



UNIVERSIDAD DE CHILE

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO**

MEMORIA DE TÍTULO

**ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE BIOMASA AÉREA PARA EL
BOSQUE NATIVO ENTRE LAS REGIONES DEL MAULE Y LOS LAGOS**

MAGDALENA ANDREA CORONA HURTADO

Santiago, Chile

2025



UNIVERSIDAD DE CHILE

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO**

MEMORIA DE TÍTULO

**ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE BIOMASA AÉREA PARA EL
BOSQUE NATIVO ENTRE LAS REGIONES DEL MAULE Y LOS LAGOS**

**ANALYSIS OF THE SPATIAL DISTRIBUTION OF ABOVEGROUND BIOMASS
FOR THE NATIVE FORESTS BETWEEN THE MAULE AND LOS LAGOS
REGIONS**

MAGDALENA ANDREA CORONA HURTADO

Santiago, Chile

2025



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE BIOMASA AÉREA
PARA EL BOSQUE NATIVO ENTRE LAS REGIONES DEL MAULE Y
LOS LAGOS**

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

MAGDALENA ANDREA CORONA HURTADO

Profesores guía		Calificaciones
Sr. Álvaro Gutiérrez I. Ingeniero Forestal, Dr. Rer. Nat.		7,0
Sr. Mauricio Galleguillos T. Ingeniero Agrónomo, M.S. Dr.		7,0
Profesores evaluadores		
Sr. Christian Salas E. Ingeniero Forestal, Ph. D.		6,2
Sra. M. Verónica Díaz M. Ingeniera Agrónoma, Mg. Sc.		6,8

Santiago, Chile
2025

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
INTRODUCCIÓN	3
Objetivo General	4
Objetivos Específicos.....	4
MATERIALES Y MÉTODOS.....	5
Área de estudio.....	5
Catastro de los Recursos Vegetacionales y Usos de la Tierra	6
Inventarios forestales	7
Datos no publicados	7
Inventario Forestal Nacional	7
Productos grillados.....	8
Colección global de biomasa aérea forestal v 6.0, iniciativa de Biomasa y Cambio Climático, Agencia Espacial Europea.....	8
Investigación de Dinámica de Ecosistemas Globales: Densidad de biomasa aérea L4B v 2.1.....	9
Modelo de dinámica vegetacional ForClim v 4.0.1	10
Identificación de estimaciones de biomasa aérea provenientes de la literatura y repositorios científicos	11
Descripción de los patrones de distribución espacial de biomasa aérea de las fuentes identificadas	12
Creación de base de datos	12
Identificación de categorías según el Catastro de Recursos Vegetacionales	12
Armonización de productos e inventarios forestales	12
Comparación de los patrones de biomasa aérea provenientes de las fuentes identificadas	13
Biomasa registrada a partir de inventarios forestales: comparación entre IFN e inventarios reportados por la comunidad científica	13
Comparación entre inventarios forestales y productos grillados	13
RESULTADOS.....	15

Identificación de estimaciones de biomasa aérea provenientes de la literatura y repositorios científicos	15
Descripción de los patrones de distribución espacial de biomasa aérea de las fuentes identificadas	17
Patrones espaciales de biomasa aérea	17
Comparación de los patrones de biomasa aérea disponibles desde las diferentes fuentes de información	20
Comparación de estimaciones de biomasa a partir de inventarios forestales	20
Comparación entre inventarios y productos.....	22
DISCUSIÓN	30
Posibles causas de la variabilidad encontrada entre las distintas fuentes de inventarios forestales	30
Desempeño diferencial entre los productos e influencia de los tipos forestales y estructuras en las estimaciones de biomasa aérea	32
CONCLUSIONES.....	37
BIBLIOGRAFÍA.....	38
APÉNDICES.....	46

RESUMEN

Los bosques almacenan considerables cantidades de carbono, destacándose el componente aéreo de su biomasa. Sin embargo, la cuantificación desde inventarios forestales para este componente resulta desafiante dada la extensión espacial que presentan los bosques. Para sopesar este desafío, se han utilizado productos grillados, los cuales pueden variar significativamente según el método utilizado para la estimación de biomasa. Para comprender las brechas de estos productos en los bosques nativos entre las regiones del Maule y Los Lagos, se analizaron fuentes de datos de biomasa que difirieron en sus metodologías de estimación. Inicialmente, se contrastaron estimaciones de biomasa aérea proveniente de inventarios forestales (considerados como realidad de terreno). Luego, estas fueron contrastadas con productos grillados de biomasa aérea provenientes tanto de sensores remotos como 1) la Colección global de biomasa aérea forestal v 6.0, de la Agencia Espacial Europea (ESA) y 2) el producto Densidad de Biomasa Aérea L4B v 2.1, de la misión de Investigación de Dinámica de Ecosistemas Globales (GEDI); como de un modelo de dinámica vegetacional 3) ForClim v 4.0.1. Por una parte, el Inventario Forestal Nacional reportó valores de biomasa significativamente inferiores ($p < 0,05$) respecto a los inventarios reportados por la literatura científica y algunos no publicados; para los mismos tipos forestales (Alerce, Roble – Hualo, Roble – Raulí – Coihue, Coihue – Raulí – Tepa, Esclerófilo y Siempreverde) y estructurales (Adulto, Adulto – Renoval y Renoval). Lo anterior se asociaría con una subrepresentación de bosques de alta densidad de biomasa en su muestreo sistemático. Por otra parte, las estimaciones de biomasa de ForClim fueron más precisas que las de ESA y GEDI, al compararlas con los inventarios ($r = 0,8$; $0,26$ y $0,37$ respectivamente). Es posible que estos últimos tendieron a subestimar en los tipos forestales de mayor densidad de biomasa (Alerce, Coihue – Raulí – Tepa y Lenga) debido a factores como la saturación de la señal del sensor y la falta de calibración específica para los bosques estudiados. Estos hallazgos tienen implicancias directas tanto para la cuantificación de los reservorios de carbono a nivel nacional y global, como para la confiabilidad de las herramientas de monitoreo. Según estos resultados, el potencial para disminuir las brechas entre las estimaciones de biomasa en los bosques de Chile reside en el ensamble de las tecnologías con mejor desempeño e inventarios forestales.

Palabras clave: Carbono neutralidad, bosques templados, teledetección, inventario forestal, modelo de dinámica vegetacional.

SUMMARY

Forests capture substantial amounts of carbon, with the aboveground biomass (AGB) component being particularly significant. However, quantifying this component through forest inventories remains challenging due to the spatial extent of these ecosystems. Gridded products have been utilized in order to address this challenge, and these can vary significantly depending on the biomass estimation methodology employed. To understand the discrepancies between these products across native forests from Maule to Los Lagos regions, various biomass datasets with differing estimation methodologies were analyzed. Initially, AGB estimates derived from forest inventories (considered as ground truth) were compared. These were subsequently contrasted with gridded AGB products derived from both remote sensing — specifically 1) the European Space Agency (ESA) Climate Change Initiative Biomass v6.0 and 2) the Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) L4B v2.1 Aboveground Biomass Density — and 3) the ForClim v4.0.1 vegetation dynamics model. The results indicated that the National Forest Inventory reported significantly lower biomass values ($p < 0.05$) compared to inventories documented in scientific literature and unpublished datasets for the same forest types (Alerce, Roble–Hualo, Roble–Raulí–Coihue, Coihue–Raulí–Tepa, Sclerophyllous, and Evergreen) and structural stages (Old-growth, Old-growth/Secondary, and Secondary). This discrepancy could be associated with an underrepresentation of high biomass density forests within the systematic sampling design. Furthermore, ForClim biomass estimates demonstrated greater precision than those of ESA and GEDI when compared to inventories ($r = 0.8, 0.26, \text{ and } 0.37$, respectively). The remote sensing products tended to underestimate biomass in higher density forest types (Alerce, Coihue–Raulí–Tepa, and Lenga), probably due to sensor signal saturation and a lack of specific calibration for the studied forests. These findings have direct implications for the quantification of carbon stocks at both national and global scales, as well as for the reliability of monitoring tools. Based on these results, the potential to reduce gaps in biomass estimation in Chilean forests lies in the ensemble of high performance technologies and forest inventories.

Key words: Carbon neutrality, temperate forests, remote sensing, forest inventories, dynamic vegetation model.

INTRODUCCIÓN

La mitigación del cambio climático puede llevarse a cabo mediante la adopción de medidas para conservar y aumentar los sumideros y depósitos de Gases Efecto Invernadero; contaminantes que han presentado una creciente concentración en la atmósfera (FAO, 2024). Los bosques, ecosistemas terrestres con el mayor potencial de mitigación del cambio climático (Griscom *et al.*, 2017), corresponden a los mayores sumideros terrestres de carbono, mediante su almacenamiento en la biomasa viva y la materia orgánica del suelo (FAO, 2020; Lorenz & Lal, 2010). Para el caso chileno, la cuantificación del carbono almacenado en la biomasa de los bosques nativos es un suministro clave en el reporte generado por el Inventario Nacional de Gases Efecto Invernadero (INGEI), dado que estos ecosistemas se encuentran en el sector correspondiente al principal sumidero de carbono del país (Ministerio del Medio Ambiente, 2024). Por lo tanto, la cuantificación de la biomasa y el carbono almacenado en los bosques corresponde a información necesaria para la orientación de estrategias de manejo y adaptación al cambio climático. Asimismo, el monitoreo periódico de estas variables entrega información determinante al evaluar avances en las estrategias implementadas.

Existen diversos enfoques para cuantificar la biomasa aérea en bosques, y pueden clasificarse según el método utilizado; como lo son 1) mediciones en terreno provenientes de inventarios forestales (Hernández *et al.*, 2012), 2) metodologías asociadas a variables registradas por sensores remotos (Asner, 2009; Asner *et al.*, 2013; Hernández *et al.*, 2012) y 3) estimaciones provenientes de modelos de dinámica vegetal o de crecimiento de bosques (Lara *et al.*, 2014; Salas *et al.*, 2016).

Por un lado, los métodos de inventario se basan en muestreos *in situ*, los cuales pueden ser destructivos o no. El fin del método destructivo, generalmente es la cuantificación y registro de relaciones alométricas específicas para una o varias especies; mientras que el método no destructivo aplica estas ecuaciones ya existentes a variables medidas de manera no destructiva, como el diámetro del fuste a 1,3 m (DAP) o la altura (Chave *et al.*, 2004; Hernández *et al.*, 2012; Pati *et al.*, 2022). Por otro lado, las metodologías asociadas a la percepción remota trabajan estas relaciones alométricas utilizando como entrada, variables que se pueden registrar a distancia mediante sensores especializados del tipo ópticos (multi-espectrales o hiperespectrales), “LiDAR” (“Light Detection and Ranging” o Detección y Medición de Distancia por Luz), “RADAR” (“Radio Detection and Ranging” o Detección y Medición de Distancia por Radio), entre otros. Ejemplos de estas variables son índices vegetacionales, variables estructurales como la altura, diámetro del dosel, densidad del dosel, entre otros (Hernández *et al.*, 2012; Lu *et al.*, 2016; Nandy *et al.*, 2019). Estos acercamientos han permitido cuantificar la biomasa forestal sobre escalas geográficas extensas, ampliando el alcance de las mediciones realizadas directamente en el terreno (Tian *et al.*, 2023). Por último, respecto a los modelos de dinámica vegetal, se definen como aquellos que se basan en la ecología y fisiología de las plantas, de los cuales emergen los patrones demográficos y vegetacionales (Snell *et al.*, 2014). Estos modelos consideran múltiples

variables tales como conjuntos de datos climáticos y datos especie-específicos para su parametrización (Fischer *et al.*, 2016; Snell *et al.*, 2014). Además, tienen el potencial de ajustarse a regiones dadas y predecir escenarios futuros basados en observaciones actuales (Mina *et al.*, 2017).

En Chile, el Inventario Forestal Nacional (IFN) es la herramienta estadística nacional que provee de datos e información respecto del estado y condición del recurso comprendido en los ecosistemas forestales (CONAF, 2024). Este inventario sirve como principal insumo para la cuantificación de carbono en los bosques en el INGEI. Debido a que el resultado de la cuantificación de los reservorios forestales de carbono varía dependiendo del método y la escala utilizados (Gayoso & Guerra, 2005; Santoro *et al.*, 2023; Tian *et al.*, 2023; Yang *et al.*, 2020), es que la presente investigación buscó determinar cómo discrepan las diferentes estimaciones de biomasa aérea en los bosques chilenos. Dado lo anterior, el objetivo de la investigación fue analizar la distribución espacial de la biomasa aérea del bosque nativo, obtenida desde diversos productos grillados e inventarios forestales, mediante la identificación, descripción y comparación de diferentes fuentes de información de biomasa acorde a los métodos mencionados.

Objetivo General

Analizar la distribución espacial de la biomasa aérea del bosque nativo obtenida desde diversos productos grillados y datos de inventarios forestales entre las regiones del Maule y Los Lagos.

Objetivos Específicos

1. Identificar fuentes de información de distribución espacial de biomasa aérea para los bosques chilenos.
2. Describir los patrones de distribución espacial de biomasa aérea de las fuentes identificadas.
3. Comparar los patrones de distribución espacial de biomasa aérea de las fuentes identificadas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio se ubicó entre las regiones del Maule ($34^{\circ}41'S$) y de Los Lagos ($44^{\circ}14'$). Para estas regiones, el bosque nativo se encuentra identificado en el Catastro de Recursos Vegetacionales (CRV) de la Corporación Nacional Forestal (CONAF; Ministerio de Agricultura, 2024), y son reconocidos reservorios de carbono y biodiversidad, albergando especies endémicas y conformando un “hotspot” de biodiversidad en la zona centro – sur de Chile (Myers *et al.*, 2000) (ver Figura 1). Pese a lo anterior, estos bosques se han visto fragmentados y degradados, lo que ha conducido a una pérdida de su superficie original (Echeverría *et al.*, 2006).

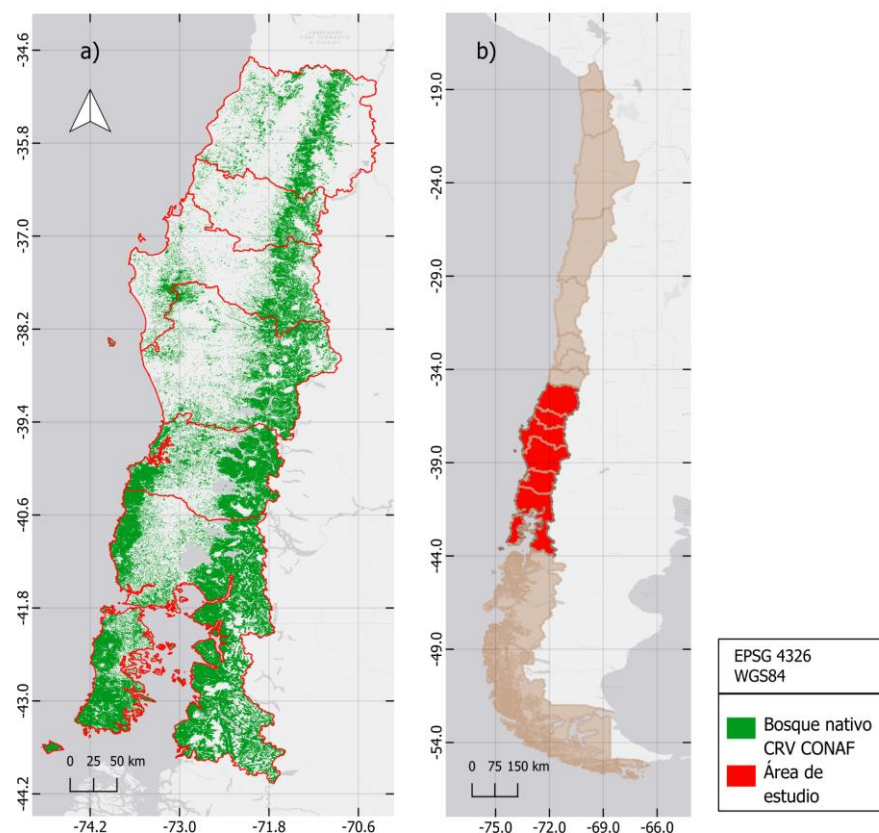


Figura 1. Área de estudio. a) Cobertura de bosque nativo identificado por CONAF en el Catastro de Recursos Vegetacionales para las regiones en estudio. Su actualización corresponde al año 2016 (Región del Maule), 2015 (regiones del Ñuble y Biobío), 2014 (regiones de La Araucanía y Los Ríos) y 2013 (Región de Los Lagos). b) Ubicación de las regiones de estudio en el territorio nacional.

Por un lado, los bosques del área de estudio son diversos. Las especies esclerófilas van desde el extremo norte del área de estudio hasta los 37°S en la Cordillera de la Costa y 39°S en la Depresión Intermedia. Es común encontrar *Peumus boldus*, *Cryptocarya alba*, *Quillaja saponaria* y *Maytenus boaria* en esta zona. En las quebradas se encuentran individuos de *Crinodendron patagua*, *Beilschmiedia miersii*, *Drimys winteri* y *Persea lingue*; mientras que en laderas con mayor exposición al sol es común encontrar *Vachellia caven* y *Neltuma chilensis*. Sobre los 1.200 msnm por la Cordillera de Los Andes y desde los 33°S, predominan bosques caducifolios del género *Nothofagus*. Estos bosques bordean la depresión intermedia y se concentran entre los 35 y 36°S formando el llamado bosque maulino, que se caracteriza por la dominancia de *N. alessandrii* y *N. glauca*. Hacia el sur, cerca de la 38°S en las cordilleras de Los Andes y Nahuelbuta se desarrolla *Araucaria araucana*. Por otro lado, intercalándose con los bosques caducifolios, se presencian los “krumholtz” de *N. antarctica*, junto con *N. pumilio*, el cual se distribuye a lo largo de la Cordillera de los Andes hacia el sur. Entre los 39 y 42°S se desarrolla el bosque laurifolio o selva valdiviana. Se caracteriza por un clima húmedo, con pp >2.000 mm anuales. Las especies arbóreas más comunes son *Aextoxicon punctatum*, *Laurelia sempervirens*, *Weinmannia trichosperma*, *Laureliopsis philippiana*, *N. dombeyi* y *Eucryphia cordifolia*. Alrededor de los 41°S, dominando en la costa e interior, se encuentra el bosque siempreverde. Este bosque se compone de *N. dombeyi*, *N. nitida* y *N. betuloides*; y se combina con especies gimnospermas como *Podocarpus nubigenus*, *Fitzroya cupressoides* y *Pilgerodendron uviferum*. Hacia la cordillera, los bosques caducifolios reemplazan al bosque siempreverde debido a la elevación (Moreira-Munoz, 2011).

Por otro lado, el clima del área de estudio varía entre regiones administrativas. Entre las regiones del Maule y La Araucanía predomina el clima templado con veranos cálidos y secos. A medida que aumenta la altitud, se presentan climas fríos con veranos secos, donde las precipitaciones del mes más seco no superan los 40 mm en promedio. En las regiones de Los Ríos y Los Lagos predomina un clima templado sin estación seca y con veranos cálidos. Hacia la cordillera se mantienen los meses húmedos durante todo el año, con precipitaciones abundantes y veranos fríos (Beck *et al.*, 2018).

Catastro de los Recursos Vegetacionales y Usos de la Tierra

Este catastro, disponible en la plataforma de Infraestructura de Datos Espaciales (IDE) del Ministerio de Agricultura, corresponde a un conjunto de archivos vectoriales que contienen información relacionada a la presencia de bosque nativo, usos de la tierra, estructura de la vegetación, especies predominantes, entre otros. El CRV es el principal instrumento nacional permanente y público que describe los usos de la tierra, cuantifica y caracteriza los recursos forestales y la vegetación para generar información base para la contribución en decisiones y planificación (CONAF, 2024). Estos archivos se encuentran actualizados a los años 2016 para la Región del Maule, 2015 para las regiones del Ñuble y Biobío, 2017 para las regiones de La Araucanía y Los Ríos, y 2018 para la Región de Los Lagos.

Inventarios forestales

Datos no publicados

Por un lado, se utilizó la base de datos de inventarios forestales del Laboratorio de Dinámica de la Vegetación (Bosque Ciencia, Universidad de Chile), la cual cuenta con un total de 98 parcelas de muestreo. El área de estas unidades va de los 500 a 1.200 m² y cubren todas las regiones del área de estudio, desde el año 2000. Este inventario no presentó estimaciones de biomasa aérea, sin embargo, contó con datos de diámetro y especie por parcela, por lo que la biomasa se estimó en el presente estudio. La metodología y los resultados de esta estimación pueden revisarse en los apéndices 1 y 2.

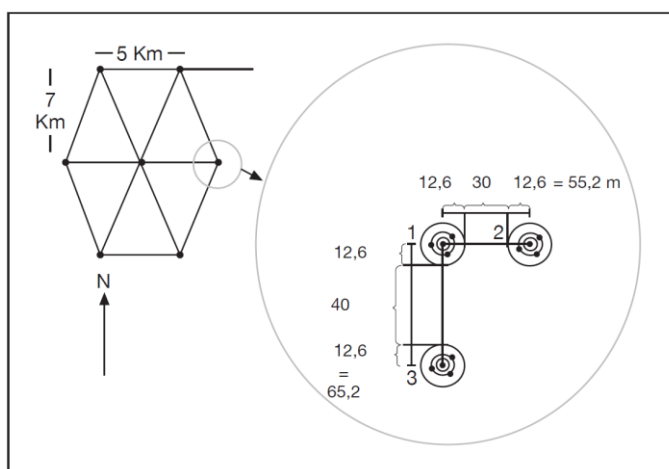
Por otro lado, se utilizó la base de datos del Laboratorio de Monitoreo y Modelación de Ecosistemas (LABMME, Universidad Adolfo Ibáñez), el cual concentra inventarios en las provincias de Cauquenes (Región del Maule) e Itata (Región del Ñuble). Este inventario provee información desde el año 2019 al 2025 y comprende un total de 137 parcelas de 706 m². Para la estimación de biomasa aérea, este inventario utilizaron principalmente las ecuaciones alométricas presentes en los compendios de Drake et al (2003) y Milla et al (2013). Para esto, se priorizó que la ecuación alométrica del individuo a calcular su biomasa, fuera para su propia especie y además haya sido elaborada utilizando ejemplares cercanos al individuo en cuestión, en términos de distribución geográfica. Lo anterior, es de relevancia cuando existe más de una ecuación alométrica para estimar la biomasa aérea de una misma especie arbórea. Se contó con ecuaciones cuya variable independiente fue el DAP, o el DAP y la altura.

Inventario Forestal Nacional

El Inventario Forestal Nacional (IFN), ejecutado por el Instituto Nacional Forestal (INFOR) desde el año 2000, constituye la herramienta que provee información respecto a los bosques en Chile. Las unidades muestrales de este inventario se organizan espacialmente en base a una cuadrícula de 5 kilómetros de ancho y 7 kilómetros de largo, comprendiendo todo el territorio nacional (Figura 2). En cada intersección se ubica una unidad muestral denominada conglomerado, la cual está compuesta por tres parcelas circulares. Cada parcela se conforma por tres parcelas concéntricas de 12,6, 122,7 y 500 m². En cada una de ellas, se miden atributos para los árboles mayores a 4, 8 y 25 cm de DAP respectivamente. Respecto a la altura, es medida con instrumentos específicos sólo a una submuestra de los árboles de la parcela 1, específicamente a 5 árboles por especie, para las dos especies más dominantes. Así, se construye una relación DAP-altura con la cual se estima la altura para el resto de los árboles de la parcela (Martin *et al.*, 2009; Sagardía *et al.*, 2024). La biomasa aérea de los árboles es estimada, en primera instancia, a partir de ecuaciones alométricas descritas por

Gayoso et al (2002) (Healey *et al.*, 2023). Para las especies que no tuvieron ecuación descrita en el grupo anterior, la biomasa se obtuvo a partir del volumen fustal y la densidad de la madera registrada (Sagardía *et al.*, 2024).

Para poder acceder a los datos del IFN se envió un requerimiento según indica el Protocolo Traspaso de Datos Biofísicos del Inventario Forestal Nacional disponible por el INFOR, solicitando los datos de biomasa aérea correspondientes al Nivel 2: Nivel de Parcela.



Fuente: Martin et al (2009).

Figura 2. Disposición y tamaño de los conglomerados del Inventario Forestal Nacional. Cada parcela se conforma por tres parcelas concéntricas de 12,6; 122,7 y 500 m².

Productos grillados

Colección global de biomasa aérea forestal v 6.0, iniciativa de Biomasa y Cambio Climático, Agencia Espacial Europea

Los productos del programa de la Agencia Espacial Europea “Biomass Climate Change Initiative” (en adelante, ESA) ofrecen estimaciones de biomasa aérea para los bosques entre los años 2007 – 2022 a escala global, con una resolución espacial de 100 m (Santoro & Cartus, 2025). El presente estudio trabajó con la estimación para el año 2021.

Como entrada principal para la estimación de biomasa aérea del año mencionado, el algoritmo de ESA utiliza los datos de Detección y Medición de Distancia por Radio (RADAR) de los satélites Sentinel-1 (banda C) y Alos-2 Palsar-2 (banda L). Esto proporciona observaciones de retrodispersión RADAR (“backscatter”) que se relacionan con la estructura de la vegetación y la biomasa. La banda C interactúa con la porción superficial del dosel, mientras que la banda L ofrece mayor penetración en la cubierta vegetal, lo que es útil para

estimar biomasa en bosques densos. Estas observaciones se combinan con funciones que vinculan la altura del dosel del bosque con la biomasa, mediante calibraciones utilizando datos LiDAR (GEDI y ICESat-2). Cabe recalcar que, en este caso, los datos LiDAR no se usan para estimar directamente la biomasa. Luego, gracias a la previa calibración LiDAR y a los inventarios forestales nacionales, se relaciona la señal de retrodispersión SAR con la densidad y altura del dosel para expresar la biomasa en función de la retrodispersión SAR. El algoritmo utilizado para la estimación de la biomasa del producto genera dos estimaciones independientes para las bandas C y L, calibrando y modelando cada una por separado, para finalmente fusionarse en un único mapa (Santoro *et al.*, 2023).

Investigación de Dinámica de Ecosistemas Globales: Densidad de biomasa aérea L4B v 2.1

La Investigación de Dinámica de Ecosistemas Globales (GEDI por sus siglas en inglés) es un sistema satelital a bordo de la Estación Espacial Internacional que genera información desde el año 2019 hasta la actualidad (con un período inactivo entre marzo del 2023 y abril del 2024). Mediante láser de detección y medición de distancias por luz (LiDAR), GEDI realiza mediciones precisas de la altura del dosel forestal, la estructura vertical del dosel y la elevación de la superficie, y corresponde al instrumento de su categoría con mayor resolución y muestreo más denso hasta la fecha (Dubayah *et al.*, 2023).

Este instrumento se compone por tres láseres que generan ocho haces paralelos de observación e iluminan la superficie terrestre en un punto de 25 m de diámetro cada uno. Estos haces miden en cada punto la estructura de la superficie en tres dimensiones. Existen 600 m de separación entre los puntos de estos ocho haces, y cada punto está separado del siguiente por 60 m. A partir de la energía láser reflejada por la materia sobre el suelo a diferentes alturas en cada punto, es que se obtienen distintos niveles de datos; L1: formas de onda crudas y geolocalizadas; L2: altura del dosel del nivel de la huella y métricas del perfil; L3: métricas de altura y variabilidad del dosel cuadriculadas; y L4: estimaciones de la huella y de la biomasa sobre el suelo cuadriculada (Dubayah *et al.*, 2022).

Para estimar la biomasa aérea a nivel de huella (GEDI L4A), se combinan métricas de altura relativa del dosel (obtenidas mediante el nivel L2A de GEDI) con modelos lineales ajustados dependiendo del tipo funcional de plantas y la región geográfica. El tipo funcional de plantas se obtiene del producto MODIS MCD12Q1 V006, mientras que los modelos derivan de formas de onda simuladas para parcelas de muestreo distribuidas a nivel global (Kellner *et al.*, 2023). La biomasa media a una resolución de 1 km del producto L4B v 2.1, se estima a partir de una muestra incompleta de valores modelados de biomasa (provenientes del L4A), principalmente mediante el método de interferencia híbrida. Las celdas con un número insuficiente de clústeres entregan la biomasa estimada mediante un modelo de inferencia jerárquica generalizado, i.e. extiende la biomasa a una superficie utilizando imágenes satelitales continuas. El producto L4B presenta una resolución de 1 km, sin embargo, no es un producto continuo (“wall to wall”) pues la estimación de biomasa en cada píxel depende de que existan dos o más líneas de huellas interceptando esta superficie (Healey *et al.*, 2023). En el presente estudio se utilizaron los datos grillados de densidad de biomasa aérea L4B v 2.1 correspondientes a la media en un píxel de 1 km entre las fechas 18/04/2019 y 16/03/2023.

Modelo de dinámica vegetacional ForClim v 4.0.1

ForClim (Bugmann, 1996; Huber *et al.*, 2020) es un modelo de dinámica vegetacional que predice la composición y estructura de los bosques en múltiples parches mediante la simulación de árboles individuales, basándose en la teoría sucesional de dinámica de claros (Botkin *et al.*, 1972; Bugmann & Seidl, 2022; Watt, 1947; White & Pickett, 1985). ForClim predice, para cada uno de los individuos, su crecimiento dadas ciertas condiciones bióticas y abióticas de sitio, pudiendo calcular su biomasa mediante funciones alométricas para cada especie que, a su vez, conduce al cálculo de variables agregadas como área basal, densidad de biomasa aérea, entre otras, para cada año de simulación. Para realizar estas predicciones, el modelo incorpora supuestos ecológicos y procesos demográficos, como lo son el reclutamiento, crecimiento, y mortalidad de individuos (Bugmann, 1996). Además, incorpora información climatológica, información de suelos, la sensibilidad climática de las especies arbóreas, la competencia por luz, y actualmente también incorpora un submodelo que permite representar el manejo histórico en los bosques (Rasche *et al.*, 2012).

ForClim, considerado como un modelo generalizado para bosques templados, ha sido evaluado en diversas regiones del mundo, abarcando amplios espectros de condiciones ambientales y gradientes de elevación. El modelo se ha evaluado con éxito en Estados Unidos, tanto para bosques de la costa oeste, como para bosques latifoliados de la costa este (Bugmann & Solomon, 1995, 2000; Gutiérrez *et al.*, 2016), y se han realizado predicciones orientadas hacia la productividad futura de los bosques de Europa en contextos de cambio climático (Elkin *et al.*, 2013; Mina *et al.*, 2017; Rasche *et al.*, 2012). También se ha aplicado en bosques templados en China (Shao *et al.*, 2001). En Chile, el modelo se ha aplicado exitosamente desde la Región del Maule a la Región de Los Lagos (Ortega, 2021; Sepúlveda, 2023; Vera, 2023), y se ha parametrizado y evaluado para 37 especies arbóreas dominantes de los bosques templados de Chile continental, para la extensión geográfica comprendida entre las regiones de O'Higgins y Aysén, por el Laboratorio de Dinámica de la Vegetación de la Universidad de Chile.

Para el presente estudio, el proceso de obtención de la simulación se inició definiendo un dominio espacial para predecir la composición y estructura de los bosques, delimitado por los rangos de distribución de 37 especies arbóreas dominantes. Dentro de esta área, se identificó la cobertura de bosque nativo usando el Catastro Vegetacional de CONAF. Se caracterizó el clima de referencia (1980-2010) utilizando el producto grillado CR2Met v2.0 (Boisier, 2023) (temperatura y precipitación mensuales), y se calculó la humedad aprovechable del suelo hasta 50 cm de profundidad con la base de datos CLSoilMaps (Dinamarca *et al.*, 2023). Se distribuyeron los puntos de simulación (representando celdas de 5 km), en las celdas con cobertura de al menos 500 ha de bosque nativo. El modelo se corrió en cada punto, simulando una condición inicial de suelo desnudo y permitiendo el establecimiento de especies del piso vegetacional dominante. Además, para el submodelo de manejo se incorporó el impacto de las cortas históricas basándose en la historia que se conoce del área de estudio. Específicamente, en las celdas clasificadas como renoval en el CRV, se aplicó una tala rasa total al azar entre 1930 y 1960. En los bosques adultos alterados, la intensidad de la tala se hizo dependiente del área basal observada y se simuló entre 1910 y

1940, mientras que los bosques adultos intactos se simularon sin ninguna intervención humana. El resultado representa la composición y estructura predicha por el modelo dadas las condiciones climáticas y edáficas de la celda. Para la presente investigación se contó con una simulación para el año 2021.

Identificación de estimaciones de biomasa aérea provenientes de la literatura y repositorios científicos

Revisión bibliográfica

Se realizó una revisión bibliográfica para recopilar datos de biomasa aérea que se haya estimado mediante diferentes métodos; 1) a partir de inventarios forestales, 2) a partir de variables obtenidas de sensores remotos y 3) mediante modelos de dinámica vegetal.

Biomasa mediante métodos de inventario: Consistió en buscar datos en 1) el repositorio “Web of Science” (WoS), 2) bibliotecas en línea, como la Biblioteca Digital de la Universidad de Chile (enfocado en tesis/memorias nacionales no publicadas), y 3) informes generados con el Fondo de Investigación de Bosque Nativo y otros similares. Para esto se utilizaron palabras y conceptos clave (e.g. biomasa aérea, sensores remotos, Chile, bosques, entre otros).

Biomasa a partir de datos de sensores remotos: Para recopilar estimaciones de biomasa derivadas de datos remotos se consideró, nuevamente, 1) el repositorio “Web of Science” (WoS); además de 2) el “NASA (National Aeronautics and Space Administration): Earthdata Search” y 3) el catálogo “Google Earth Engine: Earth Engine Data Catalog”. Para “Wos” se utilizó la misma metodología de búsqueda aplicada en el caso anterior, mientras que, para los otros se utilizaron palabras clave y se filtraron colecciones siguiendo la secuencia de categorías que refiriera a datos de biomasa aérea en cada una de las plataformas.

Biomasa modelada con modelos de dinámica vegetal: Para este caso, se buscó información en el repositorio “Web of Science” (WoS) y en la Biblioteca Digital de la Universidad de Chile, utilizando palabras clave (e.g. biomasa aérea, modelo de dinámica vegetal, Chile, bosques, entre otros).

Selección de datos

Se seleccionaron inventarios forestales con posterioridad al año 2000 y se priorizó que las observaciones mediante modelos y sensores remotos coincidieran en el año observado.

Descripción de los patrones de distribución espacial de biomasa aérea de las fuentes identificadas

Creación de base de datos

En primer lugar, se obtuvo un conjunto con las parcelas de todos los inventarios forestales. Estas, se ordenaron en una base de datos donde se diferenciaron las parcelas correspondientes al Inventario Forestal Nacional de las pertenecientes a inventarios reportados por la comunidad científica. Se incluyeron para cada observación referencia, coordenadas, año de observación, método de muestreo y biomasa aérea. Con esta base de datos inicial, se trabajó en los siguientes procedimientos.

Identificación de categorías según el Catastro de Recursos Vegetacionales

Los inventarios se clasificaron según el CRV. Este catastro se descargó en formato vectorial de la plataforma del Sistema de Monitoreo de Ecosistemas Forestales (SIMEF, 2024). Se identificaron dos clasificaciones: tipos forestales y estructurales. Las dos capas vectoriales se rasterizaron a una grilla de 40 x 40 m, para luego extraer en cada coordenada con parcelas correspondientes a inventarios de la base de datos, el tipo forestal y estructural que se encontró en ese punto. Debido a que este procedimiento reveló que hubo observaciones que quedaron fuera del límite de bosque nativo del catastro (es decir, no obtuvieron clasificación de tipo forestal o estructura), se decidió considerar las que estuvieron cerca de los límites del CRV. A criterio experto, se consideró que la estimación a partir de inventarios forestales podría ser más fidedigna que el catastro, dentro de un buffer de 3 x 3 celdas (120 x 120 m). Esto significó que se incluyeron las observaciones si se encontraron dentro de este límite, atribuyéndole la moda de la categoría de tipo forestal y estructura que tuvieran las celdas en esa área.

Armonización de productos e inventarios forestales

Luego se procedió a trabajar con los productos, para lo que fue necesaria una armonización previa debido a las diferencias inherentes de cada uno, especialmente la resolución espacial. Esto consistió en trabajar solamente con las celdas (píxeles) que albergaran una o más parcelas de inventarios. Esto resultó en productos discontinuos para el área de estudio. Los inventarios, por su parte, se procesaron de manera que fuera posible comparar el valor de la celda del producto con un solo valor observado. Esto consistió en promediar los valores de biomasa de las parcelas que compartieran la misma celda, y se realizó para cada producto por separado. Debido a la diferencia de resolución espacial de cada producto, el total de observaciones fue distinto para cada uno de ellos, como también la posición y valor de las parcelas de inventarios. Finalmente, con los productos armonizados, se llevó a cabo una descripción espacial de cada uno.

Comparación de los patrones de biomasa aérea provenientes de las fuentes identificadas

Esta etapa consistió en: 1) comparar la biomasa del IFN con la biomasa de los inventarios registrados por la comunidad científica y 2) comparar la biomasa entre todos los inventarios forestales y los productos grillados.

Biomasa estimada a partir de inventarios forestales: comparación entre IFN e inventarios reportados por la comunidad científica

Para esto, se realizó una comparación de la distribución de los datos de ambos conjuntos, clasificando según tipo forestal y estructura, dejando fuera los grupos que tuvieron <10 parcelas para IFN y los inventarios reportados por la comunidad científica. Los inventarios que no clasificaron dentro del CRV, fueron catalogados sin clasificación. Luego se realizó la prueba estadística “U Mann – Whitney” para evaluar si existió una diferencia entre los grupos (wilcox.test() en R).

Comparación entre inventarios forestales y productos grillados

Se utilizaron los productos armonizados y los valores de biomasa estimados desde inventarios, que se promediaron para cada celda de cada producto. Se evaluaron la correlación de Pearson (r), Raíz Cuadrada Media de las Diferencias (RMSD), Error de Porcentaje Medio Absoluto (MAPE) y Error Relativo (ecuaciones 1, 2 y 3). Por un lado, el RMSD representa la precisión de las estimaciones, indicando qué tan lejos, en promedio, están las estimaciones de los productos respecto a las estimaciones a partir de los inventarios. Por otro lado, el MAPE representa el promedio del error relativo porcentual de las estimaciones. Por último, el Error Relativo representa el error de las estimaciones de los productos en proporción a los valores estimados a partir de los inventarios, para cada punto observado. A continuación, se detallan las ecuaciones.

$$RMSD = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(\hat{y}_i - y_i)^2}{n}}$$

Ecuación 1

Donde, $\hat{y}_i$ corresponde a los valores predichos, y_i corresponde a los valores observados, el subíndice i corresponde al píxel del dato grillado (en el caso de $\hat{y}_i$), y a la (s) parcela (s) de inventario dentro del píxel (en el caso de y_i) y n corresponde al número total de observaciones.

$$MAPE = 100 \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right|$$

Ecuación 2

Donde, n corresponde al número de veces que se hace la iteración de la suma, y_i corresponde al valor real, $\hat{y}_i$ corresponde al valor previsto e i representa la posición de cada una de las celdas del producto grillado (con parcela (s) asociada (s) dentro).

$$E_r = \frac{\hat{y}_i - y_i}{y_i} \cdot 100$$

Ecuación 3

Donde, y_i corresponde al valor observado e $\hat{y}_i$ corresponde al valor predicho.

Además de las métricas mencionadas, se calculó el Índice I de Moran a los residuos de las comparaciones entre cada producto y las estimaciones obtenidas de inventarios (Ecuación 4). Este índice evalúa la autocorrelación espacial de los datos según sus valores y ubicación, indicando si los valores se agrupan, están dispersos o siguen patrones aleatorios. Un valor positivo indica que los valores están agrupados, mientras que un valor negativo indica que las diferencias son aleatorias (Nowosad, 2024).

$$I = \frac{n \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Ecuación 4

Donde, n corresponde a la cantidad de observaciones, x_i es el valor de la variable en una localización i , x_j corresponde al valor de la variable en otra localización j , $\bar{x}$ corresponde a la media de la variable en todos los puntos y w_{ij} corresponde a una matriz de ponderaciones espaciales (relación entre las ubicaciones i y j) (Celemín, 2009).

RESULTADOS

Identificación de estimaciones de biomasa aérea provenientes de la literatura y repositorios científicos

Se recopilaron datos de biomasa aérea desde diversas fuentes (cuadros 1 y 2), los cuales consistieron, por un lado, en inventarios forestales provenientes de memorias de título/ tesis, artículos publicados, entre otros. Se encontraron 4 tesis con datos en el área de estudio desde el año 2000 a la fecha, y significaron un total de 13 parcelas. Los artículos e informes publicados conformaron un total de 52 parcelas.

Los inventarios forestales sumaron un total de 1.068 parcelas. El método de muestreo y las características de las parcelas obtenidas desde la literatura se describen a continuación. Por un lado, se distinguieron diversos tamaños de unidades muestrales, desde los 400 m² (Urrutia-Jalabert *et al.*, 2015), 500 m² (Dube & Stolpe, 2016; Garfias *et al.*, 2019; Poblete, 2018), 1.000 m² (González *et al.*, 2022; Naulin, 2002; Olate, 2019; Olguín, 2009; Perez-Quezada *et al.*, 2015; Soto, 2014) hasta los 2.000 y 3.000 m² (González *et al.*, 2022). Por otro lado, se identificaron diferentes métodos de cálculo de biomasa, los cuales fueron: 1) la medición directa, implicando el volteo y pesado de los árboles para el desarrollo de relaciones alométricas y la posterior estimación de la biomasa de la unidad (Garfias *et al.*, 2019; Naulín, 2002; Olate, 2019; Soto, 2014) y 2) la medición de atributos como el DAP y la altura, para la posterior estimación de la biomasa con ecuaciones alométricas desarrolladas previamente (Dube & Stolpe, 2016; González *et al.*, 2022; Olguín, 2009; Perez-Quezada *et al.*, 2015; Poblete, 2018; Urrutia-Jalabert *et al.*, 2015).

Los datos proporcionados directamente por los laboratorios conformaron un total de 235 parcelas. Los inventarios de LABMME y Bosque Ciencia, coincidieron con muestreos no destructivos y sus parcelas presentaron superficies desde los 500 m² hasta los 1.200 m². Respecto al IFN, se contó con 768 conglomerados, unidades muestrales conformadas por 1 a 3 parcelas. Para este estudio se promediaron las parcelas de cada conglomerado, obteniendo una observación para cada uno.

Respecto a los años de observación, también variaron entre las diversas fuentes, desde el año 2.000 en adelante. Para los casos en los que no se especificó un año exacto, se asumió el mismo año de publicación para esas observaciones. Del mismo modo, cuando hubo un rango de años, se consideró como año observado el promedio de estos.

Cuadro 1. Estimaciones de biomasa aérea obtenidas de inventarios reportados por la comunidad científica.

Referencia	Tipo de referencia	Año de observación	Método de muestreo	Nº parcelas	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	Tamaño parcelas (m ²)
Naulín, 2002	Tesis	2002	Destruyitivo	1	45,1	1.000
Soto, 2014	Tesis	2014	Destruyitivo	5	115,0	1.000
Poblete, 2018	Tesis	2015 - 2017	No destruyitivo	4	172,8	500
Olate, 2019	Tesis	2010	Destruyitivo	3	151,3	1.000
Garfías <i>et al.</i> , 2019	Informe FIBN	2017	Destruyitivo	13	12,7	500
Pérez-Quezada <i>et al.</i> , 2015 / Olguín, 2009	Artículo científico / Tesis	--	No destruyitivo	13	180,0	1.000
González <i>et al.</i> , 2022	Artículo científico	--	No destruyitivo	22	209,9	1.000, 2.000 y 3.000
Urrutia - Jalabert <i>et al.</i> , 2015	Artículo científico	2012	No destruyitivo	2	297,8	400
Dube y Stolpe, 2016	Artículo científico	2013	No destruyitivo	2	45,2	500
Laboratorio de Dinámica de la Vegetación Universidad de Chile (Bosque Ciencia)	Datos proporcionados directamente	2000 - 2024	No destruyitivo	98	239,7	500 a 1.200
Laboratorio de Monitoreo y Modelación de Ecosistemas Universidad Adolfo Ibáñez (LABMME)	Datos proporcionados directamente	2017 - 2025	No destruyitivo	137	86,2	700
Instituto Forestal: Inventario Forestal Nacional (IFN)	Datos proporcionados directamente	2001 - 2020	No destruyitivo	768	87,4	500
Total	-	2000 - 2025	-	1.068	104,9	400 a 1.200

Por otro lado, los productos grillados variaron en resolución espacial y año de observación (Cuadro 2). A pesar de que las simulaciones del modelo ForClim son puntuales, consideran información en un área de 5.000 m², por lo que se trabajó con este producto como una grilla. Por su parte, los productos ESA y GEDI presentaron resoluciones espaciales de 100 y 1.000 m² respectivamente. Respecto al año observado, los productos ESA y ForClim representan el año 2021. GEDI, por último, entrega un promedio de biomasa para los años 2019 a 2023 en un solo producto.

Cuadro 2. Estimaciones de biomasa aérea obtenida de productos grillados.

Referencia	Nombre	Tipo de producto	Año de observación	Resolución espacial (m)
Santoro & Cartus, 2025	ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass cci): Global datasets of forest above-ground biomass v 6.0	Imagen producto de observaciones satelitales	2021	100
Dubayah <i>et al.</i> , 2023	Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI): L4B v 2.1	Imagen producto de observaciones satelitales	2019 - 2023	1.000
Laboratorio de Dinámica de la Vegetación Universidad de Chile (Bosque Ciencia)	Simulación con Modelo ForClim v 4.0.1	Simulaciones georreferenciadas mediante modelo de dinámica vegetal	2021	Puntual, pero considerando información en 5.000

Descripción de los patrones de distribución espacial de biomasa aérea de las fuentes identificadas

Originalmente, el CRV dejó sin clasificar 122 parcelas de la base de datos generada. De estas, un 74% correspondió a parcelas pertenecientes al IFN. Mediante la aplicación del buffer de 120m, este número se redujo a 14. Estas últimas parcelas fueron catalogadas sin clasificar. Los tipos forestales que se asignaron a las parcelas incluidas en el buffer fueron en su mayoría Roble - Raulí - Coihue y Siempreverde; mientras que el tipo estructural fue mayoritariamente renoval.

Patrones espaciales de biomasa aérea

En la distribución espacial de las 1.054 parcelas, se identificaron las clasificaciones tanto en la estructura del bosque como en la composición de los tipos forestales. En cuanto a la estructura, se observó que en la porción perteneciente a las regiones del Maule y Ñuble predominaron los renovales, y hacia el sur estos se combinaron con el tipo estructural Adulto. La estructura Achaparrado presentó una distribución marcadamente restringida, localizándose casi exclusivamente en la distribución de las cordilleras de los Andes y de la Costa (Figura 3).

Respecto a la composición, en el extremo norte del área de estudio predominaron los tipos forestales Esclerófilo, Roble - Hualo y Roble - Raulí - Coihue. Este último, sin embargo, se vio distribuido ampliamente de Norte a Sur y de Este a Oeste. Hacia el sur, la diversidad de tipos forestales aumentó, incluyendo Coihue - Raulí - Tepa, Araucaria, Ciprés de las

Guaitecas y el inicio del dominio del tipo forestal Siempreverde. Este último se extendió como un componente principal hasta el extremo sur del área, donde estuvo acompañado por bosques de Lenga y Coihue – Raulí – Tapa.

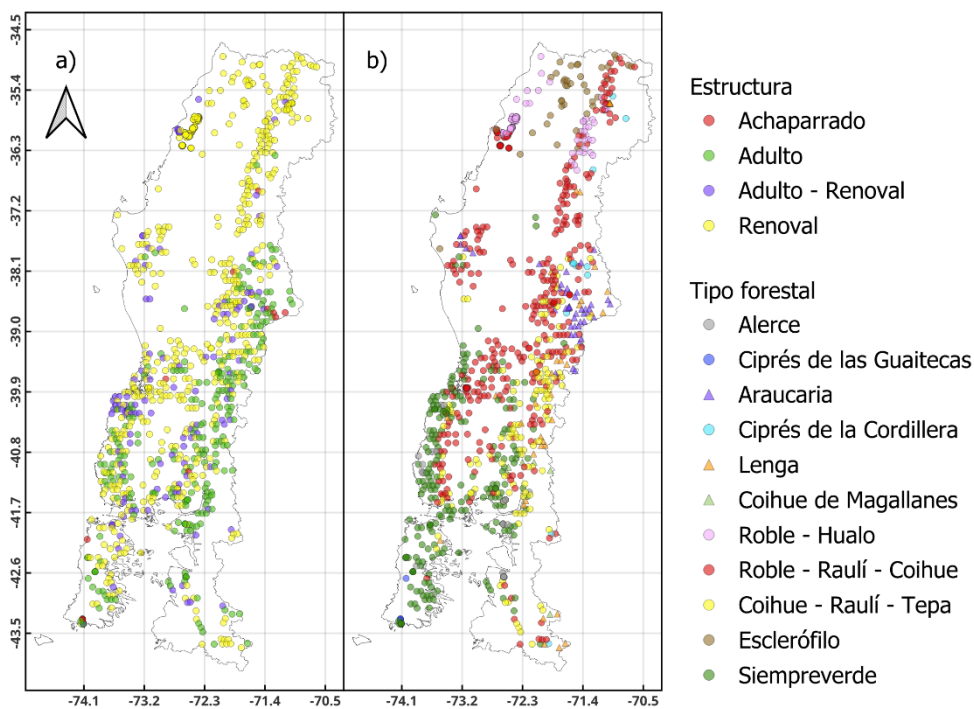


Figura 3. Estructura (a) y tipos forestales (b) para las parcelas de inventarios ($n = 1.054$). Se excluyeron las 14 parcelas que quedaron fuera de los límites del Catastro de Recursos Vegetacionales de CONAF.

La distribución de las parcelas del IFN fue más homogénea y abarcó un área más extensa que las del resto de los inventarios, las cuales se encontraron distribuidas de una manera más localizada (Figura 4). Pese a lo anterior, las estimaciones de biomasa obtenidas de la literatura documentaron niveles más elevados de concentración de biomasa, mientras que los puntos de muestreo del IFN no sobrepasaron las 350 ton C /ha. Respecto al IFN, destacó la concentración de inventarios en la Región de Los Ríos y en la zona norte de la Región de Los Lagos; sin embargo, no hubo inventarios en la Región del Biobío.

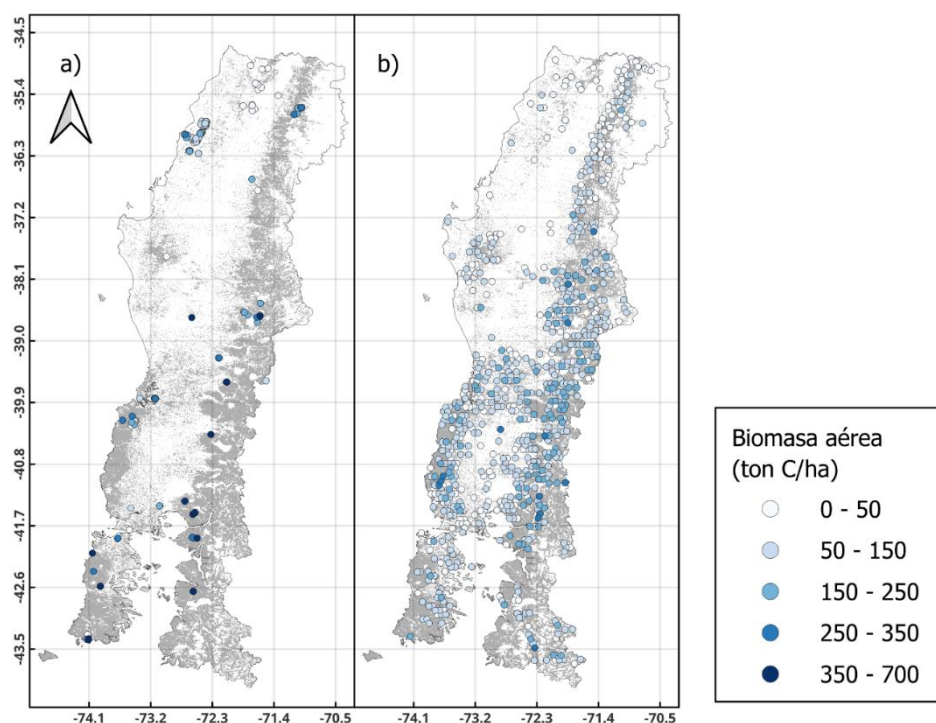


Figura 4. Distribución de biomasa aérea (ton C/ha) según inventarios forestales; a) reportados por la comunidad científica (n = 300), y b) Inventario Forestal Nacional (n = 768).

La magnitud y distribución geográfica de la biomasa aérea fue distinta para cada producto (Figura 5). Por un lado, GEDI (n = 1.030) fue el que se observó más homogéneo de los tres ($\sigma^2 = 1.549$), concentrando la mayoría de los valores más altos en la Cordillera de Los Andes, que se encontraron en el rango de 150 a 250 ton C/ha. Por otro lado, ESA (n = 842) presentó menos homogeneidad que GEDI ($\sigma^2 = 2.133$), alcanzando 250 ton C/ha en los Andes, en la Cordillera de Nahuelbuta, en la mayor parte de la Región de Los Ríos y hacia el sur en la extensión de los tipos forestales Siempreverde y de Alerce. ForClim (n = 692) destacó por alcanzar el rango más alto de biomasa entre los productos (250 a 350 ton C/ha), desde la Región de La Araucanía hacia el sur. Además, alcanzó la mayor varianza de los tres productos ($\sigma^2 = 4.234$). Entre las regiones del Maule y Ñuble se ubicó la mayor parte de los puntos con menor concentración de biomasa (0 – 50 ton C/ha), mientras que las concentraciones más altas se ubicaron entre la Región de la Araucanía y Los Lagos, principalmente en las cordilleras de Los Andes y de la Costa.

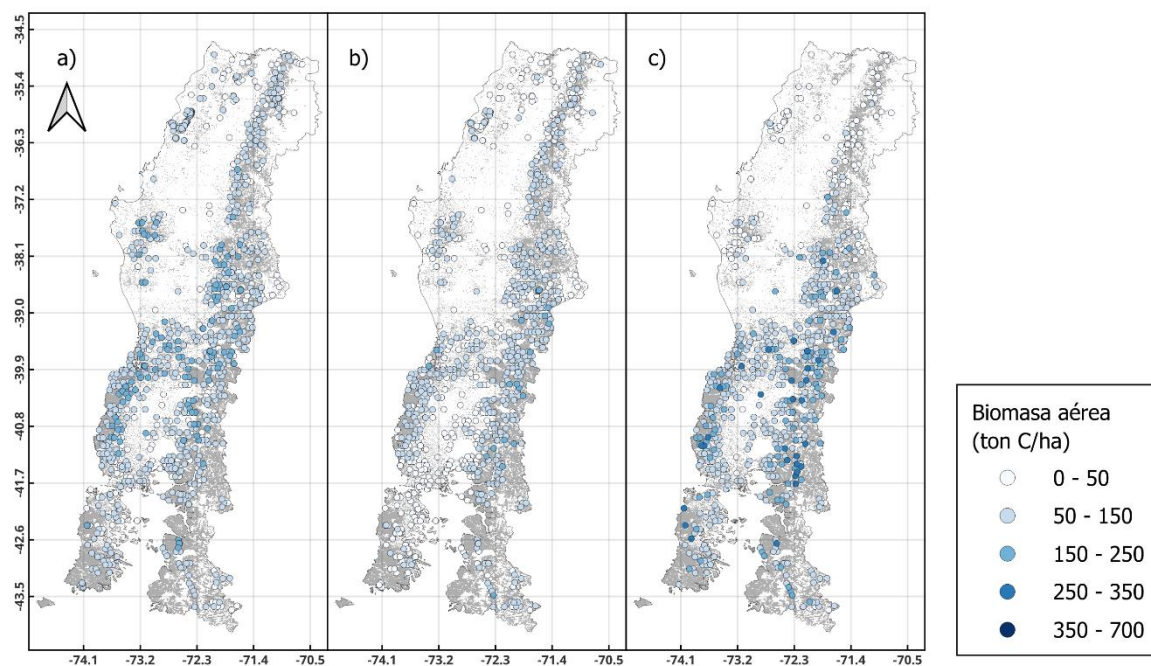


Figura 5. Distribución de biomasa aérea (ton C/ha) obtenida desde los diferentes productos grillados, en ubicaciones según inventarios forestales. a) ESA (n = 1.030), b) GEDI (n = 842), c) ForClim (n = 692).

Comparación de los patrones de biomasa aérea disponibles desde las diferentes fuentes de información

Comparación de estimaciones de biomasa a partir de inventarios forestales

De los 11 tipos forestales presentes en el área de estudio, sólo 6 cumplieron con la condición de tener al menos 10 parcelas ($n \geq 10$) para el IFN y los inventarios reportados por la comunidad científica: Alerce, Roble – Hualo, Roble – Raulí – Coihue, Coihue – Raulí – Tepa, Esclerófilo y Siempreverde. Los demás tipos forestales; Ciprés de las Guaitecas, Araucaria, Ciprés de la Cordillera, Lenga y Coihue de Magallanes, no cumplieron con esta condición. En estructura, las categorías Adulto, Adulto – Renoval y Renoval cumplieron con esta condición, mientras que Achaparrado quedó fuera.

En la Figura 6 se observó que el IFN fue para cada categoría, el que más observaciones tuvo, a excepción de los tipos forestales Alerce y Roble – Hualo (sin considerar categorías Otros y Sin Clasificar). El tipo forestal y estructura con mayor cantidad de observaciones para ambos grupos fue Roble – Raulí – Coihue y Renoval. Todos los tipos forestales presentes en la figura mencionada, a excepción del tipo Esclerófilo, presentaron distribuciones significativamente diferentes ($p < 0,05$), y con menor densidad de biomasa para el IFN, respecto a los inventarios reportados por la comunidad científica. El comportamiento fue similar cuando se clasificaron

las observaciones según estructura. El máximo registrado para los inventarios reportados por la comunidad científica fue de 698,6 ton C/ha, mientras que el IFN alcanzó 313,2 ton C/ha.

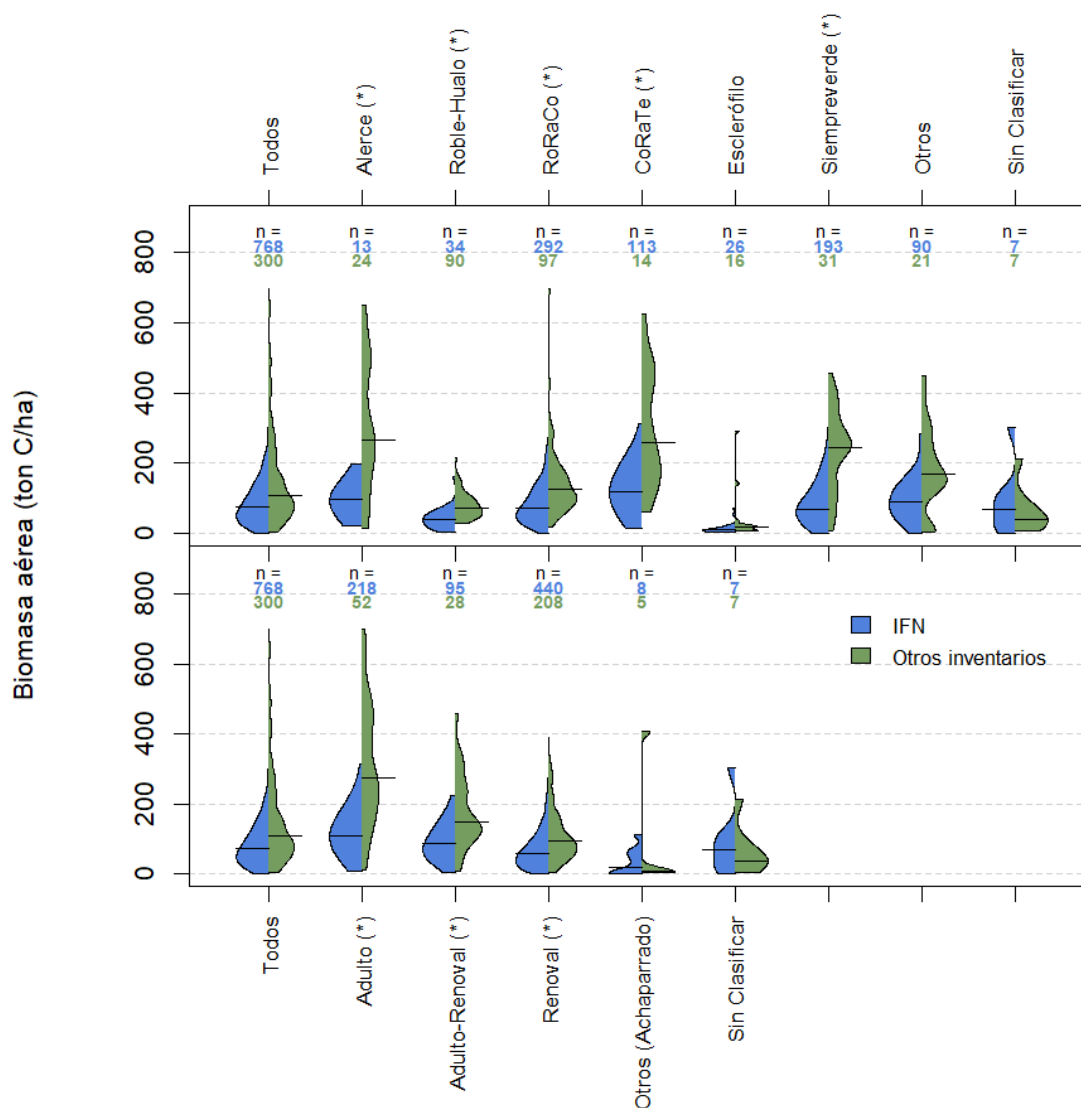


Figura 6. Distribuciones de biomasa aérea (ton C/ha) para los inventarios forestales, diferenciando tipos forestales (arriba) y estructura (abajo) según el Catastro de Recursos Vegetacionales. Se separan Inventario Forestal Nacional (IFN) e inventarios reportados por la comunidad científica (otros inventarios). Las categorías que presentaron <10 parcelas para estos grupos se agrupan en Otros. La categoría Todos incluye el total de los inventarios y la categoría Sin Clasificar agrupa las observaciones que están fuera de los límites del bosque nativo según el catastro. (*) $p < 0,05$.

A modo general, se visualizó la biomasa para cada tipo forestal y estructura en todos los inventarios (figuras 7 y 8; apéndices 3 y 4). El tipo forestal Alerce fue el que mostró mayor concentración de biomasa en promedio (231 ton C/ha), al contrario del tipo forestal

Esclerófilo (24,2 ton C/ha). Los tipos forestales Coihue – Raulí – Tepa y Lenga concentraron 142,6 y 129,2 ton C/ha en promedio. El tipo forestal Araucaria, en promedio concentró 113,6 ton C/ha y Siempreverde 105,83. Los que tuvieron bajo 100 ton C/ha fueron los tipos forestales Roble – Raulí – Coihue, Ciprés de la Cordillera y Roble – Hualo (98,9; 75,4 y 69,1 ton C/ha). Por otro lado, los tipos estructurales adultos alcanzaron una media de 155,7; los adultos – renovales 112,2; los renovales 83,9 y los achaparrados 56,0 ton C/ha.

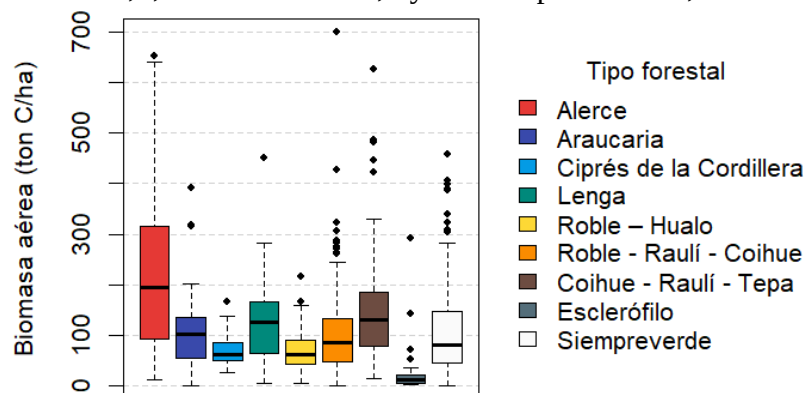


Figura 7. Distribución de biomasa aérea (ton C/ha) estimada a partir de inventarios forestales, según tipos forestales del Catastro de Recursos Vegetacionales. Se excluyeron los tipos forestales que no tuvieron suficientes observaciones ($n \geq 10$).

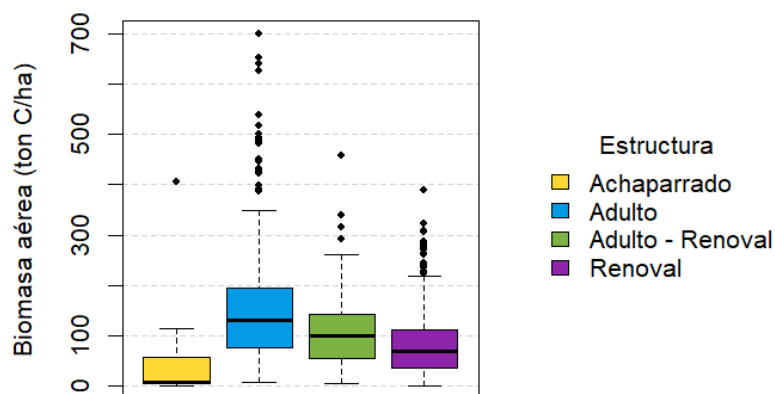


Figura 8. Distribución de biomasa aérea (ton C/ha) estimada a partir de inventarios forestales (ton C/ha), según estructura del Catastro de Recursos Vegetacionales.

Comparación entre inventarios y productos

Al evaluar la similitud de los productos con los inventarios, se obtuvo a ForClim como el producto que más se asemejó a lo observado, con un $r = 0,8$ y una tendencia a la subestimación de -3,39 ton C/ha en promedio. Sin embargo, los errores absolutos fueron del 39,6% y 40,97 ton C/ha en promedio. GEDI y ESA, por otra parte, obtuvieron un $r = 0,37$ y 0,26 respectivamente, demostrando relaciones lineales débiles comparadas con ForClim. GEDI, en promedio, subestimó 35,13 ton C/ha mientras que ESA se acercó bastante más a

ForClim, subestimando 8,15 ton C/ha en promedio. Sin embargo, los errores fueron mayores en ESA que en GEDI, presentando 143,72% y 86,64 ton C/ha comparado con 100,5% y 79,58 ton C/ha.

Al observar la Figura 9, se evidenciaron comportamientos diferentes para cada producto. Para el caso de ESA, fue visible un corte superior cercano a las 201 ton C/ha, al cual se acercaron valores para todo el rango de distribución de los inventarios, desde las 0,9 a las 698,6 ton C/ha. GEDI no estimó un valor máximo tanto mayor al producto anterior (236,3 C/ha), sin embargo, se observó que entre las 0 y 100 ton C/ha el producto sobrestimó menos que ESA. Pese a distinguir a ForClim como la mejor relación lineal de los tres, aún se observa subestimación desde las 350 ton C/ha en adelante.

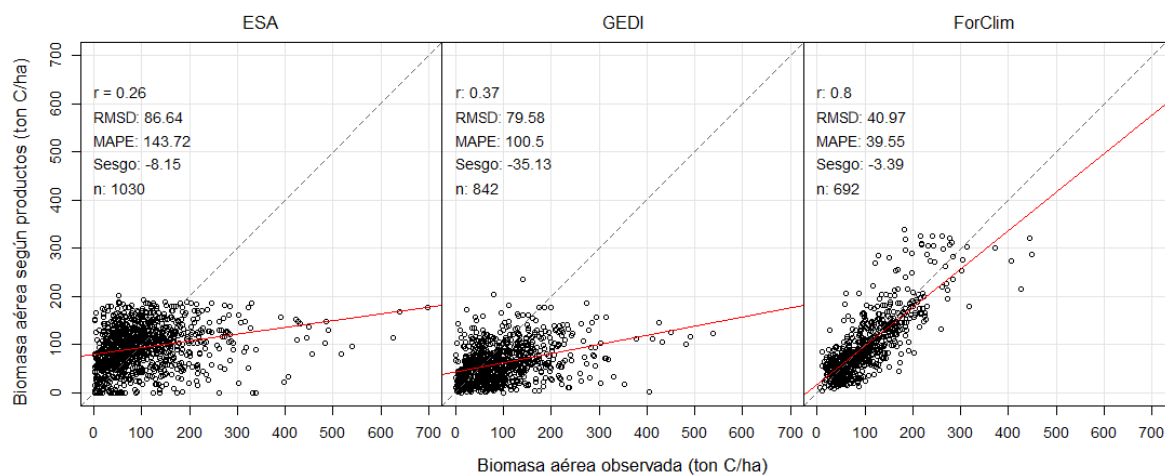


Figura 9. Diagrama de dispersión entre la biomasa aérea reportada por inventarios forestales y productos grillados; ESA (n = 1.030), GEDI (n = 842) y ForClim (n = 692). Se presentan las métricas Coeficiente de Correlación de Pearson (r), Raíz Cuadrada Media de las Diferencias (RMSD), Error Medio Absoluto Porcentual (MAPE) y Sesgo.

Analizando los comportamientos de cada producto con relación a los tipos forestales (ver Apéndice 5), es posible identificar que, para ESA el mejor manejo del error (ton C/ha) en tipos forestales fue para Roble – Hualo y Esclerófilo (RMSD 40,25 y 50,02). El peor, fue para Alerce (RMSD 202,05 ton C/ha), mientras que el error promedio porcentual se manifestó mejor en Lengua y Coihue – Raulí – Tepa (53,52 y 65,28%), y peor en Esclerófilo (287,54%). Los tipos forestales Roble – Raulí – Coihue y Roble – Hualo fueron los mejor representados en términos de sesgo (4,74 y 11,24 ton C/ha), mientras que el peor fue Alerce (-103,48 ton C/ha). La única correlación $r \geq 0,5$ fue para el caso de Lengua ($r = 0,54$), mientras que Ciprés de la Cordillera presentó una débil correlación inversa ($r = -0,35$). Los tipos forestales Siempreverde, Alerce y Coihue – Raulí – Tepa demostraron casi nula correlación ($r = 0,02, 0,12$ y $0,14$ respectivamente).

GEDI, por otro lado, obtuvo el mínimo error (ton C/ha) en los tipos forestales Esclerófilo y Roble – Hualo (RMSD 40,75 y 46,88), y el mayor en Alerce (RMSD 178,55 ton C/ha), mientras que el error promedio porcentual se manifestó en menor medida para Ciprés de la Cordillera y Coihue – Raulí – Tepa (43,50 y 48,06%), y en mayor medida para Esclerófilo (249,94%). Los tipos forestales Esclerófilo y Roble – Hualo fueron los mejor representados

en términos de sesgo (10,54 y 17,77 ton C/ha), mientras que el peor fue Alerce (-119,97 ton C/ha). Este producto subestimó todos los tipos forestales, a excepción del tipo Esclerófilo. Pese a los errores que presentó el tipo Alerce, este fue el con la correlación más alta ($r = 0,66$), seguido por Lenga ($r = 0,51$). El tipo Ciprés de la Cordillera presentó una correlación inversa débil ($r = -0,35$), mientras que los tipos forestales Siempreverde, Roble – Hualo y Esclerófilo tuvieron escasa correlación ($r = 0,14$, $0,15$ y $0,20$ respectivamente).

ForClim obtuvo el mínimo error (ton C/ha) en los tipos forestales Roble – Raulí – Coihue, Siempreverde y Roble – Hualo, de manera casi idéntica (RMSD: 36,55, 36,81 y 37,81), y el peor lo obtuvo Alerce (RMSD 61,16 ton C/ha). El error promedio porcentual se manifestó en menor medida para Roble – Raulí – Coihue, Coihue – Raulí – Tepa y Lenga (MAPE: 32,56, 35,52 y 36,22%), y en mayor medida para Araucaria (58,09%). Los tipos forestales Coihue – Raulí – Tepa y Roble – Raulí – Coihue fueron los mejor representados en términos de sesgo, sobrestimando 4,84 ton C/ha y subestimando 10,96 ton C/ha respectivamente. El mayor sesgo lo mostró Alerce, que se sobrestimó en 35,16 ton C/ha. El tipo forestal Siempreverde fue el que presentó la correlación más fuerte ($r = 0,85$), seguido de cerca por Roble – Raulí – Coihue, Coihue – Raulí – Tepa y Lenga ($r = 0,82$, $0,81$ y $0,80$). La correlación más débil fue para Roble – Hualo, con $r = 0,53$. No hubo correlaciones negativas.

Transversalmente, se puede notar que todos los productos tuvieron su peor desempeño, en cuanto a RMSD y sesgo, para el tipo forestal Alerce. Por otro lado, los tipos forestales Araucaria, Ciprés de la Cordillera y Lenga fueron subestimados por los tres productos.

Al ordenar los tipos forestales de manera creciente según la biomasa aérea promedio estimada en los inventarios (Figura 10), se obtuvo un comportamiento similar para todos los parámetros al comparar ESA y GEDI. Las diferencias se obtuvieron principalmente en los tipos forestales Alerce, Coihue – Raulí – Tepa y Siempreverde. Se observó, además, que ambos productos tienden a aumentar su sesgo al aumentar la biomasa. ForClim presentó curvas más suavizadas para r y MAPE. Este producto mantuvo elevada la correlación, a excepción de los tipos forestales Roble – Hualo y Araucaria.

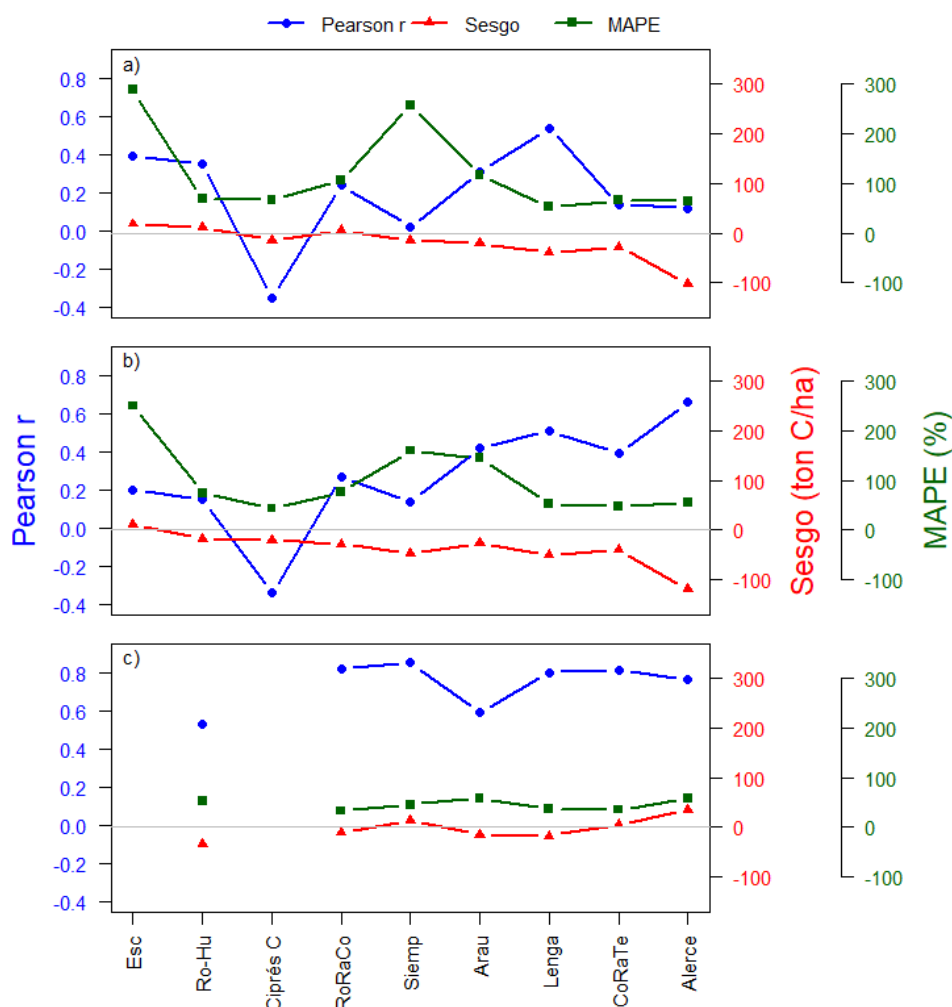


Figura 10. Tendencia de las métricas Coeficiente de correlación de Pearson (r), Sesgo (ton C/ha) y Error Medio absoluto Porcentual (MAPE; %) al ordenar los tipos forestales del Catastro de Recursos Vegetacionales de manera creciente, según biomasa aérea promedio (ton C/ha) estimada en inventarios forestales. Se consideraron solamente los tipos forestales que tuvieron un mínimo de 10 observaciones para el producto. a) ESA, b) GEDI y c) ForClim. Esc = Esclerófilo, Ro - Hu = Roble - Hualo, Ciprés C = Ciprés de la Cordillera, RoRaCo = Roble - Raulí - Coihue, Siemp = Siempreverde, Arau = Araucaria, CoRaTe = Coihue - Raulí - Tepa.

En términos de tipos estructurales (ver Cuadro 3), ESA tuvo el mejor manejo del error (ton C/ha) en los renovales (RMSD 65,36), y el peor en bosques adultos (RMSD 122,64 ton C/ha). El error promedio porcentual (MAPE) se manifestó mejor para bosques adultos (71,77%) y peor para el Achaparrado (495,28%). Las estructuras Achaparrado y Renoval fueron las mejor representadas en términos de sesgo (3,01 y 6,01 ton C/ha), mientras que la peor fue Adulto (-42,11 ton C/ha); subestimada. La correlación más alta, aunque débil, fue para

bosques renovales ($r = 0,30$), mientras que los achaparrados demostraron una nula correlación ($r = 0,02$).

GEDI, por otro lado, obtuvo el mínimo error (ton C/ha) en renovales (RMSD 62,84) y el máximo en achaparrados (RMSD 123,73). El error promedio porcentual se manifestó en menor medida para adultos (61,74%) y en mayor medida para achaparrados (308,15%). La estructura con el menor sesgo fue Renoval (-24,74 ton C/ha), mientras que la que presentó el mayor sesgo fue Adulto (-51,79 ton C/ha). Este producto subestimó todas las estructuras. La correlación más alta fue para bosques adultos ($r = 0,33$), mientras que los achaparrados presentaron una débil correlación inversa ($r = -0,08$).

ForClim, sin considerar la estructura Achaparrado ($n = 6$), obtuvo el mínimo error (ton C/ha) en la estructura Renoval (RMSD: 34,16) y el peor lo obtuvo para bosques adultos (RMSD 51,43 ton C/ha). El error promedio porcentual se manifestó en menor medida para Adulto - renovales (MAPE: 35,95%) y en mayor medida para adultos (41,95%). Estos últimos fueron los mejor representados en términos de sesgo, sobrestimando sólo 0,85 ton C/ha, mientras que el mayor sesgo se evidenció en los renovales, subestimados en 7,55 ton C/ha. Esta fue, sin embargo, la estructura que presentó la correlación más fuerte ($r = 0,80$), seguida por los adultos ($r = 0,76$). La correlación más débil, aunque todavía fuerte, fue para Adulto - Renoval, con $r = 0,75$. No hubo correlaciones negativas.

ForClim presentó un desempeño superior a ESA y GEDI en todas las métricas, destacando por sus correlaciones consistentemente altas ($r \geq 0,75$) y sus bajos valores de RMSD. Por otro lado, los bosques achaparrados fueron los que generaron mayores dificultades para ESA y GEDI, mostrando para ambos los peores valores de MAPE y RMSD. Los bosques renovales, consistentemente mostraron los errores (RMSD) más bajos para los tres productos.

Cuadro 3. Métricas de comparación entre estimaciones de biomasa aérea presentes en inventarios forestales y productos grillados, diferenciando estructura según el Catastro de Recursos Vegetacionales. Incluye Coeficiente de correlación de Pearson (r), Raíz Cuadrada Media de las Diferencias (RMSD; ton C/ha), Sesgo (ton C/ha) y Error Medio absoluto Porcentual (MAPE; %). Se consideraron solamente las estructuras que tuvieron un mínimo de 10 observaciones para el producto.

	Estructura	Achaparrado	Adulto	Adulto – Renoval	Renoval
ESA	r	0,02	0,18	0,04	0,30
	RMSD (ton C/ha)	113,4	122,6	86,3	65,3
	MAPE (%)	495,2	71,7	77,4	166,3
	Sesgo (ton C/ha)	3,0	-42,1	-11,3	6,0
	n	13	255	119	629
GEDI	r	0,0	0,3	0,1	0,2
	RMSD (ton C/ha)	123,7	101,8	85,0	62,8
	MAPE (%)	308,1	61,7	70,9	121,5
	Sesgo (ton C/ha)	-33,2	-51,7	-44,7	-24,7
	n	11	227	109	485
ForClim	r	-	0,7	0,7	0,8
	RMSD (ton C/ha)	-	51,4	37,6	34,1
	MAPE (%)	-	41,9	35,9	39,4
	Sesgo (ton C/ha)	-	0,8	4,3	-7,5
	n	6	215	95	371

En promedio, el error relativo porcentual de los tres productos fue de 103 y 8% para ESA, GEDI y ForClim respectivamente. ForClim obtuvo menos dispersión en términos de error relativo comparado con GEDI y ESA ($\sigma^2 = 4.451$; $\sigma^2 = 129.870$ y 377.645 respectivamente), siendo este último el producto con mayor dispersión. El tipo forestal Alerce fue en su mayoría subestimado por ESA y GEDI, y sobrestimado por ForClim (Figura 11). Para bosques de Araucaria, Roble – Hualo, Roble – Raulí – Coihue, Coihue – Raulí – Tepa y Siempreverde, la menor dispersión fue de ForClim, y la mayor de ESA. Para Ciprés de la Cordillera y Esclerófilo también ESA presenta la mayor dispersión de datos. En general, ForClim muestra cajas más pequeñas que los otros productos. Asimismo, en este producto los tipos forestales Araucaria, Lenga, Roble - Hualo, Roble – Raulí – Coihue y Coihue – Raulí – Tepa fueron mayoritariamente subestimadas, mientras que Alerce y Siempreverde fueron en su mayoría sobrestimados. Por otro lado, GEDI subestimó en promedio todos los tipos forestales a excepción del Esclerófilo. ESA, por último, sobrestimó la mayoría de las estimaciones de biomasa en Roble – Hualo, Roble – Raulí – Coihue, Esclerófilo y Siempreverde. Las demás las subestimó. ESA y GEDI subestimaron hasta el máximo posible (-100 %) en uno o más tipos forestales, mientras que ForClim no llegó a este límite para ninguno de ellos.

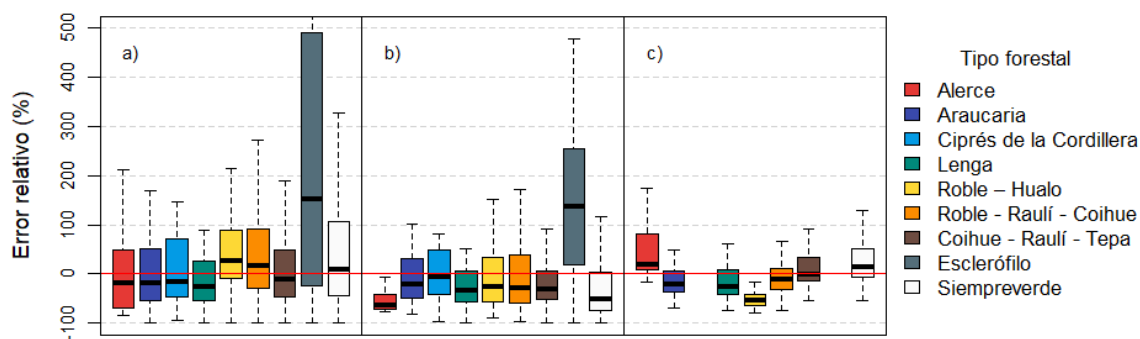


Figura 11. Error relativo porcentual para los productos a) ESA, b) GEDI y c) ForClim, según tipo forestal del Catastro de Recursos Vegetacionales. Se consideraron solamente los tipos forestales que tuvieron un mínimo de 10 observaciones para el producto ($n \geq 10$).

Respecto a los errores relativos por tipo estructural, ESA sobrestimó los bosques achaparrados mucho más que los otros productos y otras estructuras, ubicándose el 50% de los errores entre -100 y 800% aproximadamente (Figura 12). Para los demás productos y estructuras, los errores oscilaron entre -100 y 400%. GEDI presentó mayor dispersión para bosques achaparrados y renovales, al igual que ESA. ForClim mostró distribuciones de los errores similares tanto para Adultos, como para Adultos – Renovales, sobrestimando estos dos grupos y subestimando los Renovales, en promedio.

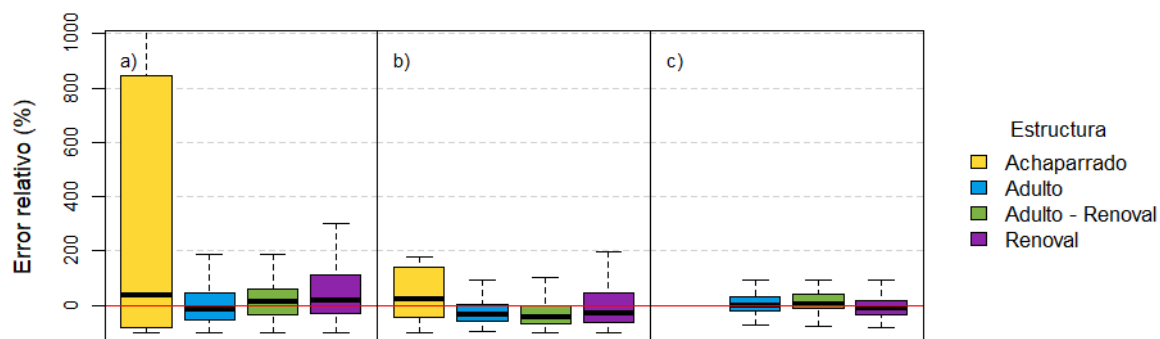


Figura 12. Error relativo porcentual para los productos a) ESA, b) GEDI y c) ForClim, según estructura del Catastro de Recursos Vegetacionales. Se consideraron solamente las estructuras que tuvieron un mínimo de 10 observaciones para el producto ($n \geq 10$).

Al analizar los errores en el espacio, fue posible distinguir diferentes patrones (Figura 13). ESA mostró una marcada tendencia a la sobrestimación de la biomasa, concentrando puntos en las categorías 50 a 100% y >100% a lo largo de toda la región de estudio. GEDI, por el contrario, tendió a subestimar la biomasa, distribuyendo puntos con valores entre 0 a -100% en la mayoría del territorio. No obstante, se distinguió un patrón de sobrestimación al norte de la Región de Los Ríos, y subestimación desde esta región hacia el sur. Por último, ForClim mostró mejor desempeño en general. Los puntos fueron predominantemente entre los valores -50 y 50%. Los puntos de subestimación se encontraron principalmente entre las regiones del

Maule y La Araucanía, tendiendo a la sobrestimación desde La Araucanía a Los Lagos, mayoritariamente.

Destaca que, en general, hubo una importante cantidad de valores mayores a 100%, especialmente en ESA y GEDI.

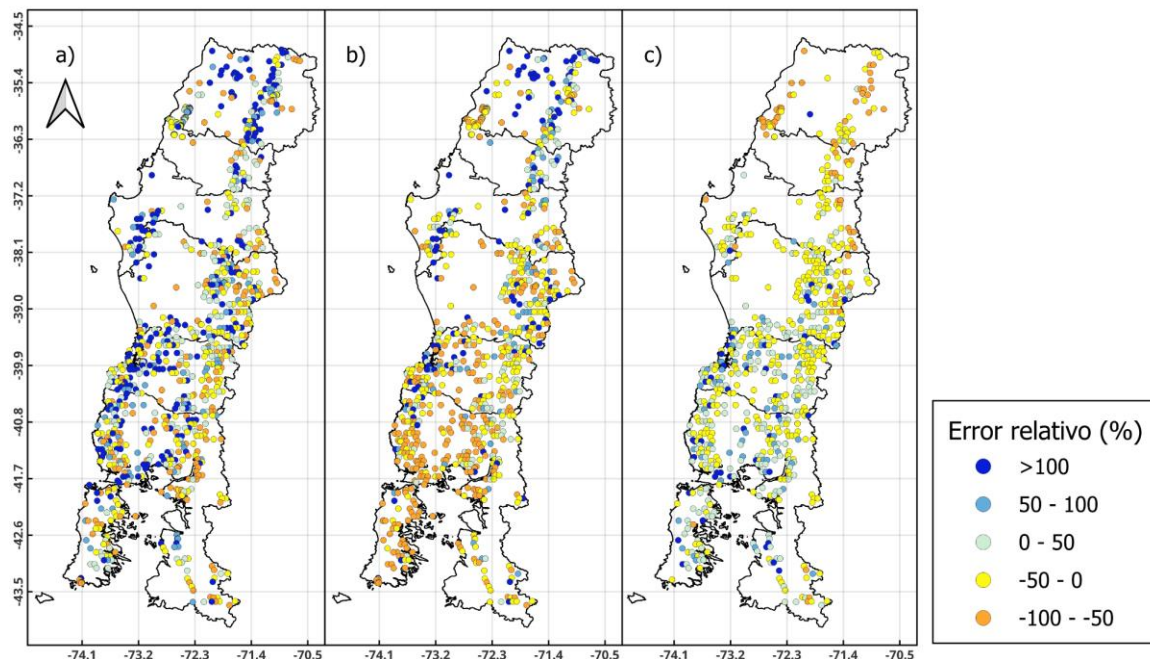


Figura 13. Error relativo porcentual entre la biomasa obtenida a partir de los inventarios forestales y los productos. a) ESA (n = 1.030), b) GEDI (n = 842), c) ForClim (n = 692). Los valores positivos indican subestimación; el valor observado es mayor al valor predicho (observado – predicho) y viceversa.

Por último, al evaluar el Índice I de Moran en los residuos de los productos, se observaron resultados positivos para ESA, GEDI y ForClim (0,29, 0,18 y 0,20 respectivamente), lo que sugiere una autocorrelación espacial positiva ($p < 2,2 \times 10^{-16}$). Esto quiere decir que los residuos se encuentran cercanos a otros residuos con similar valor.

DISCUSIÓN

La investigación demostró que: 1) existen discrepancias significativas en la estimación de biomasa aérea de bosques entre las regiones del Maule y Los Lagos, donde los datos del Inventario Forestal Nacional consistentemente reportaron valores de biomasa inferiores a los de los inventarios reportados por la comunidad científica para los mismos tipos forestales y estructuras; 2) el modelo de dinámica vegetal ForClim se asemejó de manera más precisa a los inventarios forestales ($r = 0,8$) que los productos grillados de biomasa aérea satelitales ESA y GEDI ($r = 0,26$ y $0,37$ respectivamente), los cuales tendieron a subestimar la biomasa en los tipos forestales con mayor cantidad de biomasa (Alerce, Coihue – Raulí – Tepa y Lenga); y 3) el desempeño de todos los productos grillados de acuerdo a los inventarios registrados varió considerablemente según el tipo forestal y la estructura del bosque, mostrando limitaciones particulares en bosques de Alerce y Esclerófilo, y entregando mejores resultados para la predicción de biomasa de ForClim comparado con los productos globales ESA y GEDI. Estos hallazgos tienen implicancias directas para la cuantificación de los reservorios de carbono a nivel nacional y la certidumbre de las herramientas que se podrían utilizar para mejorar la cuantificación.

Para profundizar en estos resultados, la presente discusión abordará: a) las posibles causas de la variabilidad encontrada entre las distintas fuentes de inventarios forestales y b) el desempeño diferencial entre los productos e influencia de los tipos forestales y estructuras en las estimaciones de biomasa.

Posibles causas de la variabilidad encontrada entre las distintas fuentes de inventarios forestales

Los resultados revelaron que existe una discrepancia significativa en las estimaciones de biomasa aérea entre el IFN y los inventarios reportados por la comunidad científica. Se demostró que estas últimas reportaron significativamente más biomasa promedio que las del IFN, en los tipos forestales Alerce, Roble – Hualo, RoRaCo, CoRaTe y Siempreverde; y en las estructuras Adulto, Adulto – Renoval y Renoval. Esto concuerda con Pascual et al (2024) quienes declaran que existe una falta de representatividad de los bosques con alta densidad de biomasa en el IFN en Chile. A continuación, se detallan posibles razones de este comportamiento.

a) Tipo de muestreo

Es posible que la selección de los sitios donde se establecen las parcelas en ambos tipos de inventario influya en la estimación. Es necesario comprender que la metodología del IFN es caracterizar a escala regional la estructura de bosques mediante una malla sistemática, en la

cual se ubican potenciales unidades muestrales con igual probabilidad de ser seleccionados para muestreos en cada ciclo (teniendo en cuenta que debe corresponder a bosque nativo). A diferencia del muestreo sistemático del IFN, la localización de los inventarios reportados por la comunidad científica es, en la mayoría de los casos, dirigida. Esto se debe al interés u objetivo de la investigación, como puede serlo: determinar la productividad de especies endémicas, longevas y poco estudiadas como el Alerce (Urrutia-Jalabert *et al.*, 2015), cuantificar el stock de carbono de bosques prístinos como los que se encuentran al sur de la Isla de Chiloé (Perez-Quezada *et al.*, 2015), analizar cambios estructurales en rodales de bosques amenazados y degradados en la Región de Los Ríos (Poblete, 2018), desarrollar funciones alométricas de biomasa aérea para especies esclerófilas (Garfias *et al.*, 2019), entre otros. En esencia, el muestreo dirigido no busca representar la totalidad del bosque de un país, sino representar en detalle un fenómeno, condición o proceso específico. Por su parte, el hecho de que las parcelas reportadas por la comunidad científica hayan mostrado valores máximos mayores que el IFN, evidencia que existen bosques antiguos que el IFN no está reportando actualmente. Dado esto, es posible que la implementación de métodos como el muestreo estratificado por tipos forestales y estructurales para el IFN, entreguen mejores resultados dada la mejor representatividad de los bosques (Jayaraman, 1999).

Por otro lado, se debe mencionar que, respecto a los inventarios forestales, el IFN demostró una cobertura espacial mayor a la de los inventarios reportados por la comunidad científica (Figura 4), presentando tipos forestales que estos últimos contaron con muy baja representatividad (tipo forestal Araucaria, Ciprés de la Cordillera y Lenga). Por otro lado, pese a la proporción de parcelas pertenecientes a inventarios reportados por la comunidad científica presentes en el total de datos (~39%), estas se distribuyeron de manera agregada y condensada, comparado con el IFN. Esto resultó en que, para productos de menor resolución, no se aprovecharon en su totalidad los inventarios para realizar las comparaciones. Pese a lo anterior, el IFN no presentó representatividad en todas las regiones administrativas del área de estudio, dejando sin parcelas en la Región del Biobío. En este punto, los inventarios reportados por la comunidad científica fueron clave para suplir este vacío de información.

b) Procesamiento de información y uso de ecuaciones alométricas

El método más preciso para medir la biomasa aérea es la corta, secado y pesado del individuo; sin embargo, no es un método práctico a grandes escalas (Roxburgh *et al.*, 2015), es costoso, destructivo e inviable para especies protegidas. Debido a lo anterior, es necesario el desarrollo de funciones que describan las relaciones alométricas para las diferentes especies. Sin embargo, en Chile aún existe una gran cantidad de especies arbóreas que no han sido estudiadas en este aspecto. Incluso, la estimación de biomasa en especies ya documentadas pero que estén fuera de los límites de estos modelos puede introducir un sesgo significativo y adicionar incertidumbre (Picard *et al.*, 2012). En el presente estudio, particularmente en la estimación de biomasa aérea para el inventario de Bosque Ciencia (ver Apéndices 1 y 2), se demostró que las funciones existentes para algunas de las especies estudiadas no lograron cubrir a individuos que quedaron fuera de los límites del rango de DAP utilizado para crearlas. Por ejemplo, los límites máximos de DAP de las ecuaciones alométricas de *Amomyrtus luma* (Gayoso *et al.*, 2002), *Austrocedrus chilensis* (Mac Donald, 2005), *Nothofagus glauca* (Drake *et al.*, 2003) y *Saxegothaea conspicua* (Gayoso *et al.*, 2002) que

se utilizaron en este estudio, fueron iguales a 22, 14,3, 40 y 54 cm respectivamente (ver Apéndice 6). Pese a lo anterior, los DAP máximos registrados para tales especies en este trabajo fueron de 136, 74,4, 89 y 138 cm respectivamente, claramente sobrepasando estos límites. Lo mismo sucedió con los límites inferiores de las ecuaciones para especies como *Nothofagus glauca* y *Saxegothaea conspicua*, donde los límites y DAP mínimos registrados fueron de: 10 y 5 cm, y 7 y 5 cm respectivamente. Por último, hubo dos *outliers* identificados con claridad en la Figura 14 (Apéndice 2); *Austrocedrus Chilensis* (DAP = 74,4 cm y biomasa aérea = 0,4 ton C) y *Nothofagus glauca* (DAP = 89 cm y biomasa aérea = 3,1 ton C). Se deduce que este comportamiento se debe a la estimación de biomasa aérea para individuos cuya medida de DAP aún no ha sido integrada en las ecuaciones establecidas para la especie, lo que induce a un sesgo.

c) Uso del Catastro de Recursos Vegetacionales de CONAF

El uso del CRV permitió identificar los tipos forestales y estructurales para los inventarios, lo cual fue la base principal para los análisis de este estudio. Pese a lo anterior, se rescatan ciertos aspectos en los que se cree que este catastro podría mejorar para entregar mejor información respecto a los bosques nativos.

Para la utilización del catastro, en el presente estudio se utilizó un buffer de 120 m para rescatar 108 parcelas que no estaban siendo identificadas como bosque nativo en este instrumento. De ellas, la mayoría perteneció al IFN, por lo que se sugiere que una mejor coordinación entre las instituciones INFOR y CONAF podría mejorar los reportes referentes al bosque nativo en el país. Por otro lado, la antigüedad del catastro podría generar cierta incertidumbre debido a que los reportes generados representan un escenario presente hace 10 o más años atrás.

Por último, es posible que surja incertidumbre debido al hecho mismo de generar el buffer. Pese a lo anterior, y dada la naturaleza del CRV como producto extrapolado en base a puntos observados en terreno, es que se les otorgó mayor importancia a los datos observados de inventario en la base de datos trabajada (dentro de un buffer máximo).

Desempeño diferencial entre los productos e influencia de los tipos forestales y estructuras en las estimaciones de biomasa aérea

a) ESA

Los resultados de ESA, al compararse con los inventarios, mostraron una débil correlación tanto para los tipos forestales como para los tipos estructurales estudiados. Respecto al sesgo, fue menor en los tipos forestales Esclerófilo y Roble – Hualo (sesgo = 17,3 y 11,2 ton C/ha) y mayor en el tipo forestal Alerce (sesgo = -103,5 ton C/ha), mostrando una tendencia al aumento al ordenar los tipos forestales según biomasa observada promedio. Es reconocido por varios autores que el “backscatter” de SAR en las bandas C y L presentan saturación luego de ciertos niveles de biomasa (Joshi *et al.*, 2017). La variabilidad de la estimación de biomasa aérea en base a las observaciones SAR debe ser analizada independientemente para cada tipo forestal, dadas sus diferencias estructurales y las relaciones de estas con la biomasa

(Woodhouse *et al.*, 2012), como demostraron Joshi *et al* (2017), al evaluar esta variabilidad entre bosques de coníferas y latifoliadas. Al visualizar la Figura 13, se percibe que los colores azul y naranja se presentan a lo largo de toda el área de estudio. No se observa un patrón geográfico claro (por ejemplo, latitudinal o de elevación), lo que sugiere que el sesgo del producto puede darse por su algoritmo y calibración, más que por una variable geográfica específica.

En términos de correlación, las más débiles correspondieron a los tipos forestales Siempreverde, Coihue – Raulí - Tepa y Alerce ($r = 0,02$; $0,14$ y $0,12$). Se demostró en un estudio, que existe nula o débil correlación entre el backscatter y el volumen total aéreo en bosques de alta densidad de volumen (Joshi *et al.*, 2017). Esto puede explicar las débiles correlaciones de los dos tipos forestales con mayor biomasa aérea que se trabajaron: Coihue – Raulí – Tepa y Alerce (promedio de $142,6$ y $231,0$ ton C/ha). Por otro lado, en bosques siempreverdes la baja correlación puede deberse a la densidad del dosel, la cual provoca que la señal regrese más débil al sensor (Mermoz *et al.*, 2014). Es posible que la correlación negativa del tipo forestal Ciprés de la Cordillera ($r = -0,35$) se deba a la poca cantidad de datos observados ($n = 11$). Por otro lado, según Joshi *et al* (2017), existe una relación entre la saturación del RADAR y la edad sucesional del bosque. Demostraron que es posible un efecto de cancelación a medida que los árboles envejecen, debido a los cambios estructurales que atraviesan. Por ejemplo, la señal del RADAR aumenta a medida que aumenta el DAP de los árboles, pero disminuye a medida que disminuye el número de árboles en el bosque. Esto podría explicar la mejor correlación de ESA en el tipo estructural Renoval comparada con el Adulto ($r = 0,30$ y $0,18$ respectivamente).

Los tipos forestal Esclerófilo y estructural Achaparrado alcanzaron el máximo error relativo del producto, sobrestimando hasta en ocho veces el valor observado. Dado que estas clasificaciones son las que presentan menor biomasa observada (de 24 a 56 ton C/ha en promedio), puede deducirse que los productos no diferenciaron entre estas clasificaciones y otras de mayor biomasa, resultando en sobrestimaciones. Respecto a esto, resulta llamativo el patrón de la Figura 13, donde la sobrestimación se presenta casi a lo largo de toda el área de estudio. Lo anterior hace sentido si se considera que el producto sobrestimó los tipos forestales Roble - Hualo, Roble - Raulí - Coihue, Esclerófilo y Siempreverde, los cuales representaron un 73% de las parcelas. No obstante, es posible que variables espaciales como la topografía (elevación, pendiente, exposición) también afecten la estimación del producto. Se ha demostrado en estudios anteriores que, en terrenos accidentados, la variabilidad topográfica puede causar errores en la señal RADAR si no se corrige adecuadamente (Atwood *et al.*, 2014; Sinha *et al.*, 2015). Incluso, el contenido de humedad presente en la vegetación o en la superficie afecta la señal backscatter, lo que influye en la estimación de biomasa (Sinha *et al.*, 2015).

b) GEDI

A modo general, GEDI obtuvo una mejor, pero aún débil correlación que ESA con los datos de inventarios ($r = 0,37$). Se sugiere que la moderada correlación general entre producto GEDI y los inventarios forestales del área de estudio, se deba en parte a la calidad de la información con la que se combinan las mediciones del LiDAR para estimar la biomasa aérea. Por ejemplo, las ondas simuladas que se utilizaron para validar en terreno los datos de

GEDI en Sudamérica, se encuentran en su totalidad en los bosques tropicales. Además, según el producto MCD12Q1 V006 de MODIS, utilizado para identificar los tipos funcionales de plantas, sólo se cuentan con validaciones en terreno para los bosques siempreverdes latifoliados pertenecientes a bosques tropicales (Kellner *et al.*, 2023), con dinámicas y estructuras diferentes a las que existen en los bosques templados sudamericanos.

Respecto al sesgo para cada tipo forestal, este mostró una tendencia a aumentar a medida que aumentó la biomasa aérea promedio estimada a partir de inventarios (Figura 10). Por otro lado, el tipo forestal que obtuvo mejor correlación fue Alerce ($r = 0,66$). Un estudio comparó la precisión de estimación de las alturas GEDI en bosques latifoliados y de coníferas, obteniendo en estos últimos mayor precisión, posiblemente atribuido a características estructurales como el tener un follaje más agrupado y una estructura vertical más homogénea que otros tipos de bosques, lo que facilita la penetración del láser en el dosel y permite mayor precisión en la medición (Pourrahmati *et al.*, 2023). Sin embargo, esto no ocurre de igual manera con el tipo forestal Araucaria ($r = 0,42$).

Respecto al tipo forestal Siempreverde ($r = 0,12$), la imprecisión del producto concuerda con un estudio realizado en bosques maduros siempreverdes de la Patagonia, en el cual se manifiesta una subestimación sistemática de la biomasa aérea al comparar GEDI L4B v2.1 con la biomasa observada en parcelas del IFN (Pascual *et al.*, 2024). Se argumentó que este comportamiento es esperado dado el nivel de agregación de GEDI L4B en base a GEDI L4A, siendo este último más preciso, pero con menor cantidad de observaciones debido a la órbita del satélite (Dubayah *et al.*, 2022). Sin embargo, este resultado discrepa de lo establecido según Asner y Mascaro (2014), quienes afirman que, en condiciones de bosques de dosel cerrado, la altura de copas registrada por LiDAR es capaz de explicar parte de la biomasa aérea.

Respecto a la distribución espacial de los errores relativos, el patrón es mayormente opuesto al de ESA. En la Figura 13 b) dominan predominantemente los colores naranja y amarillo, indicando una tendencia a la subestimación. Este sesgo se identifica más pronunciado en la zona sur del área de estudio (entre la Región de la Araucanía y Los Lagos), donde se concentran los tipos forestales de mayor biomasa (Alerce, Coihue – Raulí – Tepa, Lenga). Al mismo tiempo, se observaron focos de sobrestimación en la zona norte, donde la biomasa es menor y predominó el tipo forestal Esclerófilo, lo que coincide con el patrón reportado para ESA.

c) ForClim

A diferencia de los productos derivados de sensores remotos, el modelo de dinámica vegetal ForClim generó una predicción de biomasa considerablemente superior, logrando la correlación más alta con los inventarios ($r = 0,8$) y el sesgo promedio más bajo ($-3,39$ ton C/ha). Al analizar su rendimiento por tipo forestal, ForClim exhibió correlaciones consistentemente altas en la mayoría de los bosques, destacando en Siempreverde ($r = 0,85$), Roble – Raulí – Coihue ($r = 0,82$), Coihue – Raulí – Tepa ($r = 0,81$) y Lenga ($r = 0,80$). Este desempeño se atribuye a su naturaleza como modelo que simula la dinámica forestal a partir de principios ecológicos y está específicamente calibrado para las condiciones y especies de los bosques templados de Chile (Ortega, 2021; Sepúlveda, 2023; Vera, 2023).

Respecto al error relativo de ForClim, en las figuras 11 y 12 se identificó que las estimaciones son precisas, con mínima variación por tipo forestal y estructura, si se compara con los productos de sensores remotos. La Figura 13 c) declara errores moderados, que van principalmente de -50 a 50% en general, distribuyéndose de manera homogénea en el territorio. Los errores de -100 a -50%, parecen concentrarse hacia el norte del área de estudio, y los errores de 50 a >100% hacia el sur.

No obstante, se destaca que parte de este buen desempeño se debe a la metodología para emular los disturbios pasados en los bosques nativos y a la calibración para especies locales. El ajuste de los parámetros de disturbios del modelo se realiza utilizando la estructura, asumiendo una intensidad de corta dada en función del área basal observada de las parcelas de inventario. Dado lo anterior, es de esperar que la precisión del modelo sea superior a otras metodologías, sin embargo, el modelo no obtuvo una alta correlación en ciertos tipos forestales, ni tampoco fue homogénea en todos ellos, lo que revela sus propias limitaciones y fuentes de incertidumbre. La correlación más débil se observó en el tipo forestal Roble – Hualo ($r = 0,53$), un bosque históricamente sometido a un intenso manejo y degradación (Echeverría *et al.*, 2006). La dificultad para simular con precisión su biomasa puede atribuirse a la alta incertidumbre sobre la cronología e intensidad de este manejo histórico, información que corresponde a un supuesto en el modelo y es difícil de representar con exactitud. A esto, se le suma el efecto de los últimos grandes incendios que han afectado gran parte del bosque nativo, como los de los años 2017 y 2023 en la zona centro - sur del país.

Otras fuentes de error pueden provenir de vacíos en los datos de entrada, como la posible incertidumbre en bases de datos de suelos, o la falta de estaciones meteorológicas, lo cual obliga a utilizar estimaciones de condiciones de sitio en ciertas zonas con menor accesibilidad, por ejemplo. Se ha estudiado que el producto grillado de precipitación CR2MET v2, utilizado como entrada en ForClim, muestra subestimación en zonas de mayor elevación (Parra, 2021). Asimismo, aunque ForClim ha sido parametrizado para las especies más dominantes, la falta de datos para especies menos comunes, pero localmente importantes sigue siendo una limitante. Para mejorar las predicciones sobre los bosques chilenos es fundamental mejorar la recopilación y el acceso público a datos más precisos sobre el manejo forestal, la diversidad de especies, las características del suelo, la variación climática y la ecología de las especies nativas.

d) Otras consideraciones

El producto de GEDI L4B v2.1 se acompaña de una capa que entrega la incertidumbre (error estándar de la estimación) para cada píxel del producto, y es la resultante de la combinación de las incertidumbres asociadas a: la estimación de biomasa en el L4A, el muestreo del LiDAR propiamente tal, y la estimación utilizando los modelos de L4B (Dubayah *et al.*, 2023; Healey *et al.*, 2023). Por otro lado, la capa de incertidumbre del producto ESA es representada por la desviación estándar de la estimación de biomasa para cada píxel. Esta desviación estándar se calcula propagando los errores individuales de cada componente del modelo (errores referentes a la retrodispersión SAR, al modelo que relaciona la altura y la biomasa, y a la estimación de altura o datos LiDAR) (Santoro *et al.*, 2023). En la presente investigación, se optó por no utilizar este material debido a que se priorizó la no pérdida de información. Los resultados demostraron que fue posible evaluar la estimación de estos

productos bajo diferentes tipos forestales y estructuras, sin embargo, el número de observaciones no fue suficiente para poder analizar algunos de ellos. Es por esto por lo que, en futuros estudios, a menor escala y con mayor disponibilidad de inventarios forestales, se recomienda la utilización de estos insumos para poder obtener una mayor precisión del nivel de error de las estimaciones satelitales; aunque cabe recalcar que esto no mejorará la existencia de subestimación de biomasa generalizada en ambos casos, de acuerdo con los resultados de este estudio.

Por otro lado, es posible que ciertos errores observados en la estimación de biomasa de los productos se deban a la diferencia entre los años de observación respecto a los inventarios forestales registrados. Los tres productos utilizados entregaron una observación para el año 2021, sin embargo, los inventarios se distribuyeron entre el 2000 y el 2025. Pese a lo anterior, se considera que, dadas las características del bosque nativo de esta zona, las variaciones de 21 años no se consideran significativas en términos de productividad para este tipo de análisis y la escala observada.

Respecto al comportamiento de los errores en el espacio, el hallazgo de autocorrelación espacial positiva en los residuos ($\text{Moran } I > 0$) fue consistente con la naturaleza agrupada de los ecosistemas forestales. Las fuentes de variabilidad (como por ejemplo errores sistemáticos en la medición o el proceso de calibración de los productos) tienden a manifestarse de forma espacialmente agrupada. Dado que los bosques se estructuran en función de variables ambientales compartidas (estructurales y fisiológicas), cualquier deficiencia del modelo o de la medición será replicada en el grupo de individuos que comparten esas mismas características. El resultado esperable es el agrupamiento espacial de los errores, donde los residuos con magnitudes similares se concentran geográficamente. Se sugiere que futuros análisis utilicen pruebas, permutaciones o modelos espaciales para evaluar contrastes según tipo forestal o estructura.

Adicionalmente, el índice I de Moran significativamente más alto en los residuos de ESA (0,29) en comparación con GEDI (0,18) y ForClim (0,20) demuestra que la autocorrelación espacial positiva es más intensa en el primer producto. Esta diferencia sugiere que los errores de ESA están agrupados en el espacio de manera más sistémica y a mayor escala, lo que puede deberse a un sesgo inherente al algoritmo o sensor que no se corrige con el modelo, o a la omisión de una variable espacial como, por ejemplo, la topografía. Se interpreta que el rendimiento de ESA es el más comprometido por la dependencia espacial, por lo que se sugiere, que se realice una corrección mediante métodos que consideren la distribución y variables espaciales para validar las estimaciones.

Finalmente, se destaca que el ensamble de diferentes métodos conforme al avance de la tecnología (como la modelación de la dinámica vegetacional y la percepción remota) es considerado una herramienta con gran potencial para mejorar las estimaciones de biomasa en los bosques a grandes e incluso pequeñas escalas (Zhang *et al.*, 2025). Varios autores concuerdan en que la combinación de estas herramientas, junto con la integración de inventarios forestales, pueden mejorar sustancialmente la precisión de las estimaciones (Fassnacht *et al.*, 2021; Pascual *et al.*, 2024; Shugart *et al.*, 2015; Zhou *et al.*, 2025; Zhu *et al.*, 2020), lo que potencia la toma de decisiones, el manejo y monitoreo de los reservorios de carbono en los bosques.

CONCLUSIONES

La presente investigación encontró discrepancias de las diferentes estimaciones de biomasa aérea para los bosques en Chile, mediante el análisis de la distribución espacial de biomasa de los bosques entre las regiones del Maule y Los Lagos. Los resultados demostraron la existencia de diferencias sustanciales y sistemáticas entre las fuentes de información. Por un lado, los inventarios no fueron homogéneos; el Inventario Forestal Nacional, reportó consistentemente valores de biomasa inferiores a los de inventarios reportados por la comunidad científica, lo que sugirió una posible subrepresentación de los bosques de alta biomasa en el muestreo. Por otro lado, los productos satelitales globales mostraron limitaciones presentando saturación a cierto nivel de biomasa, lo cual pudo suplir Forclim, no sin presentar sus propias limitaciones en ciertos tipos forestales. En términos espaciales, al analizar los inventarios forestales se identificó que los reportados por la comunidad científica presentaron menor cantidad de unidades muestrales, ubicadas de manera concentrada a lo largo del área de estudio, al contrario que las del IFN. También, se comprobó que el método y las herramientas utilizadas para la creación de los productos de ESA, GEDI y ForClim, condujeron a que se diferencien de lo observado de manera única para cada uno de ellos.

Este estudio demostró que la cuantificación de la biomasa forestal en Chile es dependiente de la metodología empleada, y que la utilización de una única fuente de datos puede conducir a sesgos o imprecisiones significativas en los balances nacionales de carbono. Es posible que el camino hacia estimaciones más robustas resida en la calibración de los productos que no obtuvieron buen desempeño, utilizando los datos de inventario existentes, para luego generar un ensamble de las distintas tecnologías. De esta manera, se aprovecharían atributos como la cobertura espacial de los sensores remotos y la precisión de modelos de simulación dinámicas de vegetación como ForClim. Esta investigación reveló brechas y desafíos para el futuro en temas como el estudio de alometrías en especies poco investigadas, la calibración de productos de sensores remotos que estimen biomasa aérea en Chile, y la afinidad entre inventarios forestales; los cuales son de relevancia para ser subsanados y así mejorar la estimación de la contribución de los bosques nativos al balance nacional de carbono.

BIBLIOGRAFÍA

- Asner, G. P. (2009). Tropical forest carbon assessment: Integrating satellite and airborne mapping approaches. *Environmental Research Letters*, 4(3), 034009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/3/034009>
- Asner, G. P., & Mascaro, J. (2014). Mapping tropical forest carbon: Calibrating plot estimates to a simple LiDAR metric. *Remote Sensing of Environment*, 140, 614–624. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.09.023>
- Asner, G. P., Mascaro, J., Anderson, C., Knapp, D. E., Martin, R. E., Kennedy-Bowdoin, T., Van Breugel, M., Davies, S., Hall, J. S., Muller-Landau, H. C., Potvin, C., Sousa, W., Wright, J., & Bermingham, E. (2013). High-fidelity national carbon mapping for resource management and REDD+. *Carbon Balance and Management*, 8(1), 7. <https://doi.org/10.1186/1750-0680-8-7>
- Atwood, D. K., Andersen, H.-E., Matthijs, B., & Holec, F. (2014). Impact of Topographic Correction on Estimation of Aboveground Boreal Biomass Using Multi-temporal, L-Band Backscatter. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(8), 3262–3273. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2013.2289936>
- 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>
- Boisier, J. P. (2023). *CR2MET: A high-resolution precipitation and temperature dataset for the period 1960-2021 in continental Chile*. (Versión v2.5) [Dataset]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/ZENODO.7529682>
- Botkin, D. B., Janak, J. F., & Wallis, J. R. (1972). Some Ecological Consequences of a Computer Model of Forest Growth. *The Journal of Ecology*, 60(3), 849. <https://doi.org/10.2307/2258570>
- Bugmann, H. (1996). A Simplified Forest Model to Study Species Composition Along Climate Gradients. *Ecological Society of America*, 77(7), 2055–2074. <https://doi.org/10.2307/2265700>
- Bugmann, H. K. M., & Solomon, A. M. (1995). The Use of a European Forest Model in North America: A Study of Ecosystem Response to Climate Gradients. *Journal of Biogeography*, 22(2/3), 477. <https://doi.org/10.2307/2845944>
- Bugmann, H. K. M., & Solomon, A. M. (2000). EXPLAINING FOREST COMPOSITION AND BIOMASS ACROSS MULTIPLE BIOGEOGRAPHICAL REGIONS. *Ecological Applications*, 10(1), 95–114. [https://doi.org/10.1890/1051-0761\(2000\)010%255B0095:EFCABA%255D2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1051-0761(2000)010%255B0095:EFCABA%255D2.0.CO;2)
- Bugmann, H., & Seidl, R. (2022). The evolution, complexity and diversity of models of long-term forest dynamics. *Journal of Ecology*, 110(10), 2288–2307. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13989>
- Celemín, J. P. (2009). *Autocorrelación espacial e indicadores locales de asociación espacial. Importancia, estructura y aplicación*.

- Chave, J., Condit, R., Aguilar, S., Hernandez, A., Lao, S., & Perez, R. (2004). Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 359(1443), 409–420. <https://doi.org/10.1098/rstb.2003.1425>
- CONAF. (2024). *Catastro de los Recursos Vegetacionales y Uso de la Tierra de Chile*. Departamento de Monitoreo, CONAF. https://sit.conaf.cl/varios/ESTADISTICAS_CONAF_2024_FINAL.pdf
- Corti, D. (1996). *Caracterización y crecimiento de un renoval de roble (Nothofagus obliqua (Mirb) Oerst.), lingue (Persea lingue (R. et P.) Ness ex Kopp) y radial (Lomatia hirsuta (Lam.) Diels ex Macbr.), en la comuna de Loncoche, IX Región*. [Tesis de Grado.]. Universidad Austral de Chile.
- Cruz, P., Bascuñan, A., Velozo, J., & Rodriguez, M. (2015). Funciones alométricas de contenido de carbono para quillay, peumo, espino y litre. *Bosque (Valdivia)*, 36(3), 375–381. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000300005>
- Cubillos, V. (1988). Funciones de volumen y factor de forma para renovales de coigüe. *Ciencia e Investigación Forestal*, 2(2), 062–068.
- Dinamarca, D. I., Galleguillos, M., Seguel, O., & Faúndez Urbina, C. (2023). CLSoilMaps: A national soil gridded database of physical and hydraulic soil properties for Chile. *Scientific Data*, 10(1), 630. <https://doi.org/10.1038/s41597-023-02536-x>
- Drake, F., Emanuelli Avilés, P., & Acuña C., E. (2003). *Compendio de funciones dendrométricas del bosque nativo* (1a. ed). Conaf y Sociedad Alemana de Cooperación Técnica (GTZ).
- Dubayah, R. O., Armston, J., Healey, S. P., Yang, Z., Patterson, P. L., Saarela, S., Stahl, G., Duncanson, L., Kellner, J. R., Bruening, J. M., & Pascual, A. (2023). *Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) GEDI L4B Gridded Aboveground Biomass Density, Version 2.1* (Versión 2.1, p. 0 MB) [COG]. ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/2299>
- Dubayah, R. O., Armston, J., Kellner, J. R., Duncanson, L., Healey, S. P., Patterson, P. L., Hancock, S., Tang, H., Bruening, J. M., Hofton, M. A., Blair, J. B., & Luthcke, S. B. (2022). *Global Ecosystem Dynamics Investigation GEDI L4A Footprint Level Aboveground Biomass Density, Version 2.1* (Versión 2.1, p. 0 MB) [HDF5]. ORNL Distributed Active Archive Center. <https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/2056>
- Dube, F., & Stolpe, N. (2016). SOM and Biomass C Stocks in Degraded and Undisturbed Andean and Coastal Nothofagus Forests of Southwestern South America. *Forests*, 7(12), 320. <https://doi.org/10.3390/f7120320>
- Echeverría, C., Coomes, D., Salas, J., Rey-Benayas, J. M., Lara, A., & Newton, A. (2006). Rapid deforestation and fragmentation of Chilean Temperate Forests. *Biological Conservation*, 130(4), 481–494. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2006.01.017>
- Elkin, C., Gutiérrez, A. G., Leuzinger, S., Manusch, C., Temperli, C., Rasche, L., & Bugmann, H. (2013). A 2 °C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps. *Global Change Biology*, 19(6), 1827–1840. <https://doi.org/10.1111/gcb.12156>
- Espic, M. (2007). *Evaluación de la producción de biomasa aérea y del rendimiento en aceite esencial y boldina, de Boldo (Peumus boldus Mol.) en la Comuna de Papudo, V Región*. [Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal]. Universidad de Chile.

- FAO. (2020). *Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020*. FAO ; <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/ca8753es>
- FAO. (2024). *The State of the World's Forests 2024*. FAO ; <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cd1211en>
- Fassnacht, F. E., Poblete-Olivares, J., Rivero, L., Lopatin, J., Ceballos-Comisso, A., & Galleguillos, M. (2021). Using Sentinel-2 and canopy height models to derive a landscape-level biomass map covering multiple vegetation types. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 94, 102236. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102236>
- Fischer, R., Bohn, F., Dantas De Paula, M., Dislich, C., Groeneveld, J., Gutiérrez, A. G., Kazmierczak, M., Knapp, N., Lehmann, S., Paulick, S., Pütz, S., Rödig, E., Taubert, F., Köhler, P., & Huth, A. (2016). Lessons learned from applying a forest gap model to understand ecosystem and carbon dynamics of complex tropical forests. *Ecological Modelling*, 326, 124–133. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2015.11.018>
- Garfias, R., Castillo, M., Vita, A., Bown, H., & Zúñiga, P. (2019). *Determinación de funciones alométricas de biomasa para las principales especies del bosque esclerófilo de las Regiones de O'Higgins y del Maule* (Fondo de Investigación Bosque Nativo No. 005/2016; p. 193). Facultad de Ciencias Forestales y de la Conservación de la Naturaleza, Universidad de Chile.
- Gayoso, J. (2013). *Funciones alométricas para la determinación de existencias de carbono forestal para la especie Araucaria araucana (Molina) K. Koch (Araucaria)*. <https://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/147593>
- Gayoso, J., & Guerra, J. (2005). Contenido de carbono en la biomasa aérea de bosques nativos en Chile. *Bosque (Valdivia)*, 26(2). <https://doi.org/10.4067/S0717-92002005000200005>
- Gayoso, J., Guerra, J., & Alarcón, D. (2002). *Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas* (p. 157) [Proyecto FONDEF D98I1076]. Universidad Austral De Chile.
- González, M. E., Lara, A., Urrutia-Jalabert, R., Bustos-Salazar, A., Ruiz-Gómez, C., & Aravena, J. C. (2022). Carbon stocks across different environments, disturbance regimes, and stand age in Fitzroya cupressoides forests, the longest-lived species of the southern hemisphere. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 960429. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2022.960429>
- Griscom, B. W., Adams, J., Ellis, P. W., Houghton, R. A., Lomax, G., Miteva, D. A., Schlesinger, W. H., Shoch, D., Siikamäki, J. V., Smith, P., Woodbury, P., Zganjar, C., Blackman, A., Campari, J., Conant, R. T., Delgado, C., Elias, P., Gopalakrishna, T., Hamsik, M. R., ... Fargione, J. (2017). Natural climate solutions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 114(44), 11645–11650. <https://doi.org/10.1073/pnas.1710465114>
- Gunckel, G. (1980). *Estudio de desarrollo y rendimiento de renovales de canelo en el sector de Corral, cordillera de la costa – provincia de Valdivia*. [Tesis de Grado]. Universidad Austral de Chile,.
- Gutiérrez, A. G., Snell, R. S., & Bugmann, H. (2016). Using a dynamic forest model to predict tree species distributions. *Global Ecology and Biogeography*, 25(3), 347–358. <https://doi.org/10.1111/geb.12421>

- Healey, S. P., Patterson, P. L., & Armston, J. (2023). *Algorithm Theoretical Basis Document (ATBD) for GEDI Level-4B (L4B) Gridded Aboveground Biomass Density v 2.0*.
- Hernández, J., Corvalán, P., Emery, X., Pea, K., & Donoso, S. (2012). Geostatistical Estimation of Biomass Stock in Chilean Native Forests and Plantations. En L. Fatoyinbo (Ed.), *Remote Sensing of Biomass—Principles and Applications*. InTech. <https://doi.org/10.5772/20037>
- Huber, N., Bugmann, H., & Lafond, V. (2020). Capturing ecological processes in dynamic forest models: Why there is no silver bullet to cope with complexity. *Ecosphere*, 11(5), e03109. <https://doi.org/10.1002/ecs2.3109>
- Jayaraman, K. (1999). *A Statistical Manual for Forestry Research*. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS REGIONAL OFFICE FOR ASIA AND THE PACIFIC.
- Joshi, N., Mitchard, E. T. A., Brolly, M., Schumacher, J., Fernández-Landa, A., Johannsen, V. K., Marchamalo, M., & Fensholt, R. (2017). Understanding ‘saturation’ of radar signals over forests. *Scientific Reports*, 7(1), 3505. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-03469-3>
- Kellner, J. R., Armston, J., & Duncanson, L. (2023). Algorithm Theoretical Basis Document for GEDI Footprint Aboveground Biomass Density. *Earth and Space Science*, 10(4), e2022EA002516. <https://doi.org/10.1029/2022EA002516>
- Lara, A., Amoroso, M., Bannister, J., Donoso, C., González, M., Vargas-Gaete, R., Smith-Ramírez, C., Arellano, G., & Gutierrez, A. (2014). Sucesión y Dinámica de Bosques Templados en Chile. En *Ecología Forestal. Bases para el Manejo Sustentable y Conservación de los Bosques Nativos de Chile* (pp. 323–410).
- Lorenz, K., & Lal, R. (2010). *Carbon Sequestration in Forest Ecosystems*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-3266-9>
- Lu, D., Chen, Q., Wang, G., Liu, L., Li, G., & Moran, E. (2016). A survey of remote sensing-based aboveground biomass estimation methods in forest ecosystems. *International Journal of Digital Earth*, 9(1), 63–105. <https://doi.org/10.1080/17538947.2014.990526>
- Mac Donald, D. (2005). *Biomasa aérea en una plantación de Austrocedrus chilensis de 20 años ubicada en Valdivia* [Memoria para optar al Título de Ingeniero Forestal]. Universidad Austral de Chile.
- Martin, M., Bahamóndez, C., Quiroz, I., Peña, O., & Barrientos, M. (2009). *Inventario de los Ecosistemas Forestales—Manual de Operaciones en Terreno*. INFOR. <https://metadatos.mma.gob.cl/sinia/L1050MAR2009.pdf>
- Mermoz, S., Rejou-Mechain, M., Villard, L., Le Toan, T., Rossi, V., & Gourlet-Fleury, S. (2014). Biomass of dense forests related to L-band SAR backscatter? *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 1037–1040. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2014.6946605>
- Milla, F., Emanuelli Avilés, P., Sartori Ruilova, A., & Emanuelli Avilés, J. (2013). *Compendio de funciones alométricas para la estimación de la biomasa de especies forestales en Chile: Elemento clave para el desarrollo de la estrategia de bosques y cambio climático* (ENBCC). <http://bibliotecadigital.ciren.cl/handle/20.500.13082/26280>

- Mina, M., Bugmann, H., Cordonnier, T., Irauschek, F., Klopčič, M., Pardos, M., & Cailleret, M. (2017). Future ecosystem services from European mountain forests under climate change. *Journal of Applied Ecology*, 54(2), 389–401. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12772>
- Ministerio de Agricultura. (2024). *CATASTRO Y ACTUALIZACIÓN DE LOS RECURSOS VEGETACIONALES y USO DE LA TIERRA (CONAF)*. Planificación Catastral | IDE minagri. <https://ide.minagri.gob.cl/geoweb/2019/11/22/planificacion-catastral/>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2024). *DOCUMENTO DEL INVENTARIO NACIONAL DE GASES DE EFECTO INVERNADERO SERIE 1990-2022* (p. 513) [Informe técnico]. Sistema Nacional de Inventarios de Gases de Efecto Invernadero.
- Moreira-Munoz, A. (2011). *Plant Geography of Chile* (Vol. 5). Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-90-481-8748-5>
- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C. G., Da Fonseca, G. A. B., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853–858. <https://doi.org/10.1038/35002501>
- Nandy, S., Ghosh, S., Kushwaha, S. P. S., & Senthil Kumar, A. (2019). Remote Sensing-Based Forest Biomass Assessment in Northwest Himalayan Landscape. En R. R. Navalgund, A. S. Kumar, & S. Nandy (Eds.), *Remote Sensing of Northwest Himalayan Ecosystems* (pp. 285–311). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2128-3_13
- Naulin, P. (2002). *Estimación de la biomasa en un renoval de canelo (Drimys winteri J. R. et Foster) en la comuna de Ancud, décima región* [Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal]. Universidad de Chile.
- Nowosad, J. (2024). Comparison of spatial patterns in continuous raster data for overlapping regions using R [Jakub Nowosad]. *Thinking in spatial patterns*. <https://jakubnowosad.com/posts/2024-10-20-spatcomp-bp2/#spatial-context>
- Olate, M. (2019). *Estimación de biomasa aérea de Nothofagus dombeyi (Mirb.) Oerst. En un renoval de Nothofagus con potencial productivo, en la comuna de Curacautín, Región de La Araucanía* [Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal]. Universidad de Chile.
- Olguín, S. (2009). *Estimación de reservorios de carbono asociados a vegetación arbórea, influencia de variables bióticas y abióticas en una formación vegetal típica del bosque siempreverde, Inío, Chiloé* [Memoria para optar al Título Profesional de: Ingeniera en Recursos Naturales Renovables]. Universidad de Chile.
- Ortega, J. I. (2021). *EVALUACIÓN DE UN MODELO DE DINÁMICA VEGETACIONAL PARA LOS BOSQUES TEMPLADOS LLUVIOSOS DE LA ECORREGIÓN VALDIVIANA* [Memoria para optar al Título Profesional de: Ingeniero en Recursos Naturales Renovable]. Universidad de Chile.
- Parra, N. (2021). *EVALUACIÓN DE DISTINTOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE PRECIPITACIÓN Y SU EFECTO EN LA RECONSTRUCCIÓN DE CAUDALES EN CUENCAS Y SUBCUENCAS PLUVIALES DE LA CORDILLERA DE LA COSTA TRIBUTARIAS AL RÍO CAUQUENES* [Memoria para optar al Título Profesional de: Ingeniero en Recursos Naturales Renovables]. Universidad de Chile.
- Pascual, A., Grau-Neira, A., Morales-Santana, E., Cereceda-Espinoza, F., Pérez-Quezada, J., Cárdenas Martínez, A., & Fuentes-Castillo, T. (2024). Old-growth mapping in

- Patagonia's evergreen forests must integrate GEDI data to overcome NFI data limitations and to effectively support biodiversity conservation. *Forest Ecology and Management*, 568, 122059. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.122059>
- Pati, P. K., Kaushik, P., Khan, M. L., & Khare, P. K. (2022). Allometric equations for biomass and carbon stock estimation of small diameter woody species from tropical dry deciduous forests: Support to REDD+. *Trees, Forests and People*, 9, 100289. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2022.100289>
- Perez-Quezada, J. F., Olguín, S., Fuentes, J. P., & Galleguillos, M. (2015). Tree carbon stock in evergreen forests of Chiloé, Chile. *Bosque (Valdivia)*, 36(1), 27–39. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002015000100004>
- Picard, N., Saint-André, L., & Henry, M. (2012). *Manual for building tree volume and biomass allometric equations: From field measurement to prediction*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) [u.a.].
- Poblete, J. (2018). *ANÁLISIS DE LOS CAMBIOS ESTRUCTURALES DE LOS BOSQUES NATIVOS DE LA COSTA DE LA REGIÓN DE LOS RÍOS ATRIBUIBLES A LA DEGRADACIÓN* [Memoria para optar al Título Profesional de: Ingeniera en Recursos Naturales Renovables]. Universidad de Chile.
- Pourrahmati, M., Baghdadi, N., & Fayad, I. (2023). Comparison of GEDI LiDAR Data Capability for Forest Canopy Height Estimation over Broadleaf and Needleleaf Forests. *Remote Sensing*, 15(6), 1522. <https://doi.org/10.3390/rs15061522>
- Rasche, L., Fahse, L., Zingg, A., & Bugmann, H. (2012). Enhancing gap model accuracy by modeling dynamic height growth and dynamic maximum tree height. *Ecological Modelling*, 232, 133–143. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2012.03.004>
- Roxburgh, S. H., Paul, K. I., Clifford, D., England, J. R., & Raison, R. J. (2015). Guidelines for constructing allometric models for the prediction of woody biomass: How many individuals to harvest? *Ecosphere*, 6(3), 1–27. <https://doi.org/10.1890/ES14-00251.1>
- Sagardía, R., Bahamóndez V., C., Avila Campos, A., Reyes Gallardo, R., Sanhueza Venegas, R., & Vergara Asenjo, G. (2024). *Los recursos forestales en Chile 2024. Inventario forestal nacional de bosques nativos y actualización de plantaciones forestales* (Informe técnico No. 227; p. 202). INFOR. <https://bibliotecadigital.infor.cl/>
- Salas, C., Gregoire, T. G., Craven, D. J., & Gilabert, H. (2016). Modelación del crecimiento de bosques: Estado del arte. *Bosque (Valdivia)*, 37(1), 03–12. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002016000100001>
- Santelices, R. (1989). Funciones de volumen, factores de forma y modelos de crecimiento diametral para rodales de lingue y mañío. *Ciencia & Investigación Forestal*, 3(2), 1–19. <https://doi.org/10.52904/0718-4646.1989.116>
- Santoro, M., & Cartus, O. (2025). *ESA Biomass Climate Change Initiative (Biomass_cci): Global datasets of forest above-ground biomass for the years 2007, 2010, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021 and 2022, v6.0* (p. 11441 Files, 698903278165 B) [Application/xml]. NERC EDS Centre for Environmental Data Analysis. <https://doi.org/10.5285/95913FFB6467447CA72C4E9D8CF30501>
- Santoro, M., Cartus, O., Miettinen, J., Antropov, O., Araza, A., & Herold, M. (2023, mayo 15). *Understanding the uncertainty of forest aboveground biomass maps derived from satellite observations*. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9562>

- Schlegel, B. (2001). *Estimación de la biomasa y carbono en bosques del tipo forestal siempreverde*. 13p.
- Sepúlveda, F. (2023). *SIMULACIÓN DE LA DINAMICA DE LOS BOSQUES DE ARAUCARIA- NOTHOFAGUS DE LOS ANDES DE LA REGIÓN DE LA ARAUCANÍA, CHILE*. [Memoria para optar al Título Profesional de: Ingeniera en Recursos Naturales Renovables]. Universidad de Chile.
- Shao, G., Bugmann, H., & Yan, X. (2001). A Comparative Analysis of the Structure and Behavior of Three Gap Models at Sites in Northeastern China. *Climatic Change*, 51(3–4), 389–413. <https://doi.org/10.1023/A:1012550300768>
- Shugart, H. H., Asner, G. P., Fischer, R., Huth, A., Knapp, N., Le Toan, T., & Shuman, J. K. (2015). Computer and remote-sensing infrastructure to enhance large-scale testing of individual-based forest models. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 13(9), 503–511. <https://doi.org/10.1890/140327>
- SIMEF. (2024). *Sistema Integrado de Monitoreo de Ecosistemas Forestales Nativos (SIMEF)* [Dataset]. <https://simef.minagri.gob.cl>
- Sinha, S., Jeganathan, C., Sharma, L. K., & Nathawat, M. S. (2015). A review of radar remote sensing for biomass estimation. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 12(5), 1779–1792. <https://doi.org/10.1007/s13762-015-0750-0>
- Snell, R. S., Huth, A., Nabel, J. E. M. S., Bocedi, G., Travis, J. M. J., Gravel, D., Bugmann, H., Gutiérrez, A. G., Hickler, T., Higgins, S. I., Reineking, B., Scherstjanoi, M., Zurbruggen, N., & Lischke, H. (2014). Using dynamic vegetation models to simulate plant range shifts. *Ecography*, 37(12), 1184–1197. <https://doi.org/10.1111/ecog.00580>
- Soto, J. (2014). *Estimación de la biomasa aérea en renoales de coigüe (Nothofagus dombeyi (Mirb) Oerst)—Raulí (Nothofagus alpina (Poepp. Et Endl.) Oerst.) en Lautaro, IX región* [Memoria para optar al Título Profesional de Ingeniero Forestal]. Universidad de Chile.
- Tian, L., Wu, X., Tao, Y., Li, M., Qian, C., Liao, L., & Fu, W. (2023). Review of Remote Sensing-Based Methods for Forest Aboveground Biomass Estimation: Progress, Challenges, and Prospects. *Forests*, 14(6), 1086. <https://doi.org/10.3390/f14061086>
- Urrutia-Jalabert, R., Malhi, Y., & Lara, A. (2015). The Oldest, Slowest Rainforests in the World? Massive Biomass and Slow Carbon Dynamics of Fitzroya cupressoides Temperate Forests in Southern Chile. *PLOS ONE*, 10(9), e0137569. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0137569>
- Vera, C. P. (2023). *ESCENARIOS FUTUROS DE DIVERSIDAD ARBÓREA EN LA CUENCA DEL RÍO CAUQUENES* [Tesis para optar al Título Profesional de Ingeniera en Recursos Naturales Renovables y al Grado de Magíster en Gestión Territorial de Recursos Naturales]. Universidad de Chile.
- Watt, A. S. (1947). Pattern and Process in the Plant Community. *The Journal of Ecology*, 35(1/2), 1. <https://doi.org/10.2307/2256497>
- White, P. S., & Pickett, S. T. A. (1985). Natural Disturbance and Patch Dynamics: An Introduction. En *The Ecology of Natural Disturbance and Patch Dynamics* (pp. 3–13). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-050495-7.50006-5>

- Woodhouse, I. H., Mitchard, E. T. A., Brolly, M., Maniatis, D., & Ryan, C. M. (2012). Radar backscatter is not a “direct measure” of forest biomass. *Nature Climate Change*, 2(8), 556–557. <https://doi.org/10.1038/nclimate1601>
- Yang, H., Ciais, P., Santoro, M., Huang, Y., Li, W., Wang, Y., Bastos, A., Goll, D., Arneth, A., Anthoni, P., Arora, V. K., Friedlingstein, P., Harverd, V., Joetzjer, E., Kautz, M., Lienert, S., Nabel, J. E. M. S., O’Sullivan, M., Sitch, S., ... Zhu, D. (2020). Comparison of forest above-ground biomass from dynamic global vegetation models with spatially explicit remotely sensed observation-based estimates. *Global Change Biology*, 26(7), 3997–4012. <https://doi.org/10.1111/gcb.15117>
- Zhang, Y., Zou, Y., & Wang, Y. (2025). Remote Sensing of Forest Above-Ground Biomass Dynamics: A Review. *Forests*, 16(5), 821. <https://doi.org/10.3390/f16050821>
- Zhou, H., Liu, W., De Boeck, H. J., Ma, Y., & Zhang, Z. (2025). Improving Total Carbon Storage Estimation Using Multi-Source Remote Sensing. *Forests*, 16(3), 453. <https://doi.org/10.3390/f16030453>
- Zhu, Y., Feng, Z., Lu, J., & Liu, J. (2020). Estimation of Forest Biomass in Beijing (China) Using Multisource Remote Sensing and Forest Inventory Data. *Forests*, 11(2), 163. <https://doi.org/10.3390/f11020163>

APÉNDICES

Apéndice 1. Metodología para la estimación de biomasa aérea para el inventario de Bosque Ciencia

El inventario de Bosque Ciencia fue un insumo utilizado en la presente memoria. Debido a que no tuvo estimaciones de biomasa aérea, se calculó la biomasa para todas las parcelas presentes en esta base de datos, durante la presente memoria. Para esto, se buscaron ecuaciones alométricas (Cuadro 4) que estimaran la biomasa aérea o el volumen a partir del DAP, para la mayor cantidad de especies presentes en el inventario. Esto, dado que la mayoría de los individuos no registraron altura.

Cuadro 4. Ecuaciones alométricas y densidad básica de la madera para especies pertenecientes al inventario de Bosque Ciencia. B = biomasa aérea (kg), V = volumen total aéreo (m³), DAP = Diámetro a 1,3 m (cm). Hubo especies que no presentaron ecuaciones alométricas, pero sí densidad básica, sin embargo, no se presentan en este cuadro debido a que no fue posible utilizar este dato de manera aislada para la estimación de biomasa.

Especie	Ecuación alométrica DAP - biomasa aérea	Ecuación alométrica DAP - volumen aéreo	Referencia de las ecuaciones	Rango diamétrico de validez (cm)	Densidad básica (kg/m ³)	Referencia a densidad básica
<i>Amomyrtus luma</i>	$B = \exp(2,15765 + 0,16039 * DAP)$		Gayoso <i>et al.</i> , 2002	5 - 22	764,5	Gayoso <i>et al.</i> 2002
<i>Araucaria araucana</i>	$B = EXP(-2,25492 + 2,3987 * LN(DAP))$		(Gayoso, 2013)	10 – 124,6	483,0	Pérez, 1983
<i>Austrocedrus chilensis</i>	$B = 0,136 * DAP^2 + 0,629 * DAP$		(Mac Donald, 2005)	3,0 - 14,3	424,0	Pérez, 1983
<i>Cryptocaria alba</i>	$B = 0,136 * DAP^{2,352}$		(Cruz <i>et al.</i> , 2015)	5-37	460,1	Gayoso <i>et al.</i> 2002
<i>Drimys winteri</i>	$B = -5,73651 + EXP(3,25257 + 0,07943 * DAP)$		Gayoso <i>et al.</i> 2002	6 - 52	431,2	Gayoso <i>et al.</i> 2002

Especie	Ecuación alométrica DAP - biomasa aérea	Ecuación alométrica DAP – volumen aéreo	Referencia de las ecuaciones	Rango diamétric o de validez (cm)	Densida d básica (kg/m ³)	Referenci a densidad básica
		V $= -0,03588$ $+ 0,00075$ $* DAP^2$	(Gunckel, 1980)	10- 60		
<i>Eucryphia cordifolia</i>	LNB $= -1,472 + 2,223$ $* LN(DAP)$		(Schlegel, 2001)	5-95	546,9	Gayoso <i>et al.</i> 2002
<i>Gevuina avellana</i>	B $= EXP(-1,84774$ $+ 2,23221$ $* LN(DAP)$		Gayoso <i>et al.</i> 2002	6-27	506,7	Gayoso <i>et al.</i> 2002
<i>Laureliopsis philippiana</i>	B $= EXP(-0,88067$ $+ 2,00017$ $* LN(DAP))$		Gayoso <i>et al.</i> 2002	6 - 74	438,2	Gayoso <i>et al.</i> 2002
<i>Lomatia hirsuta</i>	V $= 0,007019$ $+ 0,00002229$ $* DAP^3$		(Corti, 1996)	10-45	474,4	Gayoso <i>et al.</i> 2002
	B $= -43,875$ $+ 7,155 * DAP$		(Gayoso <i>et al.</i> , 2002)	4,8 – 25,4		
<i>Nothofagus antarctica</i>	B $= -53,873$ $+ 7,373 * DAP$		Gyenge <i>et al.</i> 2009	6,8 – 21,1	464,0	Pérez, 1983
<i>Nothofagus dombeyi</i>	B $= -577,329$ $+ EXP(6,11716$ $+ 0,02752 * DAP)$	V $= (-0,05476487$ $+ 0,00073611$ $* DAP^2)$	Gayoso <i>et al.</i> 2002 Drake <i>et al.</i> , 2003	6-105 10 – 60	504,2	Gayoso <i>et al.</i> 2002

Especie	Ecuación alométrica DAP - biomasa aérea	Ecuación alométrica DAP – volumen aéreo	Referencia de las ecuaciones	Rango diamétric o de validez (cm)	Densida d básica (kg/m ³)	Referenci a densidad básica
<i>Nothofagus glauca</i>	B $= (-2,05 + 2,26$ $* LN(DAP))$ $+ (-5,14 + 2,92$ $* LN(DAP))$ $+ (-2,76 + 1,2$ $* LN(DAP))$ $+ (-2,86 + 1,81$ $* LN(DAP))$		Drake <i>et</i> <i>al.</i> , 2003	10 – 40		
<i>Nothofagus alpina</i>	B $= -441,440$ $+ EXP(5,84538$ $+ 0,03211 * DAP)$	V $= 0,03655$ $+ 0,00002$ $* DAP^3$	Gayoso <i>et</i> <i>al.</i> 2002 INFOR 1991	5- 66 10 – 60	507,6	Gayoso <i>et</i> <i>al.</i> 2002
<i>Nothofagus nitida</i>	$Ln B$ $= -1,017$ $+ 2,125$ $* LN(DAP)$		Schlegel, 2001	5 – 47	537,8	(Gayoso <i>et al.</i> , 2002)
<i>Nothofagus obliqua</i>	B $= -27,8703$ $+ 0,59063$ $* DAP^2$	V $= -0,03695309$ $+ 0,00075407$ $* DAP^2$	Gayoso <i>et</i> <i>al.</i> 2002 (Cubillos, 1988)	5 -72 10-60	461,4	Gayoso <i>et</i> <i>al.</i> 2002
<i>Nothofagus pumilio</i>	B $= EXP (2,1142$ $* LN (-0,7287$ $+ 0,595 * DAP))$		(Gayoso, 2013)	11 – 138		
<i>Peumus boldus</i>	LNB $= 5,669 + 1,9159$ $* LN(DAP)$		(Espic, 2007)	1 - 25,5		
<i>Persea lingue</i>		V $= 0,003155$ $+ 0,000475$ $* DAP^2$	(Santelices , 1989)	10 – 50	464,3	Gayoso <i>et</i> <i>al.</i> 2002

Especie	Ecuación alométrica DAP - biomasa aérea	Ecuación alométrica DAP - volumen aéreo	Referencia de las ecuaciones	Rango diamétrico o de validez (cm)	Densidad básica (kg/m ³)	Referencia a densidad básica
<i>Podocarpus nubigena</i>	B $= EXP(-0,49120 + 1,90639 * LN(DAP))$		Gayoso <i>et al.</i> 2002	5 - 55	513,2	Gayoso <i>et al.</i> 2002
		V $= 0,09988 + 0,000019 * DAP^3$	Santelices 1989	10-60		
<i>Quillaja saponaria</i>	B $= 0,1502 * DAP^{2,251}$		Cruz <i>et al.</i> , 2015	5-41		
<i>Saxegothea conspicua</i>	B $= EXP(-0,2277 + 1,77378 * LN(DAP))$		Gayoso <i>et al.</i> 2002	7 -54	547,0	Gayoso <i>et al.</i> 2002
<i>Weinmannia trichosperma</i>	B $= -170,119 + EXP(5,23563 + 0,03876 * DAP)$		Gayoso <i>et al.</i> 2002	6 – 91	540,8	Gayoso <i>et al.</i> 2002

Algunas especies contaron con más de una ecuación y otras con ninguna, por lo cual, se siguió la siguiente lógica de prioridad para elegir y asignar ecuaciones a cada individuo:

1. Se calculó la biomasa para los individuos que tuvieron ecuaciones alométricas específicas de biomasa, y que su DAP estuvo dentro del rango válido definido¹.
2. Se calculó la biomasa para los individuos que tuvieron ecuaciones alométricas específicas de volumen, con su DAP dentro del rango válido definido, y con la densidad de la madera para la especie (Ecuación 5).

$$B = V \cdot \rho$$

Ecuación 5

Donde, B es la biomasa aérea (kg), V es el volumen total aéreo (m³) y ρ es la densidad básica de la madera de la especie (kg/m³).

3. Se clasificaron los individuos que no tuvieron una ecuación específica para su especie y que fueran pertenecientes a los tipos forestales Roble – Raulí – Coihue o Siempreverde. De esta manera, se les pudo aplicar una ecuación generalizada por tipo forestal (Cuadro 5; Gayoso *et al.*, 2002). Esto también aplicó para los individuos que

¹ Se calculó la biomasa aérea de las especies *Luma apiculata* y *Amomyrtus meli* con la ecuación de *Amomyrtus luma* (Gayoso *et al.*, 2002). Esto, debido a que las especies mencionadas no contaron con una ecuación específica.

no clasificaron dentro de los pasos 1 y 2 presentados, debido al DAP fuera del rango definido en la ecuación.

4. Se calculó la biomasa aérea para los individuos restantes, que tuvieron ecuaciones alométricas específicas de biomasa o volumen, sin importar el rango definido de DAP.
5. Los individuos restantes carecieron de ecuaciones alométricas específicas para estimar su biomasa. Se modeló la relación DAP – biomasa aérea de todos los individuos anteriormente calculados según la forma:

$$\log(B) = \log(a) + b \cdot \log(DAP)$$

Ecuación 6

Donde B = biomasa aérea (kg), DAP = diámetro a 1,3 m de altura (cm) y a, b = parámetros del modelo.

Esta ecuación generalizada se aplicó a los individuos restantes del inventario.

Cuadro 5. Ecuaciones alométricas por tipo forestal según Gayoso *et al.* (2002). B = Biomasa aérea (kg), DAP = Diámetro del fuste a 1,3 m (cm).

Tipo forestal	Ecuación alométrica DAP - biomasa aérea	Especies	Rango diamétrico de validez (cm)
Roble – Raulí – Coihue	$B = 0,2977 \cdot DAP^{2,1521}$	<i>Aextoxicon punctatum</i> , <i>Gevuina avellana</i> , <i>Laurelia sempervirens</i> , <i>Nothofagus alpina</i> , <i>Nothofagus obliqua</i> , <i>Persea lingue</i> .	5 – 72
Siempreverde	$LN(B) = -1,835 + 2,291 \cdot LN(DAP)$	<i>Amomyrtus luma</i> , <i>Dasyphyllum diacanthoides</i> , <i>Drimys winteri</i> , <i>Eucryphia cordifolia</i> , <i>Gevuina avellana</i> , <i>Laureliopsis philippiana</i> , <i>Nothofagus dombeyi</i> , <i>Nothofagus nítida</i> , <i>Podocarpus nubigena</i> , <i>Saxegothea conspicua</i> , <i>Weinmannia trichosperma</i> .	5 – 104

Apéndice 2. Resultados de la estimación de biomasa aérea para el inventario de Bosque Ciencia

Se contó con un total de 7.801 árboles, contenidos en 98 parcelas del laboratorio Bosque Ciencia. Para las 58 especies presentes en el inventario, hubo 22 que tuvieron una ecuación alométrica específica del tipo DAP – biomasa aérea o DAP – volumen total aéreo descrita. No se encontraron en la bibliografía revisada, ecuaciones que cumplieran con lo anterior para las 36 especies restantes.

Fue posible calcular la biomasa del 80,4% de los árboles inicialmente (mediante ecuaciones descritas para la especie o generalizadas por tipo forestal), quedando el 19,5% restante a calcular con la función general (Ecuación 7; Figura 14).

$$B = EXP(-1,18 + 2,11 \cdot LN(DAP))$$

Ecuación 7

Donde, B = biomasa aérea (kg) y DAP = diámetro a la altura del pecho (cm). $R^2 = 0,9671$, $p < 2,2 \cdot 10^{-16}$.

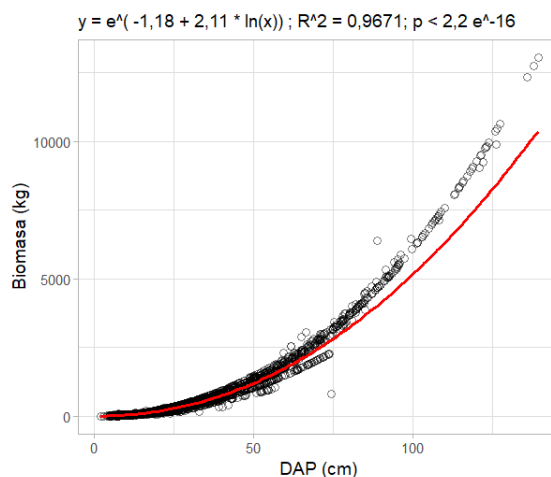


Figura 14. Relación entre el diámetro del fuste a 1,3 m de altura (DAP [cm]) y la biomasa aérea (kg) para el 80,4% de los árboles del inventario de Bosque Ciencia ($n = 6.273$). Esta relación (línea roja) se utilizó para estimar la biomasa aérea del porcentaje restante de los individuos, no presentes en la figura.

La biomasa de un 59% de los árboles fue calculada usando ecuaciones alométricas específicas para las especies y dentro del rango válido de DAP (con un DAP máximo de 99,5 cm); mientras que, para un 3,5% se aplicaron estas ecuaciones fuera de los rangos válidos de DAP (ver Apéndice 3). Las ecuaciones generalizadas por tipo forestal se utilizaron dentro de los rangos validados para un 14,4% de los árboles, y fuera de los rangos válidos para un 0,9%.

En la Figura 15 se muestra la relación entre el DAP y la biomasa aérea de las parcelas mencionadas, diferenciando si esta se calculó mediante ecuaciones alométricas preexistentes (en azul), o mediante la función generalizada creada en el presente estudio. Cabe mencionar que el rango de DAP del segundo grupo estuvo dentro del rango del primero (4-137 cm y 1-139,4 cm respectivamente).

Pese a que el árbol con mayor cantidad de biomasa tuvo 6,5 ton C, el 50% de los árboles tuvo entre 0,01 y 0,1 ton C, ubicándose la mediana en 0,02 ton C. Para el caso del DAP, el 50% de los árboles tuvo entre 7,4 y 21,8 cm, con una mediana de 11,7 cm. Por último, se observa que la mayoría de los datos se ubicó dentro de la misma curva, alejándose de ella principalmente un ejemplar de *Austrocedrus chilensis* (Ciprés de la Cordillera) y uno de *Nothofagus glauca* (Hualo). Ambos presentaron DAP de 74,4 y 89 cm, y biomasa de 0,4 y 3,1 ton C respectivamente.

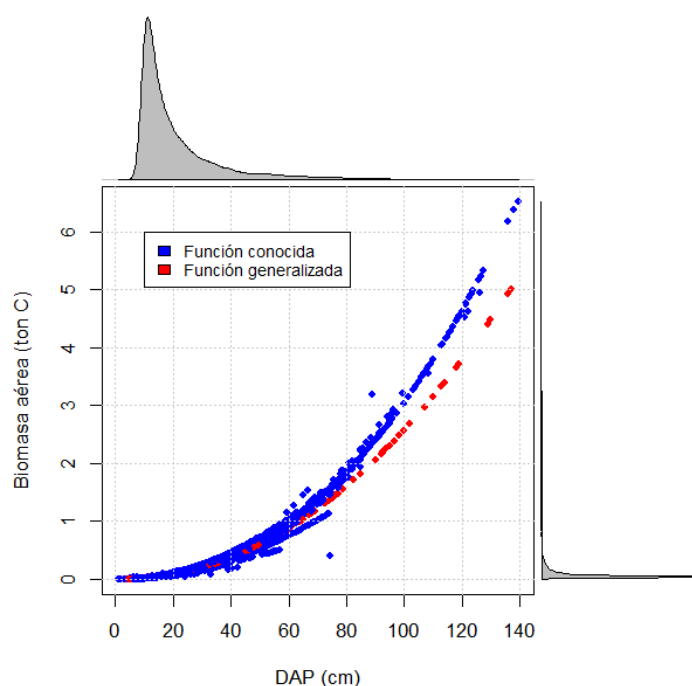


Figura 15. Relación entre el diámetro del fuste a 1,3 m de altura (DAP [cm]) y la biomasa aérea (ton C) estimada para los 7.801 árboles del inventario de Bosque Ciencia. En azul se aprecian los individuos con ecuaciones alométricas preexistentes ($n = 6.273$) y en rojo los que utilizaron la ecuación generalizada ($n = 1.528$).

Apéndice 3. Biomasa aérea promedio (ton C/ha) y número total de estimaciones a partir de inventarios forestales, según tipos forestales del Catastro de Recursos Vegetacionales. Se diferencian Inventario Forestal Nacional (IFN) e inventarios registrados por la comunidad científica. Se excluyeron los tipos forestales que no tuvieron suficientes observaciones ($n \geq 10$).

	IFN		Inventarios reportados por la comunidad científica		Todos los inventarios	
Tipo forestal	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n
Alerce	94,8	13	304,8	24	231,0	37
Araucaria	92,4	39	231,3	7	113,6	46
Ciprés de la Cordillera	66,3	10	166,5	1	75,4	11
Lenga	104,9	34	232,7	8	129,2	42
Roble – Hualo	42,1	34	79,3	90	69,1	124
Roble – raulí – Coihue	84,3	292	142,6	97	98,8	389

	IFN		Inventarios reportados por la comunidad científica		Todos los inventarios	
Tipo forestal	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n
Coihue – Raulí – Tepa	123,3	113	298,4	14	142,6	127
Esclerófilo	14,3	26	40,2	16	24,2	42
Siempreverde	84,2	193	240,2	31	105,8	224

Apéndice 4. Biomasa aérea promedio (ton C/ha) y número total de estimaciones a partir de inventarios forestales, según estructura del Catastro de Recursos Vegetacionales. Se diferencian Inventario Forestal Nacional (IFN) e inventarios registrados por la comunidad científica.

	IFN		Inventarios reportados por la comunidad científica		Todos los inventarios	
Estructura	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n	$\bar{x}$ biomasa (ton C/ha)	n
Achaparrado	36,8	8	86,8	5	56,0	13
Adulto	119,1	218	309,3	52	155,7	270
Adulto – Renoval	92,6	95	178,6	28	112,2	123
Renoval	71,5	440	110,0	208	83,9	648

Apéndice 5. Métricas de comparación entre estimaciones de biomasa aérea presentes en inventarios forestales y productos grillados, diferenciando tipos forestales según el Catastro de Recursos Vegetacionales. Incluye Coeficiente de correlación de Pearson (r), Raíz Cuadrada Media de las Diferencias (RMSD; ton C/ha), Sesgo (ton C/ha) y Error Medio absoluto Porcentual (MAPE; %). Se consideraron solamente los tipos forestales que tuvieron un mínimo de 10 observaciones para el producto.

	Tipo Forestal	Alerce	Araucaria	Ciprés de la Cordillera	Lenga	Roble – Hualo	Roble – Raulí – Coihue	Coihue – Raulí – Tepa	Esclerófilo	Siempreverde
ESA	r	0,12	0,31	-0,35	0,54	0,35	0,24	0,14	0,39	0,02
	RMSD (ton C/ha)	202,0	80,0	64,3	86,3	40,2	75,0	106,3	50,0	93,6
	MAPE (%)	64,4	116,1	67,2	53,5	69,2	106,3	65,2	287,5	256,3
	Sesgo (ton C/ha)	-103,4	-20,8	-14,7	-39,5	11,2	4,7	-27,8	17,7	-14,5
	n	27	46	11	42	116	378	126	42	216
GEDI	r	0,66	0,42	-0,34	0,51	0,15	0,27	0,39	0,20	0,14
	RMSD (ton C/ha)	178,5	71,4	59,0	94,2	46,8	66,2	81,2	40,7	92,9
	MAPE (%)	55,3	144,9	43,5	53,2	74,8	76,5	48,0	249,9	159,9
	Sesgo (ton C/ha)	-119,9	-26,4	-19,6	-50,3	-17,7	-28,2	-38,8	10,5	-48,0
	n	20	43	10	35	65	300	116	36	196
ForClim	r	0,76	0,59	-	0,80	0,53	0,82	0,81	-	0,85
	RMSD (ton C/ha)	61,1	55,2	-	56,9	37,8	36,5	44,0	-	36,8

Tipo Forestal	Alerce	Araucaria	Ciprés de la Cordillera	Lenga	Roble – Hualo	Roble – Raulí – Coihue	Coihue – Raulí – Tepa	Esclerófilo	Siempreverde
MAPE (%)	57,1	58,0	-	36,2	52,1	32,5	35,5	-	45,3
Sesgo (ton C/ha)	35,1	-15,3	-	-17,2	-33,1	-10,9	4,8	-	13,9
n	12	40	9	31	36	263	114	7	167

Apéndice 6. Registro de DAP para los árboles de todas las parcelas del inventario de Bosque Ciencia

Especie	DAP mínimo (cm)	DAP máximo (cm)	DAP promedio (cm)	n
<i>Aextoxicon punctatum</i>	2	121	22,87	481
<i>Amomyrtus luma</i>	3,1	136	11,38	1128
<i>Amomyrtus meli</i>	5	55,9	12,00	134
<i>Araucaria araucana</i>	5	91,5	33,73	69
<i>Aristotelia chilensis</i>	5	16	9,55	17
<i>Austrocedrus chilensis</i>	7,6	74,4	25,00	8
<i>Azara sp.</i>	5,3	5,3	5,30	1
<i>Azara lanceolata</i>	5	8,9	6,07	9
<i>Azara petiolaris</i>	5,2	13,6	7,12	13
<i>Azara serrata</i>	5,9	5,9	5,90	1
<i>Caldcluvia paniculata</i>	5	77	15,36	76
<i>Citronella mucronata</i>	7,9	8,5	8,20	2
<i>Cryptocarya alba</i>	4,9	62,9	11,19	128
<i>Crinodendron hookerianum</i>	4,9	9,2	6,59	8
<i>Dasyphyllum diacanthoides</i>	5	139,4	21,01	114
<i>Desfontainia fulgens</i>	7,7	11	8,80	3
<i>Drimys winteri</i>	5	76,5	17,41	484
<i>Embothrium coccineum</i>	12,6	30,9	20,72	5
<i>Escallonia myrtoidea</i>	5,1	7,1	5,93	4
<i>Eucryphia cordifolia</i>	5	126,6	20,41	293
<i>Fitzroya cupressoides</i>	7,7	137	47,23	130
<i>Fuchsia magellanica</i>	6,3	11,5	8,57	3
<i>Gaultheria mucronata</i>	5,7	8,5	6,58	4
<i>Gevuina avellana</i>	5	53	13,41	307
<i>Hydrangea serratifolia</i>	5	20,5	9,71	58
<i>Laureliopsis philippiana</i>	5	121,5	22,45	987
<i>Laurelia sempervirens</i>	6,2	126,2	24,41	30
<i>Lithrea caustica</i>	5	7,7	5,96	12
<i>Lomatia dentata</i>	5	95	11,46	53
<i>Lomatia ferruginea</i>	5	34,1	11,14	94
<i>Lomatia hirsuta</i>	5	20,5	10,39	8
<i>Luma apiculata</i>	5,1	83	18,81	46
<i>Maytenus magellanica</i>	7,5	19	13,92	5
<i>Myrceugenia chrysocarpa</i>	5	11,5	7,49	15
<i>Myrceugenia ovata</i>	4	43,9	10,45	153
<i>Myrceugenia parvifolia</i>	5,2	8,5	7,07	3
<i>Myrceugenia planipes</i>	5	51	10,99	360

Especie	DAP mínimo (cm)	DAP máximo (cm)	DAP promedio (cm)	n
<i>Myrceugenia sp.</i>	5,2	37	17,77	32
<i>Nothofagus antarctica</i>	6,4	13,5	8,56	5
<i>Nothofagus dombeyi</i>	5,3	108,4	39,16	197
<i>Nothofagus glauca</i>	5	89	16,51	336
<i>Nothofagus alpina</i>	5,8	75,3	38,12	21
<i>Nothofagus nitida</i>	5	118,5	35,67	54
<i>Nothofagus obliqua</i>	4,8	108,3	21,26	491
<i>Nothofagus pumilio</i>	1	85	17,81	378
<i>Ovidia pillo – pillo</i>	7,8	28,9	14,11	27
<i>Peumus boldus</i>	6,7	40,4	17,96	8
<i>Persea lingue</i>	5	122,2	24,56	32
<i>Podocarpus nubigenus</i>	5	96	18,91	254
<i>Podocarpus salignus</i>	5	54,9	16,43	40
<i>Quillaja saponaria</i>	5,7	29,5	12,35	13
<i>Raukua laetevirens</i>	5,3	46,2	15,94	17
<i>Rhaphithamnus spinosus</i>	5	24	9,30	144
<i>Saxegothaea conspicua</i>	5	138	34,19	257
<i>Schinus patagonicus</i>	6,8	6,8	6,80	1
<i>Sophora microphylla</i>	7,3	30,5	15,13	8
<i>Tepualia stipularis</i>	5	75	13,33	210
<i>Weinmannia trichosperma</i>	6,3	114,6	43,98	11