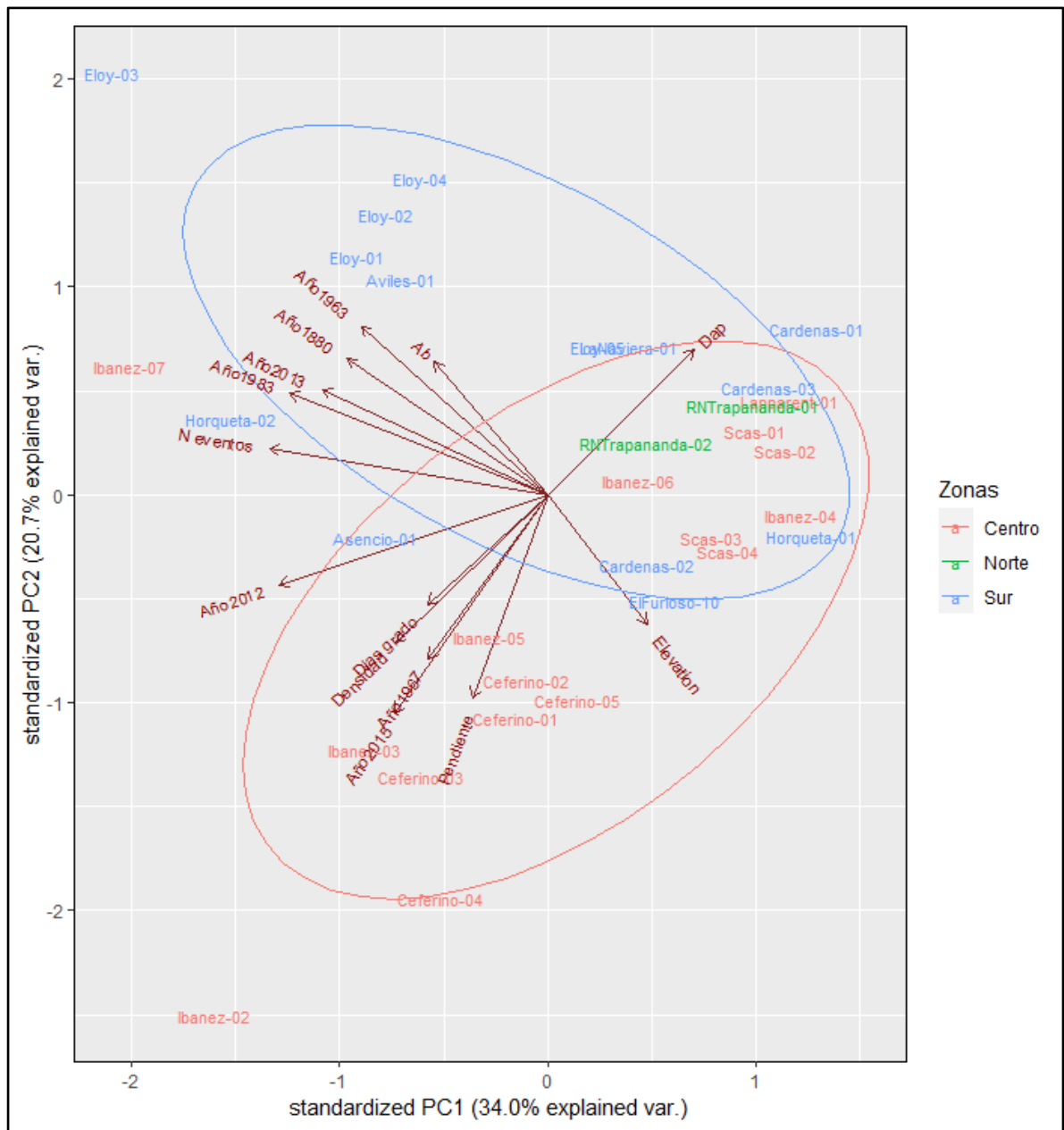


Figura 9. Análisis PCA para las variables en estudio (flechas de carga, color rojo oscuro), y su relación con las parcelas (puntos). Entre las variables se encuentran los eventos de

defoliación (Año 2015, 2013, 2012, 1983, 1967, 1963, 1880), que corresponden a la cantidad de árboles defoliados por evento en cada parcela. En color verde se destacan las parcelas de la zona norte, en color rojo claro las parcelas de la zona centro y en color azul las parcelas de la zona sur. Los nombres de las parcelas representan la ubicación de estas respecto a las variables estudiadas.

3.4.2 Modelo de regresión negativa binomial

El valor Intercept del modelo de regresión negativa binomial (Cuadro 3) corresponde al valor estimado de la variable respuesta cuando todas las variables independientes son cero (Alcaide, 2015). En este caso, el valor es altamente significativo, esto quiere decir que el porcentaje de defoliación es estadísticamente significativo, incluso en la ausencia de las variables explicativas, lo que puede deberse a factores que no han sido incluidos en el modelo. Por lo tanto, la significancia del intercepto sugiere que existe un nivel de defoliación que no puede explicarse por las variables incluidas en el modelo. A pesar de lo anterior, las variables Elevación y Días grado, resultaron ser las más significativas, lo que indica que ambas variables tienen un efecto muy altamente significativo sobre el porcentaje de defoliación. En el caso de la Densidad, resultó ser significativo, por lo que también tiene un efecto significativo sobre el porcentaje de defoliación. Finalmente, las variables Pendiente y Diámetros promedios, resultaron ser casi significativas, lo que indica que no tienen un efecto estadísticamente significativo con un nivel de confianza del 95%. De los resultados es posible inferir que el aumento de la temperatura tanto en el macroclima como en el microclima estaría siendo la variable con mayor influencia, afectando de manera positiva el desarrollo del insecto y su consumo. Donde sectores que presentan menores elevaciones presentan mayores temperaturas, y posiblemente la densidad de árboles del bosque también este aumentando la temperatura del microclima.

Cuadro 3. Significancias para los coeficientes del modelo de regresión negativa binomial, utilizando como variable respuesta el porcentaje de árboles defoliados por parcela. Las variables independientes corresponden a la pendiente, elevación, densidad, días grado y área basal. Códigos: “***” Muy altamente significativo ($P \text{ value} < 0,001$), “**” Altamente significativo ($0,001 < P \text{ value} < 0,01$), “*” Significativo ($0,01 < P \text{ value} < 0,05$), “.” Casi significativo ($0,05 < P \text{ value} < 0,1$) y “ ” No significativo.

Variables	Estimate	Std. Error	z value	Pr(> z)	Código
(Intercept)	39,268540	11,994072	3,274	0,00106	**
Pendiente	0,0166046	0,0093642	1,773	0,07620	.
Elevación	-0,0053460	0,0008924	-5,991	2,09e-09	***
Densidad	0,0011069	0,0005633	1,965	0,04942	*
Días grado	0,0406146	0,0079451	5,112	3,19e-07	***
Diámetros promedio	42,846948	24,424726	1,754	0,07939	.

4. CONCLUSIONES

Se encontraron siete eventos de defoliación masiva causada por *O. amphimone* en los bosques de *N. pumilio* en la región a lo largo del periodo 1860-2015. De los cuales, el evento más antiguo registrado ocurre en 1880, con una ventana de aproximadamente 70 años con el siguiente evento 1963. No obstante, a partir de este año, la frecuencia de defoliaciones experimenta un notable aumento, produciéndose cinco eventos de defoliación masivos en tan solo medio siglo.

El incremento constante de las temperaturas y los eventos importantes de sequía están impactando de manera significativa sobre la dinámica entre bosques de *N. pumilio* y *O. amphimone*, lo que se traduce en defoliaciones cada vez más extensas y frecuentes, destacando la sensibilidad del ecosistema a las condiciones climáticas cambiantes. Adicionalmente, se observa que la estructura del bosque desempeña un papel importante en la incidencia de ataques masivos. La presencia de un microclima influenciado por la densidad de árboles facilita el desarrollo de brotes masivos, donde densidades más altas favorecen dichos eventos. Finalmente, la elevación también demostró ser una variable importante, explicada de igual forma por la temperatura.

La compleja relación entre el bosque de *N. pumilio* y el insecto defoliador *O. amphimone* se ve fuertemente afectada por la variabilidad climática, sin embargo la estructura del bosque puede predisponer una defoliación masiva, generando variaciones en la dinámica natural del insecto, que se traduce en cambios en la estructura forestal y procesos ecosistémicos. Esta realidad plantea una preocupación importante por la biodiversidad y los servicios ecosistémicos, subrayando la importancia de abordar estos desafíos con distintos enfoques integrales, buscando identificar estrategias de control efectivas, para prevenir y mitigar los impactos negativos en los bosques.

5. BIBLIOGRAFÍA

ADDISON, P. (2002). The Illustrated Wavelet Transform Handbook: Introductory Theory and Applications in Science Engineering, Medicine, and Finance. Bristol: Institute of Physics Publishing.

ALCAIDE, M. (2015). Modelo de regresión binominal negativa. 63p.

ALEIXO, I., NORRIS, D., HEMERIK, L., BARBOSA, A., PRATA, E., COSTA, F. & POORTER, L. (2019). Amazonian rainforest tree mortality driven by climate and functional traits. *Nature Climate Change*, 9(5): 384-388.

ANGULO, A. O., LEMAIRE, C., & OLIVARES, T. S. (2004). Catálogo crítico e ilustrado de las especies de la familia *Saturniidae* en Chile (Lepidoptera: Saturniidae). *Gayana (Concepción)*, 68(1): 20-42.

AYRES, P. & LOMBARDERO, J. (2000). "Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens." *Science of the Total Environment* 262(3): 263-286.

BAUERLE, P., RUTHERFORD, P. & LANFRANCO, D. (1997). Defoliadores de roble (*Nothofagus obliqua*), raulí (*N. alpina*), coigüe (*N. dombeyi*) y lenga (*N. pumilio*). *BOSQUE*, 18(2): 97–107.

BUNN, A., KORPELA, M., BIONDI, F., CAMPELO, F., MÉRIAN, P., QEADAN, F. & ZANG, C. (2019). dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.0.

BUNN, A., KORPELA, M., BIONDI, F., CAMPELO, F., MÉRIAN, P., QEADAN, F. & ZANG, C. (2021). dplR: Dendrochronology Program Library in R. R package version 1.7.2. Recuperado de <https://CRAN.R-project.org/package=dplR>.

CARRILLO, R. & CERDA, L. (1987). Zoofitofagos en *Nothofagus* chilenos. *Bosque* 8(2):99–103.

CHÁVEZ, R., ROCCO, R., GUTIÉRREZ, Á., DÖRNER, M. & ESTAY, S. (2019). A Self-Calibrated Non-Parametric Time Series Analysis Approach for Assessing Insect Defoliation of Broad-Leaved Deciduous *Nothofagus pumilio* Forests. *Remote Sensing*. 11(2): 204.

COOK, E. & KAIRIUKSTIS, L. (1990). Methods of Dendrochronology: Applications in the Environmental Sciences. Springer. 394p.

COOK E.R., PETERS K., (1981). The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. Tree-Ring Bull. Pp. 45-53.

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). & UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE (UACH). (2012). Monitoreo de Cambios, Corrección Cartográfica y Actualización del Catastro de Bosque Nativo en la XI Región de Aysén. Valdivia, Chile. <https://sit.conaf.cl/>

ELLIS, T. & FLOWER, A. (2017). A multicentury dendrochronological reconstruction of western spruce budworm outbreaks in the Okanogan Highlands, northeastern Washington. Canadian Journal of Forest Research, 47(9): 1266-1277.

ESTAY, S., CHÁVEZ, R., LASTRA, J., ROCCO, R., GUTIÉRREZ, Á., & DECUYPER, M. (2023). MODIS Time Series Reveal New Maximum Records of Defoliated Area by *Ormiscodes amphimone* in Deciduous *Nothofagus* Forests, Southern Chile. Remote Sens. 15(14): 3538.

ESTAY, S., CHÁVEZ, R., ROCCO, R. & GUTIÉRREZ, Á. (2019). Quantifying massive outbreaks of the defoliator moth *Ormiscodes amphimone* in deciduous *Nothofagus*-dominated southern forests using remote sensing time series analysis. Journal of Applied Entomology, 143(7): 787-796.

FLOWER, A., GAVIN, D., HEYERDAHL, E., PARSONS, R. & COHN, G. (2014). Drought-triggered western spruce budworm outbreaks in the interior Pacific Northwest: a multi-century dendrochronological record. Forest Ecology and Management, (324): 16-27.

FRITTS, H. (1976). Tree Rings and Climate. London, Academic Press: 567p.

GARIBALDI, A. & PARITSIS, J. (2012). Cambio climático e insectos herbívoros. 23(10):45- 53.

GÄRTNER, H. & NIEVERGELT, D. (2010). The core-microtome: a new tool for surface preparation on cores and time series analysis of varying cell parameters. Dendrochronologia, 28(2):85-92

GUERRERO, I. (2021). Efecto de las defoliaciones de *Ormiscodes amphimone* en las tendencias de crecimiento radial de *Nothofagus pumilio* a través de un gradiente altitudinal en el valle del río furioso. Memoria de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Santiago. Universidad de Chile, Facultad ciencias agronómicas. 52p.

GUITERMAN, C., LYNCH, A. & AXELSON, J. (2020). dfoiatR: An R package for detection and analysis of insect defoliation signals in tree rings. *Dendrochronologia*, 63:125-750.

GUTIÉRREZ, Á., CHAVEZ, R., DOMÍNGUEZ, J., GIBSON, S., GUERRERO, I., ROCCO, R., URRRA, V. & ESTAY, S. (2020). *Ormiscodes amphimone* outbreaks frequency increased since 2000 in a subantarctic *Nothofagus pumilio* forests of 42 hilean Patagonia. En: ESTAY (2020) Forest Pest and Disease Management in Latin America Springer. pp. 61-75.

GIBSON, S. (2020). Análisis de las tendencias de crecimiento de *Nothofagus pumilio* y su relación con el cambio climático del último siglo en la región de Aysén. Memoria de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables. Santiago. Universidad de Chile, Facultad ciencias agronómicas. 55p.

GIBSON, S., VENEGAS, A., URRRA, V. D., ESTAY, S. A. & GUTIÉRREZ, Á. G. (2022). Recent increase in autumn temperature has stabilized tree growth in forests near the tree lines in Chilean Patagonia. *Ecosphere*, 13(10): 42-66.

GONZÁLEZ, M. E., AMOROSO, M., LARA, A., VEBLEN, T. T., DONOSO, C., KITZBERGER, T., MUNDO, I., HOLZ, A., CASTELLER, A., PARITSIS, J., MUÑOZ, A., SÚAREZ, M.L. & PROMIS, A. (2014). Ecología de Disturbios y su Influencia en los Bosques Templados de Chile y Argentina. In *Disturbios y Dinámica de Bosques* (pp. 409±470).

GOUHIER, T., GRINSTED, A., SIMKO, V., GOUHIER, M., & RCPP, L. (2013). Package 'biwavelet'. *Spectrum*, 24:2093-2102.

GRISSINO, H. 2003. A manual and tutorial for the proper use of an increment borer. *Tree-ring research*, 59(2): 63-79.

HENRY, J. & SWAN, J. (1974). Reconstructing Forest History from Live and Dead Plant Material--An Approach to the Study of Forest Succession in Southwest New Hampshire. *Ecology*, 55(4): 772-783.

HERNÁNDEZ, B. (2002). El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y los frentes fríos que arriban a la región occidental cubana. *Investigaciones Marinas*, 30(2): 3-19. ISSN: 0716-1069.

HOLMES, R. L., ADAMS, R. K., Y FRITTS, H. C. (1986). Tree-ring chronologies of western North America: California, eastern Oregon and northern Great Basin with procedures used in the chronology development work including users manuals for computer programs COFECHA and ARSTAN. Tucson, Arizona: Laboratory of Tree-Ring Research. 182 p.

INSTITUTO FORESTAL (INFOR). (2011). Diagnóstico regional y propuestas de desarrollo que permitan recuperar suelos a través de la forestación y desarrollo de la silvicultura: Subsector bosque nativo. INFOR-CORFO. Coyhaique, Chile. 23 p.

INSTITUTO FORESTAL (INFOR). (2014). Producción de árboles nativos con fines de recuperación de bosques y áreas degradadas en la región de Aysén. Propagación sexual y asexual de ñire, *Nothofagus antartica* (forster) Oerst. INFOR- MINAGRI. Coyhaique. Chile. 53 p.

LARA, A., AMOROSO, M., DONOSCO, C., GONZÁLEZ, M. E., VARGAS, G. R., SMITH-RAMÍREZ, C., ARELLANO, & GUTIÉRREZ, A. G. (2014). Sucesión y Dinámica de Bosques Templados en Chile. In *Ecología Forestal: Bases para un manejo sustentable de los Bosques Nativos*. pp. 323-410.

LANDRES, PB, MORGAN, P. & SWANSON, FJ (1999). Visión general del uso de conceptos de variabilidad natural en la gestión de sistemas ecológicos. *Aplicaciones ecológicas*, 9(4):1179-1188.

NELDER, A. & WEDDERBURN, R. (1972). Generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society: Series A (General)*, 135(3): 370-384.

MATEUCCI, D., & Colma, A. (1982). Metodología para el estudio de la vegetación. *Monografía*, (22), 168.

MATTSON, J., & HAACK, R. A. (1987). The role of drought in outbreaks of plant-eating insects. *Bioscience*, 37(2):110-118.

MORALES, M. S., COOK, E. R., BARICHIVICH, J., CHRISTIE, D. A., VILLALBA, R., LEQUESNE, C. & BONINSEGNA, J. A. (2020). Six hundred years of South American tree rings reveal an increase in severe hydroclimatic events since mid-20th century. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(29): 16816-16823.

PARITSIS, J. (2021). Insectos de importancia económica y sanitaria: La cuncuna espinuda, una oruga defoliadora en los bosques de Patagonia. *Presencia*, 75: 45-48.

PARITSIS, J. (2020). Ormiskodes Outbreak Dynamics: Impacts and Perspectives in a Warming World. In *Forest Pest and Disease Management in Latin America*. pp. 77-88.

PARITSIS, J. (2009). Insect defoliator outbreaks and environmental heterogeneity in *Nothofagus* forests in the Patagonian Andes. Tesis doctoral, Universidad Nacional del Comahue. 71(01).

PARITSIS, J., LANDESMANN, J., KITZBERGER, T., TIRIBELLI, F., SASAL, Y., QUINTERO, C., DIMARCO, R., BARRIOS-GARCÍA, M., IGLESIAS, A., DIEZ, J., SARASOLA, M., & NUÑEZ, M. A. (2018). Pine plantations and invasion alter fuel structure and potential fire behavior in a Patagonian forest-steppe ecotone. *Forests*, 9(3): 117.

PARITSIS, J. & VEBLEN, T. T. (2011). Dendroecological analysis of defoliator outbreaks on *Nothofagus pumilio* and their relation to climate variability in the Patagonian Andes. *Global Change Biology*, 17(1), 239-253.

PARITSIS, J., VEBLEN, T., & KITZBERGER, T. (2009). Assessing dendroecological methods to reconstruct defoliator outbreaks on *Nothofagus pumilio* in northwestern Patagonia, Argentina. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(9): 1617-1629.

PEARSON, K. (1895). Correlation coefficient. In *Royal Society Proceedings*, 58(214).

PIPER F., GUNDALE, M. & FAJARDO, A. (2015). Extreme defoliation reduces tree growth but not C and N storage in a winter-deciduous species. *Annals of botany*, 115:1093-1103

PROMIS, A., CALDENTEY, J. & IBARRA, M. (2010). Microclima en el interior de un bosque de *Nothofagus pumilio* y el efecto de una corta de regeneración. *Bosque (Valdivia)*, 31(2): 129-139.

PURESWARAN, D., ROQUES, A. & BATTISTI, A. (2018) Forest insects and climate change. *Curr For Rep*, 4(2):35-50.

R CORE TEAM. (2018.) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.Rproject.org/>.

RSTUDIO TEAM. (2018). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, Inc., Boston, MA URL <http://www.rstudio.com/>.

RAFFA, K., AUKEMA, B., BENTZ, B., CARROLL, A., HICKE, J., TURNER, M. & ROMME, W. (2008). Impulsores de escala cruzada de perturbaciones naturales propensas a la amplificación antropogénica: la dinámica de las erupciones de escarabajos de corteza. *Biociencia*, 58(6): 501– 517. doi:10.1641/B580607.

RICHMAN, M. (1986). Rotation of Principal Components: A review. *J. Climatol.* 6, pp. 293–336.

ROIG, F. A., & ZEVALLOS-POLLITO, P. A. (2009). Dendrocronología y dendroecología tropical: Marco histórico y experiencias exitosas en los países de América Latina. *Ecología en Bolivia*, 44(2): 73-82.

ROY, I., RIVAS R., PÉREZ, M., & PALACIOS, L., (2019). Correlación: no toda correlación implica causalidad. *Revista alergia México*, 66(3):354-360. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>

RHOADES, F. (1983). Herbivore population dynamics and plant chemistry. In *Variable plants and herbivores in natural and managed systems*. New York: Academic Press, 6:155-220.

SERRA, M., QUINTERO, C., RODRÍGUEZ, M., MARTÍNEZ, A. & PARITSIS, J. (2022). Temperature and host plant species affect the performance and immunocompetence of an outbreak defoliator in northwestern Patagonia. *Ecological Entomology*. 47(4): 580-589.

SOLIANI, C. & APARICIO, A. (2020). Evidencia de Determinación Genética en el Hábito de Crecimiento de *Nothofagus pumilio*. (Poepp. & Endl.) Krasser en los extremos de un gradiente de elevación ". *Scandinavian Journal of Forest Research* 35: 211-20.

SUÁREZ, ML., GHERMANDI, L. & KITZBERGER, T. (2004). Factores pre-eliminación de la mortalidad episódica de los árboles inducida por la sequía en *Nothofagus* — sensibilidad climática y tendencias de crecimiento. J. Ecol. 92(6): 954–966. doi:10.1111/j.1365-2745.2004.00941.

SCHULMAN, E. (1956). Dendroclimatic changes in semiarid America. University of Arizona Press. 142p.

STOKES, M. & SMILEY, T. (1968). An introduction to tree-ring dating. Chicago: University of Chicago Press. 73p.

SPEER J., SWETNAM, T., WICKMAN, B. & YOUNGBLOOD, A. (2001) Changes in pandora moth outbreak dynamics during the past 622 years. Ecology 82:679±697. [https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0679: CIPMOD\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0679: CIPMOD]2.0.CO;2)

SWETNAM, T., THOMPSON, M. & SUTHERLAND, E. (1985). Using endrochronology to measure radial growth of defoliated trees. US Department of Agriculture, Forest Service, Cooperative State Research Service. 39p

TORO MANRÍQUEZ, M., MESTRE, L., LENCINAS, M. V., PROMIS, Á., MARTÍNEZ PASTUR, G., & SOLER, R. (2016). Flowering and seeding patterns in pure and mixed *Nothofagus* forests in Southern Patagonia. Ecological Processes, 5:1-12. doi.org/10.1186/s13717-016-0065-1

TORRENCE, C. & COMPO, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. Bulletin of the American Meteorological society, 79(1): 61-78.

TRUMBORE, S., BRANDO, P. & HARTMANN, H. (2015). Salud forestal y cambio global. Ciencia, 349 (6250): 814-818.

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS (ONU). 2011. International Year of Forests (2011).

OLIVARES, V., MATTAR, C., GUTIÉRREZ, A. & JIMÉNEZ, J. (2019). Tendencias del calentamiento climático en el bosque subantártico patagónico. Revista Internacional de Observación Aplicada de la Tierra y Geoinformación. 76:51-65.

URIBE, C. (1981). Microclima del bosque. Actualidades Biológicas, 10(36): 61-66.

URRA, V. (2021). Mortalidad de *Nothofagus pumilio* inducida por brotes masivos de *Ormiscodes amphimone* en el Valle del Río Furioso (Región de Aysén, Chile). Proyecto de grado para optar al grado de Magíster en Áreas Silvestres y Conservación de la Naturaleza. Santiago, Universidad de Chile. Facultad de Ingeniería Forestal y Conservación de la Naturaleza. 55p

VEBLEN, T., DONOSO, C., KITZBERGER, T. & REBERTUS, AJ. (1996). Ecology of Southern Chilean and Argentinean *Nothofagus* forests. In: Veblen TT, RS Hill & J Read (eds) The ecology and biogeography of *Nothofagus* forests: 293-353. Yale University Press, New Haven, USA.

WHITE, C. (1969) An index to measure weather induced stress of trees associated with outbreaks of Psyllidae in Australia. Ecology 50: 905 - 909.

APENDICE

I. Lista de parcelas

Cuadro I. Ubicación, número de árboles, altitud, pendiente y grado de anomalía satelital por parcela. Donde, tipo anomalía: I (sin brotes de defoliación), II (1 o 2 brotes) y III (tres o más brotes).

Zona	Parcela	Coordenadas Geográficas	N° Árboles	Altitud (msnm)	Pendiente (°)	Tipo anomalía
Norte	Trapananda-1	-71,800, -45,367	24	1040	8	I
	Trapananda-2	-71,802, -45,365	25	1057	30	I
Centro	Ceferino-01	-71,920, -46,235	23	835	18,7	II
	Ceferino-02	-71,921, -46,237	22	790	11	I
	Ceferino-03	-71,913, -46,231	30	905	26,5	I
	Ceferino-04	-71,918, -46,233	31	910	39	II
	Ceferino-05	-71,918, -46,238	22	740	33,5	I
	Ceferino-06	-71,911, -46,232	29	840	Sin información	I
	Ibanez-02	-72,033, -46,281	35	1048	38	III
	Ibanez-03	-72,033, -46,289	30	1036	29	III
	Ibanez-04	-72,036, -46,278	9	1109	7,4	II
	Ibanez-05	-72,028, -46,282	14	970	19,7	III
	Ibanez-06	-72,012, -46,295	16	844	7,3	II
	Ibanez-07	-72,026, -46,286	29	950	8,8	II
	Lapparent-01	-72,120, -46,256	17	1134	3,5	I
	Lapparent-02	-72,124, -46,255	27	1114	22,7	I
	Scas-01	-72,043, -45,985	28	880	7,1	I
	Scas-02	-72,023, -45,985	21	860	2,1	I
	Scas-03	-71,989, -45,978	20	872	20	I
	Scas-04	-71,984, -45,981	18	872	3,8	I
	Asencio-01	-72,510, -46,809	18	718	33	II

Sur	Avilés-01	-72,475, -46,864	13	730	8	II
	Bernabé-01	-72,470, -46,858	11	653	Sin información	II
	Cardenas-01	-72,459, -46,910	8	910	0	I
	Cardenas-02	-72,443, -46,918	13	870	10	I
	Cardenas-03	-72,441, -46,919	12	880	25	I
	ElFurioso-10	-72,475, -46,902	27	907	30	I
	Eloy-01	-72,469, -46,862	17	702	17,4	III
	Eloy-02	-72,468, -46,862	21	716	5,5	III
	Eloy-03	-72,467, -46,862	34	710	12,2	III
	Eloy-04	-72,466, -46,858	15	686	9	II
	Eloy-05	-72,467, -46,864	10	710	11	II
	Horqueta-01	-72,424, -46,850	20	1113	19	I
	Horqueta-02	-72,422, -46,838	30	872	2,5	II
	La Naviera	-72,480, -46,829	16	614	9,7	II
	Rio Viviana	-72,421, -46,799	6	627	20	II