



**Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Ciencias Forestales
Programa de Magister en Ciencias Forestales**

**DINÁMICAS SELECCIONADAS DE CARBONO EN SISTEMAS
SILVOPASTORILES CON *NOTHOFAGUS OBLIQUA* (MIRB.)
OERST. EN RANCHILLO ALTO, PRECORDILLERA ANDINA
CHILENA**

Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Forestales

Por: Sebastián Parra Cabrera
Profesor Guía: Francis Dube
Universidad de Concepción

CONCEPCIÓN-CHILE
Enero 2024

DINÁMICAS SELECCIONADAS DE CARBONO EN SISTEMAS SILVOPASTORILES CON *NOTHOFAGUS OBLIQUA* (MIRB.) *OERST.* EN RANCHILLO ALTO, PRECORDILLERA ANDINA CHILENA

Comisión Evaluadora:

Francis Dube
(Profesor guía)
Ingeniero Forestal, Dr.

Erick Zagal Venegas
(Profesor co-guía)
Ingeniero Agrónomo, Dr.

Patricio Pérez
(Asesor externo)
Rector CFT Iota
Msc. en gestión de la educación

Regis Teixeira Mendonça
Director de Postgrado
Ingeniero Químico, Dr.

Decano Facultad de Ciencias Forestales
Eugenio Sanfuentes von Stowasser
Ingeniero Forestal, Dr.

DEDICATORIA

A los bosques que nos bañan con la sabiduría de las estrellas

A mis Padres y Michelle, quienes estuvieron en cada momento

A todo quién este trabajo pueda servir para crear un mundo sustentable

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi profesor guía, Francis Dube, por su constante apoyo y transferencia de conocimiento. Pese a la adversidad de los últimos años, se mantuvo firme y con una gran energía respecto a mi proceso investigativo.

Comparto este agradecimiento al profesor co-guía Erick Zagal y el asesor externo Patricio Pérez.

La presencia de mis padres fue determinante para cumplir todo este trabajo, así como también de amigos y amigas que contribuyeron en distintos pasos de este proceso (Jaime, Marcelo, Mirta y Patricia).

Agradezco a Michelle, quién me ayudó desde labores en terreno, hasta entender variables y procesos matemáticos, su amor, ternura y paciencia, fueron clave para llegar al final de esta cumbre.

El apoyo de los distintos docentes de la Universidad que contribuyeron con sus laboratorios es algo que agradezco, gracias al profesor Rafael Rubilar del Laboratorio de Suelos, al profesor Manuel Sánchez del Laboratorio de Semillas (Ambos de la Facultad de Ciencias Forestales), y al profesor Mauricio Schoebitz de la Facultad de Agronomía, quién facilitó acceso a los laboratorios modulares de esta facultad.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CONTENIDO	PÁGINA
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS	V
ÍNDICE DE TABLAS	VI
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
RESUMEN.....	8
1. INTRODUCCIÓN	10
1.1 ESFUERZOS LOCALES CONTRA EL CAMBIO CLIMÁTICO	10
1.2 EL PROBLEMA CON LOS GASES DE EFECTO INVERNADERO	11
1.3 LAS DINÁMICAS DE CARBONO Y EL SUELO.....	11
1.4 CHILE Y LA AGROFORESTERÍA	12
2. METODOLOGÍA	15
2.1 LUGAR DE ESTUDIO.....	15
2.2 MEDICIÓN DE TEMPERATURA Y HUMEDAD	19
2.3 MEDICIÓN DE LA DENSIDAD DE DOSEL	19
2.4 CARBONO EN LITERA Y DESCOMPOSICIÓN FOLIAR	20
2.5 CARBONO EN LIXIVIADOS.....	21
2.6 RESPIRACIÓN DEL SUELO	21
2.7 ANÁLISIS DE LOS DATOS	23
3. RESULTADOS.....	24
3.1. MEDICIONES DE TEMPERATURA Y HUMEDAD.	24
3.2. LITERA FOLIAR.	29
3.3 DESCOMPOSICIÓN DE LA HOJARASCA.	31
3.4 RESPIRACIÓN DE SUELO	34
3.5 LIXIVIADOS	37
4. DISCUSIÓN	38
1.1. TEMPERATURA Y HUMEDAD	38
1.2. LITERA FOLIAR Y DESCOMPOSICIÓN DE HOJARASCA	40
1.3. CARBONO PRESENTE EN LIXIVIADOS	44
1.4. RESPIRACIÓN DEL SUELO.....	45
5. CONCLUSIONES	48
6. BIBLIOGRAFÍA	50

ÍNDICE DE TABLAS

CONTENIDO	PÁGINA
Tabla 2.1. Descripción de los tratamientos y del sitio de estudio en el predio fiscal Ranchillo Alto, Chile.).....	18
Tabla 3.1. Promedio de temperaturas y humedades trianuales (2017-2018-2019).....	26
Tabla 3.3. Pérdida de peso de hojarasca en las bolsas de descomposición durante 17 meses.....	31
Tabla 3.4. Respiración de suelo en g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹ para 3 tratamientos.	35
Tabla 3.5. Medias del carbono orgánico total disuelto presente en lixiviados).	37

ÍNDICE DE FIGURAS

CONTENIDO	PÁGINA
Figura 2.1 mapa de Chile (a), se muestra la región del ñuble (b) y luego el sitio de estudio “ranchillo alto” (b) ubicado en Yungay	17
Figura 3.1. Promedio mensual de las temperaturas medias anuales de 2017, 2018 y 2019	27
Figura 3.2. Promedio mensual de humedad media anual de 2017, 2018 y 2019 para 2 profundidades distintas.	28
Figura 3.3. Litera foliar capturada (en gramos) en trampas de litera cónicas (2019) en los 3 tratamientos	30
Figura 3.5. Curvas de descomposición de hojarasca para los 3 tratamientos	33
Figura 3.6. Curva de dispersión de datos que representan las tasas de respiración de suelo para los 3 tratamientos	36

RESUMEN

Existe limitada información en cuanto a las dinámicas de carbono en sistemas silvopastoriles ubicados en sectores precordilleranos de clima templado. Esto es preocupante, puesto que las causas y consecuencias del cambio climático han degradado el ambiente de manera irreversible, provocando situaciones que frecuentemente no logran ser identificadas a tiempo, por esto, se vuelve imperante identificar y validar nuevas técnicas de manejo sustentable del suelo, las cuales integren perspectivas sustentables, donde confluya medioambiente, economía y comunidad. En respuesta a esta necesidad, el presente estudio investigó dinámicas de carbono seleccionados en un sistema silvopastoril que involucra especies forrajeras, bosque nativo (Roble) y ganado, con el fin de modelar como ocurren los ingresos y las pérdidas de carbono dentro del sistema, en el mediano y largo plazo. El estudio se realizó en el predio “Ranchillo Alto”, Comuna de Yungay, Chile, entre los años 2020 y 2023. En este sector precordillerano de clima templado, abunda un bosque altamente degradado de *Nothofagus obliqua* (Roble). El presente estudio se realizó en 4 condiciones, las que para fines metodológicos, se considerarán como “tratamientos”: Semi-cerrado (SC), Semi-abierto (SA), Abierto (A), y un control (Ctrl), que corresponde a bosque no intervenido. Esta clasificación se realizó en función del porcentaje de penetración lumínica que logra ingresar al suelo, definiéndose Semi-Cerrado (SC, 45-55%), Semi-Abierto (SA, 65-75%) y Abierto (A, 85-95%). en cada uno de ellos se analizaron 4 dinámicas de carbono (C) de forma comparativa, utilizando la metodología

de descomposición de hojarasca y trampas de litera, se identificó que, luego de 17 meses, SC presentó una descomposición más lenta de la hojarasca, conservando un 9% más de hojarasca que SA, y un 11,4% más que A. De igual forma, en SC se registró la mayor tasa de respiración de suelo, lo que se asocia a una mayor actividad de la microbiota del suelo, la cual se beneficia de la gran cantidad de litera foliar que es depositada en SC, y mayores temperaturas y humedad de este tratamiento. Si bien las causas de estas diferencias se deben principalmente a los microclimas presentes en este ensayo (SC, SA y A), la temperatura media anual no registra diferencias significativas, pese a esto, se identifica que en A se alcanzan los máximos de temperatura en verano. Finalmente, la medición de lixiviados de C no otorgó diferencias significativas entre tratamientos, lo que podría explicarse por la reciente intervención (del manejo agroforestal), que estos sectores han recibido. Para estudios futuros, se sugiere fortalecer la forma en que se definen los puntos de muestreo dentro de un microclima, puesto que incluso dentro de el mismo tratamiento, existió una amplia dispersión de los datos, lo que podría explicarse por la presencia de “microclimas dentro de los microclima”.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Esfuerzos locales contra el cambio climático

En Chile y el mundo, el bosque nativo es uno de los principales reguladores del medioambiente; proporciona servicios ecosistémicos como la captación y almacenamiento de carbono (C), la regulación del ciclo del agua, la conservación del suelo y la protección contra la erosión (Donoso, 2017), por lo tanto, es importante comprender sus dinámicas internas para prevenir su degradación. Los ecosistemas que forman las especies arbóreas autóctonas, poseen una complejidad multisistémica compuesta de animales, microbiota y plantas, un ejemplo de esto ocurre en la zona centro-sur de Chile, donde los bosques de *Nothofagus obliqua* sostienen relaciones bióticas y abióticas que afectan ciclos a nivel global (Ej.: Calentamiento global) y local (Ej.: Producción de madera y ganado). Por esto, investigadores de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Concepción, implementaron sistemas innovadores (Sistemas Agroforestales, SAF) que salvaguardan estas y otras aristas en sectores precordilleranos de la Región de Ñuble. Estas estrategias prometen crear una armonía entre las necesidades del campesinado, el medioambiente y el uso sustentable de los recursos, un quiebre de estos equilibrios, limitaría los bienes y servicios que ofrece un bosque, así como también su rol regulador del medioambiente.

1.2 El problema con los gases de efecto invernadero

Entre 1880 y 2012, la temperatura media mundial aumentó 0,85°C. Posteriormente, en 2018 se informó que el aumento de la temperatura media mundial era de 1,5°C (IPCC, 2018). La principal causa de este calentamiento global es el aumento del dióxido de carbono, (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, lo que altera el equilibrio radiactivo natural de la tierra (Forster et al., 2007). Las emisiones de CO₂ son causadas principalmente por la quema de combustibles fósiles, las industrias en general, el transporte y la creación de viviendas (Le Quéreé et al., 2020). Sin embargo, estos autores también indican que la deforestación y los cambios en el uso de la tierra, son importantes fuentes de emisión de CO₂, puesto que se altera las propiedades naturales que el suelo tiene para conservar el carbono. Pese al valor de esta conclusión, existe limitada investigación en torno a los bosques precordilleranos de la zona centro-sur de Chile, los cuales se encuentran bajo amenazas que aceleran su degradación, contribuyendo a las consecuencias globales antes descritas.

1.3 Las dinámicas de carbono y el suelo

El estudio de las dinámicas del C se constituye como un acercamiento relevante para comprender la salud de un bosque, puesto que nos permite analizar las dinámicas internas que ocurren dentro de estos ecosistemas. La selección de flujos y sumideros específicos de C permite analizar la cantidad de CO₂ que libera un bosque, la cantidad de CO₂ que retiene un bosque y las

dinámicas de transporte de C que ocurren dentro de un bosque. Una de las principales consecuencias del mal manejo del bosque nativo en Chile, es la significativa pérdida de cobertura vegetal, lo que conlleva a una erosión generalizada en las regiones del centro sur del país. Por otro lado, esta degradación del suelo conlleva la pérdida de nutrientes e importantes propiedades del suelo, contribuyendo más aún a la emisión de gases de efecto invernadero. (Pimentel et al., 1995). En Chile, CIREN (2010) indica que más del 50% de los suelos de Chile se encuentran con algún grado de erosión, proporción que, en regiones como Coquimbo, O'Higgins, y Maule, sube 82%, 53% y 49%, respectivamente.

1.4 Chile y la agroforestería

La cubierta forestal chilena alcanza los 17,66 millones de hectáreas y está compuesta por 14,41 millones de hectáreas de bosque nativo y 3,08 millones de hectáreas de plantaciones forestales (CONAF, 2017); en otras palabras, Chile es un país de vocación forestal y por esto, se vuelve necesario diseñar sistemas que se beneficien de la cubierta arbórea, como por ejemplo los “Sistemas Agroforestales (SAF)”. Nair (1993) los define como un sistema de uso del suelo en el que los árboles y/o arbustos se combinan con cultivos agrícolas y/o animales en la misma unidad espacial. Este sistema permite el uso múltiple de la tierra, proporcionando un escenario de producción capaz de conservar servicios ecológicos como la fijación de nutrientes y carbono, la retención de agua, la protección del suelo, la conservación de la

biodiversidad. y el almacenamiento de C (tanto en árboles como el suelo). Un SAF es el nombre colectivo que se le da al uso de sistemas y tecnologías, donde bajo una estrategia temporal y/o espacial, una componente arbórea es utilizada de manera deliberada en el mismo sitio que un cultivo agrícola y/o crianza de ganado. Sin embargo, para ser efectivamente un sistema agroforestal, debe poseer las siguientes características o criterios: (i) ser intensivo, es decir se realizan labores constantes de poda, raleo, limpieza, entre otros trabajos; (ii) ser integrado, sus distintas componentes se articulan de manera organizada y coherente entre sí; (iii) ser interactivo, puesto que las partes que lo conforman interactúan entre ellas a través de relaciones interespecíficas; y (iv) ser intencional, es decir, las especies presentes y las labores realizadas en un sistema agroforestal se encuentran dentro de un plan de ordenamiento predial (Gordon y Newman 1997).

En la ciudad de Coyhaique (Región de Aysén) existen experiencias pioneras de este tipo, entre ellas está la investigación de Dube et al. (2012), donde se estudió comparativamente los flujos de C entre un sistema silvopastoril basado en *Pinus ponderosa* (Dougl. Ex Laws), un sector de monocultivo de la misma especie arbórea y especies forrajeras en sectores abiertos. En esta investigación se identificó que el microclima generado por la componente arbórea conserva una temperatura, calidad de suelo y una humedad favorable para el desarrollo de un estrato inferior, lo que potencialmente beneficiaría el desarrollo de especies vegetales (forrajeras o agrícolas) y animales en este segmento. Schoeneberger (2008) plantea que esta técnica puede entregar una serie de beneficios para las comunidades rurales que lo implementen en sus

predios, ya que pueden ser utilizados como cortinas cortaviento (para evitar la deshidratación de las hojas y el estrés mecánico producido por las corrientes de viento), fajas riparianas (para evitar la sedimentación y contaminación con agroquímicos hacia los cursos fluviales), para aumentar la síntesis de metabolitos secundarios en plantas (Muschler, 2001) y otros usos de alto impacto ambiental y económico.

En el presente estudio se analizará cómo se comportan diversas dinámicas de Carbono, según la densidad del dosel de *Nothofagus obliqua*. En Ranchillo Alto, existen condiciones de dosel contrastantes, que permiten analizar el efecto de una amplia cobertura (Semi Cerrado), una cobertura equilibrada (Semi Abierto), y un sector con pradera (Abierto), para contrastar estos resultados con un bosque degradado sin manejo agroforestal, se considerará un Control que cumple con esta definición.

2. METODOLOGÍA

2.1 Lugar de Estudio.

El sitio de estudio está localizado en el predio “Ranchillo Alto”, en la comuna de Yungay (37°04’, 71°39’W), Región de Ñuble, Chile, en un área de 635 ha con suelos de origen volcánico (Alfaro et al. 2018). El clima predominante es mediterráneo templado con una temporada seca de 4 meses. Las precipitaciones anuales promedio son de 3.000 mm y se registró una temperatura media anual de 13,5°C (Rivas et al., 2009). El sitio incluye una extensa área de bosque nativo que históricamente ha sufrido una fuerte presión por parte de la comunidad y sus labores de subsistencia; el pastoreo de ganado, la tala para leña, carbón y material de construcción, han afectado drásticamente la biodiversidad, la calidad del suelo y la existencia del bosque (Dube et al., 2016). Pese a esto, el campesinado se ve obligado a replicar estos usos, puesto que no existen alternativas sustentables a su alcance, por esto, en Ranchillo Alto (R.A) se están desarrollando iniciativas pioneras que buscan contribuir al posicionamiento de los Sistemas Agroforestales como alternativas productivas sustentables. En el sector sur de R.A existe un manejo agroforestal en bosque de roble (*N. obliqua*), el cual define tres grados de cobertura de dosel. Estas se definen como Semi Cerrado (SC), Semi Abierto (SA) y Abierto (A). Sin embargo, para contrastar estos tratamientos con un bosque degradado sin manejo agroforestal, se considerará un Control (Ctrl) cuando corresponda. Aquí se realizó un estudio de tres años (mayo de 2020 a mayo de 2023), y consideró evaluaciones de

verano, otoño, invierno y primavera para 4 dinámicas de Carbono. El área experimental fue de 12 ha. Cada tratamiento cuenta con una división interna de 3 sub-parcelas (EJ: SC1, SC2, SC3).

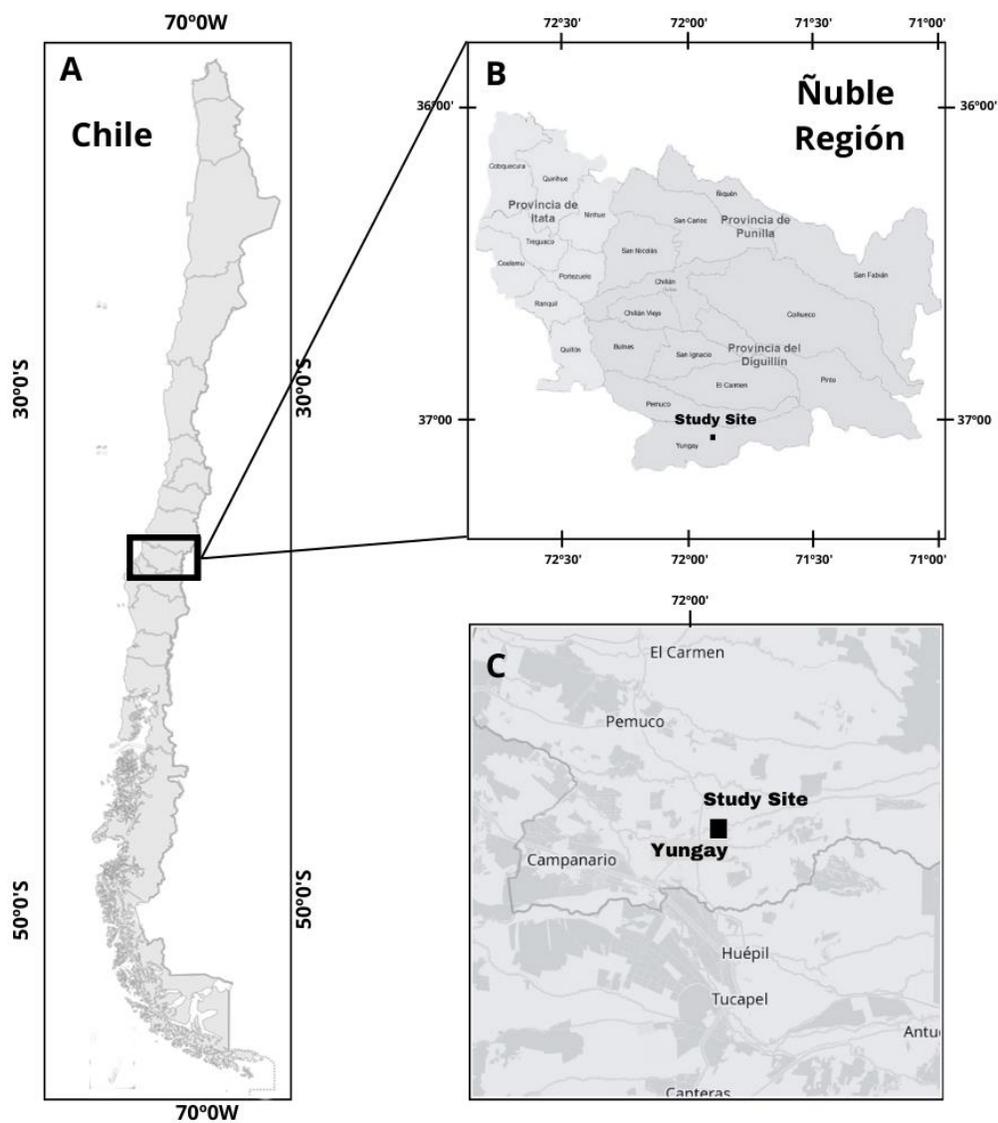


Figura 2.1 Mapa de Chile (A), se muestra la Región del Ñuble (B) y luego el sitio de estudio “Ranchillo Alto” (B) ubicado en Yungay

Tabla 2.1. Descripción de los tratamientos y del sitio de estudio en el predio fiscal Ranchillo Alto, Chile. Adaptado de Alfaro et al. (2018).

Tratamiento	% cobertura arbórea	Especies arbóreas	Densidad población (árboles ha ⁻¹)	Media Diámetro altura pecho (cm)	Área Basal (m ² ha ⁻¹)	Altura media (m)
A	85-95% de luz externa	<i>Nothofagus obliqua</i>	60	38,5	6,98	14
SA	65-75% de luz externa	<i>Nothofagus obliqua</i> , <i>Lomatia hirsuta</i> , Diels ex J.F. Machr	134	39,0	16,0	26
SC	45-55% de luz externa	<i>Nothofagus obliqua</i> , <i>Lomatia hirsuta</i>	258	32,0	20,7	20

2.2 Medición de Temperatura y Humedad

Con el fin de identificar las diferencias que produce la densidad arbórea de cada parcela, se midió la humedad y la temperatura del suelo a una profundidad de 20 cm y la temperatura del aire superficial, a 5 cm sobre el suelo. Las mediciones se realizaron cada 2 h durante un periodo de 12 meses (2017-2019) (Espinoza, 2021), mediante sensores EC-20 de humedad de suelo y sensores de temperatura ECT respectivamente, conectados a Data Loggers modelo Em5b de cinco canales (Decagon Devices, WA, USA). Se ubicó un Data Logger en las diferentes condiciones de dosel. Se promediaron valores mensuales y estacionales obtenidos por cada tratamiento.

2.3 Medición de la Densidad de Dosel

Para el establecimiento de las parcelas según cobertura de dosel, en 2015 se utilizó el instrumento Solariscope SOL-300B (Behling, Alemania), que permite medir la luminosidad directa, indirecta y total, entre otros parámetros a la altura del sotobosque (1,5 m) en los distintos tratamientos. Las evaluaciones se realizaron cada 20 m en dos transectos paralelos (1000 de m largo, con 50 m de espaciamiento), con orientación de este a oeste en cada nivel de alteración de bosque (Dube & Stolpe, 2016). De esta forma, se define el tratamiento Semi Cerrado (SC), Semi Abierto (SA), y Abierto (A). Los doseles seleccionados están compuestos en su mayoría por *Nothofagus obliqua*.

2.4 Carbono en Litera y Descomposición Foliar

La caída anual de litera foliar se determinó con trampas cónicas de 1 m² ubicadas al azar en cada parcela de estudio. Las tasas de descomposición de la hojarasca bajo el dosel arbóreo, se cuantificó usando el método de "litterbags". Se depositó tejido foliar fresco en bolsas de poliéster de 20 x 20 cm con malla de 0,5 mm, para que todo el material vegetal esté en contacto con el suelo (Berg y Laskowski, 2006). Para esto, se utilizaron 36 bolsas para cada tratamiento (Semi Cerrado, Semi Abierto, Abierto y Control), es decir un total de 144 bolsas de poliéster, con la finalidad de establecer un ensayo por triplicado, estas se dispusieron en núcleos de 12 bolsas en las subparcelas de cada tratamiento (Ej: 12 bolsas para SC1, 12 bolsas para SC2 y 12 bolsas para SC3, etc.). Se realizaron 4 muestreos durante un período de 17 meses (mes 3, 9, 12 y 17), en cada muestreo se retiraron 3 bolsas de cada unidad muestral, estas se secaban al sol por 72 h y posteriormente eran pesadas, en base a esta información, se creó una curva que describió la descomposición de hojarasca durante estos 17 meses.

La constante de descomposición se calculó siguiendo la siguiente formula:

$K = ((\ln * pf/pi) / -t)$, Donde:

Ln es Logaritmo

Pf es peso final

Pi es peso inicial

t es tiempo (en meses)

K es constante de descomposición

2.5 Carbono en lixiviados

Con el objetivo de establecer 3 puntos de muestreo por tratamiento, se realizó 1 penetración de 80 cm de profundidad en el suelo de cada subparcela de los tratamientos (SC, SA, A y C). Posteriormente, en cada estación del año se instaló un total de 12 lisímetros de tensión en estos agujeros, con el objetivo de crear una succión de 85 kPa a través de una bomba manual, este proceso se ejecutaba durante 24h y permitió obtener muestras que contienen el C que desciende por el sustrato (Soil Moisture Equipment, 1997). Al recolectar las muestras, se obtiene aproximadamente 20 ml a 50 ml de solución, la cual se almacena a -7°C . Finalmente, las muestras se trabajaron en un equipo TOC-L SHIMADZU. TOTAL ORGANIC CARBON ANALYZER para medir carbono orgánico disuelto, esto se realizó en los Laboratorios Modulares de la Facultad de Agronomía, Universidad de Concepción

2.6 Respiración del Suelo

Se midió utilizando el método de “soda carbonatada”, para esto se preparó un total de 12 frascos con 50g de soda carbonatada cada uno. Previo a cada muestreo, cada frasco debía secarse a 105°C durante 24 horas antes de llevarse al campo, donde se ubicarán bajo cámaras cilíndricas en zonas sin vegetación. Utilizando las subparcelas de cada tratamiento (Ej: SC1, SC2, SC3), estas unidades muestrales se dispusieron (destapadas) por triplicado en cada tratamiento, además, se define un blanco, el cual corresponde a un cilindro que no va al suelo, sino que solo genera un encapsulamiento del

frasco abierto. Luego de 24h se retiran los frascos, se traslada el contenido a placas Petri y se depositan en un horno, se secan a 105°C por 24h para eliminar la humedad y se pesa cada frasco. Se estima la cantidad de CO₂ producido, como la diferencia entre el peso de la cal sodada final e inicial, luego, para estimar el CO₂ producido por metro cuadrado cada hora, se ejecuta el siguiente proceso matemático (Edwards, 1982):

Se calcula el CO₂ producido en cada frasco como:

Cambio en peso del blanco (g) = Pb = (Peso final del blanco – Peso inicial del blanco)

CO₂ absorbido del suelo (g) = Peso final frasco – Peso inicial frasco – Pb

Se calcula la emisión (E) de CO₂ para cada frasco:

Ac = Área de suelo que cubre la cámara (m²)

$E \text{ (g CO}_2\text{m}^{-2}\text{h}^{-1}) = (\text{CO}_2 \text{ absorbido del suelo} * 1,69) / \text{Ac} / 24\text{h}$

1,69 equivale a un factor de corrección estandarizado (Grogan, 1998)

2.7 Análisis de los Datos

Para analizar las variables, se trabajaron variables en base a un diseño completamente aleatorizado con tres tratamientos contrastantes por el tratamiento en sí, pero equivalentes en todas las demás condiciones. Para analizar los efectos que cada tratamiento tiene sobre las variables, se diseñó un análisis basado en ANOVA de 1 vía. Previamente, se verificó la normalidad de los datos y la igualdad de varianzas entre los grupos. Luego se realizó un contraste mediante un test de Tukey ($P < 0,05$) con el software INFOSTAT, que permita identificar diferencias estadísticamente significativas para las variables de cada tratamiento. Gráficos y tablas se realizaron con el software SIGMAPLOT.

3. RESULTADOS

3.1. Mediciones de temperatura y humedad.

La figura 3.1 presenta la temperatura media obtenida con datos de 3 años consecutivos (2017, 2018 y 2019) en 3 horizontes verticales: 1) profundidad: 0-20 cm, 2) profundidad de 20-40 cm, y 3) la temperatura de aire superficial del suelo (+ 5 cm). La figura 3.2 presenta la humedad media anual de 3 años consecutivos (2017, 2018 y 2019). Se registraron 2 profundidades para la humedad media anual: 0-20 cm y 20-40 cm.

En la tabla 3.1 se describen las medias de 3 años de mediciones, valores máximos y mínimos para cada tratamiento, según la medición y su ubicación. Si bien la temperatura media anual para cada tratamiento y profundidad no presentó diferencias estadísticamente significativas, es posible identificar diferencias significativas en las estaciones y meses específicos.

El sector Abierto alcanza temperaturas máximas mayores a los sectores Semi Abierto y Cerrado, demostrándose una menor capacidad de regulación térmica en el sector Abierto. En cuanto a la humedad, es posible identificar diferencias significativas en las medias anuales de las 2 alturas medidas, destacándose valores altos (estadísticamente significativos) en el sector Semi Abierto.

El verano (diciembre-marzo) representa la época con mayor temperatura

dentro del año, consecuentemente, es posible identificar diferencias significativas en la temperatura media en ambas profundidades de suelo. En la temporada estival, el tratamiento Semi Cerrado (SC) presenta una temperatura media estacional de $12,38 \pm 0,70$, mientras que Semi Abierto (SA) y Abierto (A), presentó una temperatura de $14,70 \pm 0,66$ y $17,57 \pm 0,79$ respectivamente. De acuerdo con el test de Tukey ($P < 0,05$), se determina una diferencia significativa que justifica una regulación térmica asociada a este tratamiento (SC).

En cuanto al frío, se identificó que en el invierno (junio-septiembre) de 2019 a 20-40 cm de, el tratamiento SC ($5,70 \pm 0,29$) obtuvo una menor temperatura que sus contrapartes SA ($7,79 \pm 0,59$) y A ($7,29 \pm 0,54$), también corroborado por el test estadístico de Tukey ($P < 0,05$) (Figura 3.1).

Respecto a la humedad relativa, en las medias anuales (2017, 2018 y 2019) se establecieron diferencias significativas anuales entre los tratamientos, la cual se mantiene para las mediciones realizadas a 0-20 cm y 20-40 cm de profundidad. Para las mediciones de 20-40 cm de 2017, se identifican humedades de 0,11 m³/m³ para SC, $0,35 \pm 0,02$ m³/m³ para SA y $0,12 \pm 0,01$ m³/m³ para A, estos valores poseen diferencias estadísticamente significativas según Tukey ($P < 0,05$). Una tendencia similar se exhibe para los años 2018 y 2019 (Figura 3.2.) Así, se establece que SA posee una mayor humedad en estos estrato de suelo, seguido por SC y A.

Tabla 3.1. Promedio de temperaturas y humedades trianuales (2017-2018-2019) para distintas profundidades (Temperatura 1, 0-20 cm; Temperatura 2, 20-40cm; Temperatura 3, +5cm. Humedad 1, 0-20cm; Humedad 2, 20-40cm). Descripción de los máximos y mínimos alcanzados en cada tratamiento.

Medición	Tratamiento	Media	Máximo	Mínimo
T1 0-20cm (°C)	SC	10,32 ± 0,94	15,75	6,34
	SA	11,24 ± 1,04	16,21	6,02
	A	11,91 ± 1,24	18,28	6,21
T2 20-40 cm (°C)	SC	9,39 ± 0,97	14,44	4,83
	SA	11,28 ± 0,95	15,56	6,38
	A	12,39 ± 1,4	19,53	6,11
T° +5cm (°C)	SC	11,32 ± 1,25	18,07	5,97
	SA	12,01 ± 1,32	17,91	5,18
	A	12,39 ± 1,57	21,31	5,59
H1 0-20cm (m ³ /m ³)	SC	0,12 ± 0,01	0,17	0,06
	SA	0,29 ± 0,02	0,36	0,20
	A	0,12 ± 0,01	0,15	0,05
H1 20- 40cm (m ³ /m ³)	SC	0,11 ± 0,01	0,16	0,05
	SA	0,35 ± 0,02	0,43	0,24
	A	0,12 ± 0,01	0,17	0,05

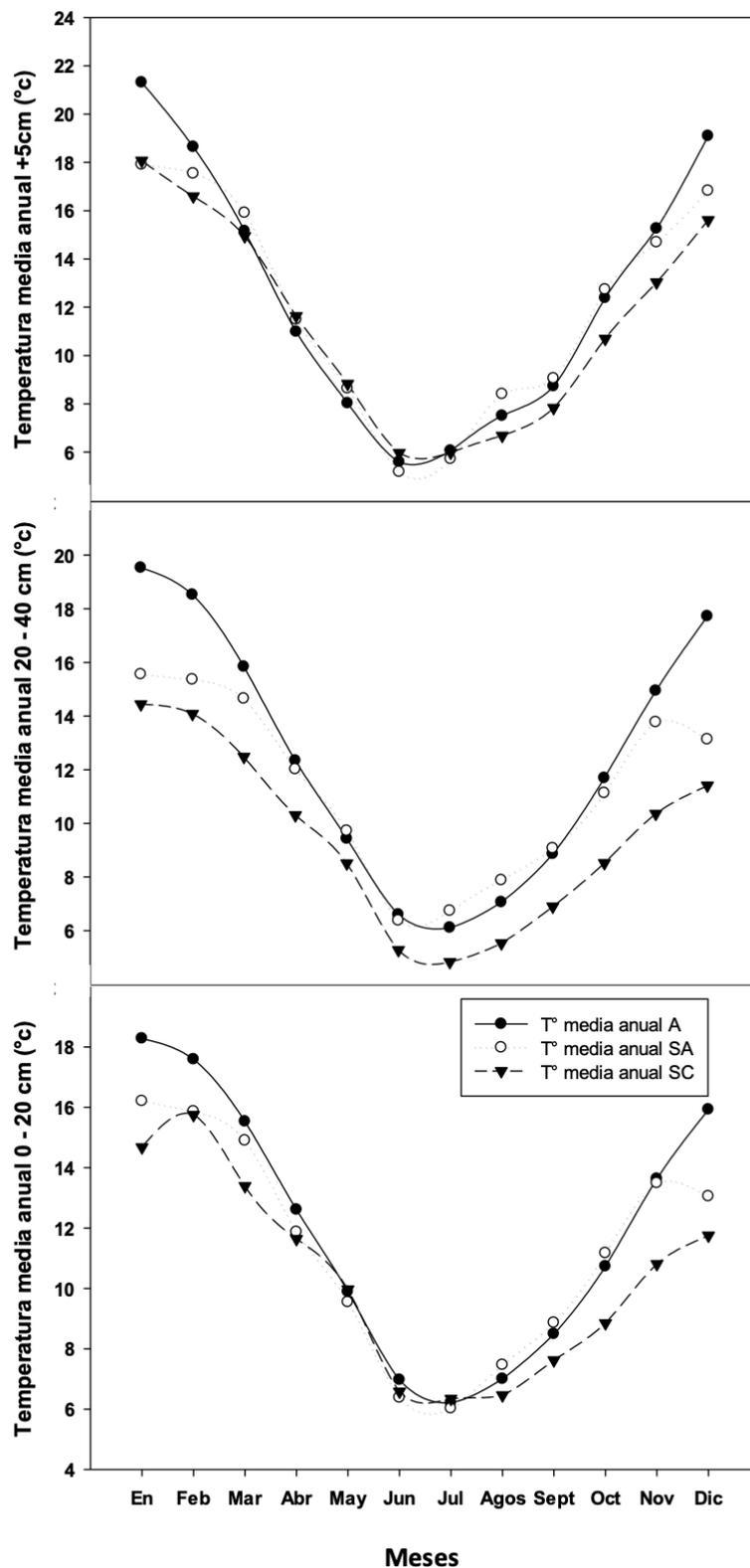


Figura 3.1. Promedio mensual de las temperaturas medias anuales de 2017, 2018 y 2019 para 2 profundidades distintas. 1) 0-20 cm, 2) 20-40 cm y 3) 5cm hacia arriba del suelo. Se presentan curvas de dispersión para cada set de datos obtenidos en los tratamientos: Semi Abierto, Abierto y Semi Cerrado de “Ranchillo Alto”, comuna de Yungay, Chile.

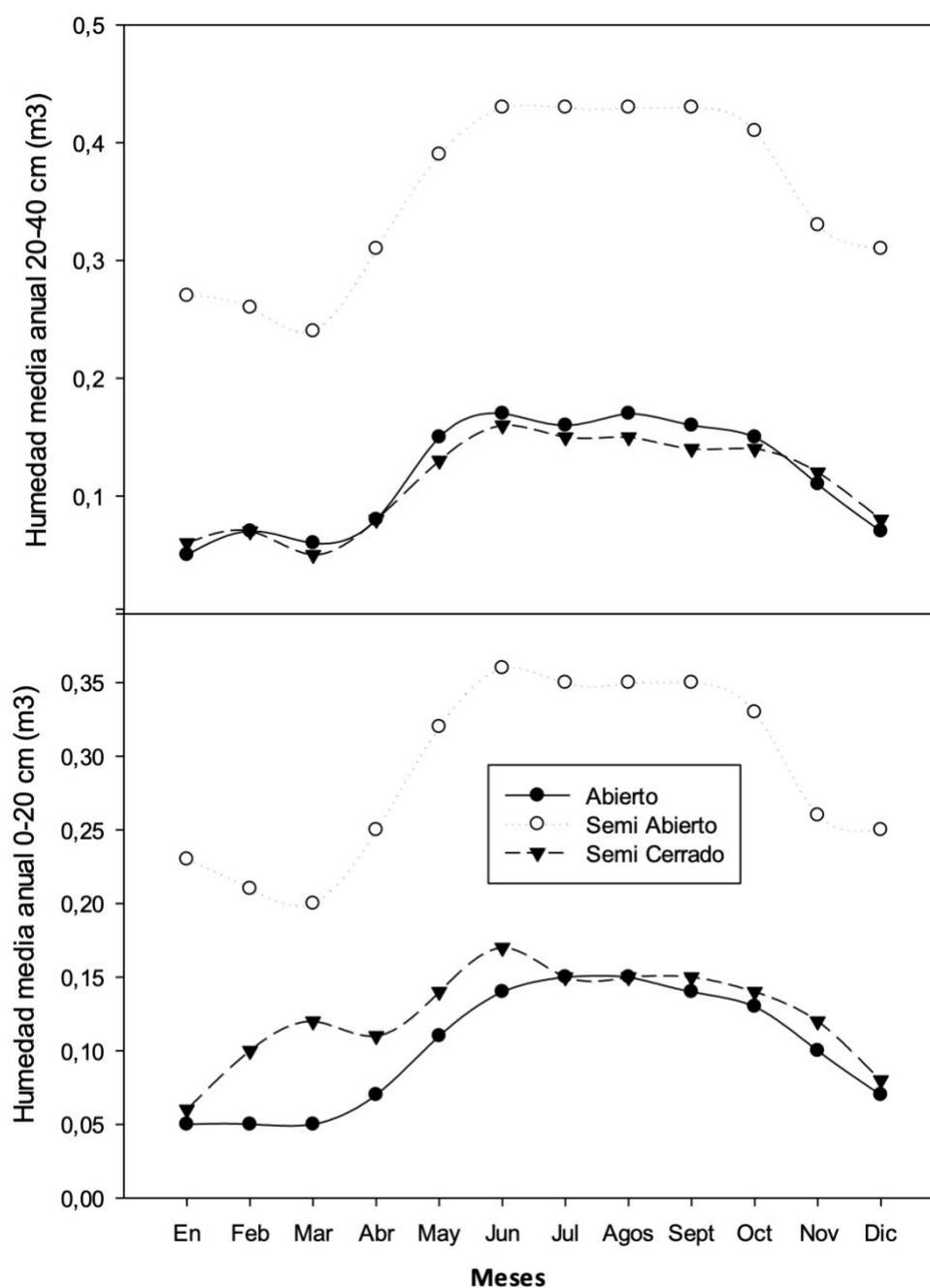


Figura 3.2. Promedio mensual de humedad media anual de 2017, 2018 y 2019 para 2 profundidades distintas. 1) 0-20 cm, 2) 20-40 cm.. Se presentan curvas de dispersión para cada set de datos obtenidos en los tratamientos: Semi Abierto, Abierto y Semi Cerrado de “Ranchillo Alto”, comuna de Yungay, Chile.

3.2. Litera foliar.

Siguiendo la metodología de las trampas cónicas, se registró la litera foliar que cayó en la temporada otoñal de 2019. Según el test de Tukey ($P < 0,05$), los tratamientos presentan diferencias estadísticamente significativas en la cantidad de litera foliar (en gramos) que fue depositada en el suelo. Para Semi cerrado se registró un peso de hojarasca recolectada equivalente a $292,96 \text{ g} \pm 12,82 \text{ g}$, $162,97 \text{ g} \pm 4,06 \text{ g}$ para Semi Abierto y $134,62 \text{ g} \pm 37,41 \text{ g}$ para Abierto (Figura 3.3).

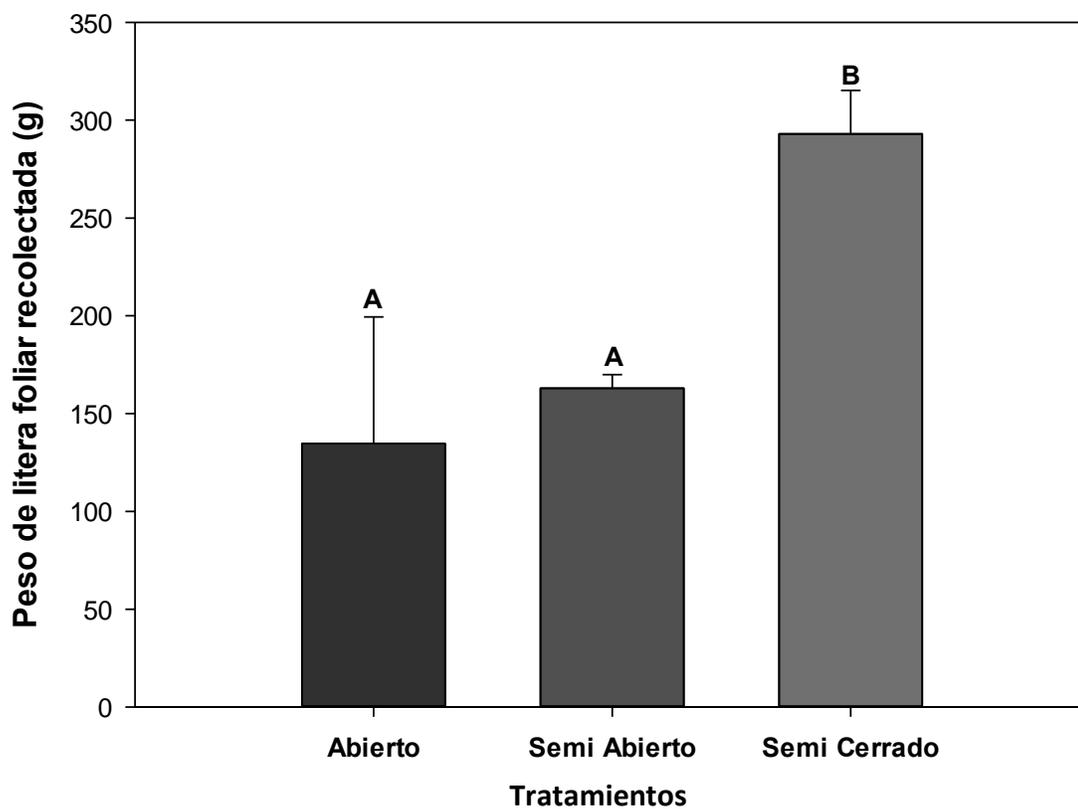


Figura 3.3. Litera foliar capturada (en gramos) en trampas de litera cónicas (2019) en los 3 tratamientos (Abierto, Semi Abierto y Semi Cerrado). Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre tratamientos (Test de Tukey, $P < 0,05$).

3.3 Descomposición de la hojarasca.

Se describen los datos obtenidos de un proceso de 17 meses que monitoreó la descomposición de hojarasca recolectada en el otoño 2019. Se contrasta el efecto que los 3 tratamientos (y un control) tuvieron sobre la pérdida de material en cada una de las bolsas (Tabla 3.3). Se presenta curva de descomposición para diagramar la pérdida de peso en el tiempo (figura 3.5) Finalizado el proceso, fue posible identificar diferencias estadísticamente significativas para la descomposición de la hojarasca entre los tratamientos. El análisis de los datos expone que el microclima asociado a las condiciones Semi Cerrada y Control, contribuye a una degradación parcialmente más lenta que sus contrapartes Abierta y Semi Abierta (según test de Tukey, $P < 0,05$).

Dentro de este análisis, se identifica una rápida descomposición inicial, seguida de una descomposición más lenta, pero con ritmos que persisten durante el ensayo. Un ejemplo de esto, son las medias de peso y el porcentaje que representa la hojarasca perdida en las bolsas en los primeros 9 meses, donde se identifica una rápida descomposición en el sector Abierto ($6,28g \pm 0,05$, pérdida porcentual de $37,2\% \pm 0,28$), versus el Semi Abierto ($6,68g \pm 0,37$, pérdida porcentual de $33,2\% \pm 2,14$) y el Semi Cerrado ($7,2g \pm 0,13$, pérdida porcentual de $28\% \pm 0,74$). En el muestreo final (17 meses), se identifica que el Semi Cerrado ($4,09 g \pm 0,16$) logra mantener la hojarasca por más tiempo en el suelo, versus el Semi Abierto ($3,18 g \pm 0,07$) y Abierto ($2,95 g \pm 0,08$), donde se identifica una mayor descomposición de hojarasca.

Tabla 3.3. Pérdida de peso de hojarasca en las bolsas de descomposición durante 17 meses. Diferencias estadísticas se indican por letras diferentes en cada muestreo para cada tratamiento, según test de Tukey ($P < 0,05$).

Mes	Tratamiento	Peso de hojarasca muestreada (g)	Pérdida porcentual de peso (%)	Constante de descomposición
3	SC	8,92 ± 0,04 c	10,8 ± 0,22 c	-0,04 ± 7,4E-04 c
	SA	8,69 ± 0,07 b	13,1 ± 0,41 b	-0,05 ± 2,90E-03 b
	A	8,44 ± 0,02 a	15,6 ± 0,11 a	-0,06 ± 7,8E-04 a
	Ctrl	8,96 ± 0,14 c	10,4 ± 0,79 c	-0,04 ± 2,90E-03 c
9	SC	7,20 ± 0,13 b	28,0 ± 0,74 b	-0,04 ± 1,2E-03 b
	SA	6,68 ± 0,37 a	33,2 ± 2,14 a	-0,04 ± 4,0E-03 a
	A	6,28 ± 0,05 a	37,2 ± 0,28 a	-0,05 ± 5,80E-04 a
	Ctrl	7,21 ± 0,01 b	27,9 ± 0,08 b	-0,04 ± 1,2E-03 b
12	SC	6,08 ± 0,02 c	39,2 ± 0,13 c	-0,04 ± 5,80E-04 c
	SA	5,56 ± 0,08 b	44,4 ± 0,47 b	-0,05 ± 1,00E-03 b
	A	4,96 ± 0,03 a	50,4 ± 0,16 a	-0,06 ± 5,80E-04 a
	Ctrl	6,09 ± 0,04 c	39,1 ± 0,21 c	-0,04 ± 5,80 E-04 c
17	SC	4,09 ± 0,16 b	59,1 ± 0,88 b	-0,05 ± 1,30E-03 b
	SA	3,18 ± 0,07 a	68,2 ± 0,39 a	-0,07 ± 6,70E-04 a
	A	2,95 ± 0,08 a	70,5 ± 0,45 a	-0,07 ± 8,80E-04 a
	Ctrl	4,08 ± 0,08 b	59,2 ± 0,49 b	-0,05 ± 1,00E-04 b

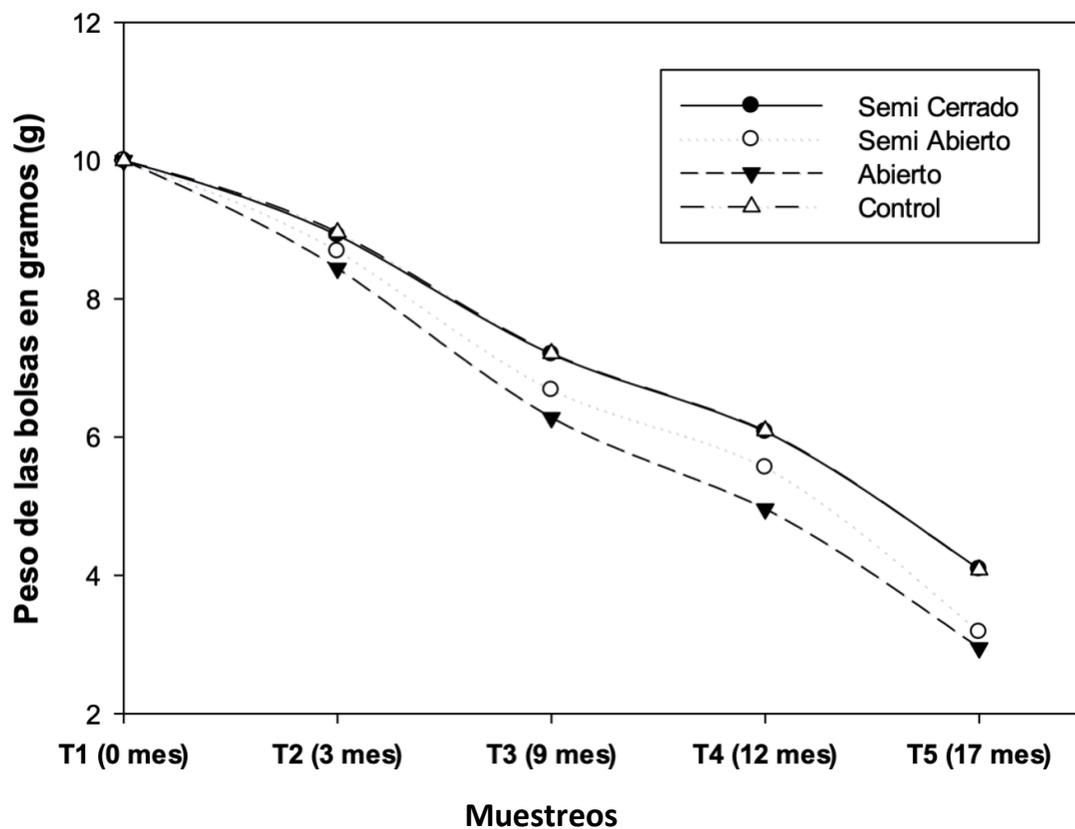


Figura 3.5. Curvas de descomposición de hojarasca para los 3 tratamientos (Semi Abierto, Abierto y Semi Cerrado) y 1 control. Se expone la pérdida de peso promedio (gramos) de cada tratamiento. Mes 0 corresponde a julio de 2020, Mes 3 corresponde a octubre de 2020, Mes 9 corresponde a mayo de 2021, Mes 12 corresponde a septiembre de 2021 y Mes 17 corresponde a febrero de 2022.

3.4 Respiración de Suelo

Se presentan datos referentes a la respiración del suelo para 4 condiciones, los 3 tratamientos; Abierto, Semi Abierto, Semi Cerrado; y un control (Bosque degradado sin manejo silvopastoril). Se considera la emisión que realizó 1 metro cuadrado de suelo por hora (Tabla 3.4). Los ensayos demostraron que el tratamiento “Semi Cerrado (SC)” posee una mayor respiración de suelo en las estaciones de mayor calor (Primavera Verano). Esto se observa claramente en verano, donde se identifica una diferencia estadísticamente significativa (Tukey, $P < 0,05$) para el Control $1,0077 \pm 0,1$ CO₂ m⁻² h⁻¹ (b) y el SC $0,9289 \pm 0,03$ g CO₂ m⁻² h⁻¹ (b), versus Abierto (A) $0,5180 \pm 0,01$ g CO₂ m⁻² h⁻¹ (a) y Semi Abierto $0,6494 \pm 0,01$ g CO₂ m⁻² h⁻¹ (a). Se identifica una tendencia entre mayores temperaturas y mayores respiraciones de suelo, en consecuencia, la respiración de suelo (g CO₂ m⁻² h⁻¹) fue mayor en verano para todos los tratamientos, y se alcanzaron los menores valores en invierno (Figura 6). En concordancia con los datos, el control propuesto (se acercó a los valores obtenidos en el tratamiento SC, seguramente por la similitud en su composición. Por lo mencionado anteriormente, existe una tendencia a que los lugares con mayor densidad arbórea poseen una mayor respiración de suelo (Figura 7). Pese a esto, existe una alta desviación en los datos pertenecientes a cada muestreo por tratamiento, probablemente debido a que cada lugar de muestreo (dentro de cada tratamiento), es afectado por diversas variables bióticas, y abióticas complejas de identificar, como por ejemplo la formación de pequeños microclimas dentro del tratamiento, las cuales, a su vez, propicien la presencia de determinadas macrobiotas o microbiotas.

Tabla 3.4. Respiración de suelo en g CO₂ m⁻² h⁻¹ para 3 tratamientos (Semi Cerrado, Semi Abierto, Abierto) y un control (Ctrl) (Bosque degradado sin manejo agroforestal) en las 4 estaciones (verano, otoño, invierno y primavera). Letras diferentes indican diferencias estadísticamente significativas entre las medias de cada tratamiento según la estación (Tukey, P < 0,05).

Tratamiento	Respiración de suelo (g CO ₂ m ⁻² h ⁻¹)			
	Verano	Otoño	Invierno	Primavera
A	0,5180 ± 0,01 a	0,3646 ± 0,06 a	0,3326 ± 0,08 a	0,4387 ± 0,05 a
SA	0,6494 ± 0,01 a	0,4591 ± 0,13 a	0,3160 ± 0,18 a	0,5811 ± 0,09 a
SC	0,9289 ± 0,03 b	0,5129 ± 0,28 a	0,4205 ± 0,18 a	0,4862 ± 0,15 a
Ctrl	1,0077 ± }0,1 b	0,6331 ± 0,32 a	0,4862 ± 0,15 a	0,7495 ± 0,05 a

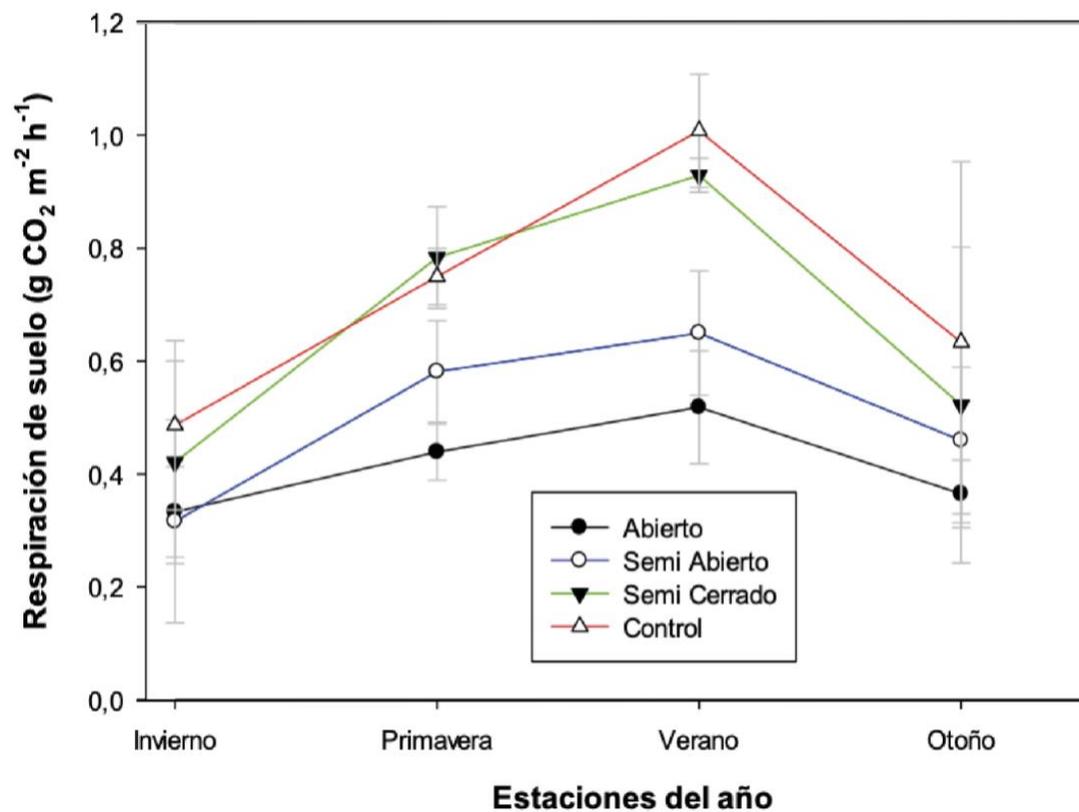


Figura 3.6. Curva de dispersión de datos que representan las tasas de respiración de suelo ($\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) para 3 tratamientos (Abierto, Semi Abierto, Semi Cerrado) y un control (bosque degradado sin manejo agroforestal). Los muestreos se realizaron en Mayo (invierno), Octubre (Primavera), Marzo (Verano) y Junio (Otoño). Se indican barras de error para cada media estacional

b

3.5 Lixiviados

El análisis que identificó el carbono orgánico total presente en muestras de lixiviados pertenecientes a los 3 tratamientos y un control (Ctrl) no otorgó diferencias estadísticamente significativas entre ellos (Tukey, $P < 0,05$). Sin embargo, es posible identificar que la media más alta ocurrió del ensayo realizado en el tratamiento Abierto $40,92 \text{ mg/L} \pm 4,06 \text{ a}$, mientras que el valor mínimo se identificó en el sector Semi Cerrado $33,8 \text{ mg/L} \pm 9,29 \text{ a}$, seguido del control (Ctrl) $40,62 \text{ mg/L} \pm 8,18$.

Tabla 3.5. Medias del carbono orgánico total disuelto presente en lixiviados (mg/L) para 3 tratamientos (Semi Cerrado, Semi Abierto, Abierto) y un control (Bosque degradado sin manejo agroforestal). Mediciones realizadas en primavera, invierno y otoño. Letras diferentes entre tratamientos indican diferencias significativas (Tukey, $P < 0,05$).

Tratamiento	Carbono orgánico total (TOC) en Lixiviados
SC	$33,8 \text{ mg/L} \pm 9,29 \text{ a}$
SA	$40,92 \text{ mg/L} \pm 4,06 \text{ a}$
A	$60,3 \text{ mg/L} \pm 14,43 \text{ a}$
Ctrl	$40,62 \text{ mg/L} \pm 8,18 \text{ a}$

4. DISCUSIÓN

El manejo agroforestal realizado en Ranchillo Alto permite analizar contrastes entre 3 microclimas diferentes. Debido a diferencias en su cobertura arbórea, los tratamientos Semi Cerrado (SC), Semi Abierto (SA) y Abierto (A), provocan una modificación local del clima (Barnes et al. (1998), afectando positiva, o negativa, el funcionamiento de determinados flujos de carbono.

1.1 Temperatura y Humedad

Si bien el análisis de datos no identifica diferencias significativas en las medias anuales de temperatura, se realizaron pruebas para meses y estaciones específicas. A través de este análisis de datos, se identificó que la temporada de verano (diciembre – marzo), representa la época con mayor temperatura dentro del año; consecuentemente, es posible identificar diferencias significativas para esta temporada de calor a 0-20 cm y 20-40 cm de profundidad del suelo, donde SC destaca como el tratamiento con menor temperatura, seguido de SA y A. Esto se comprueba también en el mes de enero, donde se mantiene esta diferencia estadísticamente significativa. El amortiguamiento térmico que se observa en SC se condice con lo concluido por Davies-Colley et al. (2000); en esta investigación, se analizaron distintos microclimas formados por cobertura arbórea, identificándose que, dentro de un bosque intacto, el efecto del viento es menor y las fluctuaciones de temperatura y humedad fluctúan de manera amortiguada entre el día, la noche

y las estaciones del año, en esta misma investigación, los autores observaron que dentro de un bosque intacto, en comparación con sectores intervenidos, es más helado y húmedo durante el día, mientras que en las noches es más cálido y seco. En el mismo estudio, se identificó que estas condiciones favorables se mitigan a medida que uno se acerca al borde del bosque, es decir, dentro de estos microclimas existen variaciones según el sitio donde uno se encuentre. Este descubrimiento sugiere que, dentro de un microclima, existen diversos eventos que podrían alterar la toma de datos, como, por ejemplo: sectores con denso pasto o especies forrajeras que formen sectores con condiciones climáticas diferentes a las del sector local, o también lugares donde grandes árboles proyecten su sombra o depositen gran cantidad de litera foliar, modificando de forma focalizada un sector del microclima. Resulta interesante conocer las temperaturas presentes en estos microclimas, puesto que el manejo sustentable del bosque podría otorgar las condiciones ideales para establecer usos agrícolas que favorezcan el correcto funcionamiento de las dinámicas del carbono. Sin ir más lejos, resguardar una temperatura estable resguarda la actividad biótica del suelo, tanto de las zonas radiculares (y su trabajo de recolección de agua y nutrientes) (Fischer 1997), como también de la microbiota del suelo (y su función en las dinámicas del carbono).

En cuanto a la humedad relativa, en las medias anuales (2017, 2018 y 2019), se establece una constante diferencia significativa anual entre los tratamientos. Esto se mantiene para las profundidades del suelo a 0-20 cm y 20-40 cm, donde SA destaca con una mayor humedad, seguido de SC y A.

Esta variable nos permite comprender que existe una correlación entre la temperatura y la humedad. Al aumentar las temperaturas, la humedad disminuye. En un ensayo realizado por Promis et al. (2010) sobre microclimas en el interior de un bosque de *Nothofagus pumilio*, se identificó una interdependencia entre los contenidos de humedad y temperatura, rescatando la idea de que el interior de los bosques tiende a ser más húmedo que el exterior. Vásquez et al. identificaron que la actividad de la microbiota del suelo es mayor cuando la temperatura y la humedad es mayor, y que esto se correlaciona con una mayor actividad respiratoria en el suelo. Por lo tanto, un microclima como el encontrado en el Semi Cerrado, que posee umbrales amortiguados entre sus máximos y mínimos de Temperatura y Humedad relativa, contribuye a que el Carbono se mantenga por más tiempo en el suelo. Finalmente, la regulación térmica y la conservación de humedad en el suelo se constituyen como una forma de conservación de las propiedades del suelo, preservando su estructura, nutrientes, humus, etc.

1.2. Litera foliar y Descomposición de hojarasca

Alfaro et al. (2018) describieron la densidad arbórea presente en los 3 tratamientos; al cruzar estos datos con la cantidad de hojarasca que cae al suelo, es evidente que existe una correlación positiva entre la cantidad de árboles y la litera foliar. Esto se observa en los datos, donde las trampas de litera foliar ubicadas en SC, captaron un mayor peso (g) de hojarasca, seguido de SA y A. Según el test de Tukey, esta diferencia es estadísticamente

significativa. La presencia de una mayor cantidad de litera foliar en el suelo, se constituye como una valiosa fuente de carbono que contribuye a la formación del humus del suelo, lo cual se constituye como una fuente de energía y humedad para la micro y macrobiota, lo que cumple un papel crucial en su descomposición y fraccionamiento (Berg & Mc Claugherty, 2008).

Cada otoño, esta litera foliar es depositada en el suelo y comienza un lento proceso de descomposición. Con material recolectado en otoño 2019, se realizó un ensayo de descomposición de hojarasca de 17 meses que monitoreó la descomposición de hojas de roble. Para el final del ensayo, se identificó que SC conservó la mayor cantidad de hojarasca en el suelo. En este análisis, se identificó una rápida descomposición inicial que presentó contrastes estadísticamente significativos entre los tratamientos, probablemente asociada a la microfauna del suelo, la macrofauna del suelo, la temperatura y la humedad presente en cada tratamiento. Según Barois et al. (2001), la macrofauna edáfica incluye a los organismos vertebrados e invertebrados que buscan su alimento en los primeros horizontes del suelo; un suelo estable confiere condiciones idóneas para el desarrollo de una macrofauna que contribuya a la conservación sustentable del suelo. Estos caracoles, gallinas, lombrices e insectos en general, se alimentan del material foliar fresco, reduciendo un gran porcentaje de su peso en los primeros meses del ensayo. Esto se observa en la variación contrastante que se generó entre tratamientos en los primeros 9 meses, donde se registró una pérdida porcentual de peso del 28% en SC, 33,2% para SA y 37,2% para A (cada

tratamiento posee diferencia estadísticamente significativa). Desde aquí, y hasta el final del ensayo, la tasa de descomposición disminuyó, alcanzando un equilibrio que se observa en los 3 tratamientos. Una explicación para esto sería que una vez que la macrofauna no contribuye a este proceso, las variables que afectan esta descomposición se pueden clasificar en bióticas y abióticas. En cuanto a las variables bióticas; la vegetación circundante (especies forrajeras o arbustos), la actividad de microorganismos y fauna edáfica contribuyen a una lenta y diferencial descomposición del material orgánico. Por otro lado, entre los factores abióticos, destaca el movimiento de columnas de viento, la infiltración de agua en el suelo (precipitaciones), la radiación solar directa, la humedad del entorno, los nutrientes presentes en el suelo y las características topográficas como la inclinación del terreno y su exposición a la radiación solar (Berg & Mc Clougherty, 2008). Todas estas condiciones ocurren de forma diferencial entre los tratamientos, lo que se puede observar en los datos recopilados al final del ensayo. A los 17 meses se realizó la última medición y se registró una disminución porcentual (respecto al peso inicial) del 59,1% en SC, 68,2% en SA y 70,5%. Ranchillo alto es un bosque de precordillera donde las condiciones climáticas en invierno sumergen los bosques en nieve, las temporadas de lluvia son intensas y el verano se extremadamente seco. En un estudio similar realizado en el mismo lugar, (Alfaro et al., 2018), se hizo un ensayo de descomposición de hojarasca de 6 meses, el cual identificó la misma tendencia indicada en este estudio: a) una rápida disminución de peso en los primeros meses del ensayo y b) una tendencia a una mayor pérdida porcentual de peso en el tratamiento abierto.

En el caso de climas templados, la descomposición es mucho más lenta que en climas tropicales (Kim et al.,1996). Por otro lado, Moreno et al (2018), indican que la rapidez en la descomposición de la hojarasca se ve afectada por los microclimas que generan las coberturas de dosel, pero también, las condiciones climáticas locales. En su estudio de descomposición de hojarasca en clima templado, estos autores identificaron comportamientos similares; inicialmente se identificó una rápida descomposición, posteriormente esto alcanzó lentas tasas de descomposición, lo cual se asoció al efecto inicial de la macrofauna y la rápida descomposición de las sustancias solubles en agua presentes en la hojarasca. En la misma línea, Ibarra et al realizaron un estudio de descomposición de hojarasca (*Nothofagus pumilio*) en clima templado frío en la región de Magallanes (Chile), los resultados indicaron que la descomposición de la hojarasca fue mayor en sectores de bosque intervenidos. Sharik y Jurgensen (1996), en un estudio realizado en Michigan (USA) identificaron que la tasa de descomposición de hojarasca fue mayor en sectores boscosos que sufrieron una tala rasa (bosques de *Quercus rubra* L.). Brown et al. (1994) plantean que la temperatura es un elemento determinante en la descomposición de la hojarasca, puesto que actúa en beneficio de la actividad de la microfauna. Otros autores (Jansson y Berg, 1985), identifican que una mayor humedad posee una correlación positiva con una mayor descomposición de la hojarasca y que, por lo tanto, una mayor cantidad de precipitaciones contribuiría a la descomposición de la hojarasca (Vanlauwe et al., 1997). Los datos obtenidos en esta investigación corresponden con lo indicado por estos autores, puesto que el tratamiento Semi Cerrado, posee condiciones de temperatura regulada y humedad alta,

lo que contribuye a bajas tasas de descomposición de hojarasca. Por esto, SC conserva el carbono en el suelo por más tiempo que su contraparte Abierta, la cual posee las mayores tasas de temperatura y menores de humedad.

1.3. Carbono presente en Lixiviados

La ausencia de diferencias estadísticamente significativas en los resultados indica que, pese a las diferencias en las coberturas arbóreas, no se alcanza a definir condiciones microclimáticas que alteren la cantidad de carbono que se traslada fuera del sistema producto de las lluvias. Sin embargo, la mayor cantidad de carbono presente en los lixiviados se identificó en el sector A, seguido de SA y SC. Se postula que con el paso del tiempo, esta diferencia pueda seguir escalando hasta ser estadísticamente significativa. Debido a que la intervención del bosque es reciente, es muy probable que las condiciones edáficas mantengan una similitud entre los tratamientos; en Ranchillo Alto se identifica una cubierta constante de especies forrajeras, arbustos y diversas plantas herbáceas autóctonas que crecen de forma silvestre, la rizósfera asociada a esta cobertura podría contribuir a crear un suelo homogéneo entre los 3 tratamientos, lo que equilibra las diferencias de dosel arbóreo entre los 3 tratamientos. Según una revisión realizada por Alberto et al. (2013), la estructura del suelo se debe en gran parte por la acción de las raíces. El segmento radicular de las plantas genera procesos de absorción de agua, lo que contribuye a la formación de agregados de suelo, por cuyos poros se infiltra el agua, es decir, la calidad del suelo esta directamente relacionada

con el carbono que abandona el sistema como lixiviado. La homogeneidad en estos resultados, podría deberse a que los 3 tratamientos se encuentran en el mismo tipo de suelo; debido a su composición química, estos suelos de origen volcánico tendrían un efecto de retención del carbono orgánico (por medio de reacciones químicas), impidiendo que se vuelva soluble y fluya como lixiviado. Esta relación entre las condiciones mineralógicas y la retención del Carbono, se estudió en bosques templados que crecen en suelos volcánicos de México por Galicia et al (2016), los autores identificaron que la alteración de las condiciones naturales del suelo, degrada las propiedades del suelo que podrían contribuir a la mitigación del cambio climático.

1.4. Respiración del suelo

Los datos obtenidos indican una tendencia a una respiración mayor del suelo en condiciones de mayor temperatura, humedad y densidad arbórea. Por esto, SC y el control, mantuvieron una similitud en esta variable y superaron a A y SA. El ensayo solo mostró diferencias estadísticamente significativas en verano para el tratamiento SC, donde se mantuvo la tendencia de que estos valores fueron superiores a A y SA. Pese a que A posee las mayores temperaturas en verano, este tratamiento posee también la menor cantidad de humedad y recibe el menor aporte de hojarasca detectado en comparación con SC y SA. Ros y Col (2006), afirman que la incorporación de materiales orgánicos, como por ejemplo la hojarasca o el compost, provocan un aumento en la biomasa microbiana, puesto que se estimula el crecimiento de la

microbiota autóctona al incorporar estas fuentes de carbono y otros nutrientes. En cuanto a los beneficios que la humedad genera en la respiración del suelo, Freeman & Orchard (2008), indican que existe una correlación positiva entre estas dos variables, puesto que la cantidad de humedad en el ambiente afecta el metabolismo de los microorganismos del suelo (afectando positiva, o negativamente su crecimiento, reproducción y respiración).

En un estudio realizado por Dube et al. (2012) en cercanías de Coyhaique, Chile, se analizó la respiración de suelo en tres condiciones contrastantes, identificándose un rango de datos similares (expresados en $\text{g CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$): a) Pradera natural (0,11 - 0,41), b) Plantación de pino con manejo (0,08 – 0,037), c) Sistema silvopastoril (0,09-0,042). La mayor respiración ocurrió entre lugares cercanos a hileras de pino de un sistema silvopastoril. La menor tasa de respiración se identificó en el sector de plantación de pino (homólogo al sector SC del presente estudio). Al cruzar esta información con la de nuestra investigación, podríamos concluir que la respiración del suelo no solo depende de la cobertura arbórea, sino también del tipo de especie arbórea que cubre el suelo. En el presente estudio, el Roble mantiene un ecosistema abundante en especies autóctonas tanto vegetales como animales (micro y macro fauna), lo que podría justificar que la mayor respiración de suelo ocurrió en el sector SC y la menor en el A. De igual forma, los autores indican que los resultados mostrados en tal estudio pueden encontrar su motivo en la configuración del sotobosque, la cantidad de hojarasca en el suelo y la rizosfera del suelo. Stevenson y Cole (1999) indican que los ácidos húmicos oscuros que son producidos por la descomposición de la hojarasca de *Pinus*

ponderosa, han demostrado limitar y disminuir la respiración microbiana. Rivas et al. (2007) indican que los bosques de *Nothofagus obliqua* de la zona centro-sur de Chile, poseen cualidades óptimas para el desarrollo de microclimas, provocando mayor temperatura y humedad y diversos procesos que aporten materia orgánica al suelo. Los autores indican que estas condiciones estimulan la actividad biológica de la microbiota. En un estudio comparativo que analizó bosques de *Nothofagus glauca* con distintos grados de invasión de *Pinus radiata*, se identificó que los sectores sin invasión mantenían mayores tasas de respiración de suelo (Soto, 2021). Según Inderjit y van der Putten (2010), la respiración de suelo puede disminuir si es que se registran especies invasoras, puesto que se altera el normal funcionamiento de la microbiota autóctona del suelo. Por lo anterior, se identifica una necesidad de conservar suelos y evitar su intervención; las consecuencias que estas alteraciones metabólicas en la microbiota son desconocidas y podrían alterar equilibrios a nivel ecosistémico en el largo plazo, contribuyendo al cambio climático.

5. CONCLUSIONES

Los sistemas agroforestales en Chile se constituyen como una opción viable para lograr un enfoque sustentable en cuanto al uso del bosque. El estudio de dinámicas de carbono permitió comprender las alteraciones que sufre el bosque cuando intervenimos su composición para fines antropogénicos (agricultura, calefacción, venta de leña, etc.); de esta forma, es posible diseñar sistemas productivos que no contribuyan al cambio climático.

Los sistemas silvopastoriles precordilleranos se presentan como una alternativa capaz de resguardar propiedades ecosistémicas claves en la mitigación del cambio climático. Sobre los 1000 m.s.n.m, las condiciones climáticas son severas, por lo que el amortiguamiento que un microclima ofrece puede ser determinante para el correcto funcionamiento de un sistema productivo. Los resultados obtenidos de temperatura y humedad durante los 3 años de monitoreo permiten identificar relaciones contrastantes entre parcelas cercanas entre sí, pero con diferencias en sus funcionamientos internos.

Se concluye que la selección planificada de densidades arbóreas específicas permite mantener una cobertura boscosa que conserve equilibrios en la respiración del suelo y la descomposición de la hojarasca en el suelo. El tratamiento Semi Cerrado, demostró poseer condiciones de suelo que favorecen estas variables y otros procesos aún no identificados.

Posiblemente, el factor más influyente en esto es la gran cantidad de litera que es depositada cada año en el suelo, lo que contribuye a la formación de un gigantesco sumidero de carbono y otros nutrientes que favorecen a la microbiota del lugar. Asimismo, la densidad arbórea y las consecuentes características del dosel, otorgan equilibrios térmicos debido a su rol en el control de los flujos de viento y la mantención de humedad al limitar el paso de radiación solar al suelo.

Se concluye que, debido a que la alteración del bosque en Ranchillo Alto es reciente o no tan drástica, los datos obtenidos a través de ciertas variables (Ej.: lixiviados), aún no alcanzan a diferenciarse, puesto que se conservan condiciones similares entre los tratamientos.

Dentro de cada microclima se generan zonas que pueden tener datos no representativos del sector, tanto por causas bióticas o abióticas, aparecen accidentes climáticos dentro del microclima. Frente a esto, se sugiere que futuros estudios consideren la variabilidad existente dentro de cada microclima. Para esto, se sugiere establecer ensayos con una gran cantidad de unidades muestrales, de tal forma de reducir el grado en que esto afecte los resultados.

6. BIBLIOGRAFÍA

1. Alfaro, M., Dube, F., & Zagal, E. 2018. Soil quality indicators in an Andisol under different tree covers in disturbed *Nothofagus* forests. Chilean journal of agricultural research, 78(1), 106- 116.
2. Berg, B. & Laskowski, R. 2005. Litter decomposition: A guide to carbon and nutrient turnover. Eds. B. Berg & R. Laskowsk). Academic Press, New York. 448.
3. Brown, S. 1994. Soil biological processes in tropical ecosystems. In: The Biological management of tropical soil fertility. Eds. P.L. Woomer & M.J. UK. 120
4. Berg, B., & McLaugherty, C. 2008. Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration (2 ed.). Germany: Springer Berlin Heidelberg.
5. Berg, B. & Laskowski, R. 2006. Litter Decomposition: A Guide to Carbon and Nutrient Turnover. 10.1016/S0065- 2504(05)38001-9.
6. Corporación Nacional Forestal (CONAF). 2017. Bosques en Chile. <https://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/>. Fuente consultada el 14 de mayo, 2023.

7. Davies-Colley, R., Payne, G.W., & van Elswijk, M. 2000. Microclimate gradients across a forest edge. *New Zealand Journal of Ecology*, 24(2), 111-121.
8. Dube, F., Espinosa M., Stolpe N., Zagal E., Thevathasan N.V., Gordon A.M. 2012. Productivity and carbon storage in silvopastoral systems with *Pinus ponderosa* and *Trifolium* spp., plantations and pasture on an Andisol in Patagonia, Chile. *Agroforestry Systems*. doi:10.1007/s10457-011-9471-7)
9. Dube, F. & Stolpe, N.B. 2016. SOM and Biomass C Stocks in Degraded and Undisturbed Andean and Coastal *Nothofagus* Forests of Southwestern South America. *Forests*, 7, 320.
10. Dube F., Zagal E., Stolpe N. & Espinosa M. 2009. The influence of land use change on the organic carbon distribution and microbial respiration in a volcanic soil of the Chilean Patagonia. *Forest Ecology and Management* 257: 1695-1704.
11. Edwards, N.T. 1982. The use of soda-lime for measuring respiration rates in terrestrial systems. *Pedobiologia* 23: 321-330.
12. Espinoza, J. 2021. Descomposición de hojarasca y respiración de suelo en bosque de *Nothofagus obliqua* bajo diferentes niveles de degradación en Ranchillo Alto, Región de Ñuble, Chile. Universidad

de Concepción, Chile, 50p.

13. Moreno, M. E., Domínguez, G. T. G., Alvarado, S., Colín, J. G., Corral, R. S., & González, R. H. (2018). Aporte y descomposición de hojarasca en bosques templados de la región de El Salto, Durango. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 9(47), 70-93.
14. Gordon, A., Newman, S. 1997. *Temperate Agroforestry Systems*. CABI (Centre for agriculture and bioscience International). Wallingford, UK. 5, 9 -13.
15. Galicia, L. , Gamboa, A., Cram, S. 2016. Almacén y dinámica del Carbono orgánico del suelo en bosques templados de México. *Terra latinoamericana*. 34, núm. 1, 1-29
16. Grogan, P., 1998. CO₂ flux measurement using soda lime : correction for water formed during CO₂ adsorption. *Ecology*, 79 (4), 1467–1468.
17. Ibarra, M., Caldentey, J. Promis, A. 2011. Descomposición de hojarasca en rodales de *Nothofagus pumilio* de la región de Magallanes. *Bosque (Valdivia.)* 32:227-233.
18. Inderjit & Van Der Putten, W. H. 2010. Impacts of soil microbial communities on exotic plant invasions. *Trends in Ecology & Evolution*, 25(9), 512-519.
19. IPCC. 2018. Global warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the

impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change. Geneva, Switzerland: Intergovernmental Panel on Climate Change.

20. Kim C, T Sharik, M Jurgensen. 1996. Canopy cover effects on mass loss, and nitrogen and phosphorus dynamics from decomposing litter in oak and pine stands in northern Lower Michigan. *Forest Ecology and Management* 80:13-20.
21. Le Quéré, C., Jackson, R. B., Jones, M. W., Smith, A. J. P., Abernethy, S., Andrew, R. M. & Zhu, D. 2020. Temporary reduction in daily global CO₂ emissions during the COVID-19 forced confinement. *Nature Climate Change*, 10(7), 647-653.
22. Nair, P. K. R. 1993. *An Introduction to Agroforestry*. Dordrecht, Países Bajos: Kluwer Academic Publishers. 12.
23. Promis, A., Caldentey, J., Ibarra, M. 2010. Microclima en el interior de un bosque de *Nothofagus pumilio* y el efecto de una corta de regeneración. *Bosque (Valdivia)*, 31(2), 129- 139.
24. Vásquez R. 2008. Efecto de la humedad, temperatura y pH del suelo en la actividad microbiana a nivel de laboratorio. *Ecología Aplicada*, 7(1-2), 123-130.
25. Rivas, Y., Godoy, R., Valenzuela, E., Leiva, J., Oyarzún, C., Alvear, M. 2007. Actividad biológica del suelo en dos bosques de *Nothofagus*

del centro sur de Chile. Gayana. Botánica, 64(1), 81-92.

26. Rivas, Y., Oyarzun, C., Godoy, R., & Valenzuela, E. 2009. Mineralización del nitrógeno, carbono y actividad enzimática del suelo en un bosque de *Nothofagus obliqua* (Mirb) Oerst y una plantación de *Pinus radiata* D. Don. del centro-sur de Chile. Revista chilena de historia natural, 82, 119-134.
27. Ros, M., Pascual J., García C., Hernández M., Insam M. 2006. Hydrolases activities, microbial biomass and bacterial community in a soil after long-term amendment with different compost. Soil Biol Biochem 38, 3443-3452.
28. Soto R. 2021. Invasión de *Pinus radiata* en la reserva nacional los Ruiles y su control: Efecto en la actividad biológica del suelo. Repositorio Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile. 41-44.
29. Stevenson, F.J. and Cole, M.A. (1999) Cycles of Soil (Carbon, Nitrogen Phosphorus Sulfur, Micronutrients). John Wiley and Sons Publishers, Hoboken, 427.
30. SoilMoistureEquipmentCorp. (1997). Operating instructions for the 1920F1/K1 Pressure- vacuum soil water samplers, Santa Barbara.