



UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FORESTALES
INGENIERIA FORESTAL

**ESTIMACIÓN DEL STOCK DE CARBONO AEREO Y DE SUELO EN
PLANTACIONES DE *Pinus radiata* D. Don CRECIENDO EN ARENAS
VOLCANICAS EN LA REGIÓN DEL BIO-BÍO**

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de
Concepción para otorgar al título profesional de Ingeniero Forestal

POR: Martín Eduardo Jiménez Jiménez

Profesor Guía: Rafael Alejandro Rubilar Pons

Mayo, 2024

Concepción, Chile

© 2024, Martín Eduardo Jiménez Jiménez

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento

ESTIMACIÓN DEL STOCK DE CARBONO AEREO Y DE SUELO EN
PLANTACIONES DE *Pinus radiata* D. Don. CRECIENDO EN ARENAS
VOLCANICAS EN LA REGIÓN DEL BIOBÍO

Profesor Guía



Rafael Alejandro Rubilar Pons

Profesor Titular

Ingeniero Forestal, PhD

Profesora Co-Guía



Rosa María Alzamora Mallea

Profesora Asociada

Ingeniera Forestal, PhD

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre, Sandra, y a mi hermano, Javier, por todo su apoyo, sacrificio y sabiduría durante toda mi vida y en esta travesía académica.

AGRADECIMIENTOS

Quiero expresar mis más sinceros agradecimientos a mis profesores guía. Al Sr. Rafael Rubilar, por su constante ayuda y dedicación durante todo el proceso de realización de esta tesis. Su orientación experta y apoyo incondicional fueron fundamentales para completar este trabajo de investigación. A la Sra. Rosa Alzamora, por su amabilidad y dedicación por sus alumnos. Sus críticas constructivas y orientación han sido pilares durante mi crecimiento académico, y estoy verdaderamente agradecido por su compromiso y guía a lo largo de esta travesía académica.

A mi hermano Javier, por siempre ayudarme y estar presente cuando más lo necesitaba. A mis amigos de la banda, por su constante aliento y consejos.

Finalmente, quiero agradecer a mis compañeros de carrera Víctor, Dariel, Sebastián y Johan, gracias por su compañía y camaradería durante todos estos años.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	x
ABSTRACT	xi
I. INTRODUCCIÓN	1
II. METODOLOGÍA.....	5
2.1. Descripción del área de estudio	5
2.2. Antecedentes de los predios evaluados	6
2.3. Levantamiento de datos en terreno	10
2.3.1. Establecimiento de parcelas.....	11
2.3.2. Medición de árboles.....	11
2.3.3. Muestreo de piso forestal.....	12
2.3.4. Muestreo de suelo mineral	13
2.4. Preparación de muestras en laboratorio para cuantificación de carbono.....	15
2.4.1. Análisis de las muestras de hojarasca	15
2.4.2. Análisis de las muestras de barreno	17
2.5. Modelación del stock de carbono.....	19
2.5.1. Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea	19
2.5.2. Estimación de carbono en biomasa total	21
2.5.3. Estimación de carbono en suelo mineral	23
2.5.4. Estimación de carbono en el piso forestal	24
2.5.5. Análisis de varianza	25
III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	26
3.1. Resultados de stock de carbono en biomasa aérea y radicular.....	26
3.2. Resultados de stock de carbono en piso forestal	28
3.3. Resultados de stock de carbono en suelo mineral.....	30
3.4. Resultados de carbono total por predio	34
3.5. Regresiones entre componentes de carbono y volumen precosecha	36
3.5.1. Relación entre carbono de biomasa aérea y volumen por parcela	36
3.5.2. Relación entre carbono de biomasa radicular y volumen por parcela	37

3.5.3	Relación entre carbono de biomasa total y volumen por parcela.....	39
3.5.4	Relación entre carbono de piso forestal y volumen por parcela	42
3.5.5	Relación entre carbono suelo mineral y volumen por parcela	44
3.5.6	Relación entre carbono total y volumen por parcela.....	47
IV.	CONCLUSIONES	49
V.	BIBLIOGRAFÍA.....	50
VI.	APÉNDICE	53

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Localización de los predios evaluados.....	6
Tabla 2. Características dasométricas de las plantaciones de <i>P. radiata</i> , en los predios evaluados.	10
Tabla 3. Ecuaciones alométricas de estimación de biomasa de <i>P. radiata</i>	20
Tabla 4. Stock de Carbono en Mg ha^{-1} del piso forestal contenido en hojarasca y residuo a nivel de predio.	28
Tabla 5. Carbono en suelo mineral a distintas profundidades, en cada uno de los predios.	32
Tabla 6. Descripción física de los suelos de los predios evaluados	33

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Figura 1. Diseño de muestreo de las tres parcelas dentro de un sitio (A) y los puntos de muestreo de barreno y hojarasca dentro de la parcela (B).	12
Figura 2. Esquema resumen de muestreo de suelo mineral a distintas profundidades para la obtención de las muestras compuestas.	14
Figura 3. Resumen de metodología para muestreo de piso forestal, desde la recolección en los puntos de muestreo hasta la preparación de las muestras para la cuantificación del carbono.	16
Figura 4. Resumen de preparación de muestras de hojarasca y suelo mineral para análisis de carbono, desde el secado hasta la cuantificación del carbono.	18
Figura 5. Representación gráfica del contenido de carbono en la biomasa aérea y biomasa radicular a nivel de predio.....	26
Figura 6. Representación gráfica del contenido de carbono del piso forestal evaluado en hojarasca y residuo a nivel de predio.	29
Figura 7. Representación gráfica del contenido carbono del suelo mineral en Mg ha^{-1} evaluado a distintas profundidades a nivel de predio.	31
Figura 8. Representación gráfica del carbono total en Mg ha^{-1} contenido en los distintos componentes a nivel de predio. El carbono en la biomasa total, el carbono en el piso forestal y el carbono en el suelo mineral.....	34
Figura 9. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono de la biomasa aérea en Mg ha^{-1}	36
Figura 10. Regresión entre carbono de biomasa radicular en Mg ha^{-1} y el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados.	38
Figura 11. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono de la biomasa total en Mg ha^{-1}	40
Figura 12. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono de piso forestal en Mg ha^{-1}	42
Figura 13. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono del suelo mineral en Mg ha^{-1} . (izquierda: considerando al predio Brasil, derecha: excluyendo al predio Brasil).	45
Figura 14. Contenido de carbono total y porcentajes de carbono almacenado por componente a nivel de predio. El carbono en la biomasa aérea, el carbono en la biomasa radicular, el carbono en el piso forestal y el carbono en el suelo mineral.	46
Figura 15. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono total en Mg ha^{-1}	48

RESUMEN

Este trabajo evaluó el almacenamiento de carbono (C) en un gradiente de productividad de plantaciones de *Pinus radiata* en edad de cosecha en suelos de arenas volcánicas pertenecientes a la empresa Forestal Mininco S.A. en la Región del Biobío. La recolección de datos consideró las propiedades del suelo forestal, y el análisis de los niveles de carbono almacenado en diferentes componentes del suelo mineral, la hojarasca, el piso forestal y la biomasa aérea. Se observó que la concentración más alta de carbono se sitúa en la capa superficial del suelo (0-20 cm). Seguida por la capa intermedia (20-40 cm) y la capa más profunda (40-100 cm).

Para el carbono en el suelo destacó la fuerte correlación positiva ($R^2 = 0.98$) entre el volumen de precosecha y el contenido de carbono en la biomasa total. Una correlación débil ($R^2 = 0.13$) fue observada entre el volumen de precosecha y el carbono en el piso forestal, sugiriendo que otros factores, además de la productividad en volumen, son cruciales para el almacenamiento de carbono en el suelo orgánico. La fuerte correlación encontrada entre el carbono total y el volumen de precosecha, con un $R^2 = 0.97$, indica que a medida que incrementa el volumen también lo hace el carbono total proporcionalmente.

ABSTRACT

This research evaluated carbon (C) storage within *Pinus radiata* plantations situated on volcanic sand soils owned by Forestal Mininco S.A. in the Biobío Region, Chile. The study involved comprehensive data collection, focusing on various variables such as forest soil properties, and analyzing carbon levels stored in different components, including mineral soil, litter (forest floor), and aerial biomass. Results revealed that the highest concentration of carbon was predominantly situated in the top layer of the soil (0-20 cm), followed by the middle layer (20-40 cm), and the deepest layer (40-100 cm).

For soil carbon, the strong positive correlation ($R^2 = 0.98$) between pre-harvest volume and carbon content in total biomass was noteworthy. A weak correlation ($R^2 = 0.13$) was observed between pre-harvest volume and forest floor carbon, suggesting that factors other than volume productivity are crucial for organic soil carbon storage. The strong correlation found between total carbon and pre-harvest volume, with an $R^2 = 0.97$, indicates that as volume increases so does total carbon proportionally.

I. INTRODUCCIÓN

El cambio climático se define como la modificación del clima atribuida directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera, mediante la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Estos gases, presentes en la atmósfera, contribuyen al efecto invernadero, fenómeno donde la radiación térmica emitida por la atmósfera es absorbida por los gases presentes y posteriormente irradiada en todas las direcciones (CEPSA, 2015).

La emisión continua de estos gases conlleva al aumento de la tropósfera, ya que absorben una mayor cantidad de radiación de la que es devuelta por la superficie terrestre (CEPSA, 2015), teniendo un impacto significativo en el medio ambiente y en la productividad del sector silvoagropecuario (Keller *et al.*, 2018).

El dióxido de carbono (CO₂) figura como uno de los principales gases de efecto invernadero a nivel mundial, representando el 44% de las emisiones globales anuales registradas en 2014. Dichas emisiones se originan mayormente en el sector energético, atribuibles en gran parte a la generación de energía mediante la combustión de petróleo (35%) y gas (20%) (CEPSA, 2015). Ante este escenario, Chile ha implementado un plan estratégico que contempla las plantaciones forestales como una herramienta clave para la mitigación del cambio climático.

Los bosques desempeñan un papel fundamental al capturar carbono (C) atmosférico durante su crecimiento, almacenándolo en los componentes estructurales de la planta y en el suelo. Las plantaciones forestales, al trabajar con especies de crecimiento rápido, se destacan como un beneficio ambiental y económico significativo para mitigar el cambio climático, actuando como captadoras netas de carbono (Prado, 2015). Este enfoque se alinea con el Protocolo de Kioto, un acuerdo internacional vinculado a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), que destaca la forestación y reforestación como medidas efectivas para mitigar el cambio climático (Prado, 2015).

En el contexto chileno, *Pinus radiata* D. Don emerge como la especie más utilizada en estrategias de mitigación, gracias a su destacada capacidad de acumulación de carbono, liberación de oxígeno y adaptabilidad a diversas condiciones ambientales. En este sentido, las plantaciones forestales de rápido crecimiento, como las de pino radiata, han desempeñado un papel esencial en la compensación de emisiones de otros sectores económicos (CONAF, 2019).

Ciertamente, diversos estudios se han llevado a cabo para evaluar la productividad de *Pinus radiata* en función de las tasas de carbono almacenado en la biomasa aérea, incluyendo análisis detallados del carbono presente en el suelo. Algunos ejemplos notables de investigaciones previas que abordan esta

relación incluyen el trabajo de Cargua *et al.* (2014), que cuantificaron el carbono orgánico en biomasa aérea, raicillas y suelo, así como el estudio llevado a cabo por Alarcon y Apaza (2023), quienes realizaron estimaciones de carbono aéreo fijado en plantaciones de *Pinus radiata* en Perú, demostrando mediante ecuaciones alométricas que en plantaciones de pino de 17 años, la biomasa aérea y el carbono almacenado es mayor que en otras especies como *Eucalyptus globulus*, debido principalmente a las diferentes tasas de crecimiento. Estos ensayos proporcionan valiosas perspectivas sobre la dinámica de la biomasa aérea y su contribución al almacenamiento de carbono en plantaciones de pino radiata, enriqueciendo nuestra comprensión de estos ecosistemas forestales.

En Chile se han hecho varios ensayos e investigaciones respecto al carbono acumulado en suelo, entre ellos el efecto de plantaciones dendroenergéticas, determinando los cambios en los niveles de carbono fijado en el suelo tras los efectos post cosecha, determinando que, a pesar de la variabilidad de los índices de carbono, la posterior incorporación de este al suelo logra compensar esas pérdidas luego de dos meses de haber establecido otra plantación (Esquivel *et al.*, 2013).

Sin embargo, no se han realizado análisis o estimaciones de carbono en base a la productividad de plantaciones de *P. radiata* establecidas en suelos arenosos. Esto es de alto interés, ya que una importante significativa de los suelos chilenos

son arenas de origen volcánico, específicamente en la Región del Biobío. Así mismo, no se han realizado estimaciones del carbono subterráneo que consideren el carbono en el suelo y en la hojarasca, y proporcionando cifras del carbono almacenado no solo en los árboles, sino en raíces y en el suelo.

En este marco de antecedentes, el presente estudio tuvo como objetivo general modelar la relación entre la productividad del rodal y el carbono almacenado en la biomasa total, piso forestal y suelo mineral de plantaciones de *Pinus radiata* en edad de cosecha, considerando un gradiente de productividad en suelos de arenas de origen volcánico en la Región del Biobío, Chile. Los objetivos específicos se centran en cuantificar los contenidos de carbono aéreo y subterráneo almacenados a nivel de rodal para plantaciones de *Pinus radiata* en edad de cosecha, así como desarrollar modelos que vinculen el almacenamiento de carbono con distintos niveles de productividad de *Pinus radiata* en suelos arenosos de la Región del Biobío.

II. METODOLOGÍA

2.1. Descripción del área de estudio

El estudio se realizó en bosques ubicados en la Región del Biobío, zona centro sur de Chile, seleccionando cinco predios con rodales de *P. radiata* de la empresa Forestal Mininco S.A. El levantamiento de datos se centró en la medición de diversas variables, incluyendo propiedades del suelo forestal, y el análisis de los niveles de carbono almacenado en diferentes componentes, como el suelo mineral, la hojarasca o piso forestal y la biomasa aérea.

Los análisis se llevaron a cabo simultáneamente en cinco localidades distintas de la región, abarcando diversas comunas como Yumbel, Laja, Cabrero y Los Ángeles (Apéndice 1). Este enfoque estratégico garantizó una cobertura representativa de la diversidad edáfica presente en la región de estudio.

2.2. Antecedentes de los predios evaluados

Los antecedentes específicos de los predios evaluados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Localización de los predios evaluados

Comuna	Fundo	Latitud	Longitud	Año Plantación
Yumbel	Misque	37° 07' 54" S	72° 29' 22" O	2000
Cabrero	La Reforma	37° 02' 14" S	72° 20' 26" O	2000
Laja	Brasil	37° 37' 15" S	72° 58' 22" O	2001
	Coyanco	37° 15' 46" S	72° 44' 55" O	1999
Los Ángeles	Los Cuartos	37° 20' 25" S	72° 21' 18" O	1999

Una descripción específica de las características físicas de cada uno de los predios evaluados se presenta a continuación:

El Predio Misque está en la comuna de Yumbel, en el secano interior, caracterizado por la ausencia de fuentes de agua para riego y la dependencia de la precipitación. Los suelos del predio son arenosos, pertenecientes a la serie arenales, y la topografía varía de ondulada a quebrada, con superficies rocosas, principalmente en áreas planas y valles. Estos suelos son derivados de arenas volcánicas de origen basáltico y tienen un uso de suelo predominante de 46,1% forestal y 39,6% agrícola (Centro de Información de Recursos Naturales, 2018). La superficie total del predio es de 51,9 hectáreas, y los rodales están sujetos a

un manejo intensivo, que incluye dos podas y un raleo comercial. En términos climáticos, el predio se ubica en un clima cálido y templado, con precipitaciones concentradas en invierno, alcanzando un promedio de 256 mm, mientras que los meses más secos registran unos 25 mm de lluvia. Las temperaturas extremas oscilan entre una máxima absoluta de 20,3°C y una mínima absoluta de 8,2°C. Aunque las temperaturas mínimas no son tan severas, se prolongan hasta los meses de agosto y septiembre (Municipalidad de Yumbel, 2017).

El predio La Reforma se encuentra en la comuna de Cabrero, en el valle central, caracterizado por la escasez de agua y sequías periódicas, al no contar con suficientes fuentes de agua para riego y depender completamente del agua de lluvia. Los suelos del predio son arenosos, pertenecientes a la serie Cabrero, y presentan una topografía plana con pendientes inferiores al 2% de inclinación, de forma cóncava, con mal drenaje en condiciones de humedad excesiva y escurrimiento superficial lento. Estos suelos son derivados de arenas volcánicas de origen andesítico y basáltico, con texturas gruesas y moderadamente gruesas. El uso predominante del suelo es forestal (Kühne *et al.*, 2005), con una superficie de 36,6 hectáreas, y los rodales están sujetos a un manejo intensivo, que incluye tres podas y un raleo comercial. En términos climáticos, el predio experimenta un clima mediterráneo templado, con precipitaciones concentradas en invierno, alcanzando un promedio de 217 mm, mientras que los meses más secos registran unos 16 mm de lluvia. La temperatura máxima absoluta es de 28,8°C y

la mínima absoluta es de 3,5°C en el mes de julio (Plan de Desarrollo Comunal de Cabrero 2014-2017).

El Predio Brasil se encuentra en la comuna de Laja, en el secano interior, caracterizado por la ausencia de fuentes de agua para riego y la dependencia del agua de lluvia. Los suelos del predio son arenosos, pertenecientes a la serie arenales, y presentan una topografía ondulada a casi plana dentro de la formación correspondiente al “abanico aluvial del Laja”, con un drenaje dominante que va desde bueno a excesivo, y una permeabilidad rápida a muy rápida, con escurrimiento superficial lento. Estos suelos derivan de compuestos de depósitos fluviales como gravas, arenas y limos, resultado de procesos geomorfológicos de carácter fluvio-volcánico (Martínez, 2004). La superficie total del predio es de 20 hectáreas, y los rodales existentes han sido sometidos a un manejo intensivo, que incluye tres podas y un raleo comercial. En cuanto al clima, el predio experimenta un clima cálido y templado, con lluvias concentradas en invierno, alcanzando un promedio de 220 mm en el mes de julio y 16,5 mm en los meses secos de verano, con una temperatura mínima de 4,7°C y una máxima de 31°C (Municipalidad de Laja, 2014).

El Predio Coyanco se encuentra en la comuna de Laja, en el secano interior, caracterizado por la falta de fuentes de agua para riego y la dependencia del agua de lluvia. Los suelos del predio son arenosos, pertenecientes a la serie

arenales, y presentan una topografía plana a casi plana dentro de la formación correspondiente al "abanico aluvial del Laja", con un drenaje dominante que va desde bueno a excesivo, y una permeabilidad rápida a muy rápida, con escurrimiento superficial lento. Estos suelos derivan de arenas volcánicas de color negro, de origen andesítico y basáltico, con texturas gruesas a moderadamente gruesas (Martínez, 2004). La superficie de Coyanco es 13,1 hectáreas, y todos sus rodales tienen manejo intensivo, que incluye tres podas y un raleo comercial. En cuanto al clima, el predio experimenta un clima cálido y templado, con lluvias invernales que alcanzan un promedio de 220 mm en el mes de julio y 16,5 mm en los meses secos del verano, con una temperatura mínima de 4,7°C y una máxima de 31°C (Municipalidad de Laja, 2014).

El Predio Los Cuartos se ubica en la comuna de Los Ángeles, en el Valle central, caracterizado por la falta de fuentes de agua para riego y la dependencia del agua de lluvia. Los suelos del predio son arenosos, pertenecientes a la serie Coreo, y presentan planicies intensamente regadas por los cursos fluviales de la región, con una topografía suavemente ondulada que varía entre un 3% y un 7%, principalmente planos remanentes y montañas. Estos suelos derivan de conglomerados volcánicos, con texturas que van de moderadamente gruesas (franco-arenosas) a muy gruesas (arenoso-gruesas) (Martínez, 2004). La superficie del predio es de 166,6 hectáreas, y los rodales del predio están sujetos a un manejo intensivo, que incluye tres podas y un raleo comercial. En cuanto al

clima, el predio experimenta un clima cálido y templado, con lluvias concentradas en invierno, alcanzando un promedio de 170 mm, mientras que en los meses secos registran unos 20 mm. Las temperaturas oscilan entre una mínima de -3°C y una máxima de 31°C. Las características dasométricas de las plantaciones de los predios se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Características dasométricas de las plantaciones de *P. radiata*, en los predios evaluados.

Fundo	Edad (Años)	Densidad (arb ha ⁻¹)	AB (m ² ha ⁻¹)	DMC (cm)	Altura (m)	Volumen (m ³ ha ⁻¹)
Misque	22	477	45,7	36,0	30,7	472,8
La Reforma	22	503	34,5	29,6	28,7	337,9
Brasil	21	490	45,8	34,5	27,5	417,6
Coyanco	23	467	51,1	37,3	36,5	632,4
Los Cuartos	23	520	49,5	36,0	29,4	512,9

2.3. Levantamiento de datos en terreno

El proceso consistió en realizar un muestreo del contenido de carbono en plantaciones de *Pinus radiata* en las etapas previas a la cosecha, ubicadas en los cinco predios seleccionados. Se consideraron las propiedades físicas de los suelos arenosos y la productividad forestal evaluada basándose en el volumen precosecha. Para garantizar la precisión de la información, se llevó a cabo un inventario forestal específico para cada predio.

2.3.1. Establecimiento de parcelas

Se establecieron parcelas de 1000 m² distribuidas sistemáticamente a lo largo del rodal, manteniendo una distancia de 300 metros entre ellas para asegurar una cobertura representativa del área de estudio. Se seleccionaron de manera que reflejaran las variaciones en la composición y estructura del bosque, incluyendo zonas bajo la copa y entre hileras.

2.3.2. Medición de árboles

En cada parcela, se realizaron mediciones sistemáticas de los árboles. Se comenzó con la enumeración, medición y caracterización del árbol más cercano en dirección norte desde el centro de la parcela. Se registraron variables clave, como el diámetro a la altura del pecho (DAP, cm) mediante el uso de una cinta métrica, altura total, altura de copa viva y altura comercial utilizando un hipsómetro. Además, se evaluaron aspectos como la presencia de poda, posición social, forma, estado sanitario y la presencia de resina.

2.3.3. Muestreo de piso forestal

Dentro de las parcelas previamente inventariadas, se llevó a cabo un muestreo en zigzag. Se establecieron diez puntos de muestreo que permitieron evaluar el aporte de este componente al contenido de carbono del piso forestal (Figura 1).

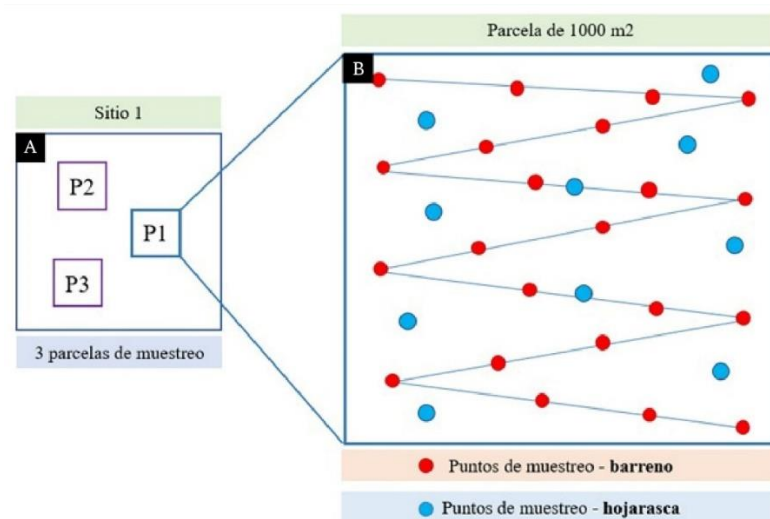


Figura 1. Diseño de muestreo de las tres parcelas dentro de un sitio (A) y los puntos de muestreo de barreno y hojarasca dentro de la parcela (B).

Se aplicaron criterios de exclusión durante la selección de puntos de muestreo para evitar áreas con características que podrían influir de manera atípica en los resultados, como la presencia de piedras, zonas cercanas a raíces grandes o micrositios particulares, como huellas de caminos o áreas donde circule ganado. Este enfoque aseguró que las mediciones reflejaran de manera precisa y

representativa las condiciones generales del bosque, excluyendo cualquier factor que pudiera introducir sesgos no representativos en las condiciones generales del bosque.

La recolección de muestras de hojarasca se realizó utilizando un molde circular de 100 cm³, separando de la hojarasca acículas de pino en diversos estados de descomposición, y los residuos gruesos de mayor tamaño, conformados por ramas y madera caída.

2.3.4. Muestreo de suelo mineral

Además, en los mismos diez puntos dentro de cada parcela, se recolectaron muestras de suelo mineral a diversas profundidades, utilizando barrenos para determinar el contenido de carbono del suelo mineral.

En cada predio, mediante una calicata y muestreo a las mismas profundidades, se obtuvo una muestra específica para la determinación de materia orgánica, textura y densidad aparente. Esto permitió caracterizar el suelo correspondiente y obtener una descripción de los horizontes respectivos de cada tipo de suelo (Figura 2).

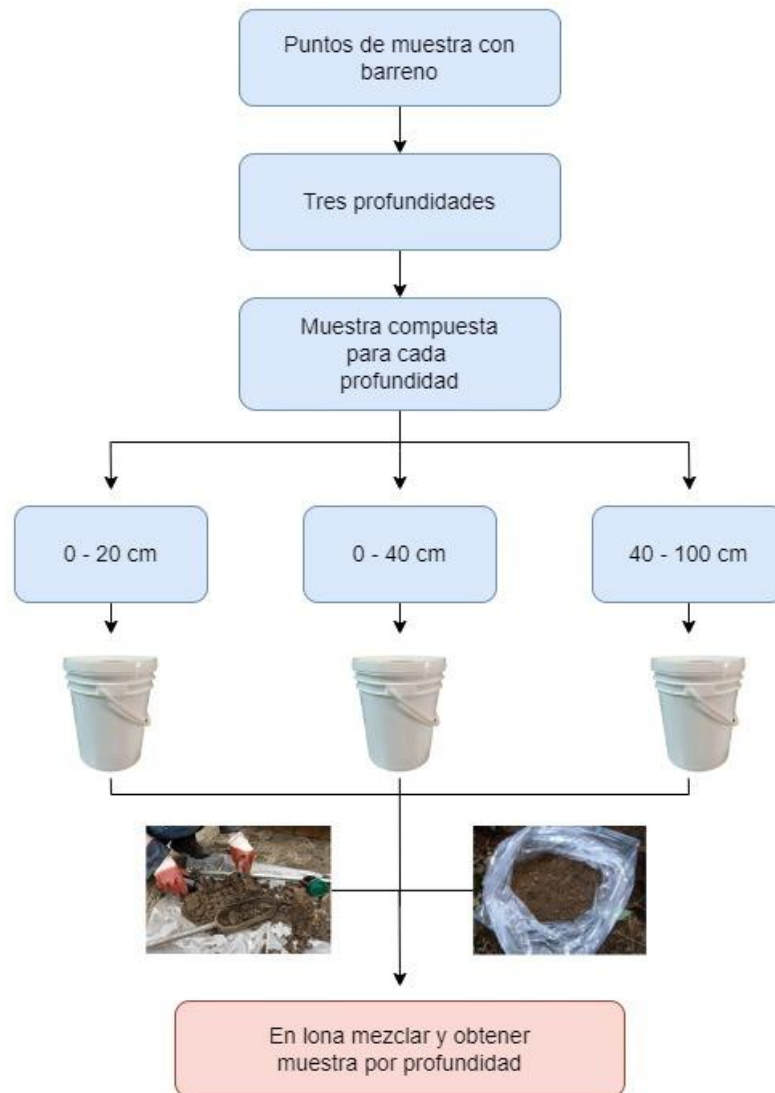


Figura 2. Esquema resumen de muestreo de suelo mineral a distintas profundidades para la obtención de las muestras compuestas.

En cada punto de muestreo se obtuvo una submuestra a tres profundidades (0 a 20 cm, 20 a 40 cm y 40 a 100 cm). Las submuestras fueron recolectadas y asignadas a un balde correspondiente a cada profundidad. Posteriormente, se

mezclaron cada conjunto de submuestras en una lona y se extrajo una muestra compuesta de 250 g de cada profundidad por parcela.

2.4. Preparación de muestras en laboratorio para cuantificación de carbono

2.4.1. Análisis de las muestras de hojarasca

Las diez muestras de piso forestal fueron transportadas al laboratorio y sometidas a un proceso de secado a 65°C, donde se procedió a cuantificar y registrar individualmente sus pesos secos. Luego, se llevó a cabo la mezcla y homogeneización de las diez muestras en una lona de plástico, asegurándose de limpiar la lona en cada mezcla de nuevas muestras. De esta mezcla, se extrajo una submuestra de aproximadamente 10 g, la cual fue molida para obtener una muestra compuesta única que representa la totalidad de la parcela para la determinación de la concentración de carbono elemental de este componente.

Una alícuota adicional de 10 g fue obtenida para posteriormente, realizar una determinación de contenido de cenizas en una mufla (“ash free basis”), a efectos de remover la contaminación de suelo mineral del peso de los componentes orgánicos. En este proceso, se registraron los pesos de suelo remanente y el peso original de la submuestra de 10 g. Finalmente, se llevó a cabo el análisis de carbono utilizando un equipo IRMS (Isotope-ratio mass spectrometry), siguiendo los protocolos establecidos por el Laboratorio de Investigación de Suelos, Aguas y Bosques (LISAB), como se detalla en la Figura 3. Cabe destacar que todos los

pesajes y determinaciones se realizaron de acuerdo con los estándares del LISAB.



Figura 3. Resumen de metodología para muestreo de piso forestal, desde la recolección en los puntos de muestreo hasta la preparación de las muestras para la cuantificación del carbono.

Las muestras compuestas de hojarasca fueron sometidas a un proceso de secado a 65°C durante 48 horas. Posteriormente, la molienda se llevó a cabo en un molino de hojas, y una vez completada, la muestra se tamizó mediante una malla de 250 µm. Luego, una alícuota de 1 a 3 g fue colocada en un crisol y sometida a calcinación a 500 °C por 4 a 8 horas para la cuantificación de cenizas. Simultáneamente, otra alícuota de 5 g fue destinada al análisis químico.

2.4.2. Análisis de las muestras de barreno

La determinación del contenido de carbono en cada una de las muestras compuestas de suelo mineral, obtenidas a nivel de parcela y para cada profundidad, se llevó a cabo mediante un equipo IRMS. Previamente, las muestras de suelo mineral fueron sometidas a un proceso de secado al aire y tamizadas a 2 mm.

Las etapas esenciales en la preparación de las muestras de hojarasca y suelo mineral para el análisis de carbono se presentan en la Figura 4, detallando visualmente los métodos de secado, molienda y tamizado hasta la obtención de las alícuotas para los análisis cuantitativos pertinentes.

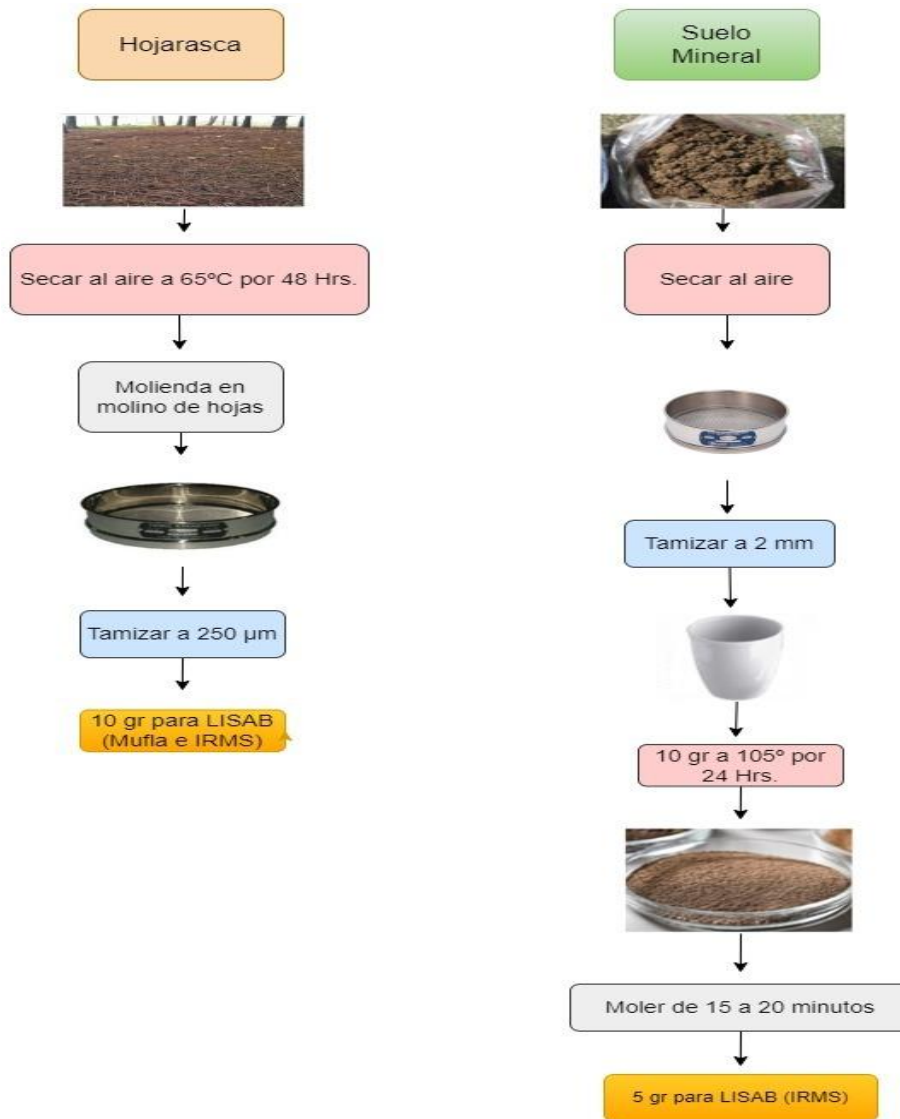


Figura 4. Resumen de preparación de muestras de hojarasca y suelo mineral para análisis de carbono, desde el secado hasta la cuantificación del carbono.

De cada muestra se extrajo una alícuota de 10 g, que fue secada en crisoles en una estufa a 105°C durante 24 horas, para luego ser pulverizada en un molino de bolas durante 15 a 20 minutos. La molienda se realizó en viales previamente limpiados con agua y metanol para evitar la contaminación cruzada entre

muestras. Finalmente, una alícuota de 5 g fue transferida a un tubo Eppendorf para el análisis elemental de carbono.

2.5. Modelación del stock de carbono

2.5.1. Ecuaciones de biomasa aérea y subterránea

Los datos obtenidos en laboratorio fueron procesados con la herramienta Excel. Para determinar la biomasa aérea de un árbol, es esencial cuantificar su biomasa total. En consecuencia, se seleccionaron cinco ecuaciones de biomasa a partir de una revisión bibliográfica. Estas ecuaciones matemáticas fueron escogidas por su adecuación a las relaciones alométricas presentes en cada componente del árbol, con el criterio específico de que sean aplicables a plantaciones de *Pinus radiata* en su edad de rotación (Acosta *et al.*, 2002).

En primer lugar, para el cálculo de la biomasa aérea fue necesario estimar la biomasa a nivel de árbol individual. Este proceso implicó dividir el cálculo en componentes específicos, considerando la biomasa fustal, la biomasa de corteza, la biomasa de ramas y la biomasa foliar como factores determinantes.

La biomasa fustal se evaluó con el modelo utilizado por Merino *et al.* (2003), teniendo en cuenta las dimensiones del fuste, mientras que la biomasa de corteza se estimó con otro modelo utilizado por los autores, considerando la proporción

típica con respecto al DAP. Asimismo, la biomasa de ramas se calculó mediante una ecuación específica utilizada por los autores Ferrere y Lupi (2021), que vincula el diámetro y la longitud de las ramas, y finalmente, la biomasa foliar se determinó utilizando una ecuación alométrica ajustada por los mismos autores para la especie de interés.

En el caso del cálculo de la biomasa radicular, esta se estimó mediante una ecuación alométrica ajustada por Guerra *et al.* (2005), basada en la composición y dimensión de las raíces, teniendo en cuenta el DAP de los árboles.

Las ecuaciones y parámetros específicos utilizados para calcular las distintas fracciones de biomasa se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3. Ecuaciones alométricas de estimación de biomasa de *P. radiata*

Ecuación	Modelo	Coeficientes		
		a	b	c
<i>BF</i>	$a + b * \ln(DAP) + c * \ln(H)$	4,83	1,72	1,43
<i>BC</i>	$a + b * \ln(DAP^2) * H$	4,17	1,12	-
<i>BR</i>	$a + b * \ln(DAP)$	4,11	1,54	-
<i>BFol</i>	$a + b * \ln(DAP)$	2,36	2,41	-
<i>BRad</i>	$a + b * \ln(DAP)$	3,01	2,47	-

BF es biomasa fustal, *BC* es biomasa de corteza, *BR* es biomasa de ramas, *BFol* es biomasa foliar, *BRad* es biomasa radicular y *Ln* es Logaritmo natural.

Para este estudio, se emplearon funciones previamente establecidas y validadas por otros investigadores en la misma especie. Estos modelos han demostrado su aplicabilidad en condiciones similares, por lo tanto, no se realizaron ajustes en los modelos y se utilizaron los parámetros establecidos en investigaciones anteriores.

De esta manera, la biomasa total por árbol individual se calculó utilizando una ecuación propuesta por Ferrere y Lupi (2021). Esta ecuación implica la suma de las biomasa aérea (biomasa fustal, corteza, ramas y foliar) y subterránea de cada árbol en las parcelas muestreadas. La ecuación utilizada es la siguiente:

$$B.total(BT) = BF + BC + BR + BFol + BRad \quad (1)$$

2.5.2. Estimación de carbono en biomasa total

Utilizando los resultados obtenidos de la ecuación de biomasa total por árbol individual, se procedió a calcular la proporción de carbono contenida en la biomasa a nivel de predio mediante el uso de la herramienta Excel. Este cálculo se realizó sumando la biomasa total de cada árbol individual dentro del rodal para obtener una biomasa total inicial. Luego, este subtotal de biomasa se multiplicó por el factor de expansión de 10, que ajusta el valor al número estándar de árboles por hectárea.

El resultado se dividió por 1000 para convertirlo en toneladas y así obtener la biomasa promedio por hectárea. Posteriormente, este valor promedio se multiplicó por el factor de conversión de carbono de 0,5, el cual ha sido utilizado en diversas investigaciones (Guerra *et al.*, 2005). Este factor de conversión se emplea para estimar la cantidad de carbono por hectárea a partir de la biomasa promedio del rodal, proporcionando una aproximación aceptada y aplicada en contextos científicos similares.

$$C = BT * f \quad (2)$$

Donde:

C es el carbono contenido en la biomasa total del rodal (Mg ha^{-1})

BT es la biomasa total del rodal (Mg ha^{-1})

f es el factor de conversión 0,5

2.5.3. Estimación de carbono en suelo mineral

Durante el proceso de determinación del contenido de carbono en el suelo mineral, se cuantificó el porcentaje de carbono almacenado en las tres muestras de suelo mineral obtenidas en las parcelas de los predios evaluados, abarcando tres profundidades distintas (0 a 20 cm, 20 a 40 cm y 40 a 100 cm). Utilizando el peso y la densidad aparente de las muestras, se llevó a cabo el cálculo del contenido de carbono en miligramos por hectárea.

$$C_{stock} = \sum_{i=0}^n \frac{C_i}{100} * BD_i * \frac{SLT_i}{100} \quad (3)$$

Donde:

C_i es el contenido de carbono en porcentaje en un determinado nivel de horizonte i .

BD_i es la densidad aparente del suelo a una profundidad i ($Mg\ m^{-3}$)

SLT_i es el espesor del suelo en cm a una profundidad i

Posteriormente, se calculó la media de los contenidos de carbono del suelo de las tres parcelas muestreadas para cada profundidad. De esta manera, se obtuvo el contenido de carbono por profundidad para cada predio. La suma de los contenidos de carbono por profundidad de cada predio proporcionó el contenido total de carbono almacenado en el suelo mineral a nivel de predio.

2.5.4. Estimación de carbono en el piso forestal

Una vez determinados los porcentajes de carbono presentes en las muestras de hojarasca y residuos, se procedió a calcular el stock de carbono en Mg ha⁻¹ contenido en estas muestras a nivel de cada parcela evaluada y predio. Para ello se calculó el valor del peso seco de cada punto de muestreo en Mg. Posteriormente, se promediaron los pesos y las concentraciones de carbono de las muestras de hojarasca y residuo de las tres parcelas de cada predio.

Al promediar estos valores, se obtuvo el stock de carbono en contenido en el piso forestal a nivel de predio (Mg ha⁻¹). Este enfoque permitió obtener una representación integral del contenido de carbono en el piso forestal, proporcionando datos significativos para el análisis del carbono almacenado en el ecosistema forestal estudiado. La determinación del stock de C de cada punto de muestreo en cada parcela se obtuvo mediante la siguiente expresión:

$$C_{stock} = \left(\frac{Carbono}{100} \right) * Peso_{Muestra} * 10000 \quad (4)$$

Donde:

Carbono es el porcentaje de carbono concentrado en

C_{stock} es el contenido de carbono en el piso forestal de cada parcela

$Peso_{Muestra}$ es el peso promedio de las submuestras de cada parcela

2.5.5. Análisis de varianza

Para llevar a cabo un análisis detallado de los datos de biomasa y carbono en el contexto de esta investigación, se aplicaron una serie de análisis complementarios. Los análisis realizados fueron análisis de estadística descriptiva para caracterizar la distribución de las variables clave DAP y la altura total de los árboles, estableciendo una base para el análisis detallado.

El análisis de varianza (ANOVA), permitió comparar las medias de biomasa y contenido de carbono entre distintos grupos, como las diferentes parcelas o tratamientos, identificando diferencias estadísticamente significativas en los stocks de carbono. Los análisis de correlación y regresión exploraron las relaciones entre la productividad de las plantaciones y el almacenamiento de carbono en la biomasa, suelo mineral y piso forestal, permitiendo la construcción de modelos predictivos. Los análisis se llevaron a cabo utilizando R Studio (Versión 4.3.2).

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de stock de carbono en biomasa aérea y radicular

Los resultados obtenidos respecto a la biomasa aérea revelaron una tendencia notable: los predios con un volumen de precosecha más significativo exhibieron una capacidad superior de captura de carbono en su biomasa aérea. De manera destacada, el predio de Coyanco marcó el stock de carbono más alto, registrando un valor de 173.4 Mg ha^{-1} , contrastando con el más bajo observado en el predio de La Reforma, con 89.4 Mg ha^{-1} (Figura 5).

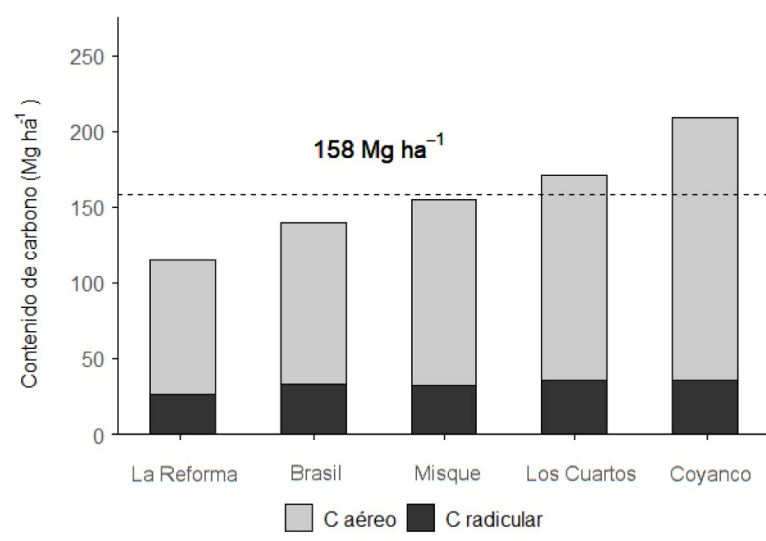


Figura 5. Representación gráfica del contenido de carbono en la biomasa aérea y biomasa radicular a nivel de predio.

Esto concuerda con lo descrito por Olmedo *et al.* (2020), quienes señalan que los predios con mayor productividad poseen mayor almacenamiento de carbono. Estudios similares realizados en Ozogoché Bajo, Ecuador (Cargua *et al.*, 2014), reportaron contenidos promedio de carbono en biomasa aérea de 287.31 Mg ha⁻¹ en una plantación de pino adulto, valores evidentemente mayores debido a las propiedades físicas del predio que influyeron positivamente en la productividad de la especie.

En contraste con la biomasa aérea, la contribución de la biomasa subterránea al total de carbono almacenado exhibió una variabilidad relativamente menor y una proporción más estable en los distintos predios examinados. Los niveles de carbono almacenado en la biomasa subterránea fluctuaron desde 35.9 Mg ha⁻¹ en Coyanco hasta 32.3 Mg ha⁻¹ en Misque. Esta distribución del carbono en la biomasa subterránea se relaciona estrechamente con la reducida presencia de biomasa radicular observada en estos predios, corroborando lo establecido por Cargua *et al.* (2014), quienes indican que la proporción de biomasa radicular en relación con el total del árbol es del 21%. Asimismo, investigaciones como la de Guerra *et al.* (2005) señalan que suelos con mayores restricciones favorecen un incremento en la proporción de biomasa radicular. Sin embargo, en condiciones de óptima disponibilidad de nutrientes, esta tendencia se ve contrarrestada, lo que permite una mayor asignación de energía hacia el crecimiento de la biomasa aérea. Esta podría ser la razón por la cual predios de alta productividad como

Coyanco y Los Cuartos presentan una proporción menor de biomasa radicular y, por ende, un almacenamiento subterráneo de carbono reducido.

3.2 Resultados de stock de carbono en piso forestal

Los resultados del análisis del contenido de carbono en el piso forestal revelan una variabilidad significativa en el stock de carbono entre los diferentes predios estudiados. En primer lugar, se observa una amplia gama de valores en el stock de carbono de la hojarasca, que varía desde un mínimo de 7,88 Mg ha⁻¹ en Brasil hasta un máximo de 25,09 Mg ha⁻¹ en Los Cuartos (Tabla 4). Por otro lado, los valores de residuo también son más bajos que aquellos registrados en Los Cuartos (4,20 Mg ha⁻¹) y los más altos en Misque (7,44 Mg ha⁻¹).

Tabla 4. Stock de Carbono en Mg ha⁻¹ del piso forestal contenido en hojarasca y residuo a nivel de predio.

Predio	Stock C (Mg ha ⁻¹)		
	Hojarasca	Residuo	Total
Brasil	7,9	5,5	13,3
Misque	12,6	7,4	20,0
La Reforma	15,0	6,0	21,0
Coyanco	17,4	6,3	23,7
Los Cuartos	25,1	4,2	29,3

Al considerar el total acumulado de carbono en el piso forestal, que incluye tanto la hojarasca como el residuo, se destaca que Los cuartos posee el valor más alto con 29,29 Mg ha⁻¹, seguido de cerca por Coyanco con 23,69 Mg ha⁻¹ y La Reforma con 21,01 Mg ha⁻¹. En contraste, Brasil y Misque presentan valores menores, con 13,35 Mg ha⁻¹ y 20,05 Mg ha⁻¹ respectivamente. La Figura 6 complementa estos hallazgos al mostrar que la hojarasca constituye la mayor parte del stock de carbono en la mayoría de los predios, representando más del 60% del stock en la mayoría de los casos.

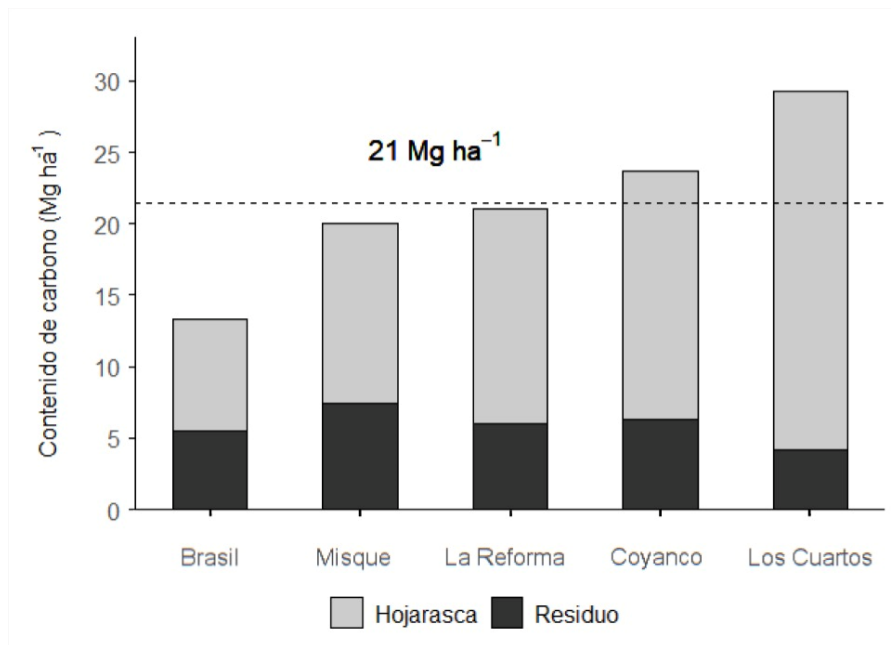


Figura 6. Representación gráfica del contenido de carbono del piso forestal evaluado en hojarasca y residuo a nivel de predio.

La variabilidad observada en el stock de carbono en el piso forestal entre los predios coincide con los resultados de Ferrere y Lupi, (2021), quienes señalan una variación del contenido de carbono almacenado en el suelo en predios con distintos manejos silvícolas. Estos hallazgos destacan la necesidad de considerar no solo la cantidad total de carbono almacenado en un ecosistema forestal, sino también su distribución entre diferentes compartimentos, como el suelo mineral y el piso forestal, para una gestión efectiva de la captura de carbono y la conservación de los bosques.

3.3 Resultados de stock de carbono en suelo mineral

Los resultados del análisis del contenido de carbono en el suelo mineral de los predios forestales a una profundidad de 1 metro, evidencio que los predios de mayor productividad, Coyanco ($631.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$) y Los Cuartos ($520.7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$), presentaron contenidos de carbono en el suelo mineral superiores al valor medio de 183 Mg ha^{-1} . Sin embargo, es importante notar que Brasil exhibió el contenido más alto de carbono ($235,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) seguido de Coyanco ($219,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) y Los Cuartos ($184,1 \text{ Mg ha}^{-1}$), superando este valor de referencia. En cambio, Misque ($165,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) y La Reforma ($110,4 \text{ Mg ha}^{-1}$) presentaron los contenidos más bajos de carbono, quedando bajo el valor medio. Estos resultados coinciden con el estudio de Olmedo *et al.* (2020), quienes indican que el carbono contenido en el suelo mineral aporta la mayor parte del stock total a nivel de predio.

La Figura 7 ilustra claramente la proporción de carbono contenido en el suelo mineral a distintas profundidades, demostrando que en todos los predios la mayor concentración de carbono se encuentra en el horizonte superficial del suelo (0-20 cm), lo cual es consistente con lo establecido por Cargua *et al.* (2014).

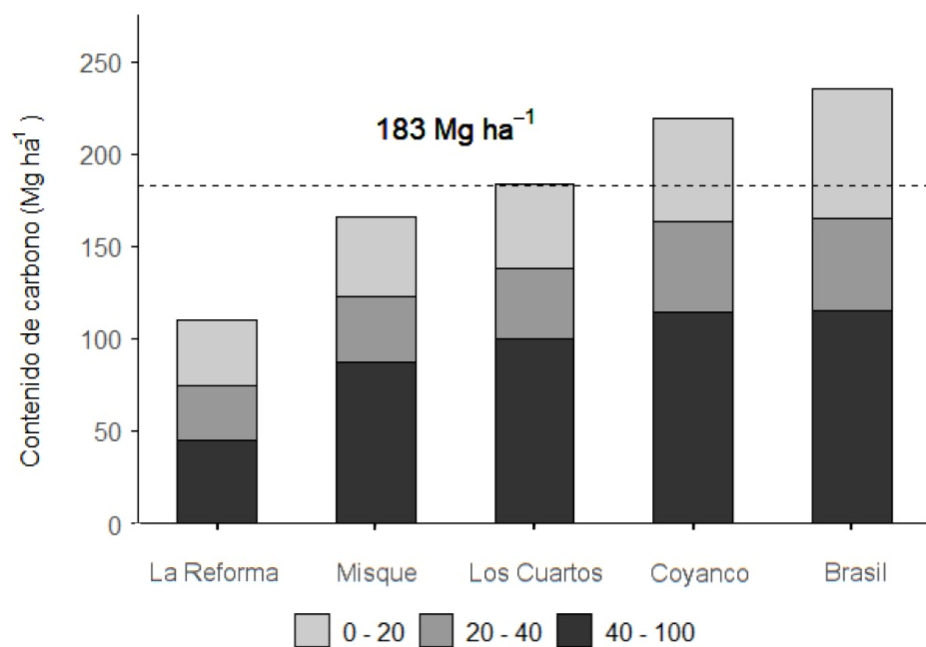


Figura 7. Representación gráfica del contenido carbono del suelo mineral en Mg ha⁻¹ evaluado a distintas profundidades a nivel de predio.

Estos resultados evidencian la importancia de considerar la profundidad del suelo durante la cuantificación de carbono en el suelo mineral, específicamente a un metro de profundidad. Esto se debe a que la mayoría de los estudios previos,

como el de Yost *et al.* (2019), solo han cuantificado y estudiado el carbono a 30 cm de profundidad en suelos arenosos.

Al profundizar en el análisis, se observa que la distribución del carbono en el suelo mineral varía según las características específicas de cada predio (Tabla 5).

Tabla 5. Carbono en suelo mineral a distintas profundidades, en cada uno de los predios.

Predio	Profundidad (cm)			C. Suelo Total (Mg ha ⁻¹)
	0 - 20	20 - 40	40 - 100	
La Reforma	35,8	29,7	44,9	110,4
Misque	42,7	35,9	87,3	165,9
Los Cuartos	46,3	37,9	99,9	184,1
Coyanco	55,9	49,4	114,1	219,4
Brasil	70,4	49,7	115,5	235,6

En contraste, Los Cuartos exhibe una distribución más uniforme del carbono en las capas superficiales, posiblemente debido a la combinación de suelos volcánicos y prácticas de manejo forestal como podas y raleos. Por otro lado, Brasil y Coyanco exhiben niveles elevados de carbono. En el caso de Coyanco se evidencia la influencia positiva de la permeabilidad y el drenaje de sus suelos volcánicos, combinados con un manejo forestal intensivo. La particularidad del

predio Brasil se debe a que posee suelos de textura franco-limosa, evidenciando un aumento significativo en el carbono almacenado en el suelo mineral (Tabla 6).

Tabla 6. Descripción física de los suelos de los predios evaluados

Predio	Profundidad (cm)	Arcilla %	Limo %	Arena %	Textura	Densidad Aparente (Mg m ⁻³)	Carbono (Mg ha ⁻¹)
La Reforma	0-20	2,74	7,15	90,10	Arenoso	1,33	35,78
	20-40	2,59	4,78	92,63	Arenoso	1,39	29,71
	40-100	2,74	4,49	92,77	Arenoso	1,30	44,93
Misque	0-20	2,47	7,20	90,33	Arenoso	1,22	42,67
	20-40	0,26	9,46	90,28	Arenoso	1,32	35,94
	40-100	2,76	4,87	92,37	Arenoso	1,37	87,30
Los Cuartos	0-20	2,66	17,45	79,89	Areno-arcilloso	1,56	46,29
	20-40	5,22	1,92	92,85	Arenoso	1,59	37,89
	40-100	2,61	2,07	95,32	Arenoso	1,60	99,96
Coyanco	0-20	2,75	29,51	67,74	Arenoso limoso	1,54	55,87
	20-40	2,66	19,51	77,82	Areno-arcilloso	1,56	49,36
	40-100	2,57	22,22	75,21	Arenoso limoso	1,59	114,13
Brasil	0-20	4,19	73,40	22,41	Franco limoso	1,26	70,38
	20-40	2,85	60,33	36,82	Franco limoso	1,30	49,74
	40-100	5,26	45,51	49,23	Arenoso limoso	1,34	115,51

Esto se debe a que los suelos de este tipo tienen un mayor contenido de materia orgánica y, por ende, mayor contenido de carbono que los suelos arenosos (Matus y Maire, 2000).

3.4 Resultados de carbono total por predio

El análisis del contenido total de carbono por rodal revela diferencias notables en la capacidad de secuestro de carbono entre las zonas estudiadas. Predominan los valores más altos en Coyanco, cercanos a 300 Mg ha⁻¹, mientras que La Reforma exhibe la concentración más baja, inferior a 200 Mg ha⁻¹. Misque y Los Cuartos presentan concentraciones comparables y significativamente más altas (Figura 8).

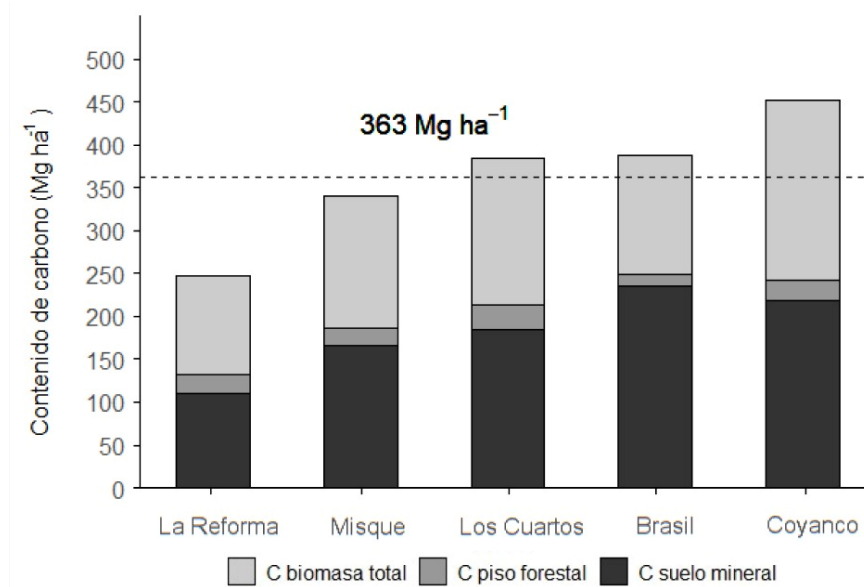


Figura 8. Representación gráfica del carbono total en Mg ha⁻¹ contenido en los distintos componentes a nivel de predio. El carbono en la biomasa total, el carbono en el piso forestal y el carbono en el suelo mineral.

Los resultados muestran que la principal reserva de carbono en todos los predios es el suelo mineral, destacando su importancia en la captura de carbono en suelos bajo bosque. Estos hallazgos son similares a los de Gayoso (2001), donde los contenidos de carbono en el suelo mineral superan los 140 Mg ha⁻¹. Aunque La Reforma tiene el menor contenido total de carbono, mantiene una proporción significativa en biomasa, lo que indica prácticas de manejo forestal beneficiosas (Ferrere y Lupi, 2021). El carbono en la biomasa total, aunque menor en comparación con el carbono en el suelo mineral, contribuye significativamente al almacenamiento de carbono a largo plazo, mientras que el carbono en el piso forestal, aunque pequeño, refleja la relevancia de la hojarasca y el material leñoso en el suelo (Olmedo *et al.*, 2020). Coyanco y Los Cuartos muestran los niveles más altos de contenido de carbono total, superando el umbral de referencia de 98 Mg ha⁻¹, lo que sugiere condiciones óptimas o prácticas de manejo forestal efectivas. La uniformidad en la proporción de carbono entre las fracciones indica patrones de almacenamiento extrapolables, respaldando estudios anteriores (Guerra *et al.*, 2005).

3.5 Regresiones entre componentes de carbono y volumen precosecha

3.5.1 Relación entre carbono de biomasa aérea y volumen por parcela

El análisis de regresión lineal entre el contenido de carbono de la biomasa aérea y el volumen de precosecha por parcela ha evidenciado una significativa relación lineal en las parcelas de los cinco predios evaluados (Figura 9).

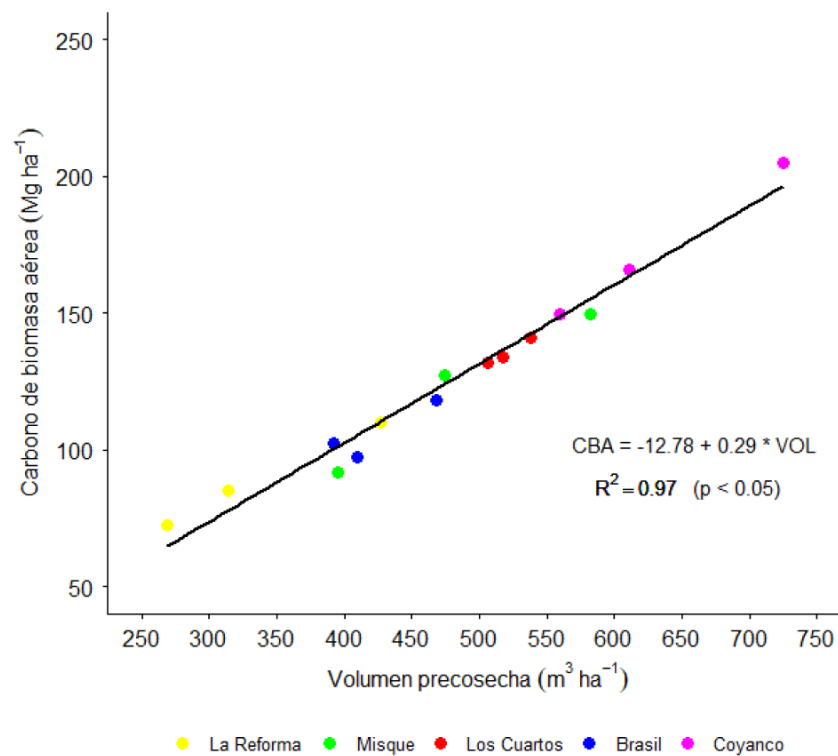


Figura 9. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono de la biomasa aérea en Mg ha⁻¹.

El modelo ajustado, expresado mediante la ecuación $CBA = -12.78 + 0.29 * VOL$, donde CBA representa el carbono de la biomasa aérea en Mega gramos por hectárea ($Mg ha^{-1}$) y VOL denota el volumen en metros cúbicos por hectárea ($m^3 ha^{-1}$), ilustra que por cada incremento en una unidad de volumen precosecha, se anticipa un incremento de $0.29 Mg ha^{-1}$ en el carbono de la biomasa aérea.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.97$ indica que aproximadamente el 98% de la variabilidad en el contenido de carbono de la biomasa aérea puede explicarse por el volumen de precosecha. Esto sugiere una fuerte correlación positiva entre ambas variables. Además, la significancia estadística de la relación se confirmó con un nivel de $p < 0.05$. La pendiente positiva de la regresión sugiere que a medida que el volumen precosecha aumenta, también lo hace el contenido de carbono de la biomasa aérea. Coincidiendo con lo mencionado por Ferrere y Lupi. (2021), la calidad del predio y el manejo silvícola adecuado afectaron significativamente en la productividad en biomasa de la especie.

3.5.2 Relación entre carbono de biomasa radicular y volumen por parcela

El análisis de regresión lineal entre el contenido de carbono de la biomasa radicular y el volumen de precosecha por parcela ha evidenciado una significativa relación lineal en las parcelas de los cinco predios evaluados. El modelo ajustado, expresado mediante la ecuación $CBR = 15.07 + 0.04 * VOL$, donde CBR

representa el carbono de la biomasa radicular (Mg ha^{-1}) y VOL denota el volumen ($\text{m}^3 \text{ ha}^{-1}$), el cual ilustró que por cada incremento en una unidad del volumen precosecha, se anticipa un incremento de 0.04 Mg ha^{-1} en el carbono de la biomasa total (Figura 10).

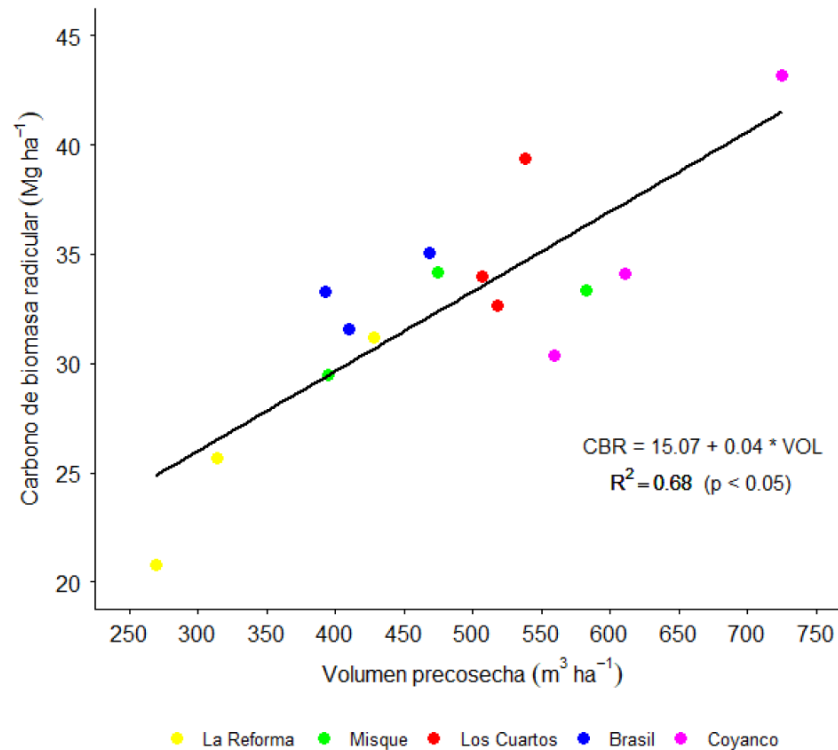


Figura 10. Regresión entre carbono de biomasa radicular en Mg ha^{-1} y el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.68$ sugiere una correlación moderadamente fuerte entre ambas variables: a medida que aumenta el volumen

de precosecha, también lo hace el contenido de carbono de la biomasa radicular, aunque en menor medida que en la biomasa aérea. Estudios previos, como el de Cargua *et al.* (2014), indican que la proporción entre la biomasa radicular y la aérea es del 21% y 79%, respectivamente, con una menor cantidad de carbono en la biomasa radicular. Sin embargo, la significancia estadística de esta relación se confirma con un nivel de $p < 0.05$. La pendiente positiva sugiere que, a medida que aumenta el volumen de precosecha, también lo hace el contenido de carbono de la biomasa radicular, aunque en menor medida que en la biomasa aérea.

3.5.3 Relación entre carbono de biomasa total y volumen por parcela

El análisis de regresión lineal entre el contenido de carbono de la biomasa total y el volumen de precosecha por parcela ha evidenciado una significativa relación lineal en las parcelas de los cinco predios evaluados. El modelo ajustado, expresado mediante la ecuación $CBT = 2.3 + 0.32 * VOL$, donde CBT representa el carbono de la biomasa total ($Mg\ ha^{-1}$) y VOL denota el volumen ($m^3\ ha^{-1}$), el cual ilustró que por cada incremento en una unidad del volumen precosecha, se anticipa un incremento de $0.32\ Mg\ ha^{-1}$ en el carbono de la biomasa total (Figura 11).

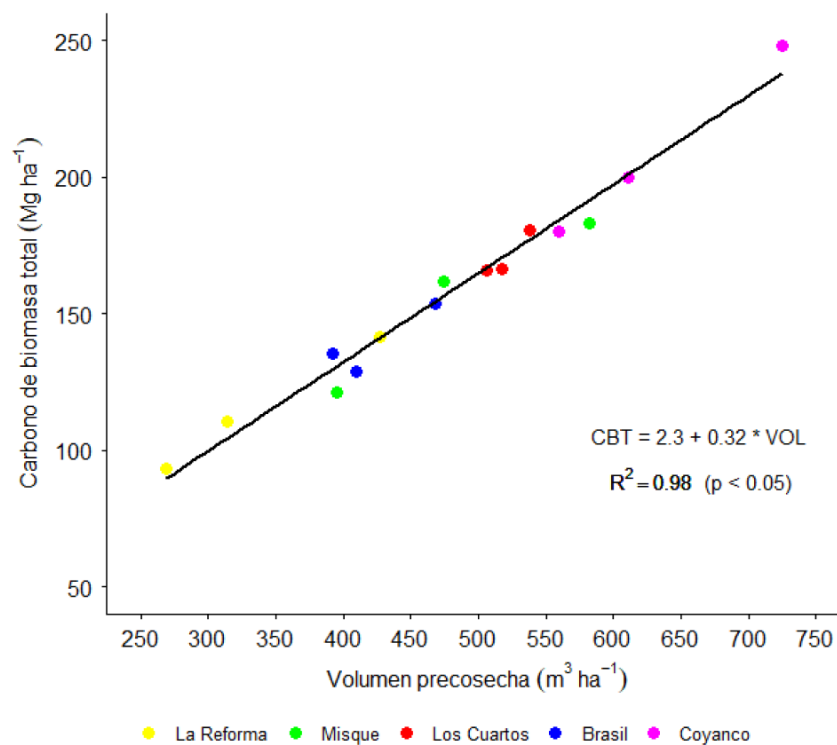


Figura 11. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono de la biomasa total en Mg ha⁻¹.

El coeficiente de determinación $R^2 = 0.98$ sugiere una fuerte correlación positiva entre ambas variables; a medida que aumenta el volumen de precosecha, también lo hace el contenido de carbono de la biomasa aérea. Así mismo la significancia estadística de la relación es confirmada con un nivel de $p < 0.05$. La pendiente positiva de la regresión sugiere que a medida que el volumen precosecha aumenta, también lo hace el contenido de carbono de la biomasa total.

Este estudio revela una correlación significativa entre los volúmenes de precosecha y la capacidad de secuestro de carbono en la biomasa total en plantaciones de *Pinus radiata*, sugiriendo que parcelas con mayor biomasa viva tienen potencialmente mayores reservas de carbono. Este hallazgo sugiere que el volumen de precosecha puede ser un indicador eficaz para predecir el almacenamiento de carbono, facilitando así la modelización del secuestro de carbono en la biomasa aérea. Esta relación lineal directa coincide con los hallazgos de Olmedo *et al.* (2020), quienes también identificaron una relación significativa entre la biomasa y el volumen de los árboles, aunque con una variabilidad significativamente mayor en sus resultados, lo que podría atribuirse a diferencias en las condiciones físicas del predio, prácticas de manejo forestal y metodologías de muestreo.

3.5.4 Relación entre carbono de piso forestal y volumen por parcela

En el análisis de regresión lineal entre el contenido de carbono en la hojarasca y el volumen de precosecha por parcela el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.13$) indica una correlación lineal relativamente débil entre las dos variables (Figura 12).

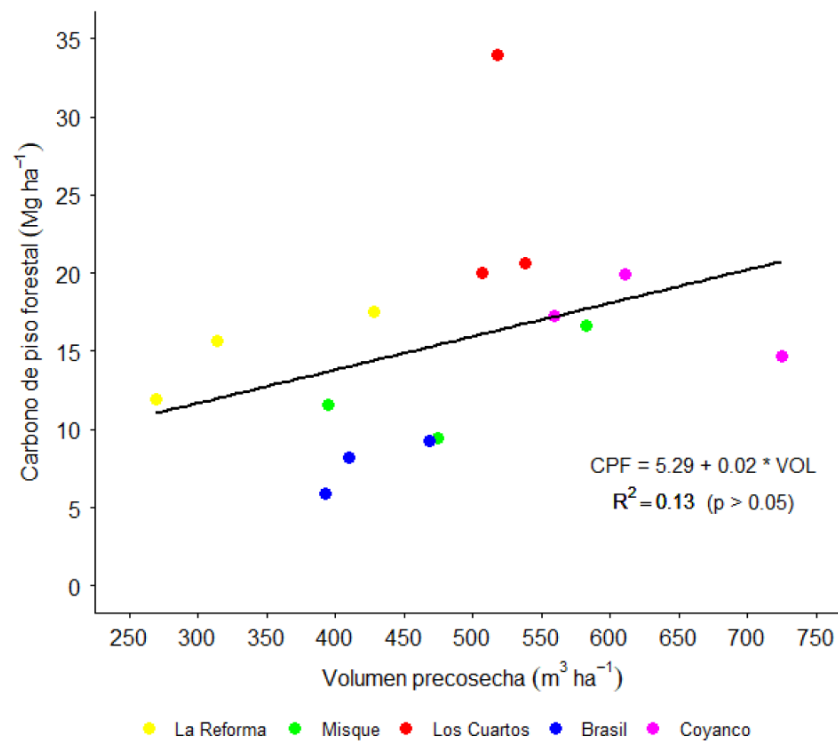


Figura 12. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono de piso forestal en Mg ha⁻¹.

Este bajo nivel de correlación sugiere que el volumen de precosecha contribuye en pequeña medida a la variabilidad observada en el contenido de carbono de Piso forestal de las parcelas analizadas. La ecuación de regresión $CPF = 5.29 + 0.02 * VOL$ sugiere que por cada incremento en el volumen precosecha, se espera un aumento de 0.02 Mg ha^{-1} en el CPF. Sin embargo, es crucial considerar la significancia estadística asociada a estos resultados ($p > 0.05$), lo que indica que no existe suficiente evidencia para sugerir una relación significativa entre estas dos variables dentro del contexto estudiado.

Pocos estudios han evaluado la relación entre el contenido de carbono en el piso forestal con la productividad en pino. Olmedo *et al.* (2020) señala que el contenido de carbono en el suelo mineral tiene un aporte mayor en comparación al carbono contenido en el piso forestal. Este hallazgo sugiere la importancia de realizar más estudios respecto a la relación entre el contenido de carbono orgánico en el piso forestal con otros factores como la materia orgánica, para comprender su influencia en estos ecosistemas.

3.5.5 Relación entre carbono suelo mineral y volumen por parcela

En el análisis de regresión lineal para el contenido de carbono en suelo mineral se observa una correlación positiva moderada en las parcelas de los cinco predios con $R^2 = 0.36$. La ecuación de regresión $CSM = 65.54 + 0.25 * VOL$ sugiere que por cada incremento unitario en VOL se espera un aumento de 0.25 Mg ha^{-1} en el carbono del suelo mineral, aunque no de manera fuertemente proporcional. Sin embargo, es crucial considerar la significancia estadística asociada a estos resultados ($p < 0.05$), lo que indica que existe suficiente evidencia para sugerir una relación significativa entre estas dos variables dentro del contexto estudiado.

Por otra parte, los resultados revelaron que el predio Coyanco, el más productivo en volumen, no fue el que más carbono en suelo mineral almacenaba, sino el predio Brasil (Figura 13). Este resultado difiere de lo descrito por de Olmedo *et al.* (2020), quienes señalan que, a mayor productividad, hay mayor almacenamiento de carbono en el suelo mineral. Esta discrepancia puede verse influenciada por el predio Brasil, debido a que este predio no es un suelo de arenas volcánicas y corresponde a arenas de sedimentos de río con mayor contenido de limo y materia orgánica (profesor Rubilar, comunicación personal). Esto explicaría la alteración de la regresión entre el carbono en el suelo mineral en las parcelas de los predios evaluados. Esto conlleva a generar una nueva

regresión sin considerar al predio en cuestión para respaldar los resultados anteriores (Figura 14).

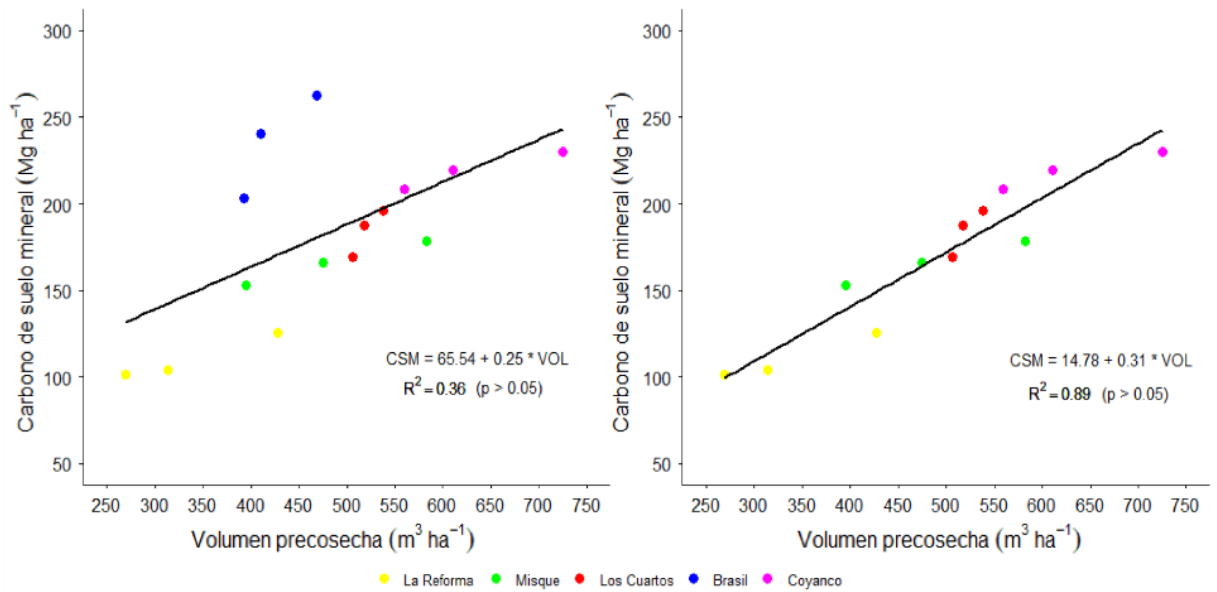


Figura 13. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono del suelo mineral en Mg ha⁻¹. (izquierda: considerando al predio Brasil, derecha: excluyendo al predio Brasil).

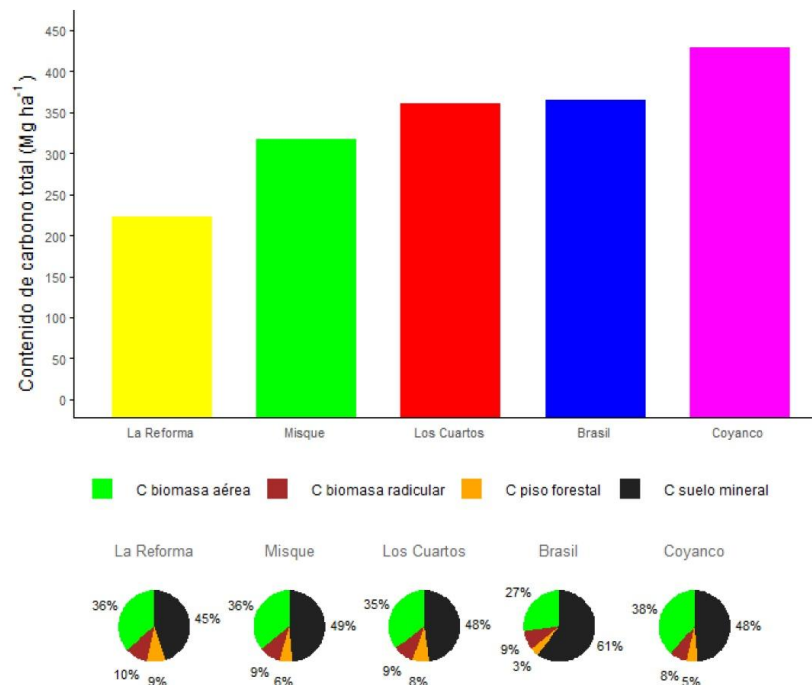


Figura 14. Contenido de carbono total y porcentajes de carbono almacenado por componente a nivel de predio. El carbono en la biomasa aérea, el carbono en la biomasa radicular, el carbono en el piso forestal y el carbono en el suelo mineral.

En el análisis se observa el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.89$) indica una correlación positiva fuerte entre las dos variables, lo que indicaría que a medida que incrementa el VOL también lo hace el carbono del suelo mineral. Resultado similar a Brito *et al.* (2022), donde señalan una correlación lineal positiva ($R^2 = 0.9$) entre la productividad y el carbono orgánico del suelo asociado a distintas perturbaciones, en un bosque de encino (*Quercus sp.*) en el Estado de México, México. La ecuación de regresión $CSM = 14.78 + 0.31 * VOL$ sugiere que por cada incremento en VOL se espera un aumento de 0.31 Mg ha^{-1} en el carbono

total. Este hallazgo difiere de los estudios realizados en una plantación híbrida de Álamo (*Populus sp.*) en New Liskeard, Ontario, Canadá (Rabearison *et al.*, 2023), quienes señalan que no hay una relación entre el almacenamiento de carbono en el suelo a una profundidad de 60 cm y la productividad en especies de rápido crecimiento.

3.5.6 Relación entre carbono total y volumen por parcela

En el análisis de regresión lineal entre el contenido de carbono total y el volumen de precosecha por parcela (excluyendo al predio Brasil), el coeficiente de determinación ($R^2 = 0.97$) indica una correlación positiva fuerte entre las dos variables, lo que indicaría que a medida que incrementa el VOL también lo hace el carbono total de manera bastante proporcional. La ecuación de regresión $CT = 28.12 + 0.65 * VOL$ sugiere que por cada incremento en VOL se espera un aumento de 0.59 Mg ha^{-1} en el carbono total. Así mismo la significancia estadística de la relación es confirmada con un nivel de $p < 0.05$. La pendiente positiva de la regresión sugiere que a medida que el volumen precosecha aumenta, también lo hace el contenido de carbono total (Figura 15).

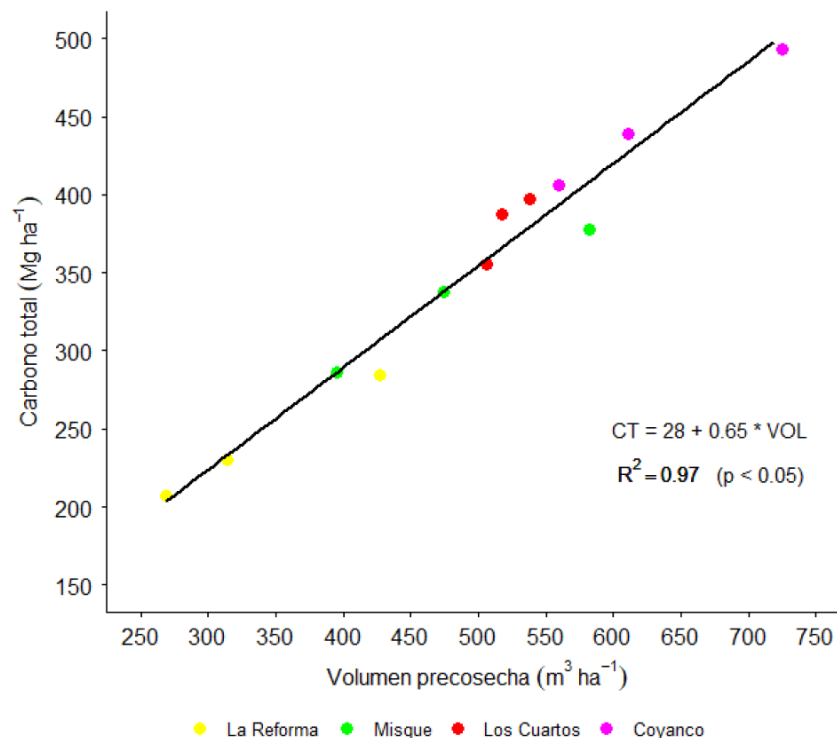


Figura 15. Regresión entre el volumen precosecha por parcela de los cinco predios evaluados y el carbono total en Mg ha⁻¹.

Este estudio revela una correlación significativa entre los volúmenes de precosecha y la capacidad de secuestro de carbono total en plantaciones de *Pinus radiata*, sugiriendo que parcelas con mayor productividad tienen potencialmente mayores reservas de carbono. Igualmente es fundamental el rol que cumplen los suelos arenosos en la mitigación del cambio climático, el estudio realizado por Yost *et al.* (2019) señala que el contenido de carbono orgánico en suelos arenosos es mayor en suelos bajo bosques.

IV. CONCLUSIONES

- Los resultados de los modelos de carbono mostraron un buen ajuste, demostrando que existe una relación significativa entre la productividad del rodal y el carbono almacenado en la biomasa total y en el suelo mineral en plantaciones de *Pinus radiata* en edad de cosecha.
- Se observó una correlación positiva significativa entre el contenido de carbono y la productividad de cada predio. Esto sugiere que los predios con mayor productividad tienen una mayor capacidad para fijar carbono.
- El suelo mineral se identificó como el principal contribuyente al stock total de carbono, y la distribución del carbono en el suelo mineral reveló una concentración más alta en la capa superficial (0-20 cm).
- En cuanto a la biomasa total, se observó que la biomasa aérea aportó más carbono que la biomasa radicular.
- Respecto al piso forestal, compuesto por hojarasca y corteza, el resultado fue que contribuyó de manera poco significativa al stock total de carbono, y no mostró una relación significativa con la productividad del predio.
- La comprensión de las dinámicas del C entre estos componentes es crucial para diseñar estrategias efectivas de manejo forestal que maximicen la captura de carbono, y la producción maderera, promoviendo la sostenibilidad ambiental del recurso suelo.

V. BIBLIOGRAFÍA

Acosta, M., Vargas, J., Velázquez, A., Etchevers J. (2002). Estimación de la biomasa aérea mediante el uso de relaciones alométricas en seis especies arbóreas en Oaxaca, México.

Alarcon Paucar, F. L. N., & Apaza Turpo, P. G. (2023). Almacenamiento de carbono aéreo en plantaciones forestales de *Eucalyptus globulus Labill* y *Pinus radiata* en el Distrito de Ccatca, Quispicanchi, Cusco-2023.

Barrales-Brito, E., Paz-Pellat, F., Velázquez-Rodríguez, A. S., Hidalgo-Moreno, C., & Etchevers-Barra, J. D. (2022). Carbono orgánico del suelo a diferentes profundidades en una secuencia de perturbación y sitios de referencia. *Terra Latinoamericana*, 40.

Cepasa D. 2015. El Cambio Climático y los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en Cepasa. Cepasa.

Corporación Nacional Forestal (CONAF), 2019. Revista Chile Forestal. Cambio climático: Los Bosques, Clave en la Captura de Carbono. *Edición N°390*, 5–14.

Corporación Nacional Forestal (CONAF), 2021. *Catastro de los Recursos Vegetacionales Nativos de Chile*. Conaf.cl. Recuperado 9 de julio de 2022. Disponible en <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/>

Cargua, F. E., Rodríguez, M. V., Recalde, C. G., & Vinueza, L. M. (2014). Cuantificación del contenido de carbono en una plantación de pino insigne (*Pinus radiata*) y en estrato de páramo de ozogoché bajo, Parque Nacional Sangay, Ecuador. *Información tecnológica*, 25(3), 83-92.

Ferrere, P., & Lupi, A. M. (2021). Biomasa en una cronosecuencia de plantaciones de *Pinus radiata* D. DON, en la Región Pampeana, Argentina.

Gayoso, J. (2001). Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. *Taller Secuestro de Carbono*, 22.

Guerra, J., Gayoso, J., Schlatter, J. y Nespolo, R. (2005). Análisis de la biomasa de raíces en diferentes tipos de bosques. *Avances en la evaluación de Pinus radiata* en Chile. *Bosque*, 5-21.

Keller, D.P.; Lenton, A.; Littleton, E.W.; Oschlies, A.; Scott, V.; Vaughan, N.E, 2018. The effects of carbon dioxide removal on the carbon cycle. *Curr. Clim. Chang. Rep.* 4, 250–265

Martínez R. 2004. Mapa de reconocimiento de suelos de la VIII Región del Bio-Bio (sector sur). Memoria para obtener el título profesional de Agrónomo. Facultad de Agronomía. Universidad de Chile.

Matus, F. J., & Maire, C. R. (2000). Relación entre la materia orgánica del suelo, textura del suelo y tasas de mineralización de carbono y nitrógeno. *Agricultura Técnica*, 60(2), 112-126.

Merino, A., Rey, C., Brañas, J., & Rodríguez-Soalleiro, R. (2003). Biomasa arbórea y acumulación de nutrientes en plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. *Investigación agraria: Sistemas y recursos forestales*, 12(2), 85-98.

Municipalidad de Yumbel, 2017. Plan de Desarrollo Comunal de Yumbel 2017-2020. Disponible en <http://www.yumbel.cl/instrumento-gestion/pladeco/PLADECO-2017.pdf>

Municipalidad de Cabrero, 2014. Plan de Desarrollo Comunal 2014-2017. Informe Final. Disponible en https://www.cabrero.cl/transparencia_cabrero/documentos/PLADECO%20CABRERO%202014-2017.pdf

Municipalidad de Laja, 2014. Actualización Plan de Desarrollo Comunal de Laja Período 2014-2022. Disponible en <https://munilaja.cl/w/wp-content/uploads/2015/03/PLADECOLAJA.pdf>

Prado, J. 2015. Plantaciones Forestales. Más allá de los árboles. Colegio de Ingenieros Forestales de Chile AG. p.

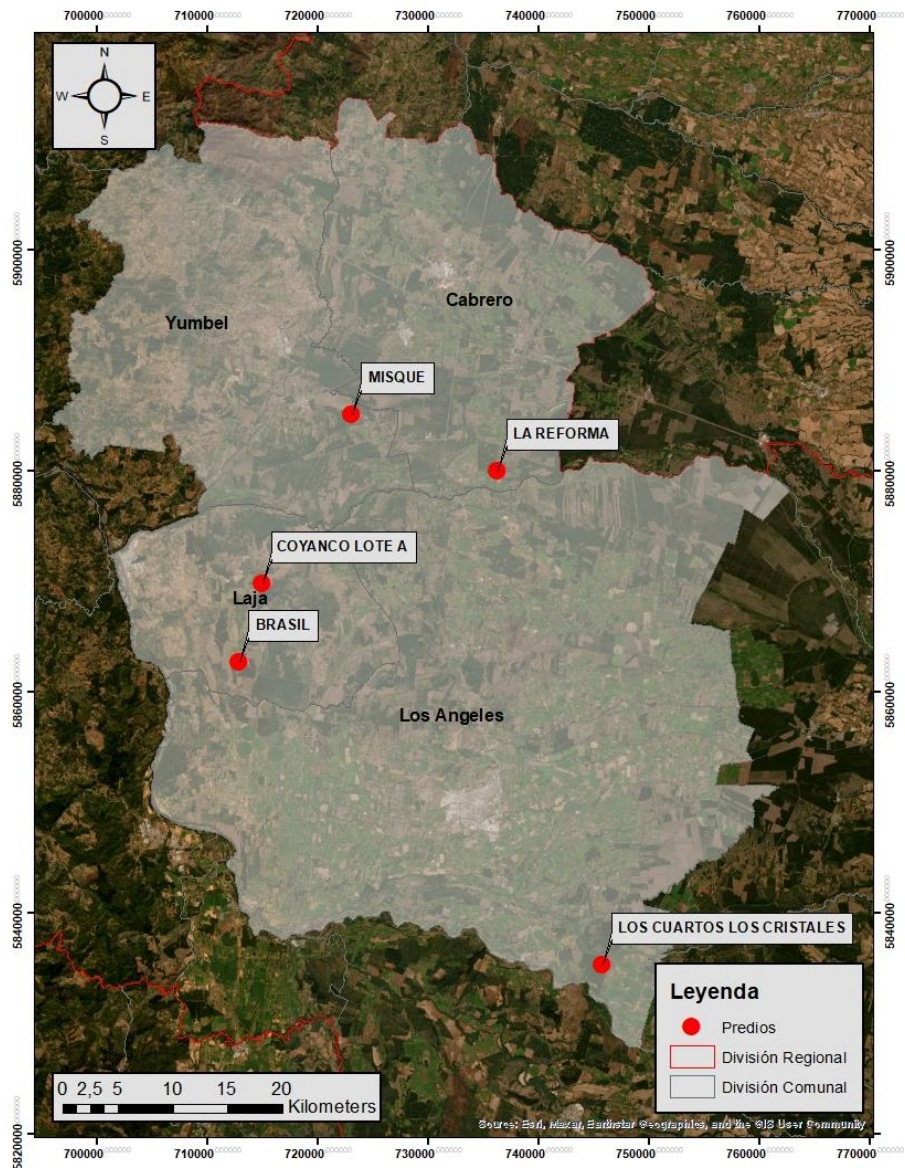
Rabearison, TJ, Poirier, V., Gillespie, A., Laganière, J. y DesRochers, A. (2023). El aumento de la productividad de los árboles no se traduce en un mayor almacenamiento de carbono orgánico en el suelo. *Ecología y gestión forestal*, 535, 120884.

Olmedo, G. F., Guevara, M., Gilabert, H., Montes, C. R., Arellano, E. C., Barría-Knopf, B., Garate, F., Mena-Quijada, P., Acuña, E., Bown, E., & Ryan, M. G. (2020). Baseline of carbon stocks in *Pinus radiata* and *Eucalyptus spp.* plantations of Chile. *Forests*, 11(10), 1063.

Watt M.S., M.O. Kimberley. 2022. Spatial comparisons of carbon sequestration for redwood and radiata pine within New Zealand. *Forest Ecology and Management* 513: 120190.

Yost, J. L., & Hartemink, A. E. (2019). Soil organic carbon in sandy soils: A review. *Advances in agronomy*, 158, 217-310.

VI. APÉNDICE



Apéndice 1. Localización de los cinco predios de estudio en la Región del Biobío