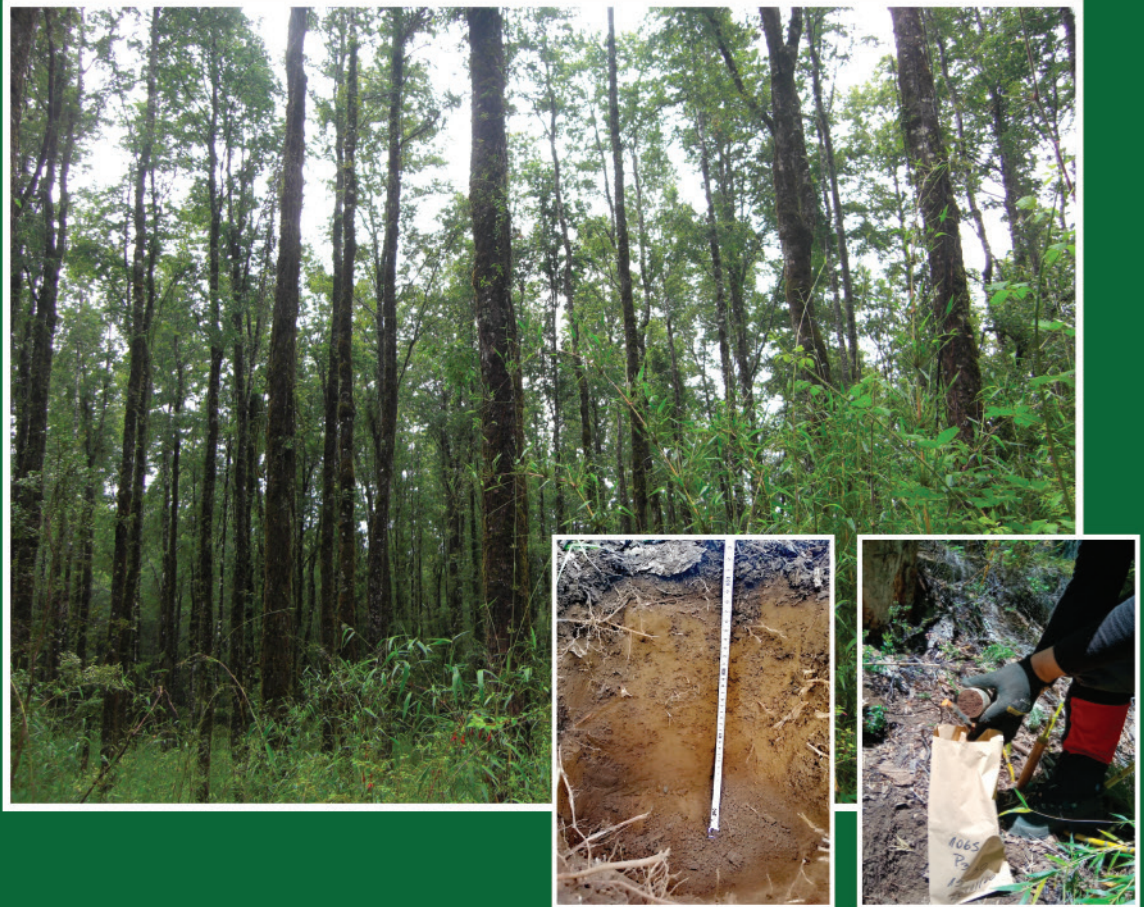


CONTENIDO Y CANTIDAD DE CARBONO DEL SUELO EN BOSQUE NATIVO DE LA REGIÓN DE LOS RÍOS



CONTENIDO Y CANTIDAD DE CARBONO DEL SUELO EN BOSQUE NATIVO DE LA REGIÓN DE LOS RÍOS

Yasna Rojas¹, Víctor Gerding², Carlos Bahamondez¹,
Eduardo Molina¹ y Rodrigo Sagardia¹

Colaboradores:
Marco Barrientos¹ y Rodrigo Guíñez¹

¹ Instituto Forestal de Chile (INFOR). Sede Los Ríos, Valdivia. Fundo Teja Norte s/n, Valdivia, Chile. yrojas@infor.cl

² Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales, Instituto de Bosques y Sociedad, Valdivia, Chile. vgerding@uach.cl



INFOR

INSTITUTO FORESTAL

Sucre 2397 Ñuñoa

Santiago, CHILE

F: 223667115

www.infor.cl

Registro Propiedad Intelectual N° 2021-A-359

ISBN N° 978-956-318-173-9

Se autoriza la reproducción parcial de esta publicación siempre y cuando se efectúe la cita correspondiente:

Rojas, Y.; Gerding, V.; Bahamondez, C; Molina, E. y Sagardia, R. 2020. Contenido y Cantidad de Carbono del Suelo en Bosque Nativo de la Región de Los Ríos. Instituto Forestal, Chile. Informe Técnico N° 233. P. 21 <https://doi.org/10.52904/20.500.12220/30394>

Las fotografías e imágenes incorporadas en tapas o texto de la presente publicación provienen de archivo institucional o fueron obtenidas o elaboradas durante el desarrollo de las actividades del trabajo que origina esta publicación.

ÍNDICE

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
MATERIAL Y MÉTODO	8
Clasificación de los Suelos	8
Muestreo en Terreno	13
Densidad Aparente	14
Manejo y Envío de Muestras a Laboratorio	15
Cantidad de Carbono por Unidad de Volumen	15
RESULTADOS	15
DISCUSIÓN	17
CONCLUSIONES	19
REFERENCIAS	20

RESUMEN

El suelo contiene uno de los depósitos de carbono más importantes de los ecosistemas terrestres, especialmente aquellos suelos que se encuentran en ecosistemas forestales. Los depósitos de carbono del suelo forman parte de la contabilidad de gases de efecto invernadero que los países informan y, en este contexto, es importante contabilizar el carbono del suelo que represente adecuadamente los suelos y ecosistemas que posee Chile. La información de carbono del suelo en el país es escasa y no siempre comparable.

El presente estudio tuvo el propósito de desarrollar un método eficiente de muestreo de carbono del suelo y estimar el carbono en el suelo superficial mediante un significativo número de sitios con datos precisos que representen las extensas superficies de bosques nativos de la región de Los Ríos.

El muestreo de suelos se asoció al Inventario Forestal Nacional y consideró los parámetros recomendados por el IPCC. En los resultados se destaca que, en los primeros 30 cm de profundidad, las cantidades de carbono variaron entre 111,16 y 151,82 t/ha, con un promedio de 142,73 t/ha. Según el tipo de suelo, el orden descendente de la cantidad de carbono fue Ultisol (151,82 t/ha), Andisol (145,26 t/ha), Misceláneo (136,79 t/ha), Terrazas (127,42 t/ha), Asociación Tres Cruces (127,37 t/ha) e Inceptisol (111,16 t/ha). La variabilidad observada mediante el coeficiente de variación fluctuó entre 21,8 y 36,8 %.

La estimación del carbono acumulado en cada tipo de suelo (0-30 cm), de acuerdo con su superficie boscosa, mostró un total de 92,054 millones de toneladas de carbono en la zona de estudio de la región de Los Ríos, la cual representa al 71,5% de la superficie de sus bosques nativos. Las cantidades promedio de carbono en suelos de la región de Los Ríos se encuentran dentro de los rangos que se han estimado en la literatura y son mayores que aquellos propuestos por el IPCC para diversos tipos de suelos.

Tanto las unidades muestrales aplicadas en terreno como el diseño de la unidad muestral y el método para su recolección demostraron ser eficientes y adecuados y son consistentes con métodos empleados en otros países.

INTRODUCCIÓN

El suelo almacena importantes cantidades de carbono producto de las interacciones de varios procesos que ocurren en el ecosistema donde se destacan la fotosíntesis, respiración y descomposición como elementos clave (Ontl y Schulte, 2012). Las reservas de carbono orgánico del suelo que se encuentran almacenadas en el primer metro de profundidad del suelo se han estimado en 1500 Pg³, lo que supone más carbono que el que se encuentra contenido en la atmósfera (800 Pg) y la vegetación terrestre (500 Pg) juntos (FAO e ITPS, 2015).

La materia orgánica muerta que cae en el suelo se fragmenta y descompone, transformándose una parte de ella en materia orgánica del suelo. La materia orgánica del suelo incluye una gran variedad de materiales que difieren significativamente en cuanto a su tiempo de permanencia en el suelo. Parte de este material está integrado por compuestos inestables que los organismos microbianos descomponen fácilmente, y devuelven el carbono a la atmósfera. Sin embargo, parte del carbono orgánico del suelo (COS) se convierte en compuestos recalcitrantes (p. ej. complejos organominerales) que se descomponen muy lentamente y que, por ende, pueden permanecer en el suelo durante décadas, siglos o más tiempo. Los suelos contienen también depósitos de carbono inorgánico, ya sea en forma de minerales primarios del material madre del que se formó el suelo (p. ej. roca caliza) o como minerales secundarios (p. ej. carbonatos pedogénicos) que surgen durante la formación del suelo. Las existencias de carbono inorgánico en el suelo pueden verse afectadas por el manejo, aunque habitualmente no en el grado en que sucede con los depósitos de carbono orgánico (IPCC, 2006).

Los bosques a nivel mundial cubren 4,06 miles de millones de hectáreas (FAO, 2020), equivalentes al 30 % de la superficie terrestre total. La vegetación forestal y los suelos contienen aproximadamente 1240 Pg de carbono. Del total de carbono terrestre en biomas forestales, el 37 % se encuentra en bosques de baja latitud, el 14 % en latitudes medias y el 49 % en latitudes altas. La reserva de carbono orgánico del suelo puede abarcar el 85 % de las reservas de carbono terrestres en el bosque boreal, el 60 % en los bosques templados y el 50 % en los bosques tropicales. Una gran parte de la reserva total de dicho carbono se encuentra en suelos de regiones de tundra, pre-tundra y taiga. El contenido de carbono orgánico en suelos forestales puede oscilar de 0 %, en suelos muy jóvenes, a 50 % en algunos suelos orgánicos o de humedales, conteniendo la mayoría de los suelos entre 0,3 y 11,5 % en los 20 cm superficiales de suelo mineral (Lal, 2005).

Si bien se ha avanzado en la comprensión y explicación de la dinámica del carbono orgánico del suelo, en el caso de la protección y monitoreo de las reservas de carbono del suelo se enfrentan todavía desafíos importantes. La reserva de carbono debe ser medida usando un método eficiente y que pueda cubrir una gran variedad de tipos de suelos. No obstante, aplicar un solo método para analizar el carbono del suelo en diversas circunstancias es complejo, ya que el carbono no está distribuido uniformemente en amplias superficies, profundidades, tipos de suelos y posiciones de paisaje (FAO, 2017).

Los países tienen distintos sistemas de monitoreo del carbono orgánico del suelo para lograr eficiencia y representatividad. Por ejemplo, Alemania, México y Francia realizan una selección de áreas bajo una cuadrícula, donde el área de estudio se divide en pequeñas unidades o bloques y se toman repetidas muestras en una ubicación en cada bloque. Por otra parte, Nueva Zelanda y Hungría efectúan muestreos estratificados, según una división del área de estudio en secciones homogéneas, que permite la distribución de un mayor número de muestras en estratos con una mayor variabilidad de reservas de carbono orgánico del suelo (FAO, 2017).

³Pg: Petagramo, 1 Pg = mil millones de toneladas métricas

En este contexto, es importante contabilizar el carbono del suelo considerando la información de cada país que represente adecuadamente los suelos y ecosistemas que poseen. En el país se cuenta con escasa información de carbono del suelo y esta no siempre es comparable. Es importante avanzar en la generación de información específica del país que permita reportar el carbono del suelo y los cambios que ocurren en este, capturando la variabilidad de los suelos del territorio.

En Chile, para el caso de ecosistemas forestales, Gayoso (2002) realizó mediciones del carbono del suelo para los primeros 30 cm de profundidad, considerando 168 puntos de muestreo que representan ocho sitios distintos, de los cuales tres corresponden a bosque nativo del Tipo Forestal Siempreverde de la región de Los Ríos. El mismo autor encontró cantidades de carbono entre 143,76 y 180,91 t/ha, mientras que en la región de La Araucanía registró un valor de 156,98 t/ha. Por su parte, Dube y Stolpe (2016) informan sobre la cantidad de carbono en dos suelos (0-40 cm) con bosques de *Nothofagus* spp. sin disturbios, uno en la Cordillera de Los Andes de la región de Ñuble (175,7 t/ha) y otro en la Cordillera de Nahuelbuta en la región de La Araucanía (162,5 t/ha).

Jara (2015) realizó mediciones del carbono del suelo en un bosque siempreverde y una pradera natural de suelos ñadi (Andisoles, Aquands) en la región de Los Lagos, estimando cantidades de carbono para los primeros 30 cm de profundidad de 253 t/ha en el bosque y 229 t/ha en praderas. En bosques de *Nothofagus* spp. creciendo en suelos Inceptisoles de la Cordillera de Los Andes, en la región de Los Ríos, Reyes (2012) encontró menor acumulación de carbono que en Andisoles, alcanzando en torno a 50 t/ha de carbono en el suelo (0-37 cm). También existen estudios que informan contenidos de carbono del suelo en otras regiones, como en bosques de coihue de Magallanes (Gerding y Thiers, 2002) y en bosques de roble (Rivas *et al.*, 2009; Alfaro, 2018) y, en general para una amplia variación latitudinal (Sadzawka *et al.*, 1995). Se aprecia del conjunto de estos datos que los estudios de cantidades de carbono en los suelos con bosques nativos en la región de Los Ríos son escasos y solo entregan información de casos puntuales.

Según la información del CIREN (2003), para las series de suelos que se encuentran en la región de Los Ríos, la cantidad de carbono en los primeros 30 cm de profundidad presenta valores promedio de 164,99 t/ha en los Andisoles (88,7 a 264,9 t/ha), 157,73 t/ha en los Ultisoles (48,9 a 151,8 t/ha) y 103,42 t/ha en los Inceptisoles (112,6 a 205,2 t/ha). Estos valores representan condiciones promedio de extensas superficies de suelo en cada tipo a partir de perfiles modales, que incluyen diversos usos del suelo. Es decir, no corresponden a condiciones exclusivas de suelo bajo bosque nativo.

La literatura actual con respecto a la cantidad de carbono de los suelos bajo bosque nativo, por una parte, entrega datos precisos de muy pocos sitios de estudio (p. ej.: Gayoso, 2002; Dube y Stolpe, 2016) y, por otra, datos de tendencia promedio de grandes superficies, pero sin discriminar el uso del suelo (CIREN, 2003).

En consecuencia, el presente estudio tiene los propósitos de desarrollar un método eficiente de muestreo de carbono del suelo y estimar el carbono en el suelo superficial mediante un significativo número de sitios con datos precisos que representen extensas superficies de bosques nativos en la región de Los Ríos.

MATERIAL Y MÉTODO

Clasificación de los Suelos

Los suelos de la región de Los Ríos se agruparon principalmente según su orden taxonómico de la Taxonomía de Suelos (Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 2014), ya que es una clasificación aplicada oficialmente en Chile y permite una equivalencia con los valores de referencia de carbono del suelo del IPCC (2006).

Los valores de referencia de carbono del suelo del IPCC (2006, Volumen 4, Capítulo 2) que aparecen en el Cuadro N° 1, para la región de Los Ríos, corresponderían a los del clima “templado frío, húmedo”. Este clima se asocia, en la clasificación de Köppen al “templado lluvioso con leve sequedad estival Cfb (s)” (Departamento de Geografía Universidad de Chile, 2017) y se caracteriza por carecer de una estación seca, las precipitaciones están bien distribuidas a lo largo del año, el monto de precipitación del mes más lluvioso varía entre tres y diez veces la precipitación del mes más seco, presenta inviernos fríos o templados y veranos frescos.

Cuadro N° 1
REFERENCIA POR DEFECTO EN CASO DE VEGETACIÓN NATIVA DE EXISTENCIAS DE
CARBONO ORGÁNICO (SOC_{REF}) PARA SUELOS MINERALES

Región Climática	Suelos HAC ¹	Suelos LAC ²	Suelos Arenosos ³	Suelos Espódicos ⁴	Suelos Volcánicos ⁵	Humedales ⁶
	(t/ha de carbono entre 0 y 30 cm de profundidad)					
Boreal	68	NA	10	117	20	146
Templado frío, seco	50	33	34	NA	20	87
Templado frío, húmedo	95	85	71	115	130	
Templado cálido, seco	38	24	19	NA	70	88
Templado cálido, húmedo	88	63	34	NA	80	

(Fuente: IPCC, 2006, Volumen 4, Capítulo 2, Cuadro 2.3).

¹ HAC (*del inglés high activity clay*): Suelos con minerales arcillosos de alta actividad, entre leve y moderadamente erosionados, dominados por minerales silicato-arcillosos 2:1 en la clasificación de la Base Mundial de Referencia para los Recursos de Suelos (WRB, *del inglés World Reference Base for Soil Resources*): Leptosoles, Vertisoles, Kastanozems, Chernozems, Phaeozems, Luvisoles, Alisoles, Albeluvisoles, Solonetz, Calcisoles, Gypsisoles, Umbrisoles, Cambisoles, Regosoles; en la clasificación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, *del inglés United States Department of Agriculture*): Mollicsols, Vertisols, Alfisols con alta saturación de bases, Aridisols, Inceptisols.

² LAC (*del inglés low activity clay*): Suelos con minerales de arcilla de baja intensidad, muy erosionados, con predominio de minerales arcillosos 1:1, hierro amorfo y óxidos de aluminio (según la WRB: Acrisoles, Lixisoles, Nitisoles, Ferralsols, Durisols; según el USDA: Ultisols, Oxisols, Alfisols ácidos).

³ Incluye todos los suelos (independientemente de su clasificación taxonómica) que tienen > 70% de arena y < 8% de arcilla, en base a análisis de textura estándar (según la WRB: Arenosols; según el USDA: Psamments).

⁴ Suelos que muestran una fuerte podzolización (según la WRB: Podzols; según el USDA: Spodosols).

⁵ Los suelos derivados de cenizas volcánicas con mineralogía alofánica (según la WRB: Andosols; según el USDA: Andisols).

⁶ Suelos con drenaje limitado, con periódicas inundaciones y condiciones anaeróbicas (según la WRB: Gleysols; según el USDA: subórdenes Aquic).

Para la identificación de los suelos de la región se consideró la cartografía y descripción de suelos de CIREN (2003), aunque, aproximadamente el 20 % de la superficie regional no cuenta con información de suelos, principalmente en la Cordillera de Los Andes (Figura N° 1). La mayor parte de los suelos correspondió a los órdenes Andisol, Ultisol e Inceptisol. Adicionalmente, se consideró el tipo de suelo Asociación Tres Cruces que, si bien su descripción distingue las series de suelo que la componen (Ultisoles e Inceptisoles), la cartografía no discrimina la ubicación ni la extensión de cada serie. Por otra parte, en los sectores sin identificación de la taxonomía de los suelos, se agruparon los suelos según algunos rasgos pedogenéticos clave que se presentan en su descripción (los tipos Terrazas y Misceláneos). De esta forma se consideraron para la región de Los Ríos seis tipos de suelos:

- **Andisol.** Los suelos Andisoles derivan de cenizas volcánicas y, en Chile, corresponden a los trumao y los ñadis. Son suelos de excelentes condiciones físicas y morfológicas por lo cual se pueden cultivar con facilidad. CIREN (2003) los define como: “Son los suelos derivados de cenizas volcánicas; en Chile corresponden a los trumao y los ñadis. Son suelos de excelentes condiciones físicas y morfológicas por lo cual se pueden cultivar con facilidad. Poseen grandes cantidades de fósforo, pero este se encuentra retenido en el suelo en forma no disponible para las plantas; en consecuencia, se requieren fuertes fertilizaciones fosfatadas para obtener rendimientos altos. Corresponden a los suelos que se han conocido como Andosols y Andepts. El primero continúa siendo usado por FAO y el segundo agrupaba a los suelos de origen volcánico en la Taxonomía de Suelos (1975)”.
- **Asociación Tres Cruces.** Esta asociación de Ultisoles e Inceptisoles se ubica en la Cordillera de la Costa, al norte de la Bahía de Corral. CIREN (2003) la define como: “Corresponde a una asociación de tres Series ubicadas en la Cordillera de la Costa, son las Series Hueicoya [Ultisol], La Pelada [Inceptisol] y Correltúe [Ultisol], que en el sector norte de la región no pudieron separarse a la escala del reconocimiento. Los suelos de las Series Hueicoya y La Pelada se ubican en la Cordillera de la Costa, desde los 100 hasta los 750 msnm, son desarrollados a partir de rocas metamórficas, con grandes variaciones de profundidad, moderadamente profundos a muy delgados, en topografía dominante de lomajes y cerros con pendientes de 20 a 50 %. En la vertiente oriental de la Cordillera de la Costa, entre los 250 a 300 msnm se encuentran suelos de la Serie Correltúe, profundos, desarrollados a partir de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre el complejo metamórfico de la costa”.
- **Inceptisol.** Los suelos Inceptisoles presentan un estado incipiente de evolución, pero cuentan con un horizonte B definido; en la región de Los Ríos, abarcan principalmente suelos de esquistos metamórficos ubicados en las altas cumbres de la Cordillera de la Costa y también en terrenos intermedios montañosos de la Cordillera de Los Andes. CIREN (2003) los define como: “Son suelos con mayor grado de desarrollo que los Entisols, ya que presentan un horizonte B bien definido; incluso pueden tener un horizonte superficial negro con alto contenido de materia orgánica. Corresponden a los suelos que se conocían como suelos de Tundra y parcialmente Pardo No Cálcidos”.
- **Misceláneos.** Los suelos misceláneos conforman un grupo que no se ha clasificado en alguna serie ni orden particular, por lo que se evalúan en forma adicional y diferenciada. Son suelos que se presentan en pequeñas superficies repartidas por toda la región.

CIREN (2003) los identifica dentro de varias categorías:

- **Misceláneo río:** Corresponde a los sectores cubiertos por el río o el cauce que cubre en sus crecidas y que no tiene ningún uso.
 - **Misceláneo quebrada:** Corresponde a terrenos de pendientes abruptas, susceptibles a erosionarse y presentar en su cauce piedras y bolones abundantes. Presenta generalmente una buena a regular vegetación arbustiva que evita los procesos erosivos y que deben mantenerse como terrenos de protección.
 - **Misceláneo duna:** Corresponde a terrenos litorales arenosos, constituidos por arenas de tipo andesítico-basáltico, de topografía ondulada pero que han sido estabilizados y/o mantiene cubierta herbácea pobre.
 - **Misceláneo pantano:** Corresponde a terrenos húmedos, de topografía plana y ligeramente cóncava, con agua superficial o nivel freático cercano a la superficie durante todo el año, la vegetación es hidromórfica.
 - **Misceláneo escarpe:** Corresponde a quiebres abruptos, de pendientes superiores a 60 %; gran parte de esta unidad está cubierta de vegetación arbustiva, especialmente en los sectores con influencia de clima marítimo. Debe conservarse la vegetación a objeto de evitar procesos erosivos acelerados.
 - **Misceláneo vega:** Vegas profundas, planas, pobremente drenadas.
 - **Misceláneo escoria volcánica:** Corresponde a campos o flujos de lavas, generalmente desprovistos de vegetación, aunque existen sectores recubiertos por una capa de cenizas volcánicas recientes, cuyo espesor fluctúa desde unos pocos cm hasta 40 cm. Donde existe ceniza se presenta una vegetación arbórea. La topografía corresponde a ondulaciones fuertes de pendientes abruptas.
 - **Misceláneo morrena:** Corresponde a terrenos delgados, con cenizas volcánicas recubriendo materiales heterogéneos de morrenas, de topografía fuertemente ondulada y con bloques erráticos abundantes.
 - **Misceláneo montañas rocosas:** Corresponde a terrenos con afloramientos rocosos y suelos delgados con cenizas volcánicas. Ocupa una topografía de montañas con pendientes mayores de 50 % y escarpes rocosos”.
- **Terrazas.** En este tipo de suelos se encuentra una gran variedad de unidades cartográficas de pequeñas superficies repartidas por toda la región. CIREN (2003) las clasifica en diferentes categorías:
 - **Terrazas aluviales:** Corresponden a suelos aluviales, planos a ligeramente inclinados (pendiente de 0-3 %), con distinta estratificación y alta variación en profundidad, textura, drenaje interno y sustratos rocosos subyacentes.

- **Terrazas aluviales de cenizas volcánicas:** Suelos en posición de terrazas aluviales planas y casi planas, formados por la redepositación de cenizas volcánicas, de texturas medias sobre moderadamente gruesas. Los sectores de mal drenaje presentan un sustrato cementado, que puede incluir un fierrillo discontinuo sobre él.
- **Terrazas aluviales recientes de los ríos de la precordillera:** Suelos estratificados, de texturas gruesas y muy gruesas de arenas basálticas mezcladas con cenizas volcánicas, con gravilla de escoria volcánica.
- **Terrazas lacustres:** Estas unidades corresponden a las terrazas de origen lacustre a orillas de los lagos de la zona y están formadas por suelos de cenizas volcánicas redepositadas por agua.
- **Ultisol.** Los suelos Ultisols, de alto grado de evolución, tienen un horizonte B bien expresado rico en arcilla en comparación con el horizonte A; en Los Ríos se ubican en la Cordillera de la Costa, principalmente en su vertiente oriental, y en parte del extremo occidental de la Depresión Intermedia. CIREN (2003) los define como: “Al igual que los Alfisols, estos suelos tienen un horizonte B bien expresado a causa de un incremento de la arcilla en relación con el horizonte A. Sin embargo, estos suelos están desbasificados y por lo tanto tienen bajos niveles de elementos nutrientes, por lo cual requieren de fuertes fertilizaciones para la obtención de rendimientos razonables. Corresponden a los suelos que se conocían como Latosoles”.

La superficie total de bosque nativo de la región de Los Ríos alcanza las 908.531 ha (INFOR, 2020), de las cuales 649.374 ha (71,5 %) cuentan con información del tipo de suelo (Figura N° 1).

Con fines de establecer un piloto metodológico y ajuste de procedimientos de levantamiento de datos desde terreno, durante el año 2018, se aplicó un muestreo considerando como criterio de selección el material de origen del suelo. Esta actividad proporcionó importantes detalles respecto al procedimiento para afinar el levantamiento de datos, de tal manera que en el 2019 el muestreo en terreno se enfocó en representar los órdenes de suelo para proporcionar comparabilidad de los datos respecto de lo reportado por el IPCC.

El año 2020, considerando principalmente aspectos presupuestarios y de eficiencia del monitoreo, se ajustó el enfoque de muestreo para establecer una sinergia con el levantamiento de datos desde terreno que realiza cada año el muestreo del Inventario Forestal Nacional (IFN) de los bosques nativos de Chile de INFOR (INFOR 2019). Se estableció así una medición regular asociada al ritmo y planificación de mediciones del IFN cada año.

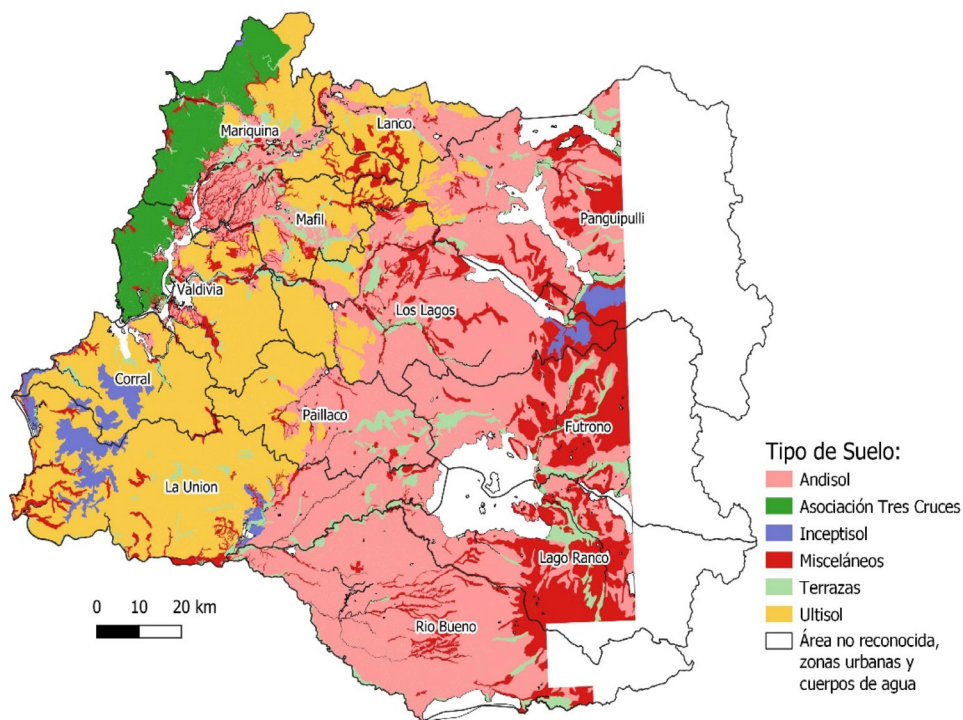


Figura N° 1
MAPA DE TIPOS DE SUELOS EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS

En resumen, el muestreo de suelos fue coherente con la planificación regular de toma de datos del IFN y también con las directrices del IPCC (2006). Esta metodología proporciona un uso eficiente de los recursos financieros disponibles y asegura el poblamiento siempre creciente de bases de datos sobre el carbono del suelo en los bosques de del país. Las parcelas levantadas en terreno se pueden ver en la Figura N° 2.

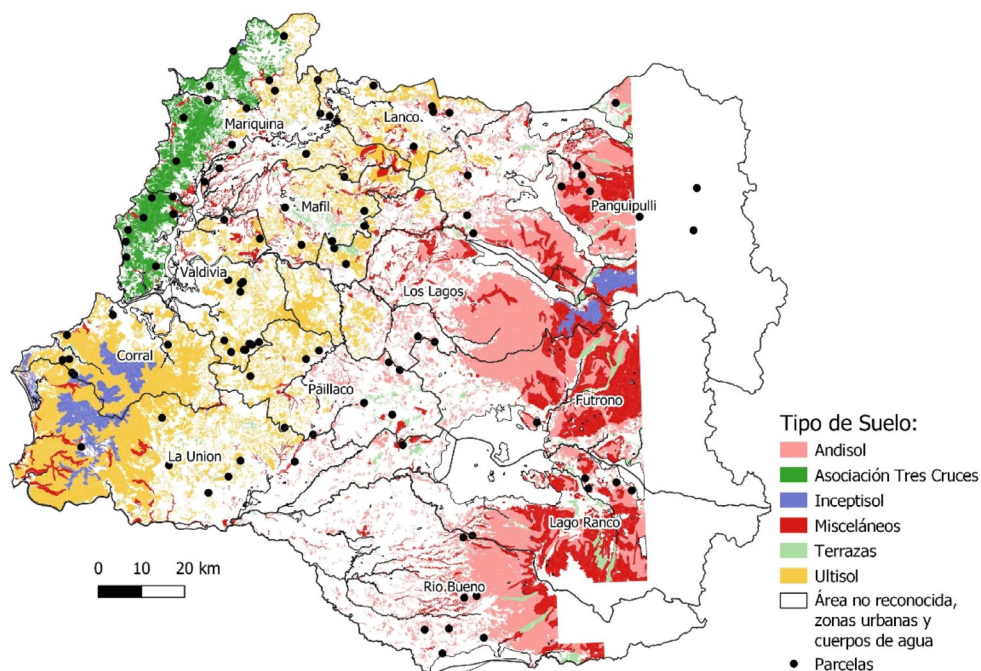


Figura N° 2
PUNTOS DE MUESTREO REPRESENTADOS SOBRE LAS ÁREAS CON BOSQUE NATIVO
SEGÚN EL TIPO DE SUELO EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS

Muestreo en Terreno

En cada parcela de inventario de bosque se ubicaron cuatro puntos de muestreo, distanciados a 10 m desde el centro, en dirección de los puntos cardinales norte, sur, este y oeste (Figura N° 3).

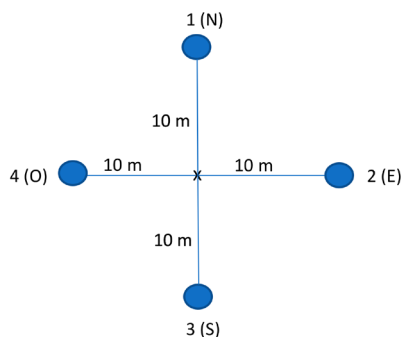


Figura N° 3
UBICACIÓN DE PUNTOS DE MUESTREO

De acuerdo a las Directrices del IPCC (2006) para inventarios de gases de efecto invernadero, la materia orgánica del suelo incluye el carbono orgánico contenido en suelos minerales hasta una profundidad dada, elegida por el país y aplicada coherentemente a lo largo de la serie temporal de los inventarios de gases de efecto invernadero. Las raíces finas vivas y muertas y la materia orgánica muerta (DOM) que se encuentran dentro del suelo, que miden menos que el límite de diámetro mínimo (sugerido 2 mm) para raíces y DOM, se incluyen con la materia orgánica del suelo cuando no se las puede distinguir de esta última empíricamente. El valor por defecto que se utiliza en la información de referencia del IPCC (2006) para la profundidad del suelo es de 30 cm.

Se estableció una profundidad de 30 cm para evaluar el contenido de carbono, en línea con la profundidad mínima de referencia que señala IPCC (2006). Esta profundidad se separó en dos secciones, la primera de 0 a 15 cm y la segunda de 15 a 30 cm, para capturar las diferencias que podrían presentarse en el contenido de carbono y su distribución en la profundidad del suelo.

La muestra de cada sección se mezcló de manera uniforme y se seleccionó una submuestra de aproximadamente 300 g que se guardó en una bolsa de papel debidamente rotulada para ser llevada a laboratorio y determinar su contenido de carbono (%) (Figura N° 4).



(Fuente: Marco Barrientos y Rodrigo Guíñez)

Figura N° 4
MUESTREO EN TERRENO

Densidad Aparente

La densidad aparente del suelo se determinó utilizando el método del “cilindro de volumen conocido” descrito por MacDicken (1997) y se consideraron los siguientes pasos:

- Utilizar un cilindro de volumen conocido, en este caso se utilizó volumen de 100 cm³.
- Preparar un perfil del suelo hasta una profundidad de 30 cm y dividir en las secciones 0-15 cm y 15-30 cm.
- Introducir el cilindro en el suelo sin comprimir en cada sección.

- Colocar la muestra en una bolsa de papel rotulada.
- Llevar muestra a laboratorio y secar a 105 °C, hasta peso constante.
- Determinar peso seco (P, en gramos).
- Calcular la densidad aparente (DA) con la siguiente fórmula:

$$DA \text{ (g/cm}^3\text{)} = \frac{P - \text{Peso bolsa}}{\text{volumen del cilindro}}$$

Manejo y Envío de Muestras a Laboratorio

Una vez terminado el proceso de medición, las muestras fueron enviadas al Laboratorio de Nutrición y Suelos Forestales de la Universidad Austral de Chile para la determinación del contenido de carbono (% p/p). En el laboratorio, las muestras fueron trituradas y tamizadas bajo 0,02 mm, luego fueron secadas en horno y se les determinó el contenido de carbono mediante el procedimiento analítico de oxidación de la materia orgánica con una mezcla de dicromato y ácido sulfúrico. Después de la reacción se midió colorimétricamente el cromato reducido (Sadzawka *et al.*, 2006).

Cantidad de Carbono por Unidad de Volumen

La cantidad de carbono por unidad de volumen de suelo se calculó a partir de los valores del contenido de carbono (%), la densidad aparente del suelo (g/cm³) y la profundidad del suelo con la siguiente fórmula:

$$CS = C \times DA \times P$$

Donde: CS = Cantidad de carbono en el suelo (t/ha)
 C = Contenido de carbono (%)
 DA = Densidad aparente (g/cm³)
 P = Profundidad del muestreo (cm).

En ninguna muestra de suelo se encontró pedregosidad, por lo que no fue necesario considerar esta variable en el cálculo de la cantidad de carbono.

RESULTADOS

Las cantidades promedio de carbono en el estrato superior (0-15 cm) de los suelos variaron entre 69,0 y 88,9 t/ha con una media de 83,5 t/ha (Cuadro N° 2). En cambio, el estrato inferior presentó menores cantidades, alcanzado, en promedio, al 71 % con respecto al estrato superior, variando entre 42,2 y 62,9 t/ha. En ambos estratos de profundidad, el orden decreciente de cantidad de carbono fue el siguiente según el tipo de suelo: Ultisol, Andisol, Misceláneo, Terrazas, Asociación Tres Cruces e Inceptisol.

La variabilidad (CV%) de la cantidad de carbono mostró una tendencia de ser levemente mayor en el estrato más profundo que en el estrato superior (Cuadro N° 2), con la excepción del tipo de suelo Inceptisol en el cual hubo solamente dos parcelas de muestreo. En general, el coeficiente de variación se observó en el rango de 23 a 40 %, sin considerar los Inceptisoles.

Cuadro N° 2
CARBONO Y DENSIDAD APARENTE DEL SUELO POR TIPO Y PROFUNDIDAD
EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS

Tipo de suelo	N° de parcelas	Profundidad (cm)	Contenido promedio de carbono (%)	Desviación estándar del contenido de carbono (%)	Cantidad promedio de carbono (t/ha)	Desviación estándar de la cantidad de carbono (t/ha)	CV de la cantidad de carbono (%)	Densidad aparente promedio (g/cm³)	Desviación estándar de la densidad aparente (g/cm³)
Andisol	29	0-15	12,4	4,02	85,1	20,34	23,9	0,49	0,16
		15-30	8,5	2,87	60,2	18,31	30,4	0,50	0,14
Asociación Tres Cruces	13	0-15	8,9	2,56	73,4	16,96	23,1	0,56	0,06
		15-30	5,6	1,63	54,0	13,30	24,6	0,65	0,11
Inceptisol	2	0-15	6,4	4,84	69,0	36,40	52,8	0,80	0,23
		15-30	2,4	0,32	42,2	0,06	0,1	1,17	0,15
Misceláneo	16	0-15	10,6	5,38	79,2	29,45	37,2	0,60	0,27
		15-30	7,7	3,69	57,6	20,93	36,3	0,59	0,24
Terrazas	4	0-15	9,3	3,85	76,9	23,26	30,2	0,59	0,18
		15-30	6,3	1,92	50,6	15,42	30,5	0,56	0,19
Ultisol	38	0-15	10,3	4,26	88,9	33,36	37,5	0,60	0,14
		15-30	6,9	3,39	62,9	24,89	39,6	0,65	0,17
Total	102	0-15	10,7	4,31	83,5	27,36	32,8	0,57	0,18
		15-30	7,2	3,21	59,3	20,76	35,0	0,60	0,19

En los primeros 30 cm de profundidad (Cuadro N° 3) las cantidades de carbono variaron entre 111,16 y 151,82 t/ha, con un promedio de 142,73 t/ha. Según el tipo de suelo, el orden descendente de la cantidad de carbono fue el mismo observado para cada estrato por separado (0-15 y 15-30 cm): Ultisol, Andisol, Misceláneo, Terrazas, Asociación Tres Cruces e Inceptisol. La variabilidad observada mediante el coeficiente de variación (CV%, Cuadro N° 3) fluctuó entre 21,8 y 36,8 %.

La estimación del carbono acumulado en cada tipo de suelo (0-30 cm), de acuerdo con su superficie boscosa (Cuadro N° 3), mostró un total de 92,685 millones de toneladas de carbono en la zona de estudio de la región de Los Ríos, la cual representa al 71,5% de la superficie de sus bosques nativos. El aporte de cada tipo de suelo estuvo directamente relacionado con su superficie de bosques, siendo los Ultisoles y Andisoles los que explicaron en partes casi iguales el 63,3 % del carbono acumulado en el suelo. Luego se presentaron los suelos Misceláneos con 23,1 % y los demás tipos de suelos (Asociación Tres Cruces, Terrazas e Inceptisoles) contribuyeron en mucho menor medida, con 3,5 a 5,8 % del total.

Cuadro N° 3
CANTIDAD DE CARBONO HASTA UNA PROFUNDIDAD DE 30 CM DEL SUELO Y
CARBONO ACUMULADO EN TODA LA SUPERFICIE DEL TIPO DE SUELO CON PRESENCIA
DE BOSQUE NATIVO EN LA REGIÓN DE LOS RÍOS

Tipo de suelo	Superficie (ha)	Cantidad de carbono (t/ha)			Carbono acumulado en 0-30 cm de suelo bajo bosque nativo	
		Promedio	Desviación estándar	CV (%)	(Millones de t)	(%)
Andisol	200.442	145,26	35,30	24,3	29,115	31,6
Asociacion Tres Cruces	42.494	127,37	27,74	21,8	5,413	5,9
Inceptisol	29.442	111,16	36,45	32,8	3,273	3,6
Miscelaneo	156.672	136,79	46,95	34,3	21,431	23,3
Terrazas	25.725	127,42	28,87	22,7	3,278	3,6
Ultisol	194.599	151,82	55,94	36,8	29,544	32,1
Total	649.374	142,73	45,24	31,7	92,054	100,0

La estimación de la cantidad de carbono por tipo de suelo tuvo un error de 14,73 % al 95 % de confianza.

DISCUSIÓN

En la comparación de los valores obtenidos en el presente estudio con aquellos de referencia del IPCC (Cuadro N° 4), se aprecia que los suelos del orden Andisol, correspondientes a suelos volcánicos, presentan un 11,7 % más carbono; los suelos del orden Inceptisol muestran una acumulación de carbono 17,0 % superior a su referencia de suelos de alta actividad de arcillas (HAC). Las Terrazas, por su parte, alcanzan un 34,1 % de mayor acumulación de carbono comparados con aquellos del tipo HAC; y los suelos del orden Ultisol superaron en 78,6 % a los de la categoría de suelos de baja actividad de arcillas (LAC).

De esta forma, en todos los tipos de suelo con datos de contraste del IPCC (2006), se aprecia que los suelos bajo bosque nativo en la región de Los Ríos acumulan más carbono (11,1 % a 78,6 %) que el estándar internacional. En todo caso, se debe tener en cuenta que los tipos de suelo Inceptisol y Terrazas presentaron una muy pequeña muestra para el análisis de carbono (Cuadro N° 2), por lo que los resultados actuales son solamente indicativos de una tendencia.

Los tipos de suelo Asociación Tres Cruces y Misceláneos del presente estudio abarcan suelos de diferentes características, sin tener la identificación de sus superficies específicas. Por ello, no se pueden asociar a alguna referencia en el IPCC (2006) para su comparación. Sin embargo, en atención a los resultados obtenidos, es posible estimar que estos dos tipos de suelo también presentan cantidades de carbono similares o superiores a las referencias del IPCC (2006).

Cuadro N° 4
CANTIDAD DE CARBONO ACUMULADO EN EL SUELO SUPERFICIAL (0-30 CM)
SEGÚN TIPO DE SUELO Y DIFERENTES ESTUDIOS

Tipo de suelo		Cantidad de carbono en el suelo de 0-30 cm (t/ha)		
Presente estudio	IPCC (2006)*	El presente trabajo (Cuadro N° 3)	IPCC (Cuadro N° 1)	CIREN (2003)
Andisol	Volcánico	145,26	130	164,99
Inceptisol	HAC	111,16	95	103,42
Terrazas	HAC	127,42	95	-
Ultisol	LAC	151,82	85	157,73

*Información del tipo de suelo en el Cuadro N° 1.

Los resultados del presente estudio, en comparación con las estimaciones obtenidas de CIREN (2003) (Cuadro N° 4), muestran menor cantidad de carbono en los suelos muestreados de Andisoles (88,0 % respecto a CIREN) y Ultisoles (96,3 % respecto a CIREN). En cambio, los suelos Inceptisoles presentan un valor mayor (7,5 % más que CIREN). Como se mencionó anteriormente, los suelos Inceptisoles abarcan muestras muy pequeñas en el presente trabajo, por lo que esta comparación puede ser considerada sin representación general. En todo caso, las cantidades de carbono estimadas mediante los muestreos de este estudio se encuentran en magnitudes similares a las que se pueden obtener a través de datos de CIREN (2003).

Las cantidades de carbono acumulado en los suelos (0-30 cm) bajo bosques nativos, estimadas en el presente estudio (111,16 a 151,82 t/ha, Cuadro N° 3), están dentro del rango de otros trabajos que muestran cifras de 119 a 173 t/ha. Sin embargo, se debe tener en cuenta que tales trabajos también consideran mayores profundidades de análisis del suelo, frecuentemente entre 0-40 cm y 0-50 cm, y bosques nativos templados de ambientes menos húmedos que en la región de Los Ríos. Los tipos de suelo abarcados corresponden a Inceptisoles, Alfisoles, Andisoles y Ultisoles. Entre tales estudios están los trabajos de Gayoso (2002), Muñoz *et al.* (2007), Jara (2015), Dube y Stolpe (2016) y Crovo (2020).

Con respecto a suelos de escaso desarrollo evolutivo, como son los Entisoles, se informan cantidades inferiores a 60 t/ha de carbono en el suelo, considerando mayores profundidades (hasta 50 cm) (Klein *et al.*, 2008, Reyes 2012, Crovo 2020). Es esperable que tales suelos recientes tengan poco carbono acumulado y, por lo tanto, que los suelos incluidos en el presente trabajo muestren mayor acumulación de carbono. Además, cuando los bosques nativos están en condiciones ambientales extremas que facilitan la acumulación de carbono en el suelo, como en los Andisoles del suborden Aquands, conocidos en Chile como ñadis, la cantidad de carbono acumulada en el suelo puede ser muy alta, como en el caso informado por Jara (2015) de 253 t/ha. En este caso, es esperable que dicha cifra supere los valores máximos encontrados en los demás tipos de suelos.

Para plantaciones forestales de *Pinus radiata* D. Don, *Eucalyptus globulus* Labill. y (Dean *et* Maiden) Maiden, Olmedo *et al.* (2020) encontraron en la región de Los Ríos las mayores cantidades de carbono en el suelo en comparación a las demás regiones entre O'Higgins y Los Lagos, valores en torno a 170 t/ha en los primeros 30 cm de profundidad del suelo. Este valor relativamente alto con respecto a los estimados en el presente estudio puede ser explicado por el tipo de suelo muestreado y por la mayor densidad aparente de los suelos bajo plantaciones forestales, debido a que anteriormente experimentaron largos períodos de uso agropecuario.

La información de contenido y cantidad de carbono en suelos de bosques nativos de la región de Los Ríos es un primer paso en la medición sistemática de carbono del suelo en bosque nativo. Los valores obtenidos se encuentran dentro de los rangos que informa la literatura y se cubre adecuadamente la variedad de suelos y bosque nativos existentes en la región con un muestro eficiente. No obstante, dada la variabilidad de situaciones factibles de encontrar en todos los bosques nativos del país, ya sea por tipos de suelos, bosques, condiciones climáticas y topográficas, es importante seguir avanzando en todas las regiones del país para contar con una representación adecuada de datos del carbono del suelo.

CONCLUSIONES

Tanto las unidades muestrales aplicadas en terreno como el diseño de la unidad muestral y el método para su recolección demuestran ser eficientes, adecuados y consistente con métodos empleados en otros países. La aproximación muestral estratificada por orden de suelo permite lograr estimados de buena precisión. Desde el punto de vista metodológico, el asociar sinérgicamente la recolección de las muestras de suelo al diseño estadístico del inventario forestal nacional (IFN) e incluir esta recolección como parte del levantamiento regular de muestras del inventario forestal nacional, permite y permitirá incorporar en forma creciente información de carbono del suelo al sistema.

Las cantidades promedio de carbono en suelos de la región de Los Ríos se encuentran dentro de los rangos que se han estimado en la literatura y son mayores que aquellos propuestos por el IPCC para diversos tipos de suelos.

REFERENCIAS

Alfaro, M., 2018. Calidad de suelo en bosques de *Nothofagus obliqua* con diferentes niveles de cobertura en el centro sur de Chile, y el potencial uso de sistemas pastoriles. Tesis para optar al grado de doctor en Ciencias Forestales. Universidad de Concepción. 102 p.

CIREN, 2003. Estudio Agrológico. Descripción de suelos, materiales y símbolos. X Región. Centro de Información de Recursos Naturales. Publicación 123. 374 p.

Crovo, O., 2020. Efecto del reemplazo de bosques secundarios por plantaciones forestales sobre variables biogeoquímicas y reservorios de carbono, nitrógeno y fósforo en suelos de mineralogía contrastante del centro-sur de Chile. Tesis para optar al grado de Magister en Ciencias Forestales. Facultad de Ciencias Forestales, Universidad de Concepción. 126 p.

Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, 2014. Claves para la taxonomía de suelos. Décima segunda edición. Traducción de C. A. Ortiz-Solorio, M.C. Gutiérrez-Castorena y E. V. Gutiérrez-Castorena. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, Servicio de Conservación de Recursos Naturales. 400 p.

Departamento de Geografía Universidad de Chile, 2017. Zonas climáticas de Chile según Köppen-Geiger escala 1:1.500.000. Santiago, Chile. Universidad de Chile.
http://www.geoportal.cl/arcgis/rest/services/Otros/chile_uchile_clima_Koppen_Geiger/MapServer
<http://www.ide.cl/index.php/clima-y-atmosfera/item/1556-zonas-climaticas-de-chile-segun-koeppen-geiger-escala-1-1-500-000>

Dube, F. y Stolpe, N. B., 2016. SOM and Biomass C Stocks in Degraded and Undisturbed Andean and Coastal *Nothofagus* Forests of Southwestern South America. *Forests* 7(12): 320; DOI: <https://doi.org/10.3390/f7120320>

Gayoso, J., 2002. Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques nativos y plantaciones de Chile. *Revista Forestal Iberoamericana (IUFRO-RIFALC)* 1 (1): 1-13.

FAO e ITPS, 2015. Status of the World's Soil Resources (SWSR) – Main Report. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.

FAO, 2017. Carbono Orgánico del Suelo: El potencial oculto. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura Roma, Italia. 90 p.

FAO, 2020. Evaluación de los recursos forestales mundiales 2020 – Principales resultados. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca8753es>

Gerding, V. y Thiers, O., 2002. Caracterización de suelos bajo bosques de *Nothofagus betuloides* (Mirb) Blume, en Tierra del Fuego, Chile. *Revista Chilena de Historia Natural*. 75: 819-833.

INFOR, 2019. Los recursos forestales en Chile. Instituto Forestal, Chile. Informe Final 2018. <https://ifn.infor.cl/index.php/descargas-recursos/descargas/send/2-documentos-inventario-forestal/28-informe-recursos-forestal-en-chile-2018>

INFOR, 2020. Anuario Forestal 2020. Instituto Forestal, Chile. Boletín Estadístico N° 174. 250 p.

IPCC, 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. Capítulo 2: Metodologías genéricas aplicables a múltiples categorías de uso de la tierra. 66 p. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/4_Volume4/V4_02_Ch2_Generic.pdf

Jara, D., 2015. Acumulación de carbono en un bosque siempreverde y una pradera natural, en condiciones de suelo Ñadi (*aquands*) en la región de Los Lagos, Chile

Klein, D.; Fuentes, J. P.; Schmidt, A.; Schmidt, H. and Schulte, A., 2008. Soil organic C as affected by silvicultural and exploitative interventions in *Nothofagus pumilio* forests of the Chilean Patagonia. Forest Ecology and Management, 255 (10): 3549-3555.

Lal, R., 2005. Forest Soils and Carbon Sequestration. Forest Ecology and Management, 220: 242-258.

MacDicken, K., 1997. A guide to monitoring carbon storage in Forestry and agroforestry projects. Arlington, VA: Winrock International Institute for Agricultural Development.

Muñoz, C.; Ovalle, C. and Zagal, E., 2007. Distribution of soil organic carbón stock in an alfisol profile in Mediterranean Chilean ecosystems. J. Soil Sc Nutr: 7 (1): 15-27.

Olmedo, G.; Guevara, M.; Gilabert, H.; Montes, C.; Arellano, E.; Barria-Knopf, B.; Gárate, F.; Mena-Quijada, P.; Acuña, E.; Bown, H. and Ryan, M., 2020. Baseline of Carbon Stocks in *Pinus radiata* and *Eucalyptus spp.* Plantations of Chile. Forests 11, 1063: doi:10.3390/f11101063

Ontl T. A. y Schulte, L., 2012. Soil carbon storage. *Nature Education Knowledge* 3(10): 35.
Sadzawka, R.; Peralta, M.; Ibarra, M.; Peralta, J. M. y Fuentes, J., 1995. Características químicas de suelos forestales chilenos. Bosque 16(1): 9-28.

Sadzawka, R.; Carrasco, M. A.; Grez, R.; Mora, M. L.; Flores, H. y Neaman, A., 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie actas INIA N° 34, Santiago Chile, 164 p.

Reyes, J., 2012. Escarificación del suelo en un bosque de *Nothofagus spp.* En Los Andes del sur de Chile. Tesis de para optar al grado de Magister en Ciencias, mención Recursos Forestales. Universidad Austral de Chile. 74 p.

Rivas, Y.; Oyarzún, C.; Godoy, R. y 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.



INFOR

www.infor.cl