



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL COMAHUE
CENTRO REGIONAL UNIVERSITARIO BARILOCHE
DEPTO. DE POSTGRADO – DOCTORADO EN BIOLOGIA

TÍTULO DE LA TESIS:

**FIJACIÓN DE CARBONO EN ECOSISTEMAS BOSCOSOS
Y HERBÁCEOS DEL NORTE DE LA PATAGONIA**

AUTOR: Pablo Laclau

DIRECTOR: Tomás M. Schlichter

SAN MARTÍN DE LOS ANDES

OCTUBRE DE 2006

RESUMEN

El cambio climático es uno de los problemas ambientales globales más preocupantes de la actualidad. El calentamiento atmosférico, producto del incremento en la concentración de *gases causantes de efecto invernadero* (GEI), ha sido reforzado por las actividades industriales, la agricultura y la deforestación en gran escala. La contribución de los bosques a la mitigación del cambio climático es reconocida por su capacidad de secuestro de CO₂ durante largos períodos. En el noroeste de la Patagonia, los bosques de ciprés del ecotono bosque-estepa y las plantaciones de pino ponderosa tienen un alto potencial de fijación de carbono. Estos sistemas secuestran una gran cantidad de carbono en la biomasa y presumiblemente también en el suelo, en relación con los pastizales naturales alternantes. En la región aún no se conoce suficientemente la cantidad y distribución de carbono secuestrado en los sistemas mencionados. En este trabajo se probaron hipótesis sobre: (1) la magnitud de acumulación de carbono en bosques de ciprés, plantaciones de pino y estepas, y su distribución en la biomasa, el mantillo y el suelo, (2) los efectos de raleos de plantaciones de pino sobre el carbono del suelo y (3) las relaciones entre variables ambientales y la partición de la biomasa en ambos sistemas forestales. Para ello se desarrollaron estimadores de biomasa a nivel de individuo y de rodal, cuantificándose el carbono almacenado en los ecosistemas considerados. Asimismo se comparó su distribución en los distintos tipos vegetales, y su relación con las condiciones de precipitación y variables fisiográficas. Además, se estudiaron los cambios de contenido de carbono en suelos de plantaciones de pino sometidas a raleo, y se simuló la dinámica de la biomasa y del mantillo, analizándose los beneficios económicos de la venta de certificados de carbono de estos proyectos. La biomasa individual osciló entre 2,3 y 460 kg.pl⁻¹ en las especies arbóreas, y entre 0,180 y 0,630 kg.pl⁻¹ en las plantas de la estepa. Su distribución en las plantas arrojó diferencias entre ambas especies forestales, observándose además variaciones según el tamaño de los árboles. Las relaciones encontradas entre diámetro o volumen de fuste y la biomasa, fueron ajustadas por regresión lineal. La relación raíz:tallo, en el rango de 0,15-0,40 en pinos y cipreses, y de 0,25-1,20 en las especies de la estepa, arrojó diferencias relacionadas con la especie, el sitio o el desarrollo de las plantas. A nivel de rodal, la biomasa total de plantaciones de pino, bosques de ciprés y estepas observados fue en promedio de 95, 141 y 10 Mg.ha⁻¹ respectivamente, y su distribución estuvo positivamente correlacionada con la precipitación en las plantaciones de pino o en las estepas, aunque no en los cipresales. El contenido de hojarasca no fue significativamente diferente entre bosques de ciprés y de pino, y el carbono del suelo -entre 80,9 y 111,1 Mg.ha⁻¹ -, tampoco arrojó diferencias entre pinares y estepas, aunque sí entre estos ecosistemas y los bosques de ciprés, cuyo contenido fue mayor en el horizonte más superficial. Tampoco se hallaron diferencias significativas en el carbono del suelo entre plantaciones de pino raleadas y no raleadas. El modelo de crecimiento de biomasa -basado en un modelo local de rendimiento volumétrico-, permitió estimar el carbono secuestrado durante la rotación. El análisis económico arrojó beneficios positivos para proyectos forestales de secuestro de carbono basados en el Mecanismo de Desarrollo Limpio, del Protocolo de Kyoto. Finalmente, se destacó el conocimiento generado en esta investigación y la necesidad de estudiar el secuestro de carbono por estos sistemas en el nivel de paisaje.

ABSTRACT

The Climate Change is a major issue of the environmental agenda. The global warming is a result of the increasing concentration of *greenhouse gases* (GHG), and has been enhanced by industrial activities, agriculture and deforestation. Forests can help to climate change mitigation by sequestering big amounts of carbon dioxide along time. In Northwestern Patagonia, the native cypress forests and the ponderosa pine plantations have a high carbon fixation potential. These forests fix carbon, allocating it in the biomass and maybe also in soils, largely exceeding the nearby steppes. However, the magnitude and distribution of carbon in the above mentioned systems still remains unclear. In this work, I tested some hypothesis related to (1) the amount of carbon accumulated in cypress and ponderosa pine forests, and in the nearby steppe, (2) The consequences of thinnings of pine forests on soil carbon, and (3) the relationship between environmental variables and the biomass partition in both forest types. To do this, some biomass predictors at tree and stand level were tested. Also, the biomass distribution was compared between the vegetation types, and in relation to annual rainfall and physiographic variables. In addition, changes of soil carbon content were analysed. The simulated dynamics of biomass and litter was the physical input for a benefit-cost analysis of carbon-trade forestry projects. The biomass of single trees ranged 2,3 to 460 kg.pl⁻¹, and 0,180-0,630 kg.pl⁻¹ for the steppe species. Its distribution in plant reservoirs varied between tree species, and also between tree sizes. To explain biomass by means of stem variables, linear regressions with transformed data were performed. The root:shoot ratio, ranging 0,15 to 0,40 for trees, and 0,25 to 1,20 for steppe species, showed different response between species, site or plant size. At stand level, the mean total biomass observed was 95, 141 and 10 Mg.ha⁻¹ for cypress, pine and steppe stands, respectively. There was found a positive correlation between rainfall and pine or steppe biomass, but not for cypress stands. There were no significant differences for litter between pine and cypress forests, and the soil carbon (ranging 80,9-111,1 Mg.ha⁻¹), was similar for pine plantations and steppes, although it was higher in the upper horizon of cypress forests. There were also found no differences for soil carbon between thinned and unthinned pine forests. The biomass growth model, which was based on a local volume yielding model, allowed calculations of sequestered carbon along the rotation. Financial benefits of forestry projects, based on the rules of the Clean Development Mechanism of the Kyoto Protocol, were evaluated and reported. Finally, the additional knowledge supplied by this search was highlighted, recommending future studies of carbon sequestration by forests at landscape level.

NOTA PRELIMINAR

En las páginas siguientes se vuelcan los resultados de observaciones iniciadas hace ya más de cinco años sobre secuestro de carbono en bosques nativos de ciprés de la cordillera, plantaciones forestales y estepas en el noroeste de la Patagonia. La contribución actual o potencial de los sistemas boscosos mencionados para secuestrar carbono atmosférico es sin duda, sustancial. Las grandes superficies disponibles para la restauración de bosques nativos o su reforestación, la magnitud del almacenaje de carbono en los suelos, y la posibilidad aún latente de un manejo de los bosques compatible con la conservación o el acrecentamiento de sus beneficios ambientales, así lo sugieren. Por otro lado, el proceso promovido a nivel mundial por la Convención Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas (UNFCCC), ha creado un escenario favorable para la investigación de aspectos biológicos poco explorados aún en la región, como la acumulación de biomasa forestal, su distribución espacial, el crecimiento de raíces de árboles y el contenido orgánico de carbono en los suelos.

Esta investigación sobre secuestro de carbono en bosques, es esencialmente un estudio de la biomasa y del carbono orgánico del suelo, y su contraste en diferentes situaciones ambientales, etarias o de uso alternativo de la tierra. Se encuentra estructurado en cuatro partes, una introductoria, la segunda referida a las estimaciones de biomasa a nivel de planta, la tercera, al secuestro de carbono a nivel de rodal o *stand*¹, y la cuarta al modelado y análisis dinámico, incluyendo la perspectiva económica.

En la tesis se sigue la siguiente línea argumental. Los bosques contribuyen a fijar grandes cantidades de CO₂ atmosférico, particularmente los de coníferas templadas como los aquí estudiados. Por otro lado, la implantación de árboles con fines industriales es una actividad productiva con un alto potencial de desarrollo en el norte de la Patagonia, que se realiza hace ya varias décadas, aún en

¹ La acepción de *rodal*, que se corresponde con *stand* en inglés, es un término ampliamente utilizado en la ciencia forestal, y representa un bosque o porción de un bosque espacialmente delimitada, de composición y estructura homogéneas, que los silvicultores asimilan a la unidad de manejo. En cambio en los pastizales, es usual referirse a un *sitio de pastizal* como sinónimo de esta unidad de condiciones específicas y estructurales homogéneas. Como la palabra *sitio* en lo forestal, tiene connotaciones diferentes, ya que representa el ambiente físico y biológico en donde crece el bosque, se optará aquí por referirse a *rodal* para mencionar unidades de bosque o plantación forestal, y a *stand* para las unidades esteparias estudiadas.

niveles moderados. Localmente, los bosques nativos se encuentran mayoritariamente dentro de áreas protegidas, con excepción de los cipresales del ecotono bosque-estepa. Como el apoyo gubernamental a la forestación está restringido desde hace ya largo tiempo hacia tierras sin bosques, las comunidades vegetales que las plantaciones forestales reemplazan localmente son las estepas arbustivo-graminosas. Estas también pueden ser reemplazadas por recolonización natural del ciprés en sitios favorables para este proceso. Estos aspectos generales y los de párrafos previos son comentados en la **Parte I**. También en esta parte se mencionan algunas características ecofisiológicas determinantes del crecimiento vegetal y la partición de biomasa en distintos órganos de las plantas, aspectos que contribuyen a comprender las variaciones de biomasa de las especies o ecosistemas estudiados, abordadas en las secciones siguientes.

En la **Parte II y III** de este estudio se tratan los aspectos relativos a la cuali-cuantificación del carbono. Para conocer la fijación de carbono por estos bosques nativos, las plantaciones de pinos y los pastizales de estepa, es necesario tener estimadores de esta función. A través de mediciones de biomasa y de carbono en los componentes vegetales vivos, en los detritos y en el suelo, y conociendo las relaciones entre el crecimiento y la edad, o el diámetro de los árboles, es posible conocer el carbono secuestrado durante el ciclo forestal. Con modelos alométricos que utilicen estimadores de fácil medición y con funciones de producción conocidas, puede conocerse la fijación de carbono; estas estimaciones pueden realizarse a nivel de individuo y expandirse a nivel de rodal. Dada la alta incidencia del fuste de las coníferas en la biomasa total, es posible realizar validaciones parciales de las funciones de biomasa en diferentes condiciones ambientales, contrastando los resultados de su aplicación con los de otro tipo de funciones disponibles sobre existencias y crecimiento.

Por otra parte, la permanencia del carbono secuestrado es función tanto de contingencias climáticas, sanitarias o incendios forestales -factores de difícil ponderación- como del manejo silvícola durante la rotación, particularmente de los raleos, ya que afectan las existencias de árboles, y su ejecución puede eventualmente desencadenar procesos erosivos, con pérdidas de carbono del suelo. En la **Parte III** se investigan los impactos del manejo forestal de raleos en la economía del carbono.

En la **Parte IV** se sintetiza la información generada y analizada en los capítulos previos, integrándola en un modelo de dinámica del carbono en una rotación forestal. A través de la evaluación de la

acumulación de carbono de plantaciones de pinos o de bosques de ciprés de la cordillera en distintas situaciones de desarrollo, de ambiente o de manejo, y de su comparación con la estepa gramínea, es posible estimar la adicionalidad² de carbono de estos sistemas y contribuir al conocimiento técnico-científico de una de las herramientas reconocidas como más económicas y eficaces a corto plazo, para la mitigación del Cambio Climático: la forestación.

Debido a que las posibles ventajas económicas relativas a la transacción de este servicio ambiental gravitarán sobre las decisiones públicas y privadas de uso del suelo, se incluyó en la investigación un análisis económico del secuestro de carbono. Finalmente, se sintetizan las conclusiones alcanzadas junto con nuevos interrogantes y propuestas de investigación futura, originadas en los vacíos detectados. Es de esperar con ello, que algunos o muchos elementos de esta tesis alienten a la búsqueda de respuestas más ajustadas a los problemas aquí planteados, o que constituyan insumos apropiados para investigaciones ecológicas y ecofisiológicas sobre estos ecosistemas patagónicos, naturales e introducidos, y sobre éste y otros servicios ambientales que proveen.

En los **Anexos** se presenta un detalle de los análisis estadísticos realizados y también de la evaluación económico-financiera del secuestro de carbono por plantaciones de pino. Para una mejor comprensión del texto se ha incorporado un listado de siglas y abreviaturas utilizadas y su definición al principio del informe. No obstante ello, algunas de estas definiciones se han mantenido en el mismo cuerpo del texto cuando estas abreviaturas aparecen por primera vez, de modo que el lector podrá recurrir indistintamente a esas páginas o al listado inicial cuando necesite clarificar esos términos. Las citas bibliográficas se enuncian en orden anticronológico (primero las más recientes) y alfabéticamente en el caso de publicaciones del mismo año.

² Se denomina *adicionalidad* al secuestro incremental de carbono debido al cambio de uso del suelo, con respecto al nivel actual del uso más probable de la tierra, conocido como *línea base*.

AGRADECIMIENTOS

Una tesis en los tiempos corrientes, es difícilmente el producto de un esfuerzo individual. El conocimiento publicado en trabajos previos, la ayuda recibida para la recolección de datos, la orientación de maestros y colegas, la discusión académica o el acompañamiento afectivo de incontables personas, hacen de este tipo de investigación una construcción colectiva, donde el autor integra esta participación incorporando su propio análisis e interpretación... para ser reorientado nuevamente en sucesivas aproximaciones. Algo así ocurrió en mi caso, en un proceso más largo y discontinuo de lo que hubiera deseado, pero a la vez también enriquecido por las aparentes demoras. Trabajar en una tesis es también, en todas partes, pero seguramente más en nuestro país, un privilegio. Las actividades de lectura y discusión, trabajo de campo o laboratorio y el análisis de información, despiertan tanto placer como estímulo a la reflexión y a nuevas preguntas. Uno no puede menos que desear que su utilidad científica y social se corresponda con estos beneficios personales. Me siento agradecido por esta oportunidad, que debo principalmente a la Institución que me ha contenido y brindado espacios para mi crecimiento profesional en estos años, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, y también a Tomás Schlichter, director de mi proyecto de tesis, por su permanente apoyo y confianza para la consecución de esta investigación, y por su generosidad en facilitarme todo lo que estuvo a su alcance, incluyendo observaciones y sugerencias, bibliografía y su permanente amistad. Tampoco hubiera sido este trabajo posible sin la aceptación familiar, particularmente de Patricia y mis hijas, quienes tuvieron una gran paciencia ante tantas salidas al campo y horas de lectura y computadora.

Debo agradecer además a muchos otros organismos públicos, proyectos o empresas agropecuarias, por apoyarme financiera o logísticamente en algunos casos, o por facilitarme las observaciones de campo en sus establecimientos en otros. Entre ellos se encuentran el Asentamiento Universitario de San Martín de los Andes y el laboratorio de suelos del Centro Regional Universitario Bariloche, ambos de la Universidad Nacional del Comahue; la Estación Experimental Agropecuaria Bariloche, la Agencia de Extensión Rural de San Martín de los Andes y el Campo Forestal General San Martín, todos ellos de INTA; el programa TOEBB y la GTZ, del gobierno de Alemania; el Proyecto Forestal de Desarrollo y el Núcleo de Extensión Forestal Patagonia, de la Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación de la Nación; la Escuela de Graduados de la Facultad de Agronomía (UBA) y el Departamento de Posgrado del CRUB (UNComa); la Delegación Técnica Regional Patagonia y la Intendencia del Parque Nacional Nahuel Huapi, de la Administración de Parques Nacionales; el PNUD; el Servicio Forestal Andino de El Bolsón (RN); las comunidades mapuche Curruhuinca, de Puente Blanco, y Namuncura, de San Ignacio (Nqn); las empresas forestales CORFONE SA, Horkla SA, Meliquina SA, Tipiliuke SA, La Constancia SA, Maitrigo SA; las estancias Chapelco, El Desafío, Chacabuco del Neuquén, Fortín Chacabuco, El Cóndor, Serranías de Lolén SA (Estancia San Pedro), Quemquemtreu, Arroyo Verde, Caleufu, El Nido, La Victoria, El Maitén, San Ramón, Catan Lil; los propietarios de bosques Kraemer y Pichón Lozano, de El Bolsón, Rolando Rocco, de Cuesta del Ternero (RN); los propietarios de plantaciones en Puerto Patriada, Epuyén (Ch); la Hostería Pájaro

Azul, Dieter Bachmann, Carlos Perner, Sr. García Cano, de Bariloche; Liliana Arana (Chapelco), y Fernando Sordelli (Roemmers) de San Martín de los Andes.

Entre quienes me han ayudado personalmente, con distintos aportes, consejos, o calidez humana se encuentran nuevamente Tomás Schlichter, Guillermina Dalla Salda, Verónica Rusch, Gonzalo Caballé, Javier Gyenge, María Elena Fernández, Hugo Brockerhof, Ernesto Andenmatten, Carlos Lorenzani(†), Thomas Retschitzegger, Esteban Coliqueo, Gabriel Stecher, Bibiana Chávez, Raúl Hevia, Mercedes de Urquiza, Ines Bertoldi, Gustavo Cortés, Jorge y Gachi Reynals, Adolfo Moretti, Susana Campos, Federico Letourneau, Nicolas De Agostini, Uriel Mele, Ricardo Ragni, Luis Pozo, Theron Taylor, Guillermo Doll, Mauricio Mazzuchelli, Esteban Bello; Werner Moosbrugger; Pedro Willi; César Cuevas, Marcela Neira, Marcelo y Cecilia Leanza, Carlos Biaus, Marcelo Rey, Ricardo Merello; Gustavo Basil, Walter Oyantçabal, Aquiles Newenschwander, Teresa Boca. A ellos y a quienes involuntariamente he omitido de esta larga lista: Muchas Gracias. Finalmente, quiero extender mi agradecimiento a Martín Aguiar, Carlos Busso y María Damascos, quienes aceptaron la tarea de evaluar este trabajo, tanto por el esfuerzo dedicado a leer detalladamente esta tesis, como por las observaciones y sugerencias destinadas a mejorar su presentación, completar contenidos o argumentar los disensos.

Nota: en abril de 2006 falleció en San Martín de los Andes el Ing. Carlos Lorenzani, productor forestal y colaborador en ésta y otras investigaciones sobre plantaciones forestales, y también compañero en el ex-grupo forestal local de Cambio Rural. Tanto por su generosidad, como por su permanente apoyo, dedico esta tesis en su recuerdo.

INDICE

PARTE I - INTRODUCCION

1 - CONTEXTO GENERAL	23
1.1 EL PROBLEMA DEL CAMBIO CLIMÁTICO	23
1.2 PROCESOS GLOBALES PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO	31
1.3 LOS BOSQUES DE CONÍFERAS Y EL SECUESTRO DE CARBONO	37
2 - FIJACION Y BALANCE DE CARBONO EN ECOSISTEMAS BOSCOSOS Y HERBACEOS	39
2.1 ASIMILACIÓN, ASIGNACIÓN Y PARTICIÓN DE CARBONO EN LA PLANTA	39
<i>Asimilación y asignación de fotosintatos</i>	<i>39</i>
<i>Acumulación y partición</i>	<i>42</i>
2.2 COMPARTIMENTOS DE CARBONO EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA	45
<i>Carbono orgánico del suelo</i>	<i>45</i>
<i>Carbono en plantas</i>	<i>46</i>
<i>Biomasa aérea</i>	<i>47</i>
<i>Biomasa subterránea</i>	<i>48</i>
2.3 PRODUCTIVIDAD Y SITIO FORESTAL	51
2.4 EL BALANCE DE CARBONO Y SU DINÁMICA EN SISTEMAS FORESTALES	55
3 - CONTEXTO REGIONAL	61
3.1 SUELOS Y CLIMA	61
3.2 USO DEL SUELO	66
3.3 LOS BOSQUES DE CIPRÉS, LAS FORESTACIONES DE PINO Y LAS ESTEPAS DE COIRÓN BLANCO	69
<i>Bosques de ciprés de la cordillera</i>	<i>69</i>
<i>Forestaciones de pinos</i>	<i>72</i>
<i>Estepas de coirón blanco</i>	<i>78</i>
<i>La partición de biomasa en la estepa patagónica.....</i>	<i>79</i>
4 - HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	83
4.1 HIPÓTESIS	86
4.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	87

5- BIBLIOGRAFIA	88
------------------------------	-----------

PARTE II - CARBONO EN BIOMASA INDIVIDUAL

6 - MATERIALES Y MÉTODOS	103
6.1 MEDICIÓN DE BIOMASA INDIVIDUAL	106
<i>Extracción de individuos</i>	<i>106</i>
<i>Separación de muestras y mediciones a campo</i>	<i>108</i>
<i>Secado y volumetría en laboratorio</i>	<i>110</i>
<i>Distribución de la biomasa aérea</i>	<i>111</i>
<i>Distribución espacial de raíces</i>	<i>112</i>
6.2 ANÁLISIS DE DATOS	115
7 - RESULTADOS	116
7.1 BIOMASA POR CLASES DE TAMAÑO	117
7.1.1 Biomasa de árboles	117
7.1.2 Biomasa de arbustos y gramíneas	120
7.2 RELACIONES ALOMÉTRICAS	123
7.2.1 Ecuaciones de biomasa individual	123
7.2.2 Análisis de los modelos	126
<i>Diferencias de biomasa entre especies forestales</i>	<i>126</i>
<i>Ecuaciones de biomasa de estepas</i>	<i>128</i>
7.3 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE BIOMASA DE ÁRBOLES	130
7.3.1 Biomasa aérea	130
7.3.2 Biomasa subterránea	135
<i>Distribución de la biomasa subterránea</i>	<i>135</i>
7.4 RELACIONES RAÍZ:TALLO	140
8 - DISCUSIÓN	142
8.1 BIOMASA DE ÁRBOLES POR CLASE DE TAMAÑO Y ESPECIE	142
8.2 BIOMASA DE ARBUSTOS Y GRAMÍNEAS	148
<i>Peso seco individual</i>	<i>148</i>
<i>Partición de biomasa</i>	<i>149</i>
8.3 ECUACIONES DE BIOMASA	152
<i>Ecuaciones alométricas de árboles</i>	<i>152</i>
<i>Ecuaciones alométricas de arbustos y gramíneas</i>	<i>156</i>
8.4 DISTRIBUCIÓN DE LA BIOMASA AÉREA DE LOS ÁRBOLES	160
8.5 BIOMASA SUBTERRÁNEA DE ÁRBOLES	164
<i>Métodos y porcentaje de extracción de raíces</i>	<i>164</i>

<i>Distribución espacial</i>	165
<i>Relación raíz: tallo</i>	168
9 - CONCLUSIONES	170
10- BIBLIOGRAFÍA	171
 PARTE III - BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUES Y ESTEPA	
11 - MATERIALES Y MÉTODOS	177
11.1 ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO DE BOSQUES Y ESTEPAS	177
11.2 MANEJO Y BALANCE DE CARBONO EN FORESTACIONES DE PINO PONDEROSA	185
<i>Selección y caracterización de sitios</i>	185
<i>Biomasa y carbono en los componentes arbóreo y herbáceo</i>	188
<i>Detritos de las plantaciones</i>	188
<i>Carbono en los suelos de las plantaciones</i>	190
 12 – RESULTADOS	195
12.1 BIOMASA DE BOSQUES Y ESTEPAS	195
<i>Biomasa de plantaciones de pino y bosques de ciprés</i>	195
<i>Biomasa de estepas</i>	197
<i>Biomasa, precipitación anual y variables fisiográficas</i>	201
<i>Biomasa de forestaciones y estepa, y densidad relativa</i>	203
12.2 BIOMASA EN EL MANTILLO Y CARBONO EN EL SUELO	205
<i>Mantillo forestal</i>	205
<i>Carbono del suelo</i>	207
12.3 MANEJO FORESTAL Y BALANCE DE CARBONO	209
<i>Estructura forestal y biomasa</i>	209
<i>Carbono en biomasa, detritos y suelos</i>	212
<i>Homogeneidad interna de parcelas y apareamiento</i>	215
<i>Análisis grupal</i>	215
 13 – DISCUSIÓN	219
<i>Biomasa forestal</i>	219
<i>Biomasa de estepas</i>	224
<i>Carbono del suelo</i>	230
 14 – CONCLUSIONES	234
 15 – BIBLIOGRAFÍA	236

PARTE IV - ADICIONALIDAD ECOLOGICA Y ECONOMICA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN FORESTACIONES DE PINO PONDEROSA

16. MÉTODOS	241
16.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DINÁMICO	241
<i>El problema del secuestro de carbono</i>	241
<i>Componentes del modelo</i>	242
<i>Relaciones de causalidad</i>	245
16.2 EL MODELO DE SIMULACIÓN	248
<i>Supuestos del análisis</i>	251
16.3 ANÁLISIS ECONÓMICO	255
<i>Supuestos de análisis económico</i>	257
<i>Herramientas de cálculo</i>	258
17. RESULTADOS	261
17.1 PRODUCCIÓN DE MADERA Y SECUESTRO DE CARBONO	261
<i>Simulación de una rotación en un sitio de calidad media</i>	261
<i>Rotación y calidad de sitio</i>	265
<i>Forestaciones sin raleo</i>	266
<i>Síntesis de resultados</i>	267
17.2 DINÁMICA DEL MANTILLO	269
<i>Análisis de sensibilidad de la descomposición del mantillo</i>	270
17.3 EVALUACIÓN DEL MODELO	274
17.4 RESULTADOS ECONÓMICOS	277
18. DISCUSIÓN	281
<i>Evaluación del modelo</i>	281
<i>Secuestro de carbono</i>	283
<i>Dinámica del mantillo</i>	284
<i>Aspectos económicos</i>	287
19. CONCLUSIONES	290
20. BIBLIOGRAFIA	292
CONCLUSIONES, NUEVOS CONOCIMIENTOS E INTERROGANTES	
<i>Primera hipótesis</i>	295
<i>Segunda hipótesis</i>	297

<i>Tercera hipótesis</i>	297
<i>Cuarta hipótesis</i>	298
<i>Quinta hipótesis</i>	298
<i>Modelo dinámico de secuestro de carbono</i>	300
<i>La forestación y el Mecanismo de Desarrollo limpio</i>	301
<i>Nuevos conocimientos, nuevas hipótesis</i>	302

ANEXOS

ANEXO 1. BIOMASA INDIVIDUAL. ECUACIONES ALOMÉTRICAS Y TABLAS DE ANOVA305

1.1 ECUACIONES DE BIOMASA INDIVIDUAL DE PINO PONDEROSA Y CIPRÉS305

1.2 MODELOS DE REGRESIÓN, ANÁLISIS DE VARIANZA, LÍMITES DE CONFIANZA Y

CONTRASTE ENTRE REGRESIONES DE PINO Y CIPRÉS307

1.2.1 Ecuaciones diámetro/ biomasa individual307

1.2.2 Ecuaciones volumen de fuste/biomasa individual (árboles)324

1.3 PRUEBA DE INFERENCIA DE LA RELACIÓN RAÍZ:TALLO ENTRE DOS MUESTRAS

INDEPENDIENTES332

ANEXO 2. BIOMASA DEL RODAL. ANALISIS DE CORRELACION, REGRESION, Y ANÁLISIS DE VARIANZA333

2.1 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA BIOMASA POR ESPECIE, COMPARTIMENTO Y CLASE

DIAMETRICA333

2.2 ANÁLISIS DE VARIANZA. BIOMASA POR COMPARTIMENTO Y CLASE DE DAP, ENTRE

CIPRES Y PINO 335

2.3 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA DISTRIBUCION PORCENTUAL DE BIOMASA DE PINO Y

CIPRES, POR COMPARTIMENTO Y CLASE DIAMÉTRICA341

2.4 ANÁLISIS DE VARIANZA Y TEST t PARA OBSERVACIONES APAREADAS. DIFERENCIAS

EN CONTENIDO DE CARBONO DEL SUELO ENTRE USOS Y PROFUNDIDADES DE CADA USO344

2.5 ANÁLISIS DE VARIANZA ENTRE PARCELAS DE PINO CON Y SIN RALEO345

2.6 ANÁLISIS DE VARIANZA DE BIOMASA AEREA, SUBTERRANEA Y TOTAL DE ABROJO,

COIRON BLANCO Y NENEO.....350

2.7 ANÁLISIS DE VARIANZA BIOMASA TOTAL SEGUN EPOCAS DEL AÑO, ENTRE COIRON, ABROJO Y NENEO	351
2.8 ANÁLISIS DE VARIANZA. ESTRUCTURA DE RODALES Y BIOMASA DE CIPRESALES Y FORESTACIONES DE PINOS	352
2.9 CORRELACION ENTRE VARIABLES FÍSIOGRÁFICAS, FÍSICO-QUIMICAS, Y DE BIOMASA FORESTAL	354
2.9-1 Coeficientes de Correlación de Spearman, plantaciones de pino ponderosa.....	354
2.9-2. Coeficientes de Correlación de Spearman, bosques de ciprés de la cordillera...	355
2.10 REGRESION LINEAL DE BIOMASA DEL RODAL EN FUNCION DE LA DENSIDAD RELATIVA	356
2.11 PRUEBA t PARA PARCELAS APAREADAS. %CO SUELO 0-25 cm	363
2.12 ANÁLISIS DE VARIANZA. BIOMASA DE ESTEPAS Y CONDICION DE PASTIZAL	364
<u>ANEXO 3.</u> MODELO DE SIMULACIÓN DE LA DINAMICA DE BIOMASA DE PINO PONDEROSA. FORMA ECUACIONAL.....	365
<u>ANEXO 4.</u> ANALISIS FINANCIERO DE UNA ROTACION DE PINO PONDEROSA. PLANILLAS DE DATOS Y RESULTADOS.....	368
4.1 PRECIOS E INSUMOS DE PRODUCCION.....	368
4.2 MODELO DE PRODUCCION.....	369
4.3 RESULTADOS DEL ANALISIS ECONOMICO	370

INDICE DE FIGURAS

PARTE I - INTRODUCCION

1.1-1 Fortalecimiento radiativo de GEI en los períodos 1765-1990 y 1990-2100	25
1.1-2 Distribución aproximada del carbono en distintos reservorios planetarios	26
2.2-1 Fijación y asignación de carbono a nivel de planta	40
2.4-1 Estado de acumulación de carbono en el bosque y flujos de entrada y salida	55
2.4-2 Modelo conceptual de reservorios y transferencias de carbono en un sistema forestal.....	56
3.1-1 Mapa del área de estudio y climogramas locales	65
3.3-1 Cobertura relativa de coirón blanco, neneo y mantillo según precipitación y pastoreo	65
4.1-1 Esquema conceptual de un modelo local de secuestro de carbono y adicionalidad.....	83

PARTE II - CARBONO EN BIOMASA INDIVIDUAL

6-1 Mapa de ubicación de las parcelas de evaluación de biomasa individual de árboles	105
6.1-1 Perfil de distribución de copa	112
6.1-2 Esquema de disposición espacial de raíces	113
7.1-1 Distribución porcentual de la biomasa de árboles de pino y ciprés, según su tamaño	118
7.1-2 Peso seco individual por unidad de área, de coirón blanco, neneo y abrojo.....	121
7.1-3. Distribución porcentual del peso seco individual de plantas de coirón, neneo y abrojo	123
7.2-1 Biomasa total, aérea y subterránea de árboles de diferente diámetro	124
7.2-2 Biomasa total, aérea y subterránea de plantas de coirón blanco, neneo y abrojo según diámetro	125
7.2-3 Peso seco observado y estimado de pinos y cipreses	126
7.2-4 Coeficientes de determinación de regresiones de biomasa de coirón blanco, neneo y abrojo	128
7.3-1 Altura total en función del dap de cipreses y pinos	130
7.3.2 Perfiles verticales de biomasa de ramas y de follaje	131
7.3-3 Porcentaje de ramas vivas de árboles de ciprés	132
7.3-4 Distribución vertical de la biomasa de fuste de pinos y cipreses	134
7.3-5 Peso seco de raíces laterales de pinos en función de la distancia al raigón.....	136
7.3-6 Distribución horizontal de raíces de pino según edad	137
7.3-7 Distribución del peso de raíces de pinos en función de la profundidad.....	138
7.3-8 Peso seco total medio de raíces gruesas de pinos	139
7.4-1 Relación raíz:tallo de pinos y cipreses	140

7.4-2 Relación raíz:tallo de coirón blanco, neneo y abrojo	141
8.1-1 Peso seco de componentes individuales de pinos, cipeses, y de pino oregón de USA.....	145

8.3-1 Bandas de confianza de estimadores de biomasa total, y aérea de especies de estepa.....	158
---	-----

PARTE III - BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUES Y ESTEPA

11.1-1 Ubicación de sitios de evaluación a nivel de rodal o <i>stand</i>	178
11.1-2 Diseño de muestreo de bosques y estepas contiguas	180
11.1-3 Ubicación de sitios de evaluación de pastizales de estepa en el sur de Neuquén	183
11.2-1 Diseño de muestreo en rodales de pino <i>sin</i> y <i>con</i> raleo	194
12.1-1 Frecuencias de bosques de ciprés en función de clases de eap	195
12.1 2 Biomasa en función del volumen de rodal, de bosques de ciprés y plantaciones de pino.....	197
12.1-3 Biomasa media por especie en diferentes sitios de pastizal y clase de condición	199
12.1-4 Biomasa aérea y subterránea promedio en función de la cobertura relativa	200
12.1-5 Regresión lineal entre cobertura total y parcial de las estepas.....	200
12.1-6 Biomasa de rodales de pino, de bosques de ciprés y de estepas según precipitación anual	201
12.2-1 Valores observados y tendencia del contenido de hojarasca de pino y ciprés	205
12.2-2 Biomasa de mantillo de plantaciones de pino, <i>sin raleo</i> y <i>con raleo</i>	206
12.2-3 Carbono orgánico en plantaciones de pino manejadas	208
12.3-1 Frecuencias relativas de la densidad de árboles de pino y biomasa, por clase diamétrica ...	210
12.3-2 Contenido de CO total en suelos, detritos y biomasa en parcelas de pino <i>sin</i> y <i>con raleo</i>	212
12.3-3 Carbono orgánico de las fracciones de biomasa, detritos y suelos	213

PARTE IV - ADICIONALIDAD ECOLOGICA Y ECONOMICA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN FORESTACIONES DE PINO PONDEROSA

16.1-1 Mapa de sectores de simulación de producción de madera y balance de biomasa y carbono de rodales de pino ponderosa	245
16.1-2 Relaciones de causalidad entre las variables del modelo.....	246
16.2-1 Modelo de simulación de producción de madera y balance de biomasa y carbono de la forestación con pino ponderosa	250
16.3-1 Diagrama de flujo de información para la evaluación económico-financiera del secuestro de carbono combinado con la producción de madera.....	255

17.1-1 Evolución del contenido de biomasa y de carbono en la rotación forestal	264
17.1-2 Volumen acumulado de una rotación forestal de pino ponderosa según edad y sitio	266
17.1-3 Duración de una rotación forestal en función del índice de sitio	267
17.1-4 Tasa anual media de simulaciones de plantaciones <i>con</i> y <i>sin</i> manejo de poda y raleo	268
17.2-1 Dinámica de la hojarasca y el mantillo leñoso en la rotación.....	269
17.2-2 Análisis de sensibilidad de las tasas de descomposición de mantillo	272
17.3-1 Comparación entre componentes estimados y observados de la biomasa y mantillo.....	275
17.4-1 VAN, B/C y TIR de diferentes simulaciones de una rotación de pino ponderosa según calidad de sitio	278

INDICE DE TABLAS

PARTE I - INTRODUCCION

3.3-1 Partición de biomasa de las distintas fracciones de matas de <i>Festuca pallescens</i>	80
--	----

PARTE II - CARBONO EN BIOMASA INDIVIDUAL

6.1-1 Variables de muestreo de árboles individuales	114
7.1-1 Biomasa individual por especie, clase diamétrica y fracción	117
7.1-2 Diámetro y peso seco de <i>Festuca pallescens</i> , <i>Mulinum spinosum</i> y <i>Acaena splendens</i>	120

PARTE III - BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUES Y ESTEPA

11.2-1 Ubicación, edad, superficie y tratamientos de las parcelas de pinos de evaluación del carbono y efectos del aprovechamiento	187
11.2-2 Compartimentos de carbono evaluados en rodales de pino ponderosa en Neuquén	193
12.1-1 Parámetros de estructura a nivel de rodal, de los dos tipos forestales evaluados	196
12.1-2 Valores medios de cobertura y biomasa, y relaciones raíz:tallo, de estepas según condición	198
12.1-3 Ecuaciones de estimación de biomasa aérea, subterránea o total, por tipo de ecosistema ...	204
12.2-1 Valores medios de carbono orgánico de estepas, bosques de ciprés y plantaciones de pino	207
12.3-1 Parámetros de los rodales de pino ponderosa	209

12.3-2 Contenido de carbono en biomasa, detritos y suelos de los rodales evaluados	214
12.3-3 Significancia de las diferencias entre parcelas <i>con</i> y <i>sin raleo</i>	217

PARTE IV - ADICIONALIDAD ECOLOGICA Y ECONOMICA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN FORESTACIONES DE PINO PONDEROSA

17.1-1 Datos de salida de simulación de una rotación de pino ponderosa	262
17.3-1 Datos observados y simulados en rodales <i>con</i> y <i>sin raleo</i>	274

SIGLAS Y ABREVIATURAS UTILIZADAS EN EL TEXTO

AAR: rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Abra Ancha (AA), Neuquén), con raleo (R).

AAT: rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Abra Ancha (AA), Neuquén), testigo sin raleo (T).

ANOVA: análisis de varianza.

B/C: relación beneficio costo. Se estima actualizando separadamente ingresos y egresos del flujo de fondos de una inversión y calculando su cociente. Representa la ganancia (o pérdida) en \$ por cada peso invertido durante un proyecto.

C: carbono.

CER's: certificados de reducción de emisiones de carbono a la atmósfera o de captura de carbono atmosférico. Se expresan en toneladas de CO₂ equivalente (Tn CO₂eq), cuyo peso atómico es (¹²C+ 2.¹⁶O= 44). Por lo tanto, 1 Tn de carbono secuestrado equivale a 3,67 Tn de CO₂.

CFC: carbofluorocarbonos.

CO: carbono orgánico.

COP's: Conferencias de las Partes de la Convención Marco del Cambio Climático de las Naciones Unidas (*Conferences of the Parties*).

CO₂eq: CO₂ equivalente, ver CER's.

Cp₀: subtratamiento correspondiente a suelo sin evidencias de compactación o arrastre de mantillo, en rodales de pino estudiados para evaluación de impactos de raleo.

Cp₁: subtratamiento correspondiente a suelo sin compactación evidente pero con signos de arrastre de material grueso, en rodales de pino estudiados para evaluación de impactos de raleo.

Cp₂: subtratamiento correspondiente a suelo con evidencias de compactación y de arrastre de material grueso, en rodales de pino estudiados para evaluación de impactos de raleo.

C6: rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Junín de los Andes, Neuquén, en empresa privada (C), en la situación actual con raleo, con código interno del establecimiento (6).

C6₍₂₀₀₀₎: rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Junín de los Andes, Neuquén, en empresa privada (C), en la situación prerraleo, en el año 2000, con código interno del establecimiento (6).

C10: rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Junín de los Andes, Neuquén, en empresa privada (C), con raleo, con código interno del establecimiento (10).

C11: rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Junín de los Andes, Neuquén, en empresa privada (C), sin raleo, con código interno del establecimiento (11).

DAP: diámetro de un árbol, o diámetro medio de un bosque a la altura del pecho (1,30m).

DAT: diámetro de árboles a la altura del tocón, es decir, aproximadamente a 30cm del suelo.

- dg:** diámetro medio cuadrático. Es una estimación del diámetro medio de los individuos del rodal a partir del área basal. Se calcula como: $dg = \sqrt{(4.G / \pi.N)}$, donde G= área basal.ha⁻¹ y N= plantas.ha⁻¹.
- DR:** densidad relativa del rodal según Curtis (1982). Es un índice de ocupación del sitio por los árboles. Se calcula como la relación entre el área basal del rodal y la raíz cuadrada del diámetro medio cuadrático ($DR=G.dg^{-0.5}$).
- D₍₀₎:** diámetro de la base de los árboles.
- EAP:** edad de un árbol, o edad media de la plantación a la altura del pecho.
- EOD:** Entidad Operacional Designada por la Junta Ejecutiva del Mecanismo de Desarrollo Limpio, para validar un proyecto presentado bajo MDL y proponer la asignación de los correspondientes créditos de carbono.
- EPT:** Evapotranspiración potencial
- G:** área basal del rodal. Se expresa en m².ha⁻¹
- GEI:** gases causantes del efecto invernadero.
- H:** altura dominante del rodal (m). Según Assmann (1970), la altura dominante se calcula como el promedio de los cien árboles más gruesos por ha.
- HCFC:** hidrocarbofluorocarbonos.
- IE:** longitud, en metros, de cinco entrenudos completos por encima de 1,30 m del suelo, de los árboles dominantes del rodal.
- IS:** Índice de Sitio. Se define como la altura promedio, en metros, que alcanzan los árboles dominantes [usualmente, los cien árboles más gruesos por hectárea (Assman 1970)] de la forestación a una edad de referencia, que se indica con un subíndice. Por ejemplo, IS₂₀ indica el índice de sitio expresado como la altura dominante a los veinte años de edad.
- IPCC:** Panel Intergubernamental de Cambio Climático (*Intergovernment Panel of Climate Change*).
- ICERs:** certificados de reducción de emisiones (CERs) de largo plazo, que acreditan un secuestro temporario de carbono de 20 o 30 años, con opción a renovación hasta un máximo de 60 años (plazo opcional, que debe establecerse *a priori* en proyectos MDL).
- LS1:** rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Meliquina, Neuquén, en estancia privada (L), bajo manejo silvopastoril (S), con código interno del establecimiento (1).
- L23:** rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Meliquina, Neuquén, en estancia privada (L), con código interno del establecimiento (23).
- L5A:** rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Meliquina, Neuquén, en estancia privada (L), con raleo, con código interno del establecimiento (5A).
- L5B:** rodal de pinos estudiado para evaluación de impactos de raleo en la localidad de Meliquina, Neuquén, en estancia privada (L), con raleo, con código interno del establecimiento (5B).
- MAPSS:** modelo de mapeo del sistema atmósfera- planta- suelo (*Mapped Atmosphere Plant Soil System*).
- MDL:** Mecanismo de Desarrollo Limpio. Uno de los mecanismos de flexibilización aceptados por el Protocolo de Kyoto sobre reducción de emisiones de carbono, que considera a la forestación

o reforestación como los cambios de uso del suelo aceptables para la acreditación de reducción de emisiones (de captura de carbono en este caso).

N: densidad de plantas de un rodal. Se expresa en plantas.ha⁻¹.

P: podas

PPD: diseño de propuesta de proyecto (*Project Proposal Design*). Constituye un requerimiento *ex ante* para la acreditación de bonos de carbono bajo proyectos presentados bajo el MDL.

PPN: Productividad Primaria Neta.

R: raleo

r:t: relación raíz: tallo, o biomasa subterránea:biomasa aérea.

tCERs: certificados de reducción de emisiones (CERs) de corto plazo, que acreditan un secuestro temporario de carbono de 5 años.

TIR: tasa interna de retorno de una inversión. Es un índice financiero que, expresada al tanto por uno representa la renta monetaria por unidad de capital invertido ($\$/\text{renta}/\$/\text{inversión}$), o alternativamente, al tanto por ciento, el interés del capital.

UNCED: Conferencia de las Naciones Unidas sobre Ambiente y Desarrollo (*United Nations Conference of Environment and Development*). “Cumbre de la Tierra” , Río de Janeiro, 1992.

UNFCC: Convención Marco de Cambio Climático de las Naciones Unidas(*United Nations Frame Convention of Climate Change*).

V: volumen bruto de los fustes, expresado en m³.

VAN: valor actual neto, expresado en \$ (por \$.ha⁻¹ en el caso de análisis de rentabilidad de las plantaciones). Indicador financiero usual en el análisis de inversiones, que actualiza al presente el flujo de saldos anuales futuros esperados de una inversión, utilizando una tasa de descuento o tasa calculatoria.

PARTE I - INTRODUCCION

1 - CONTEXTO GENERAL

1.1 EL PROBLEMA DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Entre los principales desafíos de la humanidad en el siglo XXI, se encuentran una variedad de problemas ambientales relativos a la pérdida o degradación de recursos, saturación de reservorios naturales y alteraciones significativas en los ciclos biogeoquímicos y flujo de energía (Steffen y Tyson, Eds. 2001, Jacobson y Price 1990). La creciente escasez de agua potable; el incremento de condiciones de aridez en extensos territorios; la contaminación del suelo, el agua o el aire; la pérdida de especies vivientes; el adelgazamiento de la capa de ozono atmosférico y el calentamiento global, son aspectos que ocupan la atención desde hace ya varias décadas y que aparecen como la contracara del desarrollo humano alcanzado (Jacobson y Price 1990). Con particular intensidad en los últimos 250 años, la sociedad moderna ha llegado a un grado de manipulación tal de los recursos naturales, que ha rebasado la resiliencia de los ecosistemas desde escalas locales hasta el nivel global (Steffen y Tyson, Eds. 2001). El cambio climático global ha sido señalado como uno de los procesos más preocupantes y de consecuencias difíciles de pronosticar, y por lo tanto también de prevenir o controlar (Steffen y Tyson, Eds. 2001). Los cambios en el régimen térmico, de circulación oceánica y atmosférica, e hídrico a la vez son determinantes de cambios físicos y biológicos en la superficie terrestre, modificando hábitats y con ello, amenazando la persistencia de las poblaciones actuales, incluyendo a la especie humana. Si bien el aire que respiramos está compuesto principalmente por nitrógeno y oxígeno (78% y 21% respectiva y aproximadamente), la concentración de CO₂ ha aumentado en forma alarmante durante los últimos años (desde 280 ppm a fines del S.XVIII, a 360 ppm

en el presente), pronosticándose su incremento sostenido por mucho tiempo más (Steffen y Tyson, Eds. 2001, Wigley 1999, IPCC 1996). Actualmente se estima una tasa de incremento de CO₂ atmosférico del 0,4% anual y los escenarios recientemente propuestos, postulan que a fines del siglo XXI el carbono atmosférico multiplicará por dos o tres veces el nivel histórico pre-industrial, de 250 ppm, aumentando su concentración a 558-825 ppm (Wigley 1999).

Las actividades industriales, las agrícolas y la eliminación de cobertura vegetal en gran escala son importantes causas de contaminación del aire, cuyo efecto es el cambio en la composición atmosférica, que a la vez afecta su estabilidad y la del sistema terrestre subyacente. Por su carácter global y por sus implicancias ecológicas y económicas, la destrucción de la capa de ozono y el aumento del efecto invernadero son los principales efectos de estos impactos sobre la atmósfera, aunque también el aumento de contenido de residuos tóxicos en el aire y el de la fertilización vegetal atmosférica pueden inscribirse entre otros importantes (Jacobson y Price 1990).

El efecto invernadero es la capacidad de retención atmosférica de las radiaciones de onda larga emitidas desde la superficie terrestre hacia el espacio. Esta propiedad determina que la Tierra tenga en la superficie una temperatura 33°C mayor que la que tendría en ausencia de la cubierta atmosférica, asegurando las condiciones para la vida tal como la conocemos (Steffen y Tyson, Eds. 2001). El calentamiento atmosférico es producto del incremento en la concentración de *gases causantes del efecto invernadero* (GEI). Así se denomina a un grupo de compuestos químicos como el CO₂ (que por su magnitud es el de mayor significancia), el CH₄, el N₂O, los

halocarbonos (carbofluorocarbonos e hidrocarbofluorocarbonos, o CFC y HCFC), los aerosoles de azufre (SF_6) y otros (Steffen y Tyson, Eds. 2001, Wigley 1999, Gucinski *et al.* 1995). Junto con el ozono, el vapor de agua, los hollines sólidos y otros desechos industriales, estas sustancias gaseosas impiden la disipación de energía térmica terrestre, provocando un aumento pronunciado de las temperaturas en las capas inferiores de la atmósfera como consecuencia del fortalecimiento radiativo (Figura 1.1-1). Este incremento de temperatura ha sido de aproximadamente $0,6^\circ\text{C}$ desde fines del S.XIX hasta 1990, estimándose un mayor calentamiento promedio entre 1990 y 2100, en el rango de $1,9^\circ\text{C}$ a $2,9^\circ\text{C}$ (Wigley 1999). Los aerosoles, el metano y otras sustancias también destruyen directa o indirectamente la capa de ozono atmosférica, aumentando la incidencia de la radiación solar ultravioleta y contrarrestando parcialmente el calentamiento (Wigley 1999).

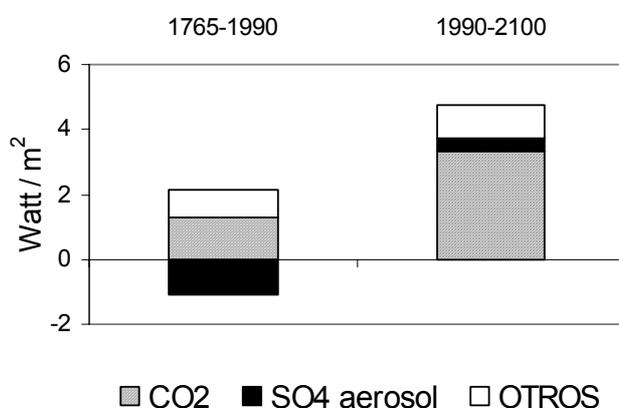


Figura 1.1-1. Fortalecimiento radiativo de GEI en los en los períodos 1765-1990 y 1990-2100 ($\text{Watt}\cdot\text{m}^{-2}$). Se indica el fortalecimiento radiativo causado por el CO_2 , los aerosoles de SO_4 (efectos directos e indirectos) y otros gases (CH_4 , N_2O , halocarbonos, O_3 , vapor de agua y aerosoles de combustión de biomasa). La estimación 1990-2100 corresponde al promedio de los cuatro escenarios elaborados para el Tercer Informe de Evaluación del Cambio Climático (en inglés TAR) del IPCC (elaborado en base a datos de Wigley, 1999)

El aumento en las emisiones habría sido potenciado por el desarrollo industrial moderno, particularmente por la utilización dominante de combustibles fósiles, pero también por el incremento de la deforestación, los incendios provocados, la agricultura y la ganadería. Aproximadamente el 80% de la eliminación de CO₂ a la atmósfera es atribuida a la combustión fósil, y el 20% restante a la deforestación y al cambio de uso del suelo (Santilli *et al.* 2003, Houghton 2003, Prentice *et al.* 2001, Cannadell *et al.* 2000), aunque estas proporciones varían significativamente entre países (Pires de Campos *et al.* 2005). Brown *et al.* (1989), señalan que la deforestación y otros cambios de uso del suelo, particularmente notables en las regiones tropicales, provocan emisiones de carbono del orden de 8-47% de las emisiones producidas por la combustión fósil. El mayor reservorio de carbono, sin embargo no es la atmósfera, sino la hidrósfera. En la Figura 1.1-2 se muestra la distribución aproximada entre los diferentes reservorios globales de carbono³ según algunas estimaciones (Waring y Running 1998, Lal y Kimble 1997, Schimel 1995, Perry 1994).

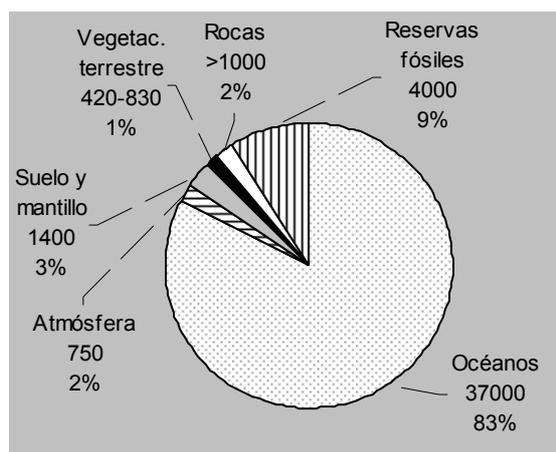


Figura 1.1-2. Distribución aproximada del carbono en distintos reservorios planetarios. Los valores se expresan en petagramos (Pg).

³ Los valores se expresan en petagramos (Pg). Un petagramo es igual a una gigatonelada (Gt), es decir: 1×10^{15} g. Otras unidades habitualmente utilizadas son los teragramos o megatoneladas (Tg o Mt), equivalentes a 1×10^{12} g, y los megagramos o toneladas (Mg o Tn), es decir: 1×10^6 g.

La contribución de los bosques a la mitigación del cambio climático es reconocida tanto por su aptitud para absorber carbono del aire a través del mecanismo de fotosíntesis como por la de mantener grandes cantidades de este elemento secuestradas en sus distintos componentes bióticos y abióticos (Gucinski *et al.* 1995, Perry 1994). No obstante, a nivel de ecosistema, el carbono secuestrado por los bosques es difícil de estimar en forma directa. La información disponible sobre la biomasa forestal suele ser insuficiente y focalizada en el rendimiento maderable, omitiéndose importantes compartimentos como los residuos (leñosos y hojarasca) y el suelo (incluyendo la biomasa subterránea), cuya dinámica de carbono es aún insuficientemente comprendida (Arneeth *et al.* 1998). En los ambientes tropicales húmedos, donde la productividad es muy alta, el carbono orgánico tiende a acumularse en la biomasa viva. Como las condiciones para la descomposición son favorables, la acumulación de detritos es relativamente menor a la de los ambientes templados, donde el carbono tiende a acumularse mayormente en el mantillo y en el suelo (Lugo y Morris 1982).

Los bosques maduros almacenan una gran cantidad de carbono, aunque su acumulación puede ser nula o negativa. En contrapartida, los bosques jóvenes tienen una alta tasa de captura de carbono (Hoover *et al.* 2000). La forestación con especies de rápido crecimiento tiene algunas ventajas respecto de otras soluciones propuestas para la mitigación del cambio climático (Ley y Sedjo 1995), que incluyen la reducción directa de las emisiones antropogénicas o el reemplazo de sus fuentes contaminantes, y su almacenaje a largo plazo en productos durables de la madera (Richter, *en*: Kohlmaier *et al.*, Eds., 1998). Algunas estimaciones de la última década, indican un área disponible para la forestación en gran escala de

aproximadamente 345 millones de ha, que podrían absorber hasta un cuarto de las emisiones producidas por combustibles fósiles (Schopfhauser, *en*: Kohlmaier *et al.*, Eds., 1998). Es decir que, claramente la forestación no alcanzaría para restablecer el balance de carbono atmosférico, aunque podría formar parte de una estrategia combinada para la solución del problema de cambio climático (Schopfhauser, *en*: Kohlmaier *et al.*, Eds., 1998, Cooper 1982). Sin embargo otros puntos de vista consideran poco realista plantar árboles para secuestrar carbono atmosférico, dado que las tierras forestales de buena aptitud, y por lo tanto alto potencial de fijación de CO₂, tienen un alto costo de oportunidad, en tanto que los sitios marginales no contribuirían significativamente (Waring y Running 1998). No obstante, los mismos autores destacan que con altos costos de hidrocarburos (es decir, como los que hay en la actualidad), el uso de energía a partir de madera puede ser una importante alternativa para la sustitución de combustibles fósiles. Solberg (1998) plantea que serán las decisiones económicas principalmente, las que definan el papel de los bosques en la mitigación del cambio climático, y por lo tanto, los proyectos deben ser evaluados y comparados con otras alternativas tanto desde el punto de vista ecológico como económico.

En ese marco, el objetivo general de este estudio es contribuir al conocimiento de aspectos básicos del secuestro de carbono en bosques nativos, plantaciones y pastizales naturales del ecotono entre la Región Andino Patagónica y la Estepa Patagónica, desde el sur de Neuquén hasta el noroeste de Chubut, y también discutir sus implicancias en el desarrollo de un mercado de certificados destinados a mitigar el Cambio Climático Global. En forma indirecta se espera contribuir con un

enfoque apropiado a la evaluación de otras funciones ecológicas de los sistemas forestales.

En relación con las respuestas de los bosques al cambio climático, se destaca por su mayor certeza el incremento de CO₂ atmosférico, aunque factores asociados como cambios de temperatura, precipitación u otros pueden guardar aún mayor significancia. La productividad y persistencia de los bosques puede verse alterada por cambios en la fijación y en la asignación de carbono, así también como en la economía del agua (Kozlowski *et al.* 1991). Prácticamente todos los procesos individuales de crecimiento y desarrollo pueden verse afectados, por lo que la predicción a nivel de ecosistema resulta aún más imprecisa.

Como las concentraciones elevadas de CO₂ tienen un efecto fertilizante sobre las plantas (Gucinski *et al.* 1995; Kozlowski *et al.* 1991), la fotosíntesis y productividad se verían incrementadas. Por ejemplo, en estudios de campo con pino ponderosa (*Pinus ponderosa* (Dougl.) Laws) en USA, se verificó un incremento sostenido en el crecimiento aéreo de plantas expuestas a una atmósfera enriquecida en CO₂ a niveles moderados (525 ppm) (Walker *et al.* 2000). Sin embargo, las alteraciones tisulares promovidas por la acumulación de carbohidratos, modificarían la composición química de la planta, con efectos impredecibles en aspectos relacionados con la resistencia de los tejidos a la herbivoría (Jones y Coleman 1991, Kozlowski *et al.* 1991), al parasitismo (Ayres 1991) o a la descomposición microbiana (Kozlowski *et al.* 1991). También la dilución del nitrógeno en el follaje por incremento del área foliar, o por su asignación al crecimiento de raíces, afectaría al crecimiento. Sus efectos dependerían de la dotación de N del suelo (Walker *et al.* 2000). Algunos

estudios en especies perennifolias del bosque templado subantártico o en las estepas del Distrito Occidental patagónico, apoyan la hipótesis de una respuesta plástica de derivación de excesos relativos de carbono hacia la formación de defensas químicas como respuesta a la herbivoría (Dimarco *et al.* 2004, Cavagnaro *et al.* 2003). También en plantaciones de pino ponderosa en el norte neuquino, se observó que aquellos plantines que habían sido abundantemente fertilizados con nitrógeno en vivero, eran más consumidos por liebre que los que tenían una mayor relación C/N foliar (M.Fariña, comunicación psnal.). Por otra parte, en coníferas, las situaciones de sequía temporaria inhiben la elongación aunque continúe la fotosíntesis (Waring 1991). De este modo las hojas producidas son menores pero con mayor concentración de carbohidratos y compuestos de defensa, a la vez que se incrementa desproporcionadamente la asignación de carbono hacia las raíces, cambiando la partición en la planta (Waring 1991). El ciclaje de nutrientes es otro aspecto que puede cambiar sustancialmente al modificarse el desarrollo y la capacidad de absorción de las raíces y la naturaleza del mantillo. Las plantas del tipo C₃, como las coníferas, reducirían su capacidad competitiva en comunidades con otras plantas C₄, aunque responderían positivamente al incremento de CO₂ atmosférico (Kozlowski *et al.* 1991). Estos y otros aspectos no permiten asegurar un balance positivo en términos de productividad y adaptación de estos bosques al cambio climático (Perry 1994).

1.2 PROCESOS GLOBALES PARA MITIGAR EL CAMBIO CLIMÁTICO

En la última década y como consecuencia de los consensos logrados en la llamada “Cumbre de la Tierra” (UNCED, Río de Janeiro, 1992) se iniciaron procesos destinados a evitar o disminuir las pérdidas de biodiversidad (Convención de Biodiversidad), a manejar sustentablemente los bosques (Procesos de Montreal, Helsinki y Tarapoto) y a mitigar el cambio climático (Convención Marco de Cambio Climático, o sus siglas, UNFCCC) a través de la reducción de emisiones de GEI o de la promoción de la fijación de CO₂ en la biota y en el suelo. Las sucesivas *Conferencias de las Partes* (CoP’s) de la UNFCCC establecieron pautas de reducción doméstica de emisiones de GEI, acordando a la vez distintos *mecanismos de flexibilización* para el cumplimiento de las metas de reducción nacionales, entre ellos, el llamado Mecanismo de Desarrollo Limpio (MDL), que incluye a la forestación o reforestación, y a los cambios de uso del suelo como alternativas de captura de carbono.

Un aspecto que suscita el interés del sector forestal es la creación de un mercado de certificados de reducción de emisiones o de fijación de CO₂ (CERs), aplicados a contabilizar la contribución de los países desarrollados firmantes del Anexo I del Protocolo de Kyoto (CoP V, UNFCCC 1997) a la mitigación del cambio climático (Canadell *et al.* 2000). La inclusión de la forestación como actividad aceptada por este proceso, presupone que la venta de un servicio ambiental compatible con otros usos del bosque (conservación, madera, ganadería, recreación, etc.), podría ser un mecanismo efectivo para el desarrollo, la conservación forestal y la mitigación del cambio climático, integrando este último servicio ambiental al flujo de fondos. Esta iniciativa podría ser de utilidad también para la evaluación de políticas ambientales o

la creación de otros mercados que incluyeran servicios de protección de la biodiversidad, del suelo o del agua, recursos crecientemente escasos y amenazados. Si bien la forestación constituye una contribución parcial y limitada, dado que sólo compensaría una parte del carbono antropogénico emitido, con una remoción temporal y no permanente, su costo de implementación es menor al de otras opciones (Ley y Sedjo 1995). Además permitiría absorber grandes volúmenes de CO₂ atmosférico a mediano plazo, de modo de "ganar tiempo" en la búsqueda de soluciones energéticas limpias alternativas. Además -y considerando las restricciones establecidas en materia de impactos sociales o ambientales-, la forestación podría contribuir simultáneamente al desarrollo social y económico de los países.

De acuerdo con lo establecido en el artículo 3° del Protocolo de Kyoto, los países firmantes del Anexo I se comprometen a hacer efectivizar medidas de reducción de emisiones domésticas al menos un 5% por debajo de los niveles de emisiones corrientes a 1990, durante el período 2008-2012 (*Primer Período de Compromiso de las Partes*) (UNFCCC 1997). En febrero de 2005, con la ratificación por los países responsables de más del 50% del monto comprometido de reducción de emisiones, el Protocolo de Kyoto entró en vigencia, habilitando transacciones de certificados de reducción de emisiones (o CERs). Con ello ha quedado instaurado el primer mercado formal de un servicio ambiental a nivel mundial. En lo que se refiere al sector forestal, para este primer período de compromiso, sólo se reconocen los beneficios de la forestación o reforestación. Por lo tanto, la prevención de la deforestación o la conservación de los bosques nativos han quedado excluidos, a pesar que se reconoce que estas acciones podrían contribuir a la mitigación del

cambio climático más efectivamente que la forestación, contribuyendo simultáneamente al desarrollo humano y al mantenimiento de otros servicios ambientales de los bosques (Chomitz 2002, Klooster y Masera 2000).

También hay otros procesos regionales asociados al mercado de carbono, aunque con diferentes modalidades. Así por ejemplo, en USA -país que no ratificó el Protocolo de Kyoto y por lo tanto, se autoexcluyó del compromiso voluntario de reducción de emisiones bajo este marco de concertación-, existe un mercado de créditos de carbono, con varios proyectos de reducción de emisiones. En ese país, varias compañías eléctricas han conformado un consorcio que apoya diversos proyectos de secuestro de carbono en distintos estados (Hoover et al. 2000) o en otros países, incluyendo la conservación de bosques nativos. Otro proceso de importancia en marcha, de origen europeo lo constituye el programa de Face Foundation, establecido en 1990 por las compañías eléctricas holandesas (Verweij, *en*: Kohlmaier *et al.*, Eds., 1998). Su finalidad es compensar emisiones ocasionadas por el uso de combustibles fósiles en las usinas, a través de proyectos forestales en el propio país o en otras regiones, basados en tres criterios: complementariedad (de recursos hacia propietarios del suelo y la forestación), costo-efectividad, y sustentabilidad (Verweij, *en*: Kohlmaier *et al.*, Eds., 1998).

La concertación global en el marco de la UNFCCC y la creación de un sistema de mercado para la aplicación de medidas de reducción de emisiones de GEI, intentan abarcar el conjunto de las soluciones de una manera ética, económica, social y ambientalmente deseables para el planeta. Esto se fundamenta en los principios y declaraciones firmadas entre los países intervinientes. Posiblemente, las CoP's

constituyan actualmente la convocatoria de mayor relevancia en el seno de la ONU, en número de países y participación activa. Entre las características salientes de los acuerdos alcanzados se destaca que (UNFCCC 1997):

- La convocatoria y negociaciones en las CoP's han sido realizadas de manera abierta a todos los países, amplia, transparente y democrática. En ellas, todos los países participantes ejercen sus derechos igualitariamente (un país o *parte* tiene un voto en las asambleas, art. 21 del Protocolo).
- Los acuerdos alcanzados sobre la reducción de emisiones han sido voluntarios por parte de los países tomadores de compromisos de reducción de emisiones.
- Las partes firmantes del Protocolo de Kyoto aceptan que existen una responsabilidad común en la contaminación atmosférica, pero diferenciada entre: (1) los países industrializados y de transición (firmantes del Anexo I), y (2) los países en vías de desarrollo (artículo 1º del Protocolo).
- Establece que los países Anexo I deberán cooperar con los países en desarrollo con información tecnológica y científica, y con medidas apropiadas para facilitar la comparación, transparencia y efectividad de políticas aplicadas a la mitigación del cambio climático (artículo 2.b y 10.c, d y e del Protocolo de Kyoto)
- El protocolo de Kyoto fue firmado por 189 países o *partes* (como la Unión Europea), de los cuales 169 lo han ratificado hasta el momento (incluyendo 31 partes Anexo I, que dan cuenta de más del 50% de la reducción de emisiones comprometidas, <http://www.unfccc.int/2860.php>).
- Exige a las naciones comprometidas, la reducción doméstica de sus emisiones (art. 3º del Protocolo de Kyoto), las que se suplementa con los llamados *Mecanismos de Flexibilización*, que de ningún modo habilitan a las partes comprometidas a reemplazar con ellos sus esfuerzos en la reducción doméstica

de emisiones (Acuerdos de Marrakech, <http://www.unfccc.int/2860.php>). De estos mecanismos, dos son factibles entre partes con compromisos: la *Implementación Conjunta* (de proyectos de reducción de emisiones) y el *Comercio de Emisiones* (intercambio de créditos excedentes de reducción verificada entre países).

- El tercer mecanismo, el *Mecanismo de Desarrollo Limpio* (art. 12 del Protocolo), habilita a la realización de proyectos de reducción de emisiones en países no Anexo I, que devengan certificados de reducción de emisiones, comercializables con las partes interesadas. Sin embargo, este mecanismo, constituye aproximadamente el 5% del compromiso total asumido, de modo que no evita sustancialmente la realización de esfuerzos domésticos por las naciones industrializadas.
- Este último mecanismo ha sido concebido como una herramienta de promoción del desarrollo sustentable en países no Anexo I, estableciendo que los proyectos MDL deben contar con la no objeción de las naciones hospedantes, respecto de impactos sociales o ambientales adversos, incluyendo la no contraposición con los objetivos de la Convención de Biodiversidad y otros tratados internacionales⁴.
- Establece que las actividades de reducción de emisiones para el primer período de compromiso, serán revisadas para mejorar su efectividad en períodos sucesivos. Actualmente ya se debaten nuevas propuestas para el período subsiguiente (2013-2017), entre las que se destacan distintos enfoques para incluir la conservación de los bosques y la reducción de la forestación (e.g., Schalamadinger *et al.* 2005).

⁴ El artículo 6.1(3) de la Resolución 825/04 de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación, que establece las normas de procedimiento para la aprobación de proyectos MDL en el país, determina que este organismo debe: "Verificar la consistencia del Proyecto con las prioridades nacionales de protección del ambiente y desarrollo sostenible, conforme a las leyes nacionales, provinciales, municipales y los tratados internacionales que resulten aplicables en la materia".

- Se apoya extensivamente en el conocimiento científico a través del Órgano Subsidiario de Consulta Técnica y Científica (siglas en inglés: SBSTA) de la UNFCCC (art. 15.1 del Protocolo), integrado por especialistas mundialmente reconocidos, y en los informes de evaluación del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), grupo de expertos coordinado por la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA).
- Se ha creado un Fondo de Adaptación al Cambio Climático de la ONU, destinado a asistir a naciones en riesgo, para realizar diversos proyectos de amortiguación de impactos del cambio climático.

1.3 LOS BOSQUES DE CONÍFERAS Y EL SECUESTRO DE CARBONO

Se estima que los bosques contienen tres cuartas partes del carbono total contenido en la vegetación terrestre (Perry 1994). Los bosques del mundo en su conjunto se consideran fuentes netas de carbono, debido a la deforestación, eliminando a la atmósfera unas 900 TgC.año⁻¹ (Gucinski *et al.* 1995), aunque a niveles regionales pueden ser importantes sumideros (Brown *et al.* 1989, Cooper 1982). Estas estimaciones y la presunción que el cambio climático promoverá la expansión de bosques a latitudes mayores, señalan la alta significancia de los ecosistemas forestales en el balance del carbono atmosférico.

Dentro de estos ecosistemas, los bosques de coníferas constituyen importantes reservorios de carbono (Gucinski *et al.* 1995). Estos bosques cubren aproximadamente un 24% de la superficie terrestre del planeta ($3,6 \times 10^9$ ha), y se estima que en los Estados Unidos, Canadá y la ex Unión Soviética contienen el 27% del *pool* de carbono de esos países, que representa un sumidero neto de 550 Tg.año⁻¹, equivalente a un 10% de las emisiones actuales de combustible fósil (Gucinski *et al.* 1995). Por lo tanto, la reducción de su superficie debido al cambio climático podría liberar enormes cantidades de CO₂ a la atmósfera.

Para estimar los efectos del cambio climático sobre la vegetación y su distribución regional, se ha recurrido a diversos modelos predictivos basados en conocimientos sobre niveles de organización menores. Basado en simulaciones de cambios de la vegetación en respuesta al cambio climático, el modelo MAPSS (Mapped Atmosphere Plant Soil System), propone distintos escenarios de distribución de varios tipos de bosques de coníferas del Hemisferio Norte (Gucinski *et al.* 1995).

Estos escenarios tienen en común un pronóstico de avance del área de bosques xerofíticos (de sabana) y reducción simultánea de los bosques mixtos de coníferas y latifoliadas y, -en el caso más extremo-, también de reducción de bosques templados puros (Gucinski *et al.* 1995) (Gucinski *et al.* 1995). La tendencia a la aridización por aumento de temperatura (reemplazo de pastizales por desiertos, y de bosques por pastizales) también ha sido evaluada por Lauenroth *et al.* (2004) para las regiones templadas de América del Norte y del Sur, quienes destacaron la alta vulnerabilidad de las áreas de contacto con zonas áridas (como las de este estudio) al cambio climático, basados en el análisis de modelos de circulación general.

Sin embargo los resultados de estos modelos, en el mejor de los casos expresan escenarios plausibles pero con alta incertidumbre (Perry 1994), debido -entre otros motivos-, a que: (1) los supuestos sobre cambios en la precipitación son muy inciertos (Steffen y Tyson, Eds. 2001, Perry 1994), (2) no se consideran los efectos del aumento de disturbios sobre los ecosistemas, ocasionados por el propio cambio climático (Perry 1994), (3) no consideran los potenciales cambios en la asignación de biomasa a nivel específico, en respuesta a cambios de humedad y temperatura (Callaway *et al.* 1994), y (4) tampoco se consideran los impactos del avance de la deforestación por actividades humanas sobre los bosques (Perry 1994).

2 - FIJACION Y BALANCE DE CARBONO EN ECOSISTEMAS BOSCOSOS Y HERBÁCEOS

2.1 ASIMILACIÓN, ASIGNACIÓN Y PARTICIÓN DE CARBONO EN LA PLANTA

Asimilación y asignación de fotosintatos

Los procesos involucrados en la fijación y acumulación de carbono en los diferentes órganos de las plantas pueden sintetizarse en (Medina 1977): *asimilación* (fijación fotosintética)→ *asignación o distribución de fotosintatos*→ *acumulación* (crecimiento) [...→ *reutilización*]→ *mortalidad de tejidos y pasaje al suelo*. En este camino se producen pérdidas por respiración de fotosíntesis, de crecimiento y de mantenimiento (Waring y Running 1998, Kozlowski *et al.* 1991, Medina 1977). La asimilación de CO₂ es controlada por la luz, la concentración atmosférica de este gas, la temperatura, la humedad relativa y el movimiento del aire. Junto con el estado hídrico de las hojas, estos factores regulan la apertura estomática y por lo tanto, la tasa de fotosíntesis (Medina 1977, Meyer *et al.* 1976). Los azúcares sintetizados en las hojas son: (1) utilizados por las hojas para su propio gasto metabólico, (2) acopiados temporariamente en los tejidos foliares, o (3) movilizados a través del floema hacia diferentes destinos de almacenamiento en raíces, llenado de frutos, y síntesis de nuevos tejidos (Figura 2.1-1) (Medina 1977, Kozlowski *et al.* 1991, Geiger y Servaites 1991, Meyer *et al.* 1976).

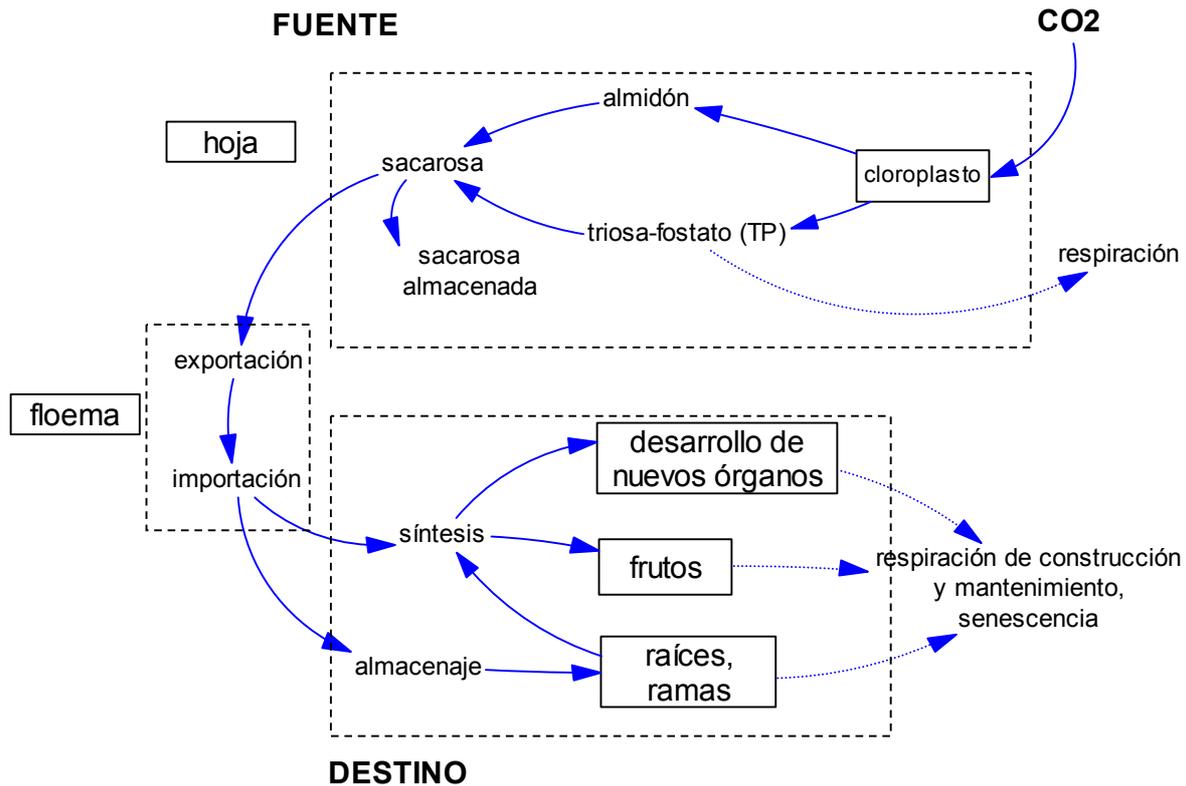


Figura 2.1-1. Fijación y asignación de carbono a nivel de planta. Síntesis de carbono en hojas (fuente) y asignación al desarrollo o almacenaje de diferentes órganos (destino), mediado por transporte floemático. Las flechas llenas indican las vías de asignación de carbono en la planta, las flechas interrumpidas, las salidas (adaptado de Geiger y Servaites 1991).

Los órganos de la planta polarizan la demanda de nutrientes a través de procesos metabólicos relacionados con la especie y su ontogenia. En áreas templadas o boreales, en la estación temprana de crecimiento (primavera-verano), los productos de la fotosíntesis son reutilizados en la formación de nuevos tejidos vegetales, y la acumulación de almidón y otros polisacáridos ocurre más tardíamente y en órganos de reserva, como raíces, base de tallos y ramas. Estos productos, que serán movilizados en la promoción del crecimiento de la estación subsecuente, constituyen una reserva indispensable para la brotación y desarrollo de nuevos tejidos en las plantas sujetas a estrés periódico de crecimiento por estacionalidad climática (Kozlowski *et al.* 1991).

Distintos factores ambientales condicionan la distribución desde fuentes a destinos, además de aspectos intrínsecos de la planta, como la regulación hormonal, la morfología, la distancia relativa y la conectividad entre los órganos involucrados (Geiger y Servaites 1991, Medina 1977).

Asimismo, fuentes y destinos se retroalimentan a través de señales recíprocas. Por ejemplo, bajo condiciones de sequía, las hojas reaccionan con cierre estomático y detención de fotosíntesis, lo que desencadena una serie de procesos que promueven el crecimiento radical (Waring 1991), lo cual incrementa el abastecimiento de agua a la hoja por vía xilemática, restableciendo la fotosíntesis (Geiger y Servaites 1991). Desde este punto de vista, el crecimiento de las plantas es consecuencia de desbalances internos que promueven respuestas diferenciales a partir de señales emitidas desde los destinos, las fuentes, o ambos simultáneamente (Sharpe y Rykiel 1991).

Por otro lado, el transporte de nutrientes se encuentra mediado por el movimiento de agua en la planta, que es regulado por la demanda atmosférica, por el estado hídrico y gaseoso del suelo, y la temperatura (Medina 1977). Por ello, la asignación de carbono a la biomasa subterránea es un factor determinante de la capacidad de utilización de los nutrientes, debido a que estos recursos ingresan a la planta por las raíces (Aerts y Chapin 2000), que son utilizados *in situ* o transportados a las partes aéreas. El crecimiento radical está determinado por la especie, su ontogenia y su fenología (Kozlowski *et al.* 1991), aunque se encuentra controlado por condiciones ambientales, como el estrés hídrico, el contenido de nitrógeno del suelo, la temperatura, el viento, la herbivoría, etc. Un alto contenido de nitratos en el suelo

deprime el crecimiento de raíces y su reciclaje (Cannell 1989), ya que los carbohidratos disponibles en la planta son asignados prioritariamente al desarrollo de nuevos tejidos foliares (Dickson e Isebrands 1991). Esta interacción fuente-destino entre hojas y raíces causa la periodicidad de crecimiento aéreo-subterráneo observado en muchas plantas (Dickson e Isebrands 1991). Anualmente, el inicio del crecimiento radical antecede al crecimiento aéreo, siguiendo la secuencia: *crecimiento radicular* → *brotación* → *crecimiento de ramas* → *elongación de acículas* (Gulke *et al.* 1998).

Acumulación y partición

La *acumulación* de materia seca es el balance entre los carbohidratos formados y su pérdida por respiración (Waring y Running 1998, Kozlowski *et al.* 1991), que es significativa. Por ejemplo, Kozlowski *et al.* (1991), reportan una pérdida estimada de carbohidratos por respiración del 58% de la PPB en un bosque de *Pinus taeda* de 14 años de edad, balance que se volvería más desfavorable con el aumento de la edad. Como también las plantas pierden biomasa por caída de órganos individuales y por consumo de herbívoros o parásitos, la acumulación de biomasa en una planta es muy inferior a su potencial (Kozlowski *et al.* 1991).

La partición de biomasa en las diferentes partes de un vegetal juega un papel fundamental en el crecimiento de las plantas y en su capacidad de reacción a factores de estrés, incluyendo el mantenimiento de la comunicación floemática y la canalización de compuestos carbonados involucrados en estas respuestas. Para ello, las plantas deben sostener un almacenaje suficiente en diferentes órganos, de modo de afrontar demandas diarias o de largo plazo para su crecimiento y

metabolismo (Geiger y Servaites 1991). La partición del carbono entre los diferentes órganos está determinada genéticamente, aunque varía también ante situaciones cambiantes de estrés ambiental (Geiger y Servaites 1991, Mooney y Winner 1991). La competencia individual por luz modifica la partición de biomasa aérea y subterránea en pino ponderosa (Grulke *et al.* 1998) y en renuevos de ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (Don) Flor. *et* Boutleje) (Letourneau *et al.* 2004). Los cambios en las condiciones del sitio producen cambios en la distribución de biomasa. Por ejemplo, un alto contenido de nitrógeno favorecería el crecimiento foliar, en detrimento de la biomasa subterránea, pero combinada con riego también se incrementarían las raíces finas. En cambio, con riego únicamente, el crecimiento de las partes leñosas sería proporcionalmente mayor al crecimiento foliar (Waring y Running 1998). En experimentos controlados con plantines de pino oregón el aumento de temperatura produjo un incremento en la aparición de nuevas raíces, sin embargo ante condiciones de estrés hídrico pronunciado, el efecto de la temperatura fue contrario (Tinus 1996). El déficit de nutrientes como el N, P y S promovería el crecimiento de raíces finas a expensas del tallo, aunque la falta de K, Mg o Mn tendría efecto contrario. La partición de biomasa entre raíces, tallos y hojas, es teóricamente considerada como un proceso de optimización del crecimiento (Mooney y Winner 1991), y es afectada por cambios estacionales y el estado de desarrollo del vegetal. Sin embargo, bajo un clima determinado, las distintas partes de las plantas crecen de manera consistente.

Por otro lado, el conocimiento de la distribución espacial y el crecimiento de las raíces es un elemento de importancia para la evaluación de la ocupación del sitio (Richardson 2000) y de la capacidad de absorción de nutrientes (Aerts y Chapin

2000). Steele *et al.* (1997), reportaron la distribución en profundidad de raíces finas para bosques de *Pinus banksiana*, *Populus tremuloides* y *Picea mariana*. También estudiaron la relación entre la $PPN_{raíces\ finas}$ y la de los detritos (broza o mantillo), sugiriendo que este cociente es diferente entre bosques boreales de coníferas (mayor) y deciduos (menor).

Schulze *et al.* (1996), estudiaron la distribución de biomasa aérea y subterránea de bosques y matorrales de *Nothofagus spp* (de lenga y ñire, respectivamente), pastizales gramínicos y vegetación de desierto, en el oeste de la Patagonia. Estos autores desarrollaron ecuaciones alométricas para el componente forestal [biomasa total árbol, en $kg = -18,48 + 0,72 \times \text{área basal (cm}^2\text{)}$], y para arbustos de neneo creciendo en estepas de: (1) *Festuca pallescens* [peso seco arbusto, en $kg = -0,169 + 0,273 \times 10^{-3} \times \text{área de canopeo (cm}^2\text{)}$] ó, (2) de *Stipa speciosa* [peso seco del arbusto, en $kg = -0,0448 + 0,156 \times 10^{-3} \times \text{área de canopeo (cm}^2\text{)}$]. Además, probaron la hipótesis de un desarrollo de raíces creciente en profundidad en un gradiente pluviométrico decreciente entre los 750 y 125 mm anuales. Sin embargo, no encontraron tal correspondencia. Citan que en general, los bosques templados sólo tienen un 35% de la biomasa subterránea por debajo de los 30 cm de profundidad, en tanto que los pastizales tendrían solamente un 17% bajo el mismo umbral.

2.2 COMPARTIMENTOS DE CARBONO EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA

Carbono orgánico del suelo

El suelo en sentido amplio, contiene cantidades significantes de carbono en el mantillo, en sus fracciones orgánica y mineral, y en la micro y mesofauna (Lal y Kimble 1997, Johnson 1992). Para la consideración de sumideros de carbono interesa la labilidad del carbono en función de su reciclaje natural o del producido por manejo. Desde este punto de vista puede clasificarse al carbono del suelo como *carbono lábil de recambio rápido* (0,2-1,4 años de permanencia), incluido en la biomasa microbiana, carbohidratos solubles y enzimas exocelulares; *carbono lábil de recambio lento* (8-50 años), conformando partículas de materia orgánica de 50 μm a 2 mm y *carbono estable* (400-2.200 años) formado por ácidos húmicos o fúlvicos, y complejos organo-minerales (Batjes 1999, Lal y Kimble 1997, Cooper 1982). Sin embargo, todas las fracciones mencionadas están sujetas a pérdidas por erosión, lixiviación o calcinación (Bruce *et al.* 1999, Lal y Kimble 1997, Batjes 1999, Waring y Running 1998).

En la vegetación viva tales períodos de recambio pueden asociarse a hojas, ramitas, flores, frutos o raíces finas (recambio rápido) o a los tejidos leñosos (reciclaje lento), incluyendo raíces. Las partes aéreas herbáceas y leñosas finas de las plantas caen a la superficie del suelo en su senescencia, por lo que el espesor del mantillo y su densidad en un sistema estable indicaría qué cantidad de carbono de estos tejidos se descompone, contribuyendo a su almacenaje en el suelo, o eliminándose a la atmósfera.

Carbono en plantas

El carbono almacenado en plantas leñosas se encuentra en los siguientes compartimentos: hojas, ramas, tallo, flores y frutos, y raíces (Lust et al. 1995, Kuusela y Nyysönen 1981). El carbono en biomasa aérea se encuentra principalmente en sus partes vegetativas (tallos y hojas), y en menor cantidad en las estructuras reproductivas (flores y frutos) (Lust et al. 1995). En las plantas herbáceas gramíneas, las sustancias carbonadas de reserva se alojan en los meristemas axilares (o yemas) de la corona, en la base de los macollos y en las raíces (Busso et al. 1989), en tanto que en las leñosas, las ramas, el tronco y también las raíces son los reservorios principales de carbono (Kozlowski et al. 1991). Además, otros organismos vivos o sus detritos también pueden estar asociados o incluidos en ellas, como por ejemplo, numerosos insectos y parásitos, ecto y endomicorrizas, o nódulos bacterianos (Perry 1994). La asignación de fotosintatos a la formación de las estructuras celulares de conducción y sostén, y la mortalidad y oclusión progresiva de estas estructuras, va modificando el balance en favor de las partes leñosas, particularmente del fuste, que actúa como un acumulador permanente de biomasa, hasta su decaimiento. Lo mismo ocurre con el raigón. El follaje y las raíces finas, una vez alcanzado el umbral de equilibrio, tienden a mantener constante su biomasa a través de la pérdida y renovación periódica (Cooper 1982). Otro tanto, aunque en plazos mayores, ocurre con ramas y raíces gruesas. Las funciones y características generales de estos compartimentos de biomasa y carbono son las siguientes:

Biomasa aérea

a- Hojas: Fijan carbono por fotosíntesis y lo pierden por respiración. Para su metabolismo utilizan parte del C soluble, que es también transferido a otros órganos de la planta (ramas, tallo y raíces; flores y frutos) contribuyendo al crecimiento y formación de nuevas estructuras, o a la acumulación de reservas. El C estructural es incorporado al suelo con la caída de hojas. *Fijan y eliminan C; almacenan temporalmente y lo transfieren a otros compartimentos.*

b- Ramas: Mantienen una importante cantidad de C estructural bajo la forma de celulosa y otros polímeros, y también almacenan C soluble que es reutilizado luego de la estación de reposo para rebrote, crecimiento de raíces o desarrollo de nuevos tejidos. Algunas ramas muy finas, como las ramillas del ciprés que sostienen las hojas escamiformes, o los braquiblastos de los pinos, siguen una dinámica similar a la de las hojas, por lo que suelen considerarse conjuntamente con ellas. La caída de ramas, por abscisión o por remoción mecánica natural o provocada, transfiere C al suelo. Por lo tanto, *almacenan C y periódicamente, lo transfieren al suelo.*

c- Tallo: Al igual que las ramas, utiliza C en su propio desarrollo y formando reservas permanentes o temporarias, y su función principal es el sostén de la copa y la vinculación entre fuentes y destinos de fotosintatos y recursos del suelo. La eliminación de corteza o la muerte de la planta incorporan el carbono a los detritos del suelo. Además puede haber transferencias al suelo mineral a través de exudaciones de raíces. *Almacenan C y periódicamente, lo transfieren al suelo.*

d- Flores y frutos. Obtienen el C transferido desde las hojas o ramas y lo pierden por respiración. Con la caída de flores, frutos o semillas, el C almacenado es transferido al mantillo del suelo. *Eliminan C o almacenan temporalmente y lo transfieren a otros compartimentos.* Suelen ser un componente relativamente menor en la biomasa de especies forestales, y por lo tanto para su estimación suelen asimilarse a los componentes de hojas o ramas, según su textura (Cooper 1982).

Biomasa subterránea

La biomasa subterránea está constituida por el conjunto de las raíces de un individuo. Sin embargo hay casos donde no es posible distinguir entre la raíz de un individuo y la de otros de la misma especie; por ejemplo, en el caso de las coníferas, la anastomosis de raíces resulta un fenómeno frecuente (Oren y Sheriff 1995). También las asociaciones simbióticas con otros organismos, como las ectomicorrizas, típicas en bosques de coníferas, o los nódulos bacterianos (Medina 1977, Perry 1994), complican aún más esta distinción. Por otra parte, los métodos de muestreo convencionales en observaciones a campo –dependiendo de la proximidad de las plantas- , confunden a veces el material subterráneo proveniente de individuos contiguos; tal es el caso de las raíces finas, usualmente recolectadas mediante la extracción de cilindros de suelo (Steele *et al.* 1997), o de excavaciones dimensionadas (Schulze *et al.* 1996).

Las funciones principales de las raíces son el sostén mecánico, la absorción de agua y nutrientes del suelo, y la acumulación de reservas (Kozlowski *et al.* 1991, Hayward 1953). Sus fracciones más finas se renuevan rápidamente, favoreciendo la transferencia de compuestos carbonados al suelo. Por lo tanto *son almacenadores*

de C, con transferencias al suelo y también hacia la biomasa aérea a través de la movilización de reservas. En plantas leñosas, por su tamaño y funciones, la biomasa subterránea puede subdividirse en el raigón⁵, las raíces laterales gruesas o finas, y las raíces muy finas (de diámetro menor a 2 mm) de cada individuo. También, de acuerdo con su grosor y en función de los métodos de muestreo generalmente aplicados, las raíces de las leñosas pueden separarse en gruesas y finas, bajo distintas sub-categorías diamétricas (e.g., Jackson y Chittenden 1981, Gayoso *et al.* 2002). Además, en el caso de árboles y varios arbustos, como los aquí estudiados, el raigón suele tener la mayor importancia en términos másicos. Las raíces finas son de corta duración y por lo tanto su reciclado es rápido y fluctuante (Kozlowski *et al.* 1991), aunque un estudio reciente demostró una supervivencia media de 3,3 años, mucho mayor que estimaciones previas (Tierney y Fahey 2001, en: Johnston *et al.* 2004). Además se descomponen más lentamente que otros tejidos de tamaño similar, debido a la alta concentración de suberina (Steele *et al.* 1997). Aunque algunos autores señalan que no aportarían una proporción importante de la biomasa arbórea (Cooper 1982), las raíces finas serían un componente significativo del ciclo del carbono (Gulke N.E., comunicación personal, Jackson *et al.* 1996). A la vez su variabilidad espacial es muy alta, lo mismo que su respuesta a la temperatura del suelo (Steele *et al.* 1997), por lo que resulta difícil una estimación rigurosa de su biomasa con niveles de muestreo usuales.

En general los estudios sobre raíces se basan en la extracción de cilindros de suelo distribuidos en el sitio para raíces finas, o en la excavación parcial, completa o

⁵ El raigón es el eje subterráneo principal engrosado, que corresponde a la raíz primaria original, a partir del cual se han diferenciado las raíces laterales leñosas. Externamente no se diferencia del tallo, más que por la presencia de nudos e internodios en este último (Hayward 1953), por lo que en este estudio se asume como la totalidad de la cepa por debajo de la superficie del suelo.

alometría para la cuantificación de raíces gruesas (Cairns *et al.* 1997). Las dificultades operativas, la arquitectura compleja y la laboriosidad que demandan estas evaluaciones, ha rezagado el estudio de este componente vegetal respecto de los órganos aéreos (Jackson *et al.* 1996). Por ejemplo, Steele *et al.* (1997) estudiaron la dinámica de raíces finas de sistemas boscosos de pino banksiana (*Pinus banksiana*), álamo temblón (*Populus tremuloides*) y abeto negro (*Picea mariana*) en dos lugares del bosque boreal canadiense. Para evaluar la biomasa radical utilizaron cilindros de 4,5 cm de diámetro x 30 cm de altura, en minirizotrones, y con un sistema de video-cámara midieron su alargamiento. Otro método no destructivo utilizado para evaluar raíces ha sido el geo-radar, que permite obtener imágenes de sistemas radicales gruesos, aunque la información que provee resulta por el momento limitada (Johnson *et al.* 2004)

2.3 PRODUCTIVIDAD Y SITIO FORESTAL

El crecimiento de una masa forestal es función de la productividad del sitio, atributo que expresa el potencial de recursos edafo-climáticos y biológicos que actúan promoviendo -o limitando- dicho crecimiento. En la ciencia forestal suele referirse a la calidad de sitio como un indicador de la productividad primaria neta de un bosque, y al sitio, como la combinación de factores climáticos, edáficos, topográficos y biológicos, -incluyendo aspectos del microsítio y competencia intra e interespecífica-, determinan esta productividad (Vanclay 1992, Thrower 1989, Hägglund 1981).

A nivel regional, la productividad forestal se encuentra estrechamente relacionada con los tipos edáficos (Colmet-Daage *et al.* 1998, Irisarri *et al.* 1997a, 1997b, Girardin y Broquen 1995). Los sitios que sostienen o han sostenido cipresales, hacia la estepa patagónica, conforman el límite oriental de distribución de alofanos, y en general son aptos para la implantación de coníferas (Colmet-Daage *et al.* 1998). Como el gradiente de acumulación de alofanos en la transición bosque-estepa, es coincidente con la distribución pluviométrica, es posible vincular la productividad forestal de los suelos con el cambio geográfico longitudinal, que explica la disminución de alofanos y de la precipitación anual. También se produce un descenso topográfico que modera la ocurrencia de bajas temperaturas particularmente durante los períodos favorables de crecimiento vegetal. Sin embargo, a nivel local, muchas veces no es posible verificar este cambio unidireccional de los suelos y el clima, debido a: (1) la presencia de bolsones de acumulación de frío, o (2) de laderas de deflación con redepósito de cenizas a barlovento, y (3) a variaciones de exposición del terreno que determinan condiciones de mayor aridez (laderas de exposición norte) o de humedad (laderas de exposición

sur) que tienden a distorsionar el patrón general (Andenmatten *et al.* 2002). La conjugación de variables de almacenamiento hídrico y fertilidad de los suelos con la recarga hídrica anual (a nivel local, dependiente de la precipitación) y la demanda atmosférica o evapotranspiración (dependiente de la exposición, la altura, y el relieve, determinarían el crecimiento y productividad de los sitios forestales. Algunos trabajos enfocados en ese sentido (Irisarri *et al.* 1997b, Broquen *et al.* 1998, Andenmatten *et al.* 2002) asignan al nivel de humedad del suelo hacia fines del verano, un valor predictivo importante de la productividad forestal.

Una expresión común de la calidad de sitio para una especie determinada, es el *índice de sitio* (IS) a una edad de referencia la altura que alcanzan los árboles dominantes de la forestación a una edad de referencia, asumiéndose que esta variable es denso-independiente en un amplio rango de densidades (Vanclay 1992, Hägglund 1981), y por lo tanto, expresiva del potencial forestal del sitio⁶.

Andenmatten y Letourneau (1997), ajustaron una función de IS para pino ponderosa en la región, a una edad de referencia de 20 años a la altura del pecho (*eap*). Esta función permite elaborar curvas de crecimiento de altura dominante del rodal en función de la edad. No obstante, en plantaciones sometidas a disturbios que afecten diferencialmente a los árboles dominantes (por ejemplo un raleo selectivo, un huracán, etc.), el IS originalmente estimado para esa plantación no resulta un indicador apropiado de la productividad actual. En estos casos es necesaria una nueva estimación (post-disturbio), basada en la altura de las plantas más gruesas remanentes. También con pinos de áreas templadas, que desarrollan un verticilo

anual, se utilizan otros indicadores de productividad forestal, como el *índice de entrenudos* (IE)⁷ (Gonda 1998, Thrower 1989, Hägglund 1981). Sin embargo, con estos métodos directos, no es posible evaluar sitios sin plantaciones (Andenmatten *et al.* 2002). Otro indicador de calidad de sitio para una especie forestal, es la tasa media estimada de crecimiento de los fustes, expresada en $\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ (Irisarri *et al.* 1997b, Enricci 1994, Hägglund 1981), o el área basal de un bosque relativa al área basal máxima o *área basal natural* del sitio (Vanclay 1992). Para la región, se han correlacionado variables edáficas y topográficas con el crecimiento observado en plantaciones de referencia, estableciendo una ponderación relativa que permite clasificar los suelos como *muy aptos*, *aptos*, *moderadamente aptos* y *marginalmente aptos* para la forestación con coníferas en seco, en plantaciones densas (Irisarri y Medía 1991, Irisarri *et al.* 1997a, 1997b). Por ejemplo, algunas de las variables utilizadas en dicha clasificación son: *profundidad efectiva* del suelo, *pendiente* del terreno, *clase de drenaje*, etc.

Recientemente, Andenmatten *et al.* (2002), en línea con estos trabajos previos, ajustaron un sistema de puntaje basado en funciones que correlacionan IS con indicadores edáficos y topográficos, que con cierto rango de tolerancia, permiten estimar el IS en áreas sin forestaciones. Por otro lado, la *densidad relativa*⁸ (DR, Curtis 1982), el *índice de densidad del rodal* (IDR, Reineke 1933), el *área basal* (AB) o el *número de plantas por hectárea* (N) son índices ampliamente utilizados en la

⁶ El índice de sitio se define como la altura promedio de los cien árboles más gruesos por hectárea (Assman 1970) a una edad de referencia a la altura del pecho (eap), que se indica junto a la sigla (IS); usualmente de 25, 50 o 100 años.

⁷ El índice de entrenudos es la longitud en metros de cinco entrenudos completos de los árboles dominantes del rodal por encima de 1,30 m del suelo, en número representativo de su proporción.

⁸ La *densidad relativa de Curtis* (DR) es un concepto análogo al *índice de densidad del rodal* o IDR (Reineke 1933) -del cual deriva-, que relaciona el área basal observada de un rodal con el área basal normal o máxima esperada de una especie (Daniel *et al.* 1979). Se expresa en forma adimensional,

ciencia forestal para la caracterización de la estructura del rodal y la aplicación de decisiones de manejo de la densidad. Biológicamente, estos índices permiten caracterizar la capacidad de carga del ambiente para las poblaciones arbóreas que soportan, así también como los niveles de máxima productividad, inicio de mortalidad y carga máxima. Se basan en la premisa aceptada que un rodal coetáneo en sitios no perturbados tiende a alcanzar una máxima ocupación espacial (*área basal natural*), que sería la expresión de la productividad del sitio (Vanclay 1994). Algunos modelos desarrollados para plantaciones en el noroeste patagónico, permiten proyectar o predecir variables de estructura y producción (Andenmatten 1999, Gonda 1998) a partir de algunas de las variables mencionadas.

calculándose como $DR=AB.dap_c^{-1/2}$ (AB: área basal, m^2 ; dap_c : dap medio cuadrático, cm). Para pino ponderosa en la región, el máximo observado ha sido $DR=20$ (E. Andenmatten, com. pers.).

2.4 EL BALANCE DE CARBONO Y SU DINÁMICA EN SISTEMAS FORESTALES

El balance del carbono fijado en un sistema forestal en un momento dado, está conformado por:

$$\text{Stock C } (C_t) = \text{Stock inicial } (C_{t_0}) + \text{fijación } (C/dt) - \text{escape}(C/dt) \quad (1)$$

Desde este punto de vista, puede considerarse al bosque como un sistema abierto cuyo contenido de carbono al tiempo i (C_t), es un balance entre el estado previo ($t_i - t_{i-1}$) y las entradas y salidas ocurridas subsecuentemente; esquemáticamente sería:

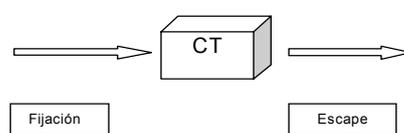


Figura 2.4-1. Estado de acumulación de carbono en el bosque (caja CT) y flujos de entrada y salida (flechas).

La estimación de la cantidad de carbono del sistema forestal en un momento dado requiere de la aplicación de diferentes métodos de muestreo. Para el presente estudio se considera que el carbono total almacenado por el sistema suelo-planta es [ecuación (1)]:

$$C_t = \sum_{i=a}^c \sum_{j=d}^n C_{ij} \quad (1)$$

donde,

C_t = carbono total

C_{ij} = carbono de la fracción j en el compartimento i , para $i = a$: biomasa, b : detritos y c : suelo; y para $j = d$: follaje, e : ramas, f : fuste, g : raigón y h : raíces laterales (cuando $i = biomasa$); i : material leñoso grueso (despuntos y tocones), j : ramas y conos, k :

hojarasca (cuando i =detritos); l : suelo orgánico (Horizonte 0), m : suelo mineral de 0 a 25 cm de profundidad, n : suelo mineral de 25-50 cm (cuando i = suelo).

En la Figura 2.4-2 se propone un modelo conceptual del almacenamiento de carbono en un bosque. El acrecentamiento de existencias es función del crecimiento vegetal, que a la vez depende de los factores determinantes de la productividad del sitio (clima, fertilidad) que son modificados por diferentes disturbios, como incendios, avalanchas etc. Las salidas del carbono del sistema ocurren por respiración auto y heterotrófica, herbivoría, incendios, erosión de suelos. El manejo forestal practicado, que incluye la regulación de la densidad de individuos, de la cubierta fotosintetizante, la remoción de suelos y el tratamiento de residuos de cosecha, afecta la captura de carbono y también su salida del sistema.

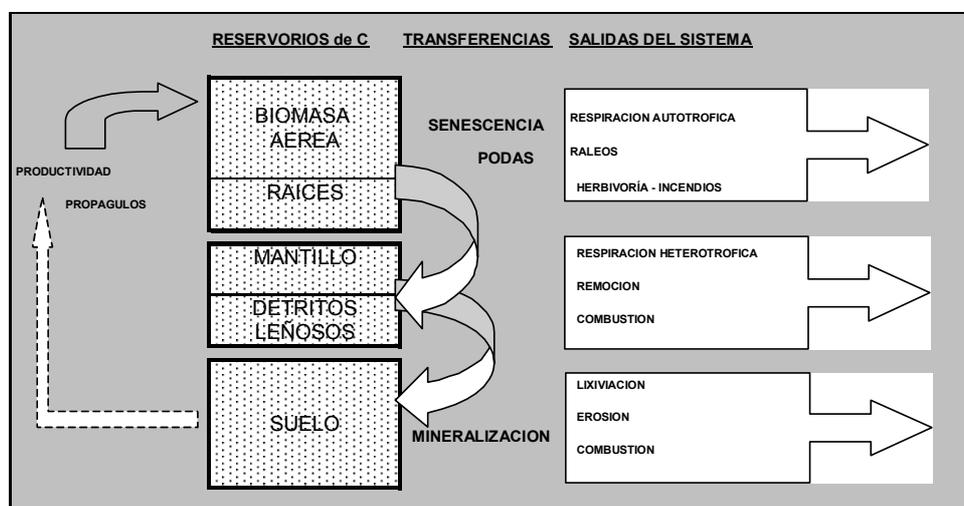


Figura 2.4-2. Modelo conceptual de los reservorios de carbono, las transferencias internas y las salidas en un sistema forestal. Se indican los principales procesos involucrados en el balance de carbono.

Para estudiar el balance de carbono en forestaciones es necesario conocer la acumulación de carbono del ecosistema de reemplazo bajo el uso habitual, o *línea*

base. La línea base de carbono de los sistemas forestales que se inician sobre sitios actualmente libres de bosques, es el *uso más probable de la tierra*, que en la región corresponde al pastizal natural bajo uso ganadero extensivo, el cual es reemplazado naturalmente al recolonizar el ciprés en sucesiones secundarias o por inducción antrópica al implantarse bosques. La mayoría de las plantaciones establecidas desde los años '80 reemplaza pastizales naturales. El carbono secuestrado en forma permanente por los pastizales, que es un balance entre el crecimiento vegetal acumulado y el consumo animal, constituye el umbral sobre el que los bosques adicionan carbono. En la Patagonia, considerando que la mayor parte de las estepas del ecotono se encuentran afectadas por pastoreo de ganado doméstico y silvestre, y que su crecimiento está fuertemente condicionado por este factor, la forestación con pinos adicionaría una cantidad importante de biomasa durante su desarrollo, dependiendo su propiedad de sumidero de: (a) la ocurrencia de disturbios naturales o antrópicos, tales como el manejo de raleos, la herbivoría, el ataque de plagas, los incendios, etc. (b) el crecimiento biológico de la especie y (c) la productividad de los sitios ocupados.

El conocimiento de esta dinámica del secuestro de carbono reviste importancia ecológica y económica. Por una parte, la comprensión de los procesos involucrados en la captación, fijación y eliminación de carbono atmosférico por los ecosistemas terrestres, permite identificar variables clave para el manejo forestal aplicado a la mitigación del cambio climático (Canadell *et al.* 2000). Por otra parte, los esfuerzos desplegados actualmente para el reconocimiento de este servicio ambiental por parte de los mercados (Protocolo de Kyoto y otros procesos nacionales e internacionales) requieren necesariamente la cuantificación de los niveles y tasas de

secuestro de carbono para la estimación de su adicionalidad ecológica, es decir, su contribución efectiva a la mitigación del cambio climático, y también económica. Dado la cantidad de variables que intervienen en la estimación del secuestro de carbono, las diferentes dimensiones del análisis (biológicas, económicas, sociales) y los cambios que ocurren con el tiempo, resulta necesario construir modelos, que permitan conceptualizar y comprender las relaciones de este sistema complejo (Lugo y Morris 1982). Un modelo dinámico del secuestro de carbono a nivel de rodal respondería distintas preguntas de aplicación directa a la toma de decisiones para la conservación y manejo silvícola, atendiendo a las dimensiones indicadas.

Un modelo dinámico es una representación del comportamiento de un sistema donde la variable *tiempo* se encuentra explícita (France y Thornley 1984). Su estructuración formal (matemática) provee un marco conceptual apropiado para la comprensión de áreas donde el conocimiento puede ser insuficiente, y su utilidad para dilucidar problemas complejos, abrir nuevos campos de investigación, o para aplicarlos al manejo de sistemas biológicos o productivos, es ampliamente reconocida (France y Thornley 1984). Se denomina *simulación* a la representación conceptual de los componentes que conforman un sistema real, bajo condiciones de incertidumbre (total o parcial) acerca de las magnitudes o tasas involucradas. Es una herramienta que permite investigar “*cómo los cambios entre los componentes afectan al resultado final*” (Bunge s/f).

Los modelos enfocados en *variables de estado* -como el que se propone en la Parte IV-, se basan en que el estado de un sistema puede ser cuantificado en cualquier momento, y sus cambios pueden ser descritos por ecuaciones matemáticas; esto

lleva a la distinción entre *variables de estado*, *tasas o variables de flujo*, y *variables de control* (Penning de Vries y van Laar, Eds.1982). Las *variables de estado* son cantidades acumuladas, virtuales o materiales (como la biomasa, el volumen de madera, los beneficios económicos), que pueden ser mensuradas en un momento cualquiera. Brindan información instantánea del sistema, al modo de una toma fotográfica. Las *variables de control* se encuentran en los límites del sistema y ejercen sus efectos sobre el mismo, aunque no se modifican por el comportamiento del sistema. Algunos ejemplos suelen ser la precipitación, el nivel de productividad de un sitio (si el sistema no produce efectos sobre esta productividad), la radiación incidente, etc. Las *tasas* representan flujos de entrada o salida de materiales, energía, dinero o información que determinan cambios en las variables de estado a las cuales se asocian; dependiendo a la vez de variables de control o de estado. El crecimiento de la madera, la tasa de interés financiera o la mortalidad de plantas, son flujos que afectan por ejemplo a un bosque, a un depósito bancario, o a un cultivo respectivamente. Estos mismos flujos pueden ser modificados por las condiciones climáticas, las decisiones macroeconómicas (variables de control), o por la estabilización del número de plantas (variable de estado) por autorraleo, respectivamente. Además de los tres tipos de variables mencionadas, los modelos incluyen *variables auxiliares*, necesarias para la transformación de unidades, la comparación de procesos o para una mejor comprensión del sistema (France y Thornley 1984).

Algunos modelos empíricos a nivel de rodal mencionados en la sección anterior (2.3), constituyen un elemento útil para la simulación de la dinámica de la biomasa. Otros modelos de la dinámica de distintos tipos forestales, basados en procesos

ecofisiológicos, como el *CO2Fix* (Mohren *et al.* 1990, 1999), han sido desarrollados para la simulación de producción de carbono en la biomasa, el mantillo, los suelos y en los productos cosechados, y han sido parametrizados para una cantidad importante de situaciones especie-sitio, aunque no para las del objeto de esta investigación.

3 – CONTEXTO REGIONAL

3.1 SUELOS Y CLIMA

En el noroeste de la Patagonia, los bosques nativos, las plantaciones de pinos y las estepas gramíneas ocupan suelos del orden de los Andosoles, Entisoles, Molisoles y Alfisoles (del Valle 1998) según la clasificación de Soil Taxonomy (Soil Survey Staff 1997, en: del Valle 1998) con predominancia absoluta de los primeros donde se desarrollan los bosques (del Valle 1998). Los Andosoles corresponden a la antigua clasificación de FAO/ UNESCO para los suelos ácidos oscuros derivados de cenizas volcánicas (Etchevehere, en: Dimitri 1972, del Valle 1998). A nivel de las tres provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut, los Andosoles representan el 21,7% de los suelos, aunque solamente cubren el 5,4% de la Patagonia (del Valle 1998). Son suelos derivados de eyecciones volcánicas o material piroclástico, cuya fracción coloidal está representada por complejos húmicos de aluminio, ocurriendo bajo un régimen termal cryico y un régimen de humedad del suelo áquico, údico, ústico o xérico (del Valle 1998). A medida que progresan hacia la estepa, los suelos netamente volcánicos de la cordillera aparecen modificados por el transporte y mezclado con arenas y limos fluviales o coluviales, dando lugar a los Molisoles y otros suelos de estepa (Colmet Daage *et al.* 1988, Etchevehere, en: Dimitri 1972). En la montaña abundan además los Litosoles, suelos no edafizados de escombros o mantos de roca (Etchevehere, en: Dimitri 1972, del Valle 1998) en cuyos intersticios sedimentan materiales finos, o la meteorización incipiente permite el crecimiento de plantas pioneras (como el ciprés) en condiciones climáticas favorables.

En las fases más finas de los suelos andosólicos predominan los alofanos, coloides con una alta superficie específica y porosidad, con alto contenido de fósforo y

carbono, acomplexados con cationes de Fe y Al. Este tenor de carbono se vincula con el crecimiento de bosques húmedos asociados a la génesis de estos suelos. Hacia el este, las cenizas se han redepositado por acción eólica o fluvial, entremezclándose con otros materiales piroclásticos y rocas sedimentarias, remodelados por las glaciaciones y fenómenos climáticos más recientes. La presencia de arcillas cristalinas en estos sitios más xéricos, en contraposición a las amorfas dominantes en los suelos netamente alofánicos hacia el oeste, ejercerían un menor efecto protector (estabilización) de la materia orgánica, facilitando una mayor mineralización de la misma que en los sitios más húmedos (Mazzarino 2005).

Morfológicamente, los Andosoles se caracterizan por una secuencia de horizontes A-C, o A-B-C (Colmet Daage *et al.* 1988), según su grado de meteorización, con ocurrencia frecuente de secuencias similares enterradas, debido a sucesivas deposiciones de material volcánico o *tefras* (Shoji *et al.* 1993). Los suelos formados a partir de deposiciones recientes poseen un alto contenido de cenizas gruesas, pumicitas y escoria. Si bien inicialmente la retención de agua es baja, el material bajo climas húmedos se meteoriza rápidamente, liberando a la solución del suelo importantes cantidades de fósforo y facilitando la instalación de vegetación pionera. Esta interacción temprana con la vegetación tiene una marcada influencia en la edafogénesis debido a la formación de productos húmicos que rápidamente se acomplexan con cationes de aluminio (Al^{+++}) y en menor medida con hierro (Fe^{++}), arrojando el color oscuro que caracteriza a este horizonte. Cuando la humificación es más lenta, el Al^{+++} forma aluminio-silicatos de arcilla alofánica e imogolita (material que se presentan en mayor cantidad en un régimen ústico, o en situaciones de mayor humedad pero con menor formación de humus).

El clima regional es templado en los valles y mesetas, y templado frío en la alta montaña, con un gradiente general de humedad decreciente desde la Cordillera de los Andes hacia el Océano Atlántico (Cordón *et al.* 1993), y otro de temperatura decreciente de Norte a Sur, modificados localmente por el relieve y la altitud (Oosterheld *et al.* 1998; Paruelo *et al.* 1998). En tanto la meseta patagónica reúne características de aridez y rigurosidad climática (Paruelo *et al.*, 1998), en los valles y laderas del área cordillerana se encuentran los mejores suelos y condiciones de desarrollo de la vegetación, en ambientes mésicos o húmedos (Dimitri, 1972; Paruelo *et al.*, 1998). El ecotono entre estos ecosistemas se caracteriza por una abrupta caída del nivel de precipitaciones (De Fina, *in*: Dimitri, 1972), que en el área de este estudio, se distribuyen en el rango de 1200-500 mm anuales. El descenso oeste-este de la precipitación ocurre en poco más de 50 km de distancia a la latitud aproximada de 40°S, y continúa hasta alcanzar menos de 300 mm en los 50 km subsiguientes en el mismo rumbo (Defina, *en*: Dimitri 1972). Las variaciones topográficas locales y la extensión latitudinal, determinan una alta diversidad climática, que en el área estudiada puede caracterizarse por la existencia de cinco distritos agroclimáticos (Caleufu, Junín de los Andes, Cuyín Manzano, Bariloche y Las Bayas) diferenciados entre sí por las temperaturas medias estacionales o por la distribución anual de la precipitación (Defina 1950, De Fina *in*: Dimitri, 1972). La periodicidad climática es marcada durante el año, con fuerte déficit hídrico y altas temperaturas estivales, que con cierta frecuencia favorecen la formación de tormentas eléctricas, uno de los factores causales de incendios en la región. Las temperaturas medias estivales en los distritos mencionados, oscilan en los 14-16°C, y las invernales en 2-4°C. Las heladas son más frecuentes entre otoño y primavera, aunque existe posibilidades de ocurrencia durante todo el año (De Fina *in*: Dimitri,

1972). Las precipitaciones se concentran en los meses de invierno (200-350 mm acumulados en los distritos agroclimáticos del este, y >500 hacia el oeste), con ocurrencia de nevadas otoño-invernales. Los veranos son secos, con precipitaciones acumuladas en el rango de 50-100 mm en las zonas más xéricas y de 100-200 mm en las más húmedas. Algunos datos de evapotranspiración potencial (ETP) estimados a partir de la fórmula de Thornthwaite (basada en la heliofanía y la temperatura media mensual) indican, para distintos sitios del área estudiada, niveles de ETP~443-600 mm, aunque estos valores subestimarían esta variable respecto de otros modelos o de mediciones reales (Drasckler *et al.* 1990).

La escasez de registros climáticos no permite una definición climática más precisa a niveles locales (Drasckler *et al.* 1990, De Fina *in*: Dimitri, 1972). Particularmente, las dificultades de estimación de precipitación nival, -que usualmente acusan cantidades inferiores a las reales-, la ausencia de registros de temperatura, viento, presión o humedad (Drasckler *et al.* 1990), o las interrupciones en las series anuales, dificultan las interpretaciones sobre la vegetación basadas en datos climáticos. También estos autores destacan la ausencia de pluviómetros en alta montaña o en ladera, sesgándose la medición a los valles de los ríos, donde la precipitación es menor. Con estas limitaciones, y con registros de distintas fuentes y períodos de tiempo, que se mencionan en cada caso, en la Figura 3.1-1 se muestra la distribución anual de las precipitaciones de varias localidades del área, y en algunos casos, de las temperaturas.

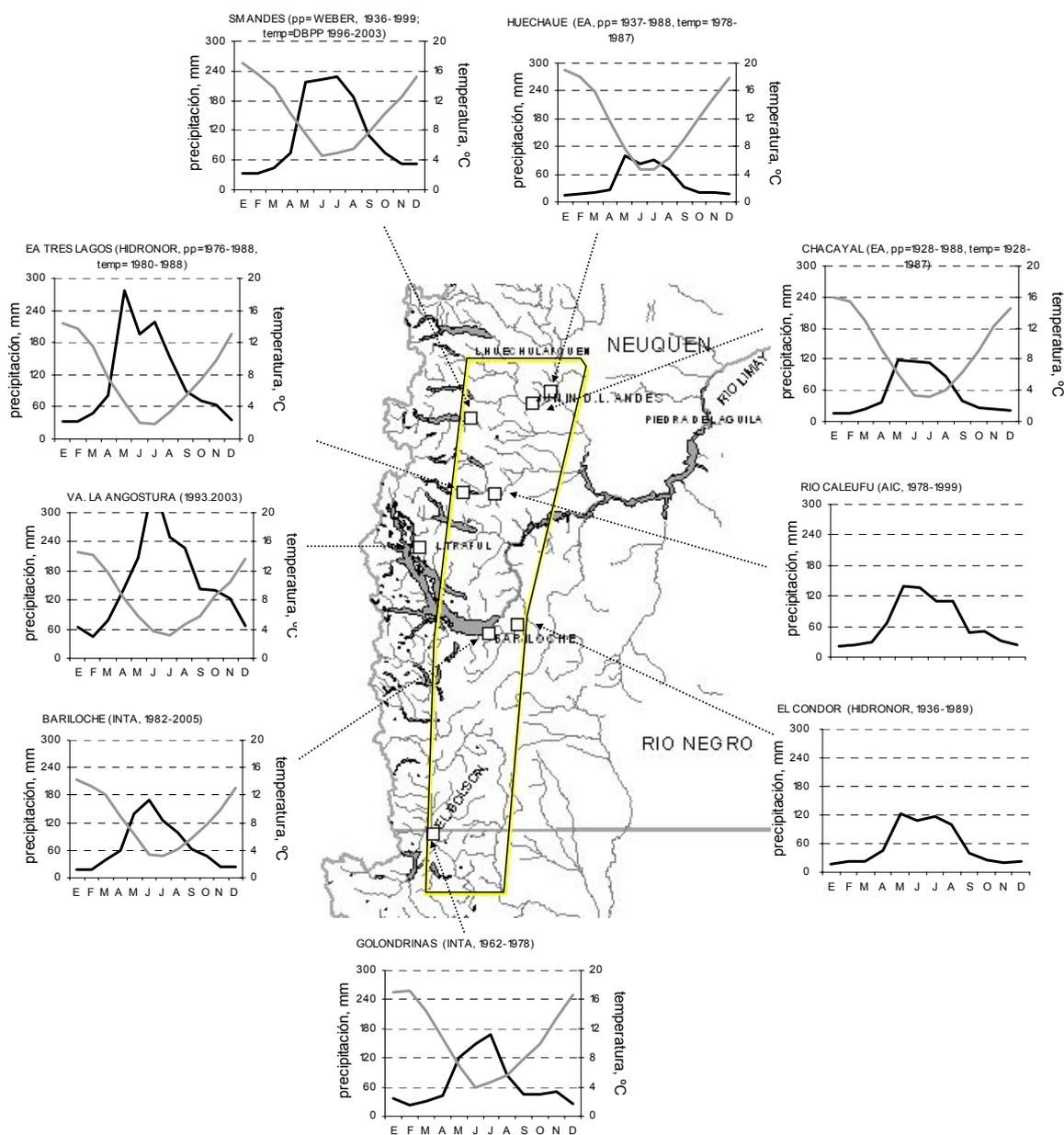


Figura 3.1-1. Mapa del oeste de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut, delimitando el área de estudio (polígono), y climogramas de algunas localidades de la zona (precipitaciones con líneas oscuras, temperaturas con líneas claras). En cada caso se menciona la localidad, el origen de los datos (Hidronor, INTA, AIC= Autoridad Interjurisdiccional de Cuencas, Sr. Carlos Weber, DBPP= Dirección de Bosques y Parques Provinciales de Neuquén, o las estancias mencionadas), y las series promediadas. La mención de más de una serie indica distintos períodos de datos pluviométricos (1ª serie) y termométricos (2ª serie). Se indican los lagos y ríos, y los límites provinciales.

3.2 USO DEL SUELO

La Región Andino Patagónica está conformada por diferentes biomas naturales templados de alto valor ecológico y escénico en la Argentina, y también relevantes a nivel mundial (Dinerstein *et al.* 1995). Esta ecorregión comprende bosques, humedales, estepas y los correspondientes ecotonos en áreas de contacto entre ellos y con otros biomas adyacentes (Dimitri 1972, Cabrera 1973, Hueck 1978, Dinerstein *et al.* 1995, Paruelo *et al.* 1998). Reviste además singular importancia económica, que se va acentuando conforme aumentan la difusión sobre los valores escénicos y las facilidades de acceso (Schlichter y Laclau 1998). Hasta la consolidación institucional de la Patagonia, las culturas indígenas pre-existentes se sustentaban en el aprovechamiento de los recursos silvestres y la cría de ganado doméstico (Veblen y Lorenz 1988). Más tarde, durante todo el siglo XX, la colonización criolla y europea se desarrolló en base a una economía ganadera extensiva caracterizada por la conversión de bosques y matorrales y un pastoreo intenso y continuo sobre la vegetación herbácea (Soriano y Sala 1983), con severo deterioro de los ecosistemas leñosos y esteparios, afectando la estructura y funcionamiento de la vegetación, la fertilidad y la disponibilidad de agua de los suelos (Salazar 1998, Paruelo *et al.* 1993). En grandes superficies de la estepa patagónica la ganadería ovina desencadenó procesos de desertificación reversibles a muy largo plazo, o directamente irreversibles (Bertiller y Bisigato 1998, Somlo *et al.* 1997, Soriano y Movia 1986). El uso del fuego como medio de habilitación de suelos y renovación de pastizales, y los incendios naturales, han producido fuertes impactos con cambios profundos en el paisaje, particularmente en las áreas de contacto entre el bosque y la estepa (Veblen y Lorenz 1988, Auer 1951). También el asentamiento de poblaciones rurales o urbanas implicó profundos cambios en la sucesión vegetal y en la dinámica de disturbios, particularmente a escala local (Schlichter y Laclau

1998, Veblen *et al.* 1996). El sobrepastoreo y la erosión, combinados con el deterioro de los precios de la lana a partir de mediados del S. XX dejaron lugar a ecosistemas degradados con pauperización de la población dependiente de la ganadería (Casas 1998, Soriano y Movia 1986). Esto provocó en los últimos 30 años, importantes migraciones de la población rural, con crecimiento de los conglomerados urbanos, cambios en la tenencia de la tierra y en los tipos sociales agrarios. En áreas agroecológicamente aptas se desarrolló la ganadería vacuna extensiva en reemplazo del ganado lanar, y en forma más o menos intensiva, la agricultura de pequeños predios con posibilidad de riego o la forestación a secano. Ambientalmente, estos cambios se reflejaron en la intensificación del uso del agua del suelo, la conversión de sistemas herbáceos y arbustivos a plantaciones, y en cambios en la composición de los pastizales remanentes. En sitios donde se redujo la carga animal, también se recuperaron pastizales o se regeneraron bosques y matorrales, particularmente de ciprés de la cordillera, ñire (*Nothofagus antarctica* (Forst.) Oerst.), laura (*Schinus patagonicus* (Phil.) Johnst.), maitén (*Maytenus boaria* Mol.) y otras especies (Veblen y Lorenz 1988).

Paralelamente, en las áreas protegidas en jurisdicción de la Administración de Parques Nacionales, creadas en las primeras décadas del siglo XX, muchos pobladores rurales fueron desplazados debido a políticas de exclusión de uso, restaurándose bosques y pastizales nativos (Laclau 1997). Ya en tiempos recientes, la promoción de actividades más vinculadas con la protección de la naturaleza, sustituyó -al menos parcialmente- el uso ganadero tradicional extendido en los parques por emprendimientos turísticos más acotados y por lo tanto con impactos menos negativos.

En el noroeste de la Región Andino Patagónica pueden identificarse dos grandes sectores de uso bien definidos. Uno, el sector occidental, corresponde a las áreas protegidas, de uso económico dominante turístico, aunque su prioridad es la protección de la naturaleza. Las áreas protegidas actuales incluyen prácticamente a todos los grandes tipos forestales presentes, aunque las poblaciones más esteparias de ciprés se encontrarían insuficientemente representadas (Dimitri 1972). El sector oriental corresponde a sistemas ecotonales bosque-estepa ligados al uso ganadero, y en menor medida, a la forestación con pinos, al aprovechamiento del bosque nativo, y también a la caza o pesca deportivas. En este sector se encuentran también las ciudades más importantes y las principales obras de infraestructura social. Climáticamente puede delimitarse como una franja norte-sur de las tres provincias norpatagónicas, entre las isohietas de 500 y 1.500 mm de precipitación anual, cuyas porciones más orientales no pertenecerían a la Región Andino Patagónica (Provincia Fitogeográfica Subantártica) sino a la Estepa Patagónica (Provincia Fitogeográfica Patagónica), o a una transición entre ambas unidades (Cabrera 1973). En este último sector se centraliza la producción vacuna de la Región (Censo Nacional Agropecuario 2002), y la ganadería compite en el uso del suelo con las plantaciones forestales o con el propio bosque nativo, que a partir de poblaciones remanentes mantiene un alto potencial de recolonización del área.

3.3 LOS BOSQUES DE CIPRÉS, LAS FORESTACIONES DE PINO Y LAS ESTEPAS DE COIRÓN BLANCO

Bosques de ciprés de la cordillera

En el noroeste de la Patagonia, las coníferas están representadas por bosques de ciprés de la cordillera puros o consociados con *Nothofagus spp*, de pehuén (*Araucaria araucana* (Mol.) C.Koch) y por escasos relictos de alerce (*Fitzroya cupressoides* (Mol.) Johnston) y ciprés de las gaitecas (*Pilgerodendron uviferum* (Don) Flor.) (Donoso 1993, Dimitri 1972). Los bosques nativos de ciprés de la cordillera y las estepas configuran la matriz vegetal dominante en el área de transición contigua a los bosques húmedos caducifolios, de las provincias de Neuquén, Río Negro y Chubut. Estos sistemas transicionales constituyen la base rural productiva regional, orientada a la producción ganadera con características de baja intensificación y fuerte deterioro ambiental histórico.

Los cipresales constituyen un importante recurso económico para las poblaciones locales a través del aprovechamiento de madera, leña o forrajes, y su área de distribución es soporte de importantes asentamientos y de actividades turísticas. Por su distribución geográfica y su expansión actual vinculada a su historia de uso reciente (Veblen y Lorenz 1988), los bosques de ciprés del ecotono bosque-estepa tienen un alto potencial de fijación actual de carbono. Esto se verificaría a partir de su restablecimiento en sitios ocupados por estepas, sistemas cuya cantidad de carbono por unidad de superficie, es menor.

Los bosques de ciprés de la cordillera se presentan como formaciones abiertas o densas. Donde las precipitaciones son mayores, la especie se asocia con

Nothofagus spp formando bosques mixtos, creciendo en micrositios de suelos someros o rocosos, donde la habilidad competitiva de las latifoliadas es menor (Seibert 1982). Su alta plasticidad adaptativa a distintas condiciones de sitio, determinan que esta especie tenga la mayor distribución longitudinal en los bosques templados de Chile y Argentina, extendiéndose en casi 12° en latitud (Donoso 1993, Veblen *et al.* 1995). Su capacidad de recolonización post-fuego al abrigo de arbustos (Letourneau *et al.* 2004, Veblen *et al.* 1995) facilita su establecimiento en la estepa patagónica, aún bajo condiciones ambientales severas (Veblen *et al.* 1996). Dezzotti y Sancholuz (1991) los clasificaron como: *bosques marginales*, -al este de la región-, *bosques compactos* -entre los 900 y 1600 mm de precipitación anual- y *bosques mixtos*, estos últimos asociados con coihue (*N. dombeyi* (Mirb.) Oerst) en áreas más húmedas. En el área correspondiente a este estudio se encuentran principalmente los tipos forestales puros, compactos o abiertos. Estos bosques se caracterizan por tener una estructura diamétrica irregular y una alta variabilidad en la relación edad:diámetro (Dezzotti y Sancholuz 1991), aunque en sitios más húmedos tendería a formar masas regulares (Loguercio *et al.* 1999). Esta estructura estaría asociada tanto a la ocurrencia de pulsos de establecimiento de la regeneración por razones climáticas (Villalba *en*: Loguercio *et al.* 1999) e incendios (Veblen *et al.* 1996), como por una alta supervivencia de plantas suprimidas (Dezzotti y Sancholuz 1991). Estos autores encontraron edades máximas de la especie entre 53 y 139 años, en general correlacionadas con incendios previos. Dezzotti y Sancholuz (1991) estimaron que los bosques de ciprés actuales de la Argentina, ocupan unas 159.000 ha (61% de bosques compactos, y el resto de formaciones mixtas o marginales en igual medida), aunque recientes actualizaciones dan cuenta de una superficie total de 140.000 ha, con 82.000 ha formando bosques puros abiertos a densos (Bran *et al.* 2003).

Estos bosques se encontrarían limitados en su distribución hacia el oeste por la sensibilidad de la especie a las bajas temperaturas, los daños a los renuevos provocados por la nieve, y la competencia con especies de *Nothofagus* (Veblen *et al.* 1996). Hacia la estepa patagónica, las bajas precipitaciones serían limitantes del desarrollo arbóreo. Por otra parte, la distribución oriental de la especie se encuentra altamente afectada por la presión de pastoreo ovino y por la ocurrencia de incendios, que en etapas del poblamiento europeo fueron muy frecuentes. Sin embargo, recientes estudios destacan el avance de los cipresales en el ecotono bosque-estepa, debido a la supresión de estos disturbios durante el S.XX (Veblen *et al.* 1996, Donoso 1993, Veblen y Lorenz 1988). En función de los procesos que gobiernan la distribución actual de la especie y su dinámica, Kitzberger (2005) propuso una tipología de bosques de ciprés de utilidad para su manejo y ordenamiento. Entre los tipos puros se encontrarían los cipresales *relictuales*, los cipresales *en refugios de fuego*, los *puros abiertos en ladera xérica* y los *puros densos*. Los bosques en refugios de fuego serían los iniciadores de la recolonización actual, originando a los bosques abiertos en ladera xérica, actualmente en expansión. En tanto, los bosques puros densos, en distinta situación topográfica, se habrían establecido a partir del último evento de fuego (Kitzberger 2005).

Si bien los incendios y la ganadería serían las principales causas de su disminución, el uso forestal habría causado importante degradación del recurso (Loguercio 2005). Su manejo histórico puede caracterizarse como netamente extractivo y desordenado, reconociendo la secuencia: corta de grandes árboles → apertura del dosel con ingreso de ganado → regeneración impedida y cortas recurrentes →

bosques degradados (Loguercio 2005). En las últimas décadas, la enfermedad conocida como *mal del ciprés*, de etiología aún desconocida (Rajchenberg y Gómez 2005), ha afectado importantes extensiones de estos bosques. Como resultado de estas condiciones estructurales actuales, la silvicultura actual se orienta a la liberación de individuos de buena forma industrial, la eliminación de ejemplares enfermos o muertos, la conservación de la estabilidad de los árboles⁹ (Peltola *et al.* 2000), y la facilitación de condiciones de regeneración natural, incluyendo el mantenimiento de cobertura arbustiva y la exclusión del ganado (Loguercio 2005).

Forestaciones de pinos

También en el ecotono, las plantaciones de pino ponderosa y otras coníferas cultivadas constituyen agroecosistemas de reemplazo de estepas naturales y de formaciones leñosas nativas. La creciente participación de las forestaciones con pinos incorpora un elemento cuyas implicancias en la fijación de carbono serían potencialmente importantes para la región. Las plantaciones se pueden instalar en lugares donde previamente el ciprés fue desplazado por la ganadería, pero mantiene su potencial de recolonización a partir de la presencia de fuentes de semilla y condiciones de sitio favorables. De esa manera podrían impedir el restablecimiento de esta especie, lo que vuelve necesario evaluar las consecuencias ecológicas de este reemplazo, incluyendo los cambios en la partición de carbono entre diferentes compartimentos.

⁹ La estabilidad de un árbol se define por su resistencia al vuelco, quiebre o descalce ante cargas físicas ocasionadas por viento u otros agentes climáticos (por ejemplo nieve). Es función del desarrollo de copa, del diámetro del fuste y del soporte radical. Los árboles más gruesos y frondosos son más estables que los árboles finos y de copas reducidas (Loguercio 2005). Usualmente se estima por la relación altura/diámetro, considerándose una relación $h/dap/80$ como indicador de inestabilidad. A nivel de rodal, además de las variables individuales intervienen otros factores, como la forma del rodal, su porosidad, estratificación, etc. (Peltola *et al.* 2000, Loguercio G., com. pers.)

La forestación con coníferas en la Región Andino Patagónica con fines industriales comenzó a desarrollarse desde los años 1970 (Laclau *et al.* 2002, Plan Forestal Neuquino 1994, Rey 1993), y hasta ese momento sólo se plantaba aisladamente en algunas estancias (Laclau 1989). El crecimiento de la superficie plantada ha sido promovido bajo diferentes mecanismos de fomento. La superficie total implantada en la región no es precisa, debido a que las evaluaciones locales (INTA/ APN/ UACH/ FVSA/ WWF 2000), o los inventarios nacionales (SAGPyA 2001) no dan cuenta de plantaciones recientes (G. Cortés, com. pers.). Se estima que el área plantada con coníferas alcanzaría unas 70-80.000 ha (entre Neuquén, Río Negro y Chubut, datos de las Direcciones Provinciales de Bosques de las tres provincias). La mayoría de las plantaciones se ha instalado sobre estepas, aunque también ocupan sitios desmontados de matorral de ñire o de sucesiones secundarias de ciprés (Bava y Gonda 1993). En general se trata de plantaciones regulares densas de pino ponderosa y en magnitud muy inferior, de pino contorta (*P. contorta* Dougl. ex Loud, var. *latifolia* Engelm. ex S. Watson) y pino oregón (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Blanco).

Las forestaciones de pinos se manejan en rotaciones de 30 a 45 años, con énfasis en el rendimiento del rodal y también en el tamaño individual (usualmente caracterizado por el diámetro a la altura del pecho, o dap). Las plantaciones de pinos siguen un diseño homogéneo, desarrollado en la región casi ininterrumpidamente desde hace 25 años. Aunque hay bosques de más de 60 años, la mayor parte de las plantaciones del área tienen menos de 15 a 20 años de edad (INTA-APN-UACH-FVSA-WWF 2000). Demuestran un crecimiento sostenido durante

toda la rotación y el criterio general de manejo se orienta a ocupar tempranamente el suelo con una alta densidad de individuos -respecto de los que se cosecharán en el futuro-, para evitar claros por fallas y concentrar los recursos disponibles en esta especie. Otra de las razones de plantar con densidades altas, es la necesidad de obtener fustes cilíndricos y ramas finas, lo que se logra manejando copas estrechas con periódicos levantes de poda. La plantación suele realizarse con herramientas manuales y remoción mínima del suelo, eliminando vegetación únicamente sobre el hoyo de plantación. Las densidades de plantación fluctuaron desde 2.500 pl.ha⁻¹ (años '70), a 1.400-1.600 pl.ha⁻¹ (años '80) hasta 800-1.100 pl.ha⁻¹ en los últimos años, debido a cambios reglamentarios de los distintos regímenes de promoción forestal. Cuando el dosel se cierra completamente, entre los 15 y 20 años de edad de la plantación prácticamente desaparece la vegetación acompañante, la cual perdura sólo en bordes o en claros. Los raleos, que comenzaron a practicarse en años recientes, evidencian una reversión de esta situación en sitios donde el mantillo es reducido o ha sido removido. El suelo es recolonizado por especies herbáceas o del matorral preexistente, junto con el establecimiento de renuevos arbóreos de semilla (P.Laclau, observación personal). Los raleos tempranos tienen por principal objetivo sanear la masa, eliminando individuos dañados o malformados y liberando ejemplares selectos de buena forma y tamaño, manteniendo una distribución uniforme en el terreno. Las podas de ramas inferiores reducen la conicidad del fuste y contribuyen a la obtención de madera sin nudos. La primera poda se realiza cuando las plantas alcanzan un rango de 9-12 cm de dap, eliminándose la base de la copa viva hasta 1,5-2 m de altura, lo que modifica la distribución vertical de la biomasa. Cuando las plantas alcanzan 18 a 20 años de edad y un dap de 23 a 25 cm se realiza una segunda poda "de altura" en ejemplares selectos (Gonda y Cortés

1995). Basados en simulaciones, estos autores proponen modelos de dos, tres y seis podas, a partir de un umbral mínimo de dap de 9,3 cm hasta un máximo de 19,8 cm, con remoción variable de la copa (Gonda y Cortés 1995). En podas bajas y altas se utilizan serruchos, tijeras, motosierras o motopodadoras. El primer raleo se realiza cuando la plantación tiene una edad de 14 a 22 años y generalmente no aporta material aserrable. Un segundo raleo con destino comercial se realiza entre los 18 y 30 años, dependiendo del sitio, y en años sucesivos los raleos comerciales pueden continuarse con periodicidad (Burschel y Rechene 1995).

La densidad remanente de árboles con destino a corta final, 10-15 años más tarde, es de 250 a 350 pl.ha⁻¹ (Burschel y Rechene 1995). Las operaciones de cosecha siguen varias etapas: selección y marcación de ejemplares, diseño y tendido de vías de saca y playas de acopio, volteo, trozado y desrame, y extracción por arrastre hasta el cargadero. Eventualmente también se amontonan y queman los residuos de cosecha. Este conjunto de tareas produce importantes impactos en el sitio, con efectos sobre la estructura de la vegetación, el mantillo y el suelo. Los residuos de poda y los deshechos de raleo producen un brusco aumento de hojarasca y material leñoso en el suelo, aspecto que incrementa la combustibilidad de la forestación y el riesgo de incendios. En los raleos avanzados y la cosecha, se extrae del sistema una gran cantidad de biomasa de troncos, aunque una gran cantidad de residuos queda en el lugar. La madera más gruesa, por sus características físico-químicas, y por su escaso contacto superficial con los descomponedores del suelo, demora muchos años en degradarse. De acuerdo con el manejo de residuos practicado, el mantillo grueso podría conservarse durante mucho tiempo, hasta promediar la siguiente rotación.

Los dos sistemas forestales considerados, al igual que otros bosques, secuestran y mantienen una gran cantidad de carbono en la biomasa, y presumiblemente también en el suelo, en relación con los pastizales naturales alternantes. En bosques deciduos del oeste de la Patagonia, Schulze *et al.* (1996) estimaron valores de 340 Mg.ha⁻¹ de biomasa aérea y 148 Mg.ha⁻¹ de biomasa subterránea en bosques de lenga de más de 200 años de edad, y una relación raíz:tallo¹⁰ (*r:t*) de 0,44. Sin embargo, en pastizales bajo condiciones más xéricas estos valores de biomasa total se redujeron a 5-7 Mg.ha⁻¹ de biomasa aérea y 8-21 Mg.ha⁻¹ de biomasa subterránea, con una relación raíz:tallo en el rango de 4,1-1,1. Además, en estos casos el 90% de las raíces se encontraban a menos de 60 cm de profundidad. Por otro lado, en bosques de coníferas templadas (*Pinus sylvestris* L.), el incremento de la precipitación y de la temperatura afectaron positivamente el contenido de carbono (Vucetich *et al.* 2000) y la estabilidad de su secuestro.

En una estrategia de promoción del secuestro de carbono por la forestación, se consideran dos variables principales: su potencial espacial (área), y la densidad unitaria de carbono (en términos de masa/área), esta última relacionada con la tasa de secuestro. Asimismo, la permanencia de ese efecto sumidero es igualmente importante y está relacionada con el manejo y conservación de la cobertura boscosa. En este marco, las forestaciones de rápido crecimiento de la Patagonia y también la expansión del bosque nativo hacia la estepa, podrían contribuir significativamente al secuestro de CO₂ atmosférico, en tanto demuestren (a) una alta tasa de fijación de

¹⁰ La relación *másica* raíz:tallo debería indicarse más apropiadamente como la relación biomasa subterránea: biomasa aérea, pues se refiere a la totalidad de los componentes aéreos (tallo, ramas, hojas) y subterráneos raíces. Aquí se mantiene el término usualmente utilizado.

CO₂, (b) un alto potencial de sitios aptos disponibles donde la actividad forestal sea económicamente competitiva y (c) el reemplazo de ecosistemas de bajo nivel de almacenaje de carbono.

No obstante, la maximización del secuestro de carbono debe ir en consonancia con otros objetivos de manejo. En general, las prácticas tendientes a mantener la cobertura forestal y a favorecer condiciones de regeneración en bosques nativos son vistas como buenas prácticas, aunque las conversiones de bosques nativos por plantaciones, no (Hoover *et al.* 2000). Sin embargo, el potencial de secuestro de carbono de estas últimas suele ser muy alto (Ley y Sedjo 1995). Por ello deben tomarse cuidadosas consideraciones acerca de las soluciones de compromiso asumidas cuando se toman decisiones de manejo (Hoover *et al.* 2000).

A pesar que se han realizado al presente algunos estudios de biomasa de árboles de la Patagonia (Peri *et al.* 2005, Loguercio y Defossé 2001, Schulze *et al.* 1996, Loguercio *et al.*, inédito), no se conoce suficientemente aún la magnitud y la dinámica del carbono secuestrado en los sistemas aquí investigados. Algunos estudios locales basados en observaciones de árboles individuales y relevamientos edafológicos y edafológicos, han evaluado la biomasa y el carbono secuestrado en suelos de plantaciones de pino ponderosa (Nosetto *et al.* 2006, Loguercio *et al.* inédito, Laclau 2003a, 2003b) y de bosques de ciprés de la cordillera (Laclau 2003b). Otros tipos forestales nativos de la región como la lenga, el ñire y varias especies del bosque valdiviano, han sido evaluados en Chile por Gayoso *et al.* (2002).

Estepas de coirón blanco

Los tipos fisonómicos principales esteparios de la zona subandina del noroeste patagónico, son las estepas gramíneas y arbustivo-gramíneas de coirón blanco (*Festuca palleescens* (St.Yves) Parodi), y en menor medida de coirón amargo (*Stipa speciosa* Trin. et Rupr. var *major*), (León *et al.* 1998, Bran 1985). A escala de paisaje, conforman una matriz esteparia que incluye bosques y matorrales (Somlo y Bran 1994) y también praderas y vegas de gramíneas, ciperáceas y juncáceas en sitios planos con algún grado de hidromorfismo. Los bosques, generalmente en macizos aislados o en formaciones en galería al este del área, se vuelven dominantes del paisaje cuando las precipitaciones superan los 900 mm (Somlo y Bran 1994). Las estepas gramíneas de coirón blanco en los sitios con menor nivel de precipitación, se corresponderían con el ecosistema original, modelado por pulsos de fuego o de sequías que impiden la instalación de leñosas arbóreas, y por su historia de uso (Soriano 1986). En los sectores más húmedos el pastizal alternaría temporalmente con bosques nativos, y ocuparía el suelo en etapas tempranas de sucesión secundaria post-fuego o post-desmante. Las estepas de *Festuca palleescens* imbricadas con el bosque de *Nothofagus* han sido caracterizadas como sistemas altamente vulnerables al sobrepastoreo (Soriano 1986). La ganadería intensiva y continua ha afectado la resiembra natural del coirón dulce, al remover el mantillo necesario para la germinación (Bran 1985) y también el suelo (Cassola 1990). Sin embargo, estos pastizales tienen un alto potencial de recuperación, con tendencia a mantenerse en niveles intermedios de disturbio (Somlo 1996). No obstante ello, en el caso de estepas muy arbustizadas, la competencia entre pastos y arbustos es un factor crítico para la restauración del pastizal (Aguar *et al.* 1992). La recolonización progresiva de ciprés y otras leñosas también ocurriría al cesar el

pastoreo (Veblen y Lorenz 1988), a partir de bosques en *refugios de fuego* (Kitzberger 2005), provocando la alternancia bosque-pastizal mencionada, aunque no se conoce la extensión ni la tasa de este proceso.

La partición de biomasa en la estepa patagónica

Para estepas del noroeste de la Patagonia en Chubut, Ares (en: Defossé y Bertiller 1991) desarrolló un modelo empírico de distribución de la biomasa aérea de *Festuca pallescens* en condiciones más xéricas que las de este estudio, a partir de mediciones sucesivas en un sitio con exclusión de ganado, y calculando las tasas de cambio de cada componente por iteración hasta ajustar el estado inicial con el estado final de cada uno de ellos. Los compartimentos cuantificados fueron: biomasa aérea viva (verde), muerta reciente y antiguamente (amarilla y gris, respectivamente) y mantillo. En el sitio de estudio, el coirón blanco produjo el 95% de la fitomasa aérea en tres años de ensayo. Por otro lado, Pedranzani (1987), evaluó la producción aérea y radical de coirón blanco en dos condiciones de pastizal intensamente pastoreado en un área próxima a la de este estudio en la Provincia de Río Negro, con precipitaciones anuales de 530 mm. En la mejor condición la cobertura total fue de 57%, con predominio de gramíneas, entre las cuales dominaba el coirón blanco con 27% de cobertura. La cobertura de neneo fue de 5%. En el sitio de peor condición de pastizal, solo el 3% de cobertura fue de coirón blanco y el 7% de neneo, sobre una cobertura total de 47%, dominada por otros pastos y especies subleñosas. En Río Negro y Neuquén, Siffredi (datos sin publicar) realizó estimaciones de biomasa forrajera viva y total de coirón blanco en sitios de 650 mm anuales de precipitación, próximos a algunas parcelas aquí evaluadas, y también en sitios con más de 2000 mm anuales, contiguos al bosque nativo de latifoliadas. Fernández *et al.* (2004) estimaron la biomasa de raíces y fracción verde de coirón

blanco en un sitio de similar precipitación, con exclusión de pastoreo. La Tabla 3.3-1 presenta las proporciones halladas en las distintas fracciones de coirón blanco por algunos de los autores mencionados.

Tabla 3.3-1. Partición de biomasa de las distintas fracciones de matas de *Festuca pallescens*. Las proporciones expresan la magnitud relativa de las fracciones amarilla, gris o raíces (numerador) respecto de la fracción fotosintética (verde) (denominador); s/d = sin datos.

Autor	Precipitación	Pastoreo	Senescente (amarillo)	Muerto (gris)	Raíces	Mantillo
Defossé <i>et al.</i> 1990*	375 mm	Sin pastoreo	3,2 : 1	5,2 : 1	S/d	2,2 : 1
Pedranzani 1987	730 mm	Moderado	1,4 : 1	6,8 : 1	4,4 : 1	s/d
		Alto	1,4 : 1	4,0 : 1	3,1 : 1	s/d
Fernández <i>et al.</i> 2004	900 mm	Sin pastoreo	s/d	s/d	3,5-3,1 : 1	s/d

* proporción media observada sobre un gráfico de distribución anual

La acumulación de materia seca en el pastizal es un balance entre la productividad primaria neta del sistema y su tasa de reciclado, y las extracciones por cosecha o herbivoría. Si bien el neneo acumula materia seca, particularmente en su porción subterránea y a mayor profundidad que los pastos (León y Aguiar 1985, Fernández y Paruelo 1988), el reemplazo de pastos por arbustos como consecuencia del pastoreo, no incrementaría la biomasa de la comunidad, dado que tanto la cobertura total como la concentración específica de biomasa disminuyen (Pedranzani 1987, León y Aguiar 1985). Aguiar *et al.* (en: Golluscio *et al.* 1998) postularon que el incremento de la abundancia relativa de arbustos en estepas de coirón blanco reduce la productividad y la capacidad de carga. Esta hipótesis se reforzaría además con otras diferencias observadas en productividad individual y duración anual de la etapa de crecimiento (INTA 1986, Defossé *et al.* 1990, Paruelo *et al.* 1998). Por otro lado, la precipitación media anual ha sido utilizada para estimar la productividad

potencial de pastizales naturales en ésta y otras regiones, independientemente de la composición botánica (Austin y Sala 2002, Fernández *et al.* 1991). No obstante, los controles sobre la productividad varían a nivel de grupos funcionales, y en los pastos el crecimiento responde a cambios estacionales de precipitación y temperatura, pero no a la precipitación acumulada anual, como ocurre con los arbustos (Jóbbagy y Sala 2000). A la vez, la cantidad de mantillo producida por cada una de estas especies está estrechamente relacionada con la productividad; por lo tanto sería menor en los arbustos, a menos que la descomposición del mantillo de estos últimos fuera más lenta. La mayor relación C/N del follaje verde y seco del coirón blanco respecto del neneo (Mazzarino *et al.* 1998), sugiere una descomposición más lenta del mantillo del pasto. Esto se hace evidente en sitios poco pastoreados (P.Laclau, observación personal).

En síntesis, en sitios poco pastoreados de la estepa arbustivo-graminosa de coirón blanco, esta especie tendrá la mayor cobertura, biomasa y mantillo. En tales condiciones, el neneo tendrá su mínima expresión. Esta participación de los coirones caerá, incrementándose a la vez la de neneo y otros arbustos, en gradientes decrecientes de precipitación y crecientes de pastoreo. Asimismo, la proporción de biomasa muerta en pie y en el mantillo crecerán con respecto a la biomasa total de coirón al disminuir la precipitación, y decrecerán con el aumento de pastoreo (Figura 3.3-1).

Precipitación	+	Coirón blanco (A) Neneo (B) Mantillo (M)	Coirón blanco (M / B) Neneo (M) Mantillo (M / B)
	.	Coirón blanco (M) Neneo (M / B) Mantillo (A)	Coirón blanco (B) Neneo (A) Mantillo (B)
		-	+
		Pastoreo	

Figura 3.3-1. Cobertura relativa de coirón blanco, neneo y mantillo según precipitación y pastoreo. A= alta, M= mediana y B= baja cobertura relativa (tomado de Laclau 2003b).

4 - HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

En la Figura 4.1-1 se propone un modelo conceptual de secuestro de carbono a nivel de stand o rodal, aplicado a las forestaciones de pinos y a los bosques puros ecotonales de ciprés de la región.

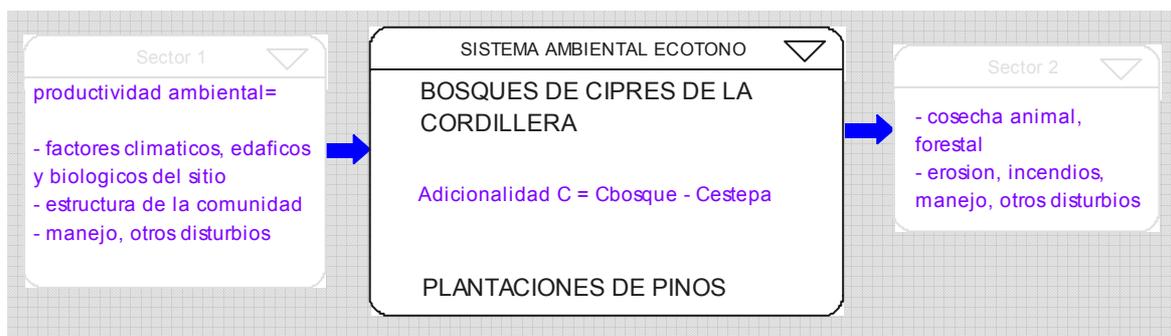


Figura 4.1-1. Esquema conceptual de un modelo local de secuestro de carbono y adicionalidad para los bosques de ciprés de la cordillera y las plantaciones de pino.

La caja central representa al estado de acumulación de carbono de los sistemas vegetales bajo estudio. El reemplazo de estepas por regeneración natural de bosques de ciprés de la cordillera, o por plantación de pinos, adicionaría progresivamente carbono al acumularse una alta cantidad de biomasa leñosa y de mantillo respecto de la condición de estepa, cuyos componentes leñosos escasos y su menor cobertura determinarían una menor acumulación de carbono, presumiblemente estable o decreciente de acuerdo con su manejo. La diferencia entre el contenido de carbono del bosque o plantación, y el de la estepa reemplazada, representaría la adicionalidad de carbono del uso forestal. Las variables que incrementan el contenido de carbono (caja menor, izquierda), son: (1) el conjunto de factores ambientales (climáticos, edáficos y biológicos) determinantes de la PPN que influyen en la estructura y dinámica de las comunidades representadas en la caja central, (2) el manejo aplicado, incluyendo la cantidad y calidad de árboles implantados, y (3) la presencia de semillas u otro tipo de

propágulos disponibles en el caso de bosques nativos y estepas, o la estructura actual de estas comunidades. Las pérdidas de carbono acumulado (caja menor, derecha) estarían dadas por la cosecha o remoción de biomasa (madera, pasto, cosechado directamente o como producción de carne o lana) y también por el fuego o la erosión. Mediante el análisis dinámico de este sistema, es posible simular y analizar la magnitud del secuestro de carbono atmosférico, su conservación *in situ*, las pérdidas o escapes, y la eficiencia de contribución a la mitigación del cambio climático en este nivel.

En ese marco, la contribución de los bosques, plantaciones y estepas del ecotono al secuestro de carbono atmosférico despierta algunos interrogantes, entre ellos: ¿cuál es la adicionalidad de carbono del uso forestal con plantaciones de pino o bosques puros de ciprés, respecto de la ganadería alternativa y dominante en la estepa?; ¿qué magnitud -absoluta y relativa- alcanzan los diferentes compartimentos de biomasa y carbono a nivel de planta y de stand, de acuerdo con su desarrollo y condiciones climáticas?; ¿cómo incide el aprovechamiento forestal en el balance de carbono y en su relocalización?

Por otra parte, las tasas de crecimiento específico de las forestaciones de pino o de ciprés (Loguercio *et al.* 1999) y las diferencias en la calidad de mantillo y el ciclaje de materia orgánica (Mazzarino *et al.* 1998) arrojarían diferencias en el secuestro de carbono por uno u otro sistema forestal. El mayor crecimiento relativo del fuste de los pinos respecto de los cipreses (Loguercio *et al.* 1999), haría esperar una mayor acumulación de carbono en la biomasa, en masas de densidad completa. Los

cipresales con muchas generaciones creciendo en forma continua sobre un mismo sitio, podrían mantener o acrecentar el carbono del suelo en comparación con plantaciones de pino reemplazando estepas, ya que estas últimas forestaciones no han tenido aún una permanencia suficiente como para influir sustancialmente en el contenido de carbono lábil de recambio lento o en los complejos orgánicos estables de suelo (*sensu* Lal y Kimble 1997). Las estepas del ecotono, debido a su composición y también a los frecuentes disturbios de pastoreo e incendios, mantendrían menos carbono secuestrado, con su mayor porcentaje en la biomasa subterránea y en el suelo. Desde el aspecto productivo, los sistemas de cosecha incidirían fuertemente en el mantenimiento del *pool* de carbono lábil, de modo que el óptimo de producción de madera no coincidiría con el óptimo de secuestro de carbono. Finalmente, la rentabilidad privada potencial de la producción de carne o de madera (bienes de consumo) y del secuestro de carbono (servicios ambientales), considerados conjunta o aisladamente, influirán marcadamente en el desarrollo de los sistemas bosque de ciprés, plantaciones de pino o pastizal en la Región, a menos que políticas de conservación y desarrollo orienten este desarrollo en armonía con otros intereses sociales.

4.1 HIPÓTESIS

En función de los aspectos comentados se postula que:

- (1) Los bosques de ciprés y las plantaciones de pinos, en etapas avanzadas de desarrollo, acumulan más carbono que las estepas en todos sus compartimentos; biomasa aérea y subterránea, mantillo y suelo.
- (2) El pastizal de estepa sólo mantiene cantidades importantes de carbono en el suelo, y en menor cantidad que los sistemas forestales.
- (3) Las diferencias en crecimiento, cobertura, naturaleza del mantillo y persistencia entre los bosques de ciprés y las plantaciones de pino determinan una magnitud y partición diferente del carbono entre la biomasa, el mantillo y los suelos de ambos sistemas forestales. En etapas de desarrollo avanzadas, los pinares producen más biomasa y mantillo que los cipresales nativos, en tanto que estos últimos mantienen un mayor nivel de carbono en el suelo.
- (4) La operación forestal en los raleos provoca pérdidas de carbono en el suelo.
- (5) La precipitación anual y variables fisiográficas como la exposición, la pendiente y la posición en el relieve, controlan la partición entre la biomasa aérea y subterránea, disminuyendo la relación raíz:tallo en sitios de mayor precipitación y condiciones físicas más favorables al crecimiento.

4. 2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Los objetivos específicos de este estudio son los siguientes:

- Identificar y cuantificar los compartimentos relevantes de carbono, en plantas individuales y en formaciones puras de ciprés de la cordillera, plantaciones de pino ponderosa y estepas naturales.
- Desarrollar estimadores de estado de la biomasa y el carbono a nivel de planta individual y de *stand* en los ecosistemas considerados.
- Comparar la cantidad y la distribución del carbono de los compartimentos analizados en función de las especies consideradas, su desarrollo, las condiciones de precipitación y variables fisiográficas.
- Determinar las consecuencias del manejo forestal en el secuestro de carbono, en bosques implantados con fines maderables.
- Simular el secuestro de carbono de una rotación forestal, para estimar su contribución a la remoción de CO₂ atmosférico.
- Analizar los beneficios económicos del aprovechamiento forestal maderero en combinación con la venta de certificados de carbono, en bosques manejados de pino.

5 - BIBLIOGRAFÍA

Aerts R. y F.S. Chapin III, 2000. The Mineral Nutrition of Wild Plants Revisited: A Re-evaluation of Processes and Patterns. *Advances in Ecological Research*, 30: 1-67

Aguiar, M.R., Soriano, A., y O.E. Sala 1992. Competition and facilitation in the recruitment of seedlings in Patagonian steppe. *Functional Ecology* 6:66-70.

Andenmatten E., López C. y F. Letourneau 2002. Método del sitio de referencia para la estimación predial de calidad de sitio. Informe técnico. Comunicación técnica N° 21, Area Forestal, Silvicultura. INTA EEA Bariloche, 10 pgs.

Andenmatten E. 1999. Proyección de Tablas de Rodal para Pino Oregón en la región Andino Patagónica de las Provincias de Chubut y Río Negro, Argentina. Tesis de postgrado M. Cs. Universidad Austral de Chile, 62 p.

Andenmatten E., Letourneau, F., y A. Ortega 1997. Vínculo entre los índices Densidad relativa y Factor de Espaciamiento y su relación con la Altura dominante. IUFRO Conference: Modelling growth of fast-grown trees species. Valdivia, Chile Setiembre 1997.

Andenmatten E. y F. Letourneau 1997. Curvas de índice de sitio *Pinus ponderosa* (Dougl) Laws de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina. *Revista Bosque* 18(2):13-18

Arneeth A., Kelliher, F.M., McSeveny, T.M. y J.N. Byers 1998. Net ecosystem productivity, net primary productivity and ecosystem carbon sequestration in a *Pinus radiata* plantation subject to soil water deficit. *Tree Physiology* 18: 785-793.

Assmann E. 1970. The principles of forest yield study. Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Pergamon Press, Oxford, 503 pgs.

Auer V. 1951. Consideraciones científicas sobre la conservación de los recursos naturales de la Patagonia. *IDIA* 4 (40-41):1-35.

Austin, A.T., y O.E. Sala 2002. Carbon and nitrogen dynamics across a natural precipitation gradient in Patagonia, Argentina. *Journal of Vegetation Science*, 13: 351-360.

Ayres, P.G. 1991. Growth Responses Induced by Pathogens and Other Stresses. In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). *Response of Plants to Multiple Stresses*. Academic Press. Chapter 11: 227-248.

Batjes N.H. 1999. Management options for reducing CO₂-concentrations in the atmosphere by increasing carbon sequestration in the soil. Report 410-200-031, Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, Technical Paper 30, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, 114 pgs

Bava J.O. y H.E. Gonda 1993. Propuesta silvícola preliminar de manejo para ciprés de la cordillera. Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, AFOA, Paraná.

Bertiller M.B. y A. Bisigato 1998. Vegetation dynamics under grazing disturbance. The state-and-transition model for the Patagonian steppes. *Ecologia Austral* 8: 191-199.

Bran, D., Pérez, A., Barrios D., Pastorino, M. y J. Ayesa 2003. Ecoregión Valdiviana: Distribución Actual de los Bosques de "Ciprés de la Cordillera" (*Austrocedrus chilensis*). Informe Preliminar. INTA/ APN/ FVSA, 12 pgs.

Bran D. 1985. Especies silvestres patagónicas: El coirón dulce. *Revista Presencia*, INTA, EEA Bariloche (3): 6-7.

Broquen P., Girardin J.L., Falbo G. y O. Alvarez 1998. Modelos predictivos de índice de sitio en *Pinus ponderosa* Dougl., en base a características del suelo andinopatagónico oriental, 37°-41°S, República Argentina. *Bosque*, 19(1):71-79.

Brown, S., Gillespie, A.J.R. y A.E. Lugo 1989. Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data. *Forest Science*, 35 (44): 881-902.

Bruce J.P., Frome M., Haites E., Janzen H., Lal R. y K. Paustian 1999. Carbon Sequestration in Soils. *Jour. of Soil and Water Conservation*, 4 (1): 382-389.

Bunge R. s/f. La simulación como una herramienta de decisión. Inédito, 9 pgs.

Burschel P. y C. Rechene 1995. Bosques Implantados. Conferencia. Actas de las IV Jornadas Forestales Patagónicas, San Martín de los Andes, 24 al 27 de Octubre de 1995. Universidad Nacional del Comahue (editor), 40 pgs.

Busso, C.A., Richards, J.H. and N.J. Chatterton 1990. Nonstructural carbohydrates and spring regrowth of two cool-season grasses: Interaction of drought and clipping. *Journal of Range Management*, 43(4): 336-343.

Cabrera A.L. 1973. Territorios Fitogeográficos de la República Argentina. Enciclopedia Argentina de Agricultura y Jardinería, 2ª ed. ACME, Buenos Aires, II(I): Fasc. I.

Callaway R.M., De Lucía, E.H., y W.H. Schlesinger 1994. Biomass allocation of montane and desert ponderosa pine: an analog for response to climate change. *Ecology*, 75 (5): 1474-1481.

Canadell, J.G., Mooney, H.A., Baldocchi, D.D., Berry, J.A., Jackson, R.B., Running, S.W., Shaver, G.R., Steffen, W., Trumbore, S.E., Valentini, R., y B.Y. Bond 2000. Carbon Metabolism of the Terrestrial Biosphere: A Multitechnique Approach for Improved Understanding. *Ecosystems* 3:115-130.

Cannell M.G.R. 1989. Physiological basis of wood production: A review. *Scandinavian Journal of Forest Research* 4:459-490.

Casas G. 1998. Recomendaciones y estrategias para compatibilizar el desarrollo productivo en la Patagonia con la prevención y control del proceso actual de desertificación. *En: Ecosistemas Desérticos Patagónicos. Informe Final. Consorcio DHV/Swedforest - Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación, Cap 4.2, 29 pgs.*

Cassola A. 1990. Más sobre desertificación. *Revista Presencia, INTA EEA Bariloche, (22/23): 23-25.*

Cavagnaro, F.P., Golluscio, R.A., Wassner, D., y D.A. Ravetta 2003. Caracterización química de arbustos patagónicos con diferente preferencia por parte de los herbívoros. *Ecología Austral, 13(2):215-221*

Censo Nacional Agropecuario 2002. Instituto Nacional de Estadística y Censos, Ministerio de Economía de la Nación.

Chomitz K.M. 2002. Baseline, leakage and measurement issues: how do forestry and energy projects compare? *Climate Policy* 2:35-49.

Colmet-Daage F., Marcolín A., Lanciotti M. L., Ayesa J. Bran D., Anednmatten E., Broquen P., Girardin J. L., Cortés G. Irisarri J., Besoain E., Sadzawka A., Sepúlveda S., Massaro S., Millot G., Bouleau P. 1988. Características de los suelos derivados de cenizas volcánicas de la cordillera y precordillera del norte de la Patagonia. San Carlos de Bariloche, Argentina. INTA-ORSTOM, 167 pgs.

Cooper C.F. 1982. Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 13:155-166.

- Cordon, V., Forquera, J.C., Gastiazoro, J., Barros, V., e I. Schmidt, 1993. Estudio microclimático del área cordillerana del Sudoeste de la Provincia de Río Negro. Cartas de precipitación. Facultad de Ciencias Agrarias. Cinco Saltos. Río Negro.
- Curtis R.O. 1982. A Simple Index of Stand Density for Douglas-fir. For.Sc. Vol 27(1): 92-94.
- Daniel, T.W., Helms, J.A. y F.S. Baker 1979. Principles of Silviculture. 2nd Edition. Mc Graw Hill Inc., New York, 500 pgs.
- Defina A.L. 1950. Sistema práctico para dividir los países en distritos agroclimáticos. Revista de Investigaciones Agrícolas. ISA (INTA), publ. n° 16, Buenos Aires, 4(4):341-355.
- Defossé, G.E. y M.B. Bertiller 1991. Comparison of four methods of grassland productivity assessment based on *Festuca palleescens* phytomass data. Journal of Range Management 44(3): 199-203.
- Defossé, G.E., Bertiller, M.B. y J.O. Ares 1990. Above-ground phytomass dynamics in a grassland steppe of Patagonia, Argentina. Journal of Range Management 43(2): 157-160.
- de Koning, F., Olschewski, R., Veldkamp, E., Benítez, P., Laclau, P., López, M., de Urquiza, M. y T. Schlichter 2002. Evaluation of the CO₂ sequestration potential of afforestation projects and secondary forests in two different climate zones of South America. GTZ / TOEB. Eschborn, Alemania.
- del Valle H.F. 1998. Patagonian Soils: a regional synthesis. Ecología Austral, 8(2): 103-124.
- Dezzotti, A. y L. Sancholuz 1991. Los bosques de *Austrocedrus chilensis* en Argentina. Ubicación, estructura y crecimiento. Bosque 12(2): 43-52
- Dickson, R.E., y J.G. Isebrands 1991. Leaves as regulators of stress response. In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). Response of Plants to Multiple Stresses. Academic Press..Chapter 1:4-34.
- Dimarco, R., Russo, G., y A.G. Farji-Brener 2004. Patrones de herbivoría en seis especies leñosas del bosque templado de América del Sur: evidencia preliminar a favor de la hipótesis del balance carbono-nutrientes. Ecología Austral, 14(1):39-44.
- Dimitri M. J. 1972. La Región de los Bosques Andino-Patagónicos. Sinopsis General. Col. Científica INTA, Buenos Aires. Tomo X.

Dinerstein, E., Olson, D.M., Graham, D.J., Webster, A.L., Primm, S.A., Bookbinder, M.P. y G. Ledec 1995. Una Evaluación del Estado de Conservación de las Ecor-regiones Terrestres de América Latina y el Caribe. Banco Mundial / WWF, Washington DC, 135 pgs.

Donoso C. 1993. Bosques templados de Chile y Argentina, Variación, Estructura y Dinámica. Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 484 pp

Drasckler, D.N., Furlotti Wagner, A., de Lasa, L.I., Frasseto, F.L. y T.E. Torres Teramo 1990. Inventario de los Recursos Hídricos Provinciales de Cuencas sin Información de Caudales. Segunda Etapa, Cuenca Activa del Río Limay. Administración Provincial del Agua, Subsecretaría de Obras y Servicios Públicos del Neuquén, 52 pgs.

Enricci J. 1994. Posibilidades para la Forestación en la Subregión Central del Ecosistema Andino Patagónico. CIEFAP, Esquel. Publicación Técnica nº 14.

Fayle D.C.F. 1975. Distribution of radial growth during the development of Red Pine root systems. Canadian Journal of Forest Research, vol.5: 608-625.

Fernández, M.E., Gyenge, J.E. y T.M. Schlichter 2004. Shade acclimation in the forage grass *Festuca pallescens*: biomass allocation and foliage orientation. Agroforestry Systems, 60(2): 159-166.

Fernández, R.J., Sala, O. E. y R.A. Golluscio 1991. Woody and herbaceous aboveground production of a Patagonian steppe. Journal of Range Management, 44(5): 434-437.

Fernández, R.J. y J.M. Paruelo 1988. Root systems of two Patagonian shrubs: a quantitative description using a geometrical method. Journal of Range Management 41(3): 220-223.

France, J., y J.H.M. Thornley 1984. Mathematical Models in Agriculture. A Quantitative Approach to Problems in Agriculture and Related Sciences. Butterworth and Co. (Publishers)Ltd, 335 pgs.

Gayoso, J., Guerra J., y D. Alarcón 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Proyecto FONDEFF D9811076: Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile, Valdivia, 157 pgs.

Geiger, D.R. y J.C. Servaites 1991. Carbon Allocation and Response to Stress. In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). Response of Plants to Multiple Stresses. Academic Press..Chapter 5:103-127.

Girardin, J.L. y P. Broquen 1995. El crecimiento de *Pinus ponderosa* y de *Pseudotsuga menziesii* en diferentes condiciones de sitio (Provincia de Neuquén, Argentina). En: Manejo Nutritivo de Plantaciones Forestales. IUFRO, Valdivia, 25 al 30 de abril: 109-123.

Golluscio, R.A., Deregibus, V.A. y J.M. Paruelo 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecologia Austral* 8: 265-284.

Gonda H.E. 1998. Height-Diameter and Volume Equations, Growth Intercept and Needle Length, Site Quality Indicators and Yield Equations for Young Ponderosa Pine Plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. Tesis de Postgrado. Oregon State University, 198 pgs.

Gonda, H.E. y G.O. Cortés 1995. Poda baja de pino ponderosa en la Patagonia andina. Utilización de distintas herramientas, proceso de cicatrización y modelos preliminares. En: IV Jornadas Forestales Patagónicas, 24-27 de octubre de 1995. Asentamiento Universitario San Martín de los Andes, Universidad Nacional del Comahue (editor), Tomo I:324-330.

Gulke, N.E. y W.A. Retzlaff 2001. Changes in physiological attributes of ponderosa pine from seedling to mature tree. *Tree Physiology*, 21: 275-286.

Gulke, N.E. y L. Balduman 1999. Deciduous conifers: High deposition and O₃ exposure effects on growth and biomass allocation in ponderosa pine. *Water, Air, and soil Pollution*, 116: 235-248.

Gulke, N.E., Andersen, C.P., Fenn, M.E. y P.R. Miller 1998. Ozone exposure and nitrogen deposition lowers root biomass of ponderosa pine in the San Bernardino Mountains, California. *Environmental Pollution*, 103: 63-73.

Gucinski, H., Vance, E. y W.A. Reiners 1995. Potential Effects of Global Climate Change. *In*: W.K. Smith and T.M. Hinckley (Editors). *Ecophysiology of Coniferous Forests*. Academic Press. Chapter 10: 309-331.

Hägglund B. 1981. Evaluation of forest site productivity. *Forestry Abstracts (CAB)*, 42(11): 515-527.

Hayward H.E. 1953. Estructura de las plantas útiles. ACME SA, Bs.As, 667 pgs.

Hoover, C.M., Birdsey, R.A., Heath, L.S., y S.L. Sotut 2000. How to Estimate Carbon Sequestration on Small Forest Tracts. *Journal of Forestry*, September 2000: 13-19.

Houghton R.A. 2003. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850-2000. *Tellus* 55: 378-390.

Hueck K. 1978. Los bosques de Sudamérica. Ecología, composición e importancia económica. Sociada Alemana de Cooperación Técnica (GTZ), Eschborn.

INTA/ APN/ UACH/ FVSA/ WWF 2000. Mapeo de los tipos de vegetación de la eco-región valdiviana. cd-rom de coberturas digitales.

INTA 1986. Los Arbustos forrajeros. Productividad del Neneo y del Mamuel Choique. Revista Presencia, EEA Bariloche, (5), 6-10

IPCC 1996. Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change. Univ. Press, Cambridge.

Irisarri, J., Mendía, J., Roca, C., Buduba, C., Valenzuela, F., Epele, F., Fraseto, F., Ostertag, G., Bobadilla, S., y E. Andenmatten 1997a. Zonificación de las tierras para la forestación en la Provincia de Chubut. Gobierno de la Provincia de Chubut, Ministerio de la Producción, Subsecretaría de Desarrollo económico. Dirección General de Bosques y Parques.

Irisarri, J., Mendía J., Roca C., Marazzi, M. y L. Búffalo 1997b. Potencial Productivo de la Provincia del Neuquén. COPADE / CFI.

Irisarri, J., y J. Mendía 1991. Reconocimiento de suelos y evaluación de la aptitud forestal de la región precordillerana de la pcia. de Río Negro. Consejo Federal de Inversiones.

Jackson, R.B, Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E. y E.D. Schulze 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108:389-411.

Jackson, D.S. y J. Chittenden 1981. Estimation of dry matter in *Pinus radiata* root systems. I. Individual trees. *N. Z. Jour. of For. Scie.* ,11(2): 164-182

Jacobson, H.K. y M.F. Price 1990. A Framework for Research on the Human Dimensions of Gloval Environmental Change. ISSC/UNESCO, 71 pgs

Jóbbagy, E.G., y O.E. Sala 2000. Control of grass and shrub aboveground production in the patagonian steppe. *Ecological Applications*, 10 (2):541-549.

Johnson, C.A., Groffman, P., Breshears, D.D., Cardon, Z.G., Currie, W., Emanuel, E., Gaudinski, J., Jackson, R.B., Lajtha, K., Nadelhoffer, K., Nelson Jr., D., Mac Post, W., Retallack, G., y L. Wielopolski 2004. Carbon cycling in soil. *Front.Ecol. Environ.* 2 (10): 522-528.

Johnson D.W. 1992. Effects of forest management on soil carbon storage. *Water, Air and Soil Pollution* 64: 83-120

Jones, C.G., y J.S. Coleman 1991. Plant Stress and Insect Herbivory: Toward an Integrated Perspective. In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). *Response of Plants to Multiple Stresses*. Academic Press. Chapter 12: 249-282.

Kitzberger T. 2005. Hacia una tipología forestal basada en procesos dinámicos: el caso ciprés de la cordillera. En: *Actas I Reunión sobre Ecología, Conservación y Uso de los Bosques de Ciprés de la Cordillera*. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) / Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco/ Universidad Nacional del Comahue. Esquel, 28-30 de Abril de 2005, pgs: 13-18.

Klooster, D. y O. Masera 2000. Community forest management in Mexico: carbon mitigation and biodiversity conservation through rural development. *Global Environmental Change* 10: 259-272

Kohlmaier, G.H., Weber, M., y R.A. Houghton, Eds. 1998. *Carbon dioxide Mitigation in Forestry and Wood Forestry*. Springer-Verlag, Cap. 3:185-251.

Kozlowski T.T., Kramer P.J. y S.G. Pallardy 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. Academic Press Inc, 611 pgs.

Kuusela, K., y A. Nyssönen 1981. Cuantificación de la energía forestal. Métodos de determinación de la biomasa. *Unasylva*, 133:31-34.

Lauenroth, W.K., Epstein, H.E., Paruelo, J.M., Burke, L.C., Aguiar, M.R., y O.E. Sala 2004. Potential effects of climate change on the temperate zones of North and South America. *Revista Chilena de Historia Natural*, 77: 439-453.

Ley, E. y R.A. Sedjo 1995. Carbon Sequestration and Tree Plantations: A Case Study in Argentina. *Environmental and Resource Economics*, 5(1):9-99.

Laclau P. 2003a. Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagonia plantation. *Forest Ecology and Management*, 173: 353-360

Laclau P. 2003b. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 180: 317-333

Laclau, P., Pozo, L.M., Huerta, G., Andenmatten, E., y F. Letourneau 2002. Rentabilidad de la forestación con pino ponderosa (*Pinus ponderosa* (Dougl. Laws) en el noroeste de la Patagonia, Argentina. *Bosque*, 23(1): 21-35

Laclau P. 1997. Los Ecosistemas Forestales y el Hombre en el Sur de Chile y Argentina. Boletín Técnico N° 34. Fundación Vida Silvestre Argentina. Buenos Aires, 147 p.

Laclau P. 1989. Rentabilidad de la Forestación con Coníferas en la Región Patagónica. Revista Presencia, INTA EEA Bariloche, Año IV, n°22/23:9-11.

Lal, R. y J. Kimble 1997. Conservation tillage for carbon sequestration. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 49: 243-253

León R.J.C. y M. R. Aguiar 1985. El deterioro por uso pasturil en estepas herbáceas patagónicas. *Phytocoenología* 13 (2): 181-196

León R.J.C., Bran D., Collantes M., Paruelo J.M. y A. Soriano 1998. Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología Austral* 8: 125-144.

Letourneau F.J., Andenmatten E. y T. Schlichter 2004. Effect of climatic conditions and tree size on *Austrocedrus chilensis*-shrub interactions in northern Patagonia. *Forest Ecology and Management* 191: 29-38

Loguercio G. 2005. Posibilidades y limitaciones del manejo forestal de los bosques de ciprés de la cordillera. En: Actas I Reunión sobre Ecología, Conservación y Uso de los Bosques de Ciprés de la Cordillera. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) / Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco/ Universidad Nacional del Comahue. Esquel, 28-30 de Abril de 2005, pgs: 21-27.

Loguercio, G. A. y G. Defossé 2001. Ecuaciones de Biomasa Aérea, Factores de Expansión y Reducción de la Lengua "*Nothofagus pumilio*" (Poepp. Et End) Frasser, en el Sudoeste de Chubut, Argentina. En: Simposio Internacional: Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile, 18 al 20 de octubre de 2001. IUFRO World Series, vol 13: 115-120.

Loguercio, G.A., Rajchenberg, M., Rodríguez, N. y P. Pantaenius 1999. Informe del Curso-Taller de Actualización en Silvicultura de los Bosques de Ciprés de la Cordillera. CIEFAP/GTZ. El Bolsón, 13 y 14 de Mayo de 1999, 104 pgs.

Lugo, A.E. y G.L. Morris 1982. Los Sistemas Ecológicos y la Humanidad. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (OEA), Washington D.C. Monografía nº 23, Serie de Biología, 82 pgs.

Lust, N., van Camp, L., Muys, B. y L. Nachtergale 1995. Comparative Study of C Sequestration by New Forests on Former Pasture Lands. *Silva Gandavensis*, 60: 81-94.

Mazzarino M.J. 2005. Indicadores de economía de nutrientes y fertilidad de suelos en bosques de ciprés. En: Actas I Reunión sobre Ecología, Conservación y Uso de los Bosques de Ciprés de la Cordillera. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) / Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco/ Universidad Nacional del Comahue. Esquel, 28-30 de Abril de 2005, pgs: 29-33.

Mazzarino, M.J., Bertiller M., Schlichter T., y M. Gobbi 1998. Nutrient cycling in Patagonian ecosystems. *Ecología Austral*, 8: 167-181.

Medina E. 1977. Introducción a la Ecofisiología Vegetal. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (OEA), Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, serie de biología, monografía nº 16, 102 pgs.

Meyer, B.S., Anderson D.B. y R.H Böhning 1976. Introducción a la fisiología vegetal. EUDEBA, Buenos Aires, cap. X, XI: 199-242.

Mohren, G.M.J. y C.G.M. Klein Goldwijk 1990. CO2FIX: A dynamic model of the CO2-fixation in forest stands. De Dorschkamp, Research Institute of forestry and Urban Ecology. Wageningen, The Netherlands, Report 624, 35 pgs.+ app.

Mohren, G.M.J., Garza Caligaris J.F., Masera O., Kanninen M., Karjalainen T. y G.J. Nabuurs 1999. CO2FIX for Windows: a dynamic model for the CO2 fixation in forest stands. Institute for Forestry and Nature Research; Instituto de Ecología, UNAM; Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE); European Forest Institute. Wageningen, The Netherlands; Morelia, México; Turrialba, Costa Rica; Joensuu, Finland; 27 pgs.

Mooney, H.A. y W.E. Winner 1991. Partitioning Response of Plantas to Stress. In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). Response of Plants to Multiple Stresses. Academic Press. Chapter 6: 129-141.

Nosetto, M.D., Jobbágy E.G, y J.M. Paruelo 2006. Carbon sequestration in semiarid rangelands: Comparison of *Pinus ponderosa* plantations and grazing exclusion in NW Patagonia. *Journal of Arid Environments*, 67:142-156.

Oesterheld, M.; Aguiar, M.R., y J.M. Paruelo, 1998. Ecosistemas patagónicos. *Ecología Austral* 8:75-84.

Oren, R. y D.W. Sheriff 1995. Water and Nutrient Acquisition by Roots and Canopies. In: Smith, W.K., Hinckley, T.M. (Editors). *Resource Physiology of Conifers. Acquisition, Allocation and Utilization*. Academic Press. Chapter 2: 39-74

Paruelo, J.M., Beltrán, A., Jobbagy E., Sala O.E., y R.Golluscio 1998. The climate of Patagonia: general patterns and controls on biotic processes. *Ecología Austral* 8: 85-101.

Pedranzani H.E. 1987. Efecto del pastoreo sobre la composición florística de una estepa gramínea de la precordillera rionegrina, sobre la forrajimasa y la producción aérea y radicular de *Festuca pallens* (St. Yves) Parodi. Tesis de grado, Centro Regional Universitario Bariloche, Universidad Nacional del Comahue.

Peltola, H., Gardiner, B., Kellomäki S., Kolström, T., Lässig, R., Moore, J., Quine, C., y J.C. Ruel 2000. Wind and other abiotic risks to forests. Introduction. *Forest Ecology and Management*, 135:1-2.

Penning de Vries, F.W.T. y H.H. van Laar, Eds. 1982. Simulation of plant growth and crop production. Simulation monographs, Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen. 308 pgs.

Peri, P., Viola E. M., y G. Martínez Pastur 2005. Estimación del contenido de carbono en bosques de ñire (*Nothofagus antarctica*) en Patagonia Sur. Actas Congreso Forestal Argentino, Corrientes. AFOA, 9 pgs.

Perry D.A. 1994. *Forest Ecosystems*. The John Hopkins University Press, USA, 649 pgs.

Pires de Campos, C., Muylaert de Araujo, M.S., Pinguelli Rosa L. 2005. Historical CO₂ emission and concentrations due to land use change of croplands and pastures by country. *Science of the Total Environment*, 346: 149-155.

Plan Forestal Neuquino 1994. Estado de Avance. Subsecretaría de Producción Agraria de Neuquén.

Prentice, I.C., Farquhar, G., Fashm, M., Goulden, M., Heimann, M., Jaramillo, V., Khashgi, H., Le Quéré, C. and R.J. Scholes 2001. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. In: *Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, J.T. Houghton, Y. Ding, D.J. Griggs, M. Noguer,

P.J. van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, U.K., pgs:183-237.

Prodan, M., Peters, R., Cox, F., y P. Real 1997. Mensura Forestal. Ed. IICA, 586 pgs.

Rajchenberg M. y C. Gómez 2005. Enfermedades y Plagas en *Austrocedrus chilensis*. En: Actas I Reunión sobre Ecología, Conservación y Uso de los Bosques de Ciprés de la Cordillera. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) / Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco/ Universidad Nacional del Comahue. Esquel, 28-30 de Abril de 2005, pgs: 35-39.

Reineke L.H. 1933. Perfecting a stand density index for even-aged stands. J. Agric. Res., 46: 627-638.

Rey 1993. Evaluación de las masas forestales implantadas en la región andina. Primera etapa: censo forestal. Provincia de Río Negro / Consejo Federal de Inversiones.

Richardson A. 2000. Coarse root elongation rate estimates for interior Douglas-fir. Tree Physiology, 20: 825-829

SAGPyA 2001. Primer inventario nacional de plantaciones forestales en macizo. Revista SAGPyA Forestal, 20: 2-9.

Salazar J.C. 1998. Degradación de suelos. En: Ecosistemas Desérticos Patagónicos. Informe Final. Consorcio DHV/Swedforest - Secretaría de Agricultura, Ganadería y Pesca de la Nación.

Santilli, M.P., Mountinho, P., Schwartzman, S., Nepstad, D., Curran, L. and C. Nobre 2003. Tropical Deforestation and the Kyoto Protocol: a new proposal. Paper presented at COP-9, 1st-12th December 2003, Milan, Italy., 6 pp. (Available at [http://www.ipam.org.br/eventos/cop9/Tropical% Deforestation% 20and% 20Kyoto% 20Protocol% 20COP9.pdf](http://www.ipam.org.br/eventos/cop9/Tropical%20Deforestation%20and%20Kyoto%20Protocol%20COP9.pdf)).

Schalamadinger, B., Bird, N., Brown, S., Canadell, P., Ciccarese, L., Clabbers, B., Dutschke, M., Fiedler, J., Fischlin, A., Forner, C., Freibauer, A., Hoehne, N., Johns, T., Kirschbaum, M., Labat, A., Marland, G., Michaelowa, A., Montanarella, L., Moutinho, P., Murdiyarso, D., Oyhantcabal, W., Pena, N., Penman, J., Pingoud, K., Rakonczay, Z., Rametsteiner, E., Rock, J., Sanz, M.J., Schneider, U., Shvidenko, A., Skutsch, M., Smith, P., Somogyi, Z., Trines, E., Ward, M., e Y. Yamagata 2005. Options for including LULUCF activities in a post-2012 international climate agreement. Documento de trabajo (no publicado), 25-08-2005, 19 pgs.

Schimel D.S. 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* (1995), 1:77-91.

Schlichter, T. y P. Laclau 1998. Ecotono estepa-bosque y plantaciones forestales en la Patagonia norte. *Ecología Austral*, 8: 285-296.

Schulze, E.D., Mooney, H.A., Sala O.E., Jóbagg E., Buchmann N., Bauer G., Canadell J., Jackson, R.B., Loreti J., Oesterheld, M. y J.R. Ehleringer 1996. Rooting depth, water availability, and vegetation cover along an aridity gradient in Patagonia. *Oecologia*, 108: 503-511.

Seibert P. 1982. Carta de vegetación de la región de El Bolsón, Río Negro, y su aplicación a la planificación del uso de la tierra. *Documenta Phytosociologica*, 2: 1-120.

Sharpe, P.J.H. y E.J Rykiel Jr. 1991. Modelling Integrated Response of Plantas to Multiple Stresses. *In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). Response of Plants to Multiple Stresses. Academic Press. Chapter 10: 205-224*

Shoji, S.; M. Nanzyo and R.A. Dahlgren 1993. Volcanic Ash Soils. Genesis, properties and utilization. Elsevier Science Publishers B.V., *Developments in Soil Science* 21, 287 p.

Solberg B. 2004. Economic aspects of forestry and climate change. *Commonwealth Forestry Review*, 77 (3): 229-233.

Somlo, R., Bonvissuto, G., Schlichter, T., Laclau, P., Peri, P. y M. Allogia, 1997. Silvopastoral Use of Argentine Patagonian Forest. *In: Gordon A.M. and S.M. Newman (Editors). Temperate Agroforestry Systems. Cab International, pp: 237-250 .*

Somlo R. 1996. Un método de estimación de cambios en el corto plazo del pastizal. *En: Seminario Taller sobre Producción Nutrición y Utilización de Pastizales. Grupo Regional Patagónico de Ecosistemas de Pastoreo, R. Somlo y G. Becker Eds., FAO-UNESCO/MAB-INTA: 97-98.*

Somlo y Bran 1994. Las Regiones Ecológicas de la Patagonia: Superficies Departamentales. INTA, EEA Bariloche, *Comunicación Técnica* n° 25.

Soriano A. 1986. Relaciones entre los métodos de uso de los recursos y la oferta de los sistemas ecológicos en la Patagonia. *Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, Buenos Aires*, 38:139-144.

Soriano, A., y C.P. Movia 1986. Erosión y Desertización en la Patagonia. *Interciencia*, Vol. II (2):77-83.

Soriano, A., y O.E. Sala 1983. Ecological strategies in a Patagonian arid steppe. *Vegetatio* 56:9-15.

Steele S.J., Gower S.T., Vogel J.G. y J.M. Norman 1997. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. *Tree Physiology*, 17: 577-587.

Steffen W. y P. Tyson, Eds. 2001. *Global Change and the Earth System: A planet under pressure*. International Geosphere-Biosphere Programme, IGBP Science #4, 33 pgs.

Tinus R.W. 1996. Root growth potencial as an indicador of drought stress history. *Tree Physiology*, 16:795-799.

Thrower J.S. 1989. Site Quality Evaluation Using Site Index. Presentación en Curso de Capacitación, Módulo III, en el Instituto de Silvicultura de British Columbia en Surrey, 8 de marzo de 1989, 10 pgs.

UNFCCC 1997. Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change. Conference of the Parties, 3rd session, Kyoto, 1-10 december 1997. FCCC/CP/1997/L.7/Add.1, 21 pgs.

Vanclay J.K. 1994. *Modelling Forest Growth and Yield. Applications to Mixed Tropical Forests*. CAB International, UK, 311 pgs.

Vanclay J.K. 1992. Assessing site productivity in tropical moist forests: a review. *Forest Ecology and Management*, 54:257-287.

Veblen T.T., Kitzberger T., Burns B.R. y A. Rebertus 1996. Perturbaciones y dinámica de regeneración en bosques andinos del sur de Chile y Argentina. En: Armesto J.J., Villagrán, C., y M.K. Arroyo 1996. *Ecología de los Bosques nativos de Chile*. Editorial Universitaria, Cap 9: 169-198.

Veblen T.T. y D.C. y Lorenz 1988. Recent Vegetation Changes along the Forest/Steppe Ecotone of Northern Patagonia. *Annals of the Association of American Geographers*, 78(1):93-111.

Vucetich, J.A., Reed, D.D., Breymeyer, A., Degórski, M., Mroz, G.D., Solon, J., Roo-Zielinska, E., y R. Noble 2000. Carbon pools and ecosystem properties along a latitudinal gradients in northern Scots pine (*Pinus sylvestris*) forests. *Forest Ecology and Management* 136: 135-145.

Walker, R.F., Johnson, D.W., Geisinger, D.R., y J.T. Ball 2000. Growth, nutrition, and water relations of ponderosa pine in a field soil as influenced by long-term exposure to elevated atmospheric CO₂. *Forest Ecology and Management*, 137:1-11.

Waring, R.H, y S.W. Running 1998. Forest Ecosystems. Analysis at multiple Scales. 2nd. Ed., Academic Press, San Diego, USA, 370 pgs.

Waring, R.H. 1991. Responses of Evergreen Trees to Multiple Stresses. In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). Response of Plants to Multiple Stresses. Academic Press. Chapter 17: 1317-390.

Wigley T.M.L. 1999. The Science of Climate Change: Global and U.S. Perspectives. The Pew Center on Global Climate Change, 25 pgs.

PARTE II - CARBONO EN BIOMASA INDIVIDUAL

6 - MATERIALES Y MÉTODOS

La evaluación de biomasa a nivel individual constituyó un paso necesario para estimar el secuestro de carbono a nivel de stand o rodal. A nivel de árbol, en este trabajo se analizaron: (1) las relaciones entre la biomasa de fuste, ramas, follaje y raíces leñosas de pino ponderosa y de ciprés de la cordillera (Laclau 2003a, 2003b) y las variables dendrométricas *diámetro* y *volumen del fuste*, (2) los cambios en la relación raíz:tallo en función del tamaño de árboles de ambas especies, (3) las diferencias en la biomasa de pino ponderosa entre sitios de diferentes condiciones de precipitación, y (4) la distribución espacial de la biomasa aérea de pinos y cipreses, y de la biomasa subterránea de pinos. Con las plantas herbáceas y arbustivas de la estepa, también se estudiaron las relaciones entre su biomasa aérea y subterránea y variables mensurables como el diámetro basal en coirón dulce, o el diámetro proyectado de la copa y la altura, en neneo y abrojo (*Acaena splendens* Hook et Arn.).

Las actividades de campo y laboratorio se desarrollaron en varias etapas. Las mediciones de los componentes de la biomasa individual, realizadas a través de muestreos destructivos permitieron obtener relaciones *alométricas* (Mateucci y Colma 1982). Esta metodología es ampliamente utilizada para la estimación de una variable a partir de la medición de otra correlacionada (por ejemplo, Suzuki y Hiura 1999, Woomey y Palm 1998, Verwijst y Da-Zhi-Wen 1996, Callaway *et al.* 1994). Con estas relaciones se estimó luego la biomasa del rodal a partir de inventarios de su estructura de diámetros (Parte III).

Para estimar la biomasa individual de árboles de ciprés de la cordillera y de pino ponderosa, se seleccionaron y extrajeron árboles completos con una amplia dispersión de tamaños en distintos sitios, en cantidad suficiente para detectar las relaciones buscadas y dentro de límites razonables de costo y tiempo. También se cosecharon al azar, plantas completas de coirón, neneo y abrojo, componentes de la estepa arbustivo-graminosa comunes en los pastizales contiguos a las forestaciones y bosques cordilleranos (Bonvisutto y Somlo 1998, León *et al.* 1998, Bertiller y Bisigato 1998). Estas tareas se realizaron entre los años 2000 y 2003, complementando observaciones en áreas más xéricas en 2005. La metodología aplicada se describe más abajo. Paralelamente, se trabajó en el análisis y elaboración de modelos parciales explicativos de la distribución de biomasa y carbono en los sistemas estudiados, y se realizó una evaluación económica del secuestro de CO₂ por plantaciones de pino. En la Figura 6-1 se indican los sitios de recolección de cada especie



Figura 6-1. Mapa de ubicación de las parcelas de evaluación de biomasa individual (círculos) de árboles de ciprés (sitio El Bolsón, RN) y de pino (sitios Catan Lil, San Ignacio, Chapelco y Filo Huahum, Neuquén). Se indican los lagos y ríos, y los límites provinciales.

6.1 MEDICIÓN DE BIOMASA INDIVIDUAL

Extracción de individuos

Las plantas fueron seleccionadas en sitios con plantaciones densas siguiendo los siguientes criterios:

- Al menos dos clases de edad en pino ponderosa
- Sitios relativamente planos y sin impedimentos edáficos evidentes a la profundidad de excavación
- Mínima o nula intervención de poda
- Cobertura de un rango diamétrico variado hasta un límite superior compatible con el esfuerzo y costo de intervención (fijado en 35 cm de dap tanto para pino como para ciprés)

En la Tabla 6.1-1 se indica el número de individuos cosechados por sitio. Las formas de extracción de raíces variaron según sitios y posibilidades locales de ejecución manual o mecánica. Los pinos de las plantaciones más jóvenes -entre 5 y 10 años de edad- (Chapelco, San Ignacio y Catan Lil), fueron removidos íntegramente con pala, separando su tallo, ramas, follaje y raíces para pesado y secado posterior, hasta una profundidad de 60-70 cm. En Chapelco también se estudiaron raíces de pinos de 20 años de una plantación recientemente talada, removidas con retroexcavadora recuperándose raíces hasta un diámetro de 0,5-1,5 cm. Los pinos de Catan lil de 15 años se excavaron hasta un metro de profundidad. Los pinos de Filo Huahum, de mayor porte, se extrajeron mecánicamente con la siguiente secuencia operativa: (a) apeo del fuste completo con motosierra, a ras del suelo, (b) aflojado de raíces con pala topadora, (c) tracción y descalzado con cable y malacate y (d) excavado con pala del suelo hasta una profundidad de 60-70 cm, y a partir de

allí, remoción de suelo a mayor profundidad y lateralmente, descalzando raíces gruesas remanentes hasta un diámetro mínimo aproximado de 0,5-1,0 cm y longitudes máximas de hasta 2 m. En el caso de los cipreses cosechados en El Bolsón, la extracción de todos los individuos fue íntegramente manual, según el siguiente procedimiento: (a) excavación con pala de cada planta en pie, hasta descalzar completamente sus raíces principales superiores, (b) sujeción del fuste con una cuerda para guiar la caída, (c) corte con hacha de las raíces opuestas a la dirección de caída para liberar el árbol, que cae suavemente y (d) remoción del hoyo desraizado para recuperar raíces principales hasta un diámetro mínimo aproximado de 0,5 cm, incluyendo raíces profundas que superaban los dos metros. Tanto en Chapelco, como en Catan lil y en El Bolsón se midieron las dimensiones del hoyo excavado y del suelo removido con pala sobre la misma excavación.

Las plantas completas de coirón blanco, neneo y abrojo fueron extraídas en abril y noviembre de 2002 a razón de 15 individuos de cada una de las tres especies en ambas cosechas, y en octubre de 2003 (11 plantas de coirón blanco solamente). Para su remoción, fueron excavados con pala y los individuos incluyeron el material senescente adherido. Todas las plantas fueron cosechadas en el paraje Chapelco, Neuquén, en un área con historia de uso ganadero de al menos 150 años (Cox 1863, de Amador 1948), y con una precipitación media anual de 900 mm. Para su selección se recorrió el sitio identificándose el rango diamétrico de plantas presentes, para tomar luego al azar plantas de distinto diámetro. Previo a su extracción, se identificó cada planta, realizándose las mediciones correspondientes (ver más abajo). En el caso de las plantas de neneo, cuyas raíces son profundas, se excavó hasta 40-60 cm, descartándose las raíces que crecen a mayor profundidad.

Fernández y Paruelo (1988) midieron perfiles de *longitud* de raíces de esta planta; las que alcanzaron hasta 1 metro de profundidad, con su máximo de expresión a los 40-50 cm. Sin embargo, la raíz principal, de forma pivotante, concentraría la mayor proporción de la biomasa dentro de los primeros 40 cm de profundidad (Soriano y Sala 1983). Las plantas de coirón blanco y abrojo se excavaron a menor profundidad -aproximadamente hasta 30 cm-, la que da cuenta de la casi totalidad de biomasa en profundidad, para los pastos (Jackson *et al.* 1996, Soriano *et al.* 1987).

Los equipos e instrumentos utilizados en las actividades de extracción fueron cintas dendrométricas vinílicas para selección de árboles, cintas plásticas para marcación, palas, hacha y machetes, y cuerdas de alambre o nylon. Las plantas de gran porte fueron apeadas con motosierra, y se utilizó un tractor forestal con pala topadora y malacate para la remoción mecánica de algunas raíces. Todas estas tareas fueron realizadas por grupos de dos o tres personas.

Separación de muestras y mediciones a campo

Los fustes extraídos fueron medidos en su longitud total, y en sus diámetros basal (d_0), a la altura del tocón (dat , a 0,30 m), a la altura del pecho (dap), y en la mitad de cada tramo sucesivo de 0,50 m desde el dat hacia el ápice en el caso de los cipreses, donde también se contabilizó el número de ramas vivas y muertas en tramos de fuste de 0,50 m c/u, con excepción del tramo apical cuya medida fue igual o menor a este valor. En cambio, en los pinos, los tramos de fuste fueron segmentados en los entrenudos con su verticilo basal correspondiente, contándose el número de éstos, midiéndose su longitud, y el número de ramas vivas y muertas de cada verticilo. Las ramas de cada verticilo de los pinos (o de cada tramo de 0,50

m de fuste de los cipreses), fueron cortadas con serrucho y pesadas en fresco con una balanza digital con precisión de 10 g. Luego se tomó una rama de diámetro basal promedio con su follaje por cada verticilo o sección, se rotuló y se embolsaron la rama y las hojas en sub-muestras separadas para secado en estufa. Este procedimiento llevado a cabo con ciprés, permitió mantener la correspondencia entre cada rama y su follaje. En cambio, con los pinos, por razones operativas, se juntaron las hojas de distintas ramas debieron juntarse, y se formó una muestra compuesta compuesta de hojas de cada árbol para secado.

Por otra parte, el raigón y las raíces laterales de las plantas más grandes se pesaron separadamente con una balanza digital con precisión de 250 g, tomándose sub-muestras de aquellas más voluminosas para su transporte, que fueron pesadas en fresco, embolsadas y rotuladas para secado posterior. Los raigones fueron llevados completos al laboratorio (en los árboles relativamente pequeños, de dap aproximadamente menor a 12 cm, también se llevaron al laboratorio la totalidad de las raíces removidas, en vez de sub-muestras).

En el caso de las especies de la estepa, previo a su extracción se midió el diámetro basal de las plantas de coirón blanco y los diámetros mayor y menor de la copa de cada neneo y abrojo. También se midió la altura de cada individuo. Las plantas de coirón y también las plantas pequeñas de neneo y abrojo fueron llevadas completas al laboratorio (incluyendo la totalidad de las raíces removidas), en tanto que los arbustos mayores fueron pesados en fresco con balanza digital (con precisión de 10 g) y fraccionados en sub-muestras para secado en laboratorio. En estos arbustos se

separaron tres fracciones: material verde, tallos con hojas muertas adheridas, y raíces. Las mismas fueron pesadas, embolsadas y rotuladas.

Secado y volumetría en laboratorio

El secado de cada fracción cosechada de los árboles se realizó en estufa, promediando entre 72-120 h a 70° C, de acuerdo con el tipo de material (herbáceo, leñoso fino, grueso). Para ello se utilizaron bolsas de papel rotuladas y una balanza digital con precisión de 1 g. Con los valores de peso seco hallados para cada árbol y fracción respectiva, se establecieron coeficientes de peso seco que se aplicaron a la totalidad de las ramas, hojas, raíces laterales y raigón. El peso seco de cada fuste fue estimado calculando su volumen con corteza por la fórmula de *Smalian* (es decir, sumando los volúmenes parciales de las secciones de fuste medidas) (Prodan *et al.* 1997), y multiplicándolo por la densidad específica de la madera. Los valores de densidad de madera utilizados fueron 0,434 Kg.dm⁻³ para pino y 0,512 Kg.dm⁻³ para ciprés. Estos valores corresponden al promedio determinado por secado de tarugos de madera extraídos con barreno de Pressler (Kuusela y Nyysönen 1981) de árboles de diferentes sitios, abarcando un amplio rango pluviométrico (500-1.500 mm).

En el laboratorio, las plantas de coirón fueron separadas en las siguientes fracciones: follaje verde, amarillo y gris (follaje muerto en pie), incluyendo vainas y bases foliares, y raíces. Cada una de estas fracciones de cada planta fue pesada en fresco y junto con las de los arbustos se secaron en estufa (72-96 h, 70°C), pesándose luego con balanza digital de precisión de 1 g.

Distribución de la biomasa aérea

Para analizar la distribución vertical de la biomasa de *copas*, se siguieron los siguientes pasos:

- (1) Se multiplicó el peso seco de cada rama cosechada y secada en laboratorio -que representa al promedio de cada segmento de fuste o verticilo de los árboles-, por el número de ramas que había en los mismos tramos. Esto dió cuenta de la biomasa parcial de segmentos horizontales de copa, representados por los cilindros superpuestos de la Figura 6.1-1.
- (2) Se multiplicó el peso seco de las hojas de la rama promedio secada en estufa, por el número de ramas *con hojas* presentes en cada segmento correspondiente. Esto se realizó sólo con ciprés.
- (3) Se agruparon las estimaciones individuales según clases diamétricas (0-5, 5-15, 15-25 y 25-35 cm), -excepto en pinos, donde no se contó con mediciones para la clase 0-5 cm-, y se promediaron los valores hallados dentro de cada clase para cada segmento de copa, y se sumaron los pesos parciales de ramas y hojas para totalizar la biomasa de las copas. También se establecieron relaciones *peso hojas:peso ramas*, y de cambios de magnitud de biomasa total de copa entre clases diamétricas sucesivas.
- (4) Se realizaron perfiles (histogramas de barras horizontales) de distribución vertical media por clase diamétrica.

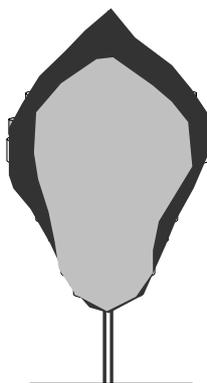


Figura 6.1-1. Perfil de distribución de la copa. El área grisada oscura representa la biomasa de hojas, que se distribuye en la periferia expuesta a la luz, en tanto que el área gris claro, es la porción interna de la copa, desprovista de hojas. Cada cilindro representa el peso seco de un segmento horizontal de la copa definido por el peso seco unitario de ramas u hojas, multiplicado por el número total de ramas (biomasa de ramas), o por el número de ramas con hojas (biomasa foliar) observados.

Por otra parte, para analizar la distribución vertical de la biomasa del *fuste*, se elaboraron perfiles de peso seco acumulado del fuste, ramas y hojas de cipreses de diferentes dap, y curvas de peso seco acumulado de fuste de pinos y cipreses en función de la altura, categorizadas según diámetro.

Distribución espacial de raíces

Las raíces removidas de los árboles pequeños de pino (dap <17 cm) provenientes de San Ignacio y Catan Lil fueron suspendidas sobre una grilla de alambre con cuadrícula espaciada en 20 cm, (coordenadas planas x- y) midiéndose con cinta métrica la proyección de las raíces sobre cada cuadrícula de 20 x 20 cm, en intervalos verticales de 10 cm a partir del cuello de la raíz (eje z). En las plantas mayores, de 15 años, las raíces se apoyaron en forma invertida sobre la grilla de alambre (el cuello de la planta hacia abajo), pero preservando la conformación espacial natural de las raíces con ayuda de soportes en los casos de raíces laxas,

realizándose idénticas mediciones. Por provenir de suelos arenosos o franco arenosos, y de sitios con vegetación arbustiva o herbácea rala, las raíces no presentaban adherencia importante de suelo o entremezclado con raíces de otras plantas. Igualmente, previo a su medición, fueron lavadas previamente y posteriormente cepillados sus intersticios con escoba. La Figura 6.1-2 ejemplifica la forma de medición practicada. Todos los segmentos de raíces encontrados dentro de un prisma virtual x,y,z de 20 x 20 x 10 cm de lado, fueron cortados con tijera o serrucho de poda, y embolsados en bolsas rotuladas de papel para su secado y pesado. Esta tarea se realizó desde los extremos de las raíces hacia los bordes del raigón. Luego de removida la totalidad de las raíces laterales se estimó, a partir del diámetro proyectado sobre el plano xy , la ubicación espacial de cada porción del raigón, estimándose su peso seco a partir de pesado en fresco, sub-muestreo y secado. De este modo se obtuvo la distribución del peso seco radical lateralmente y en profundidad.

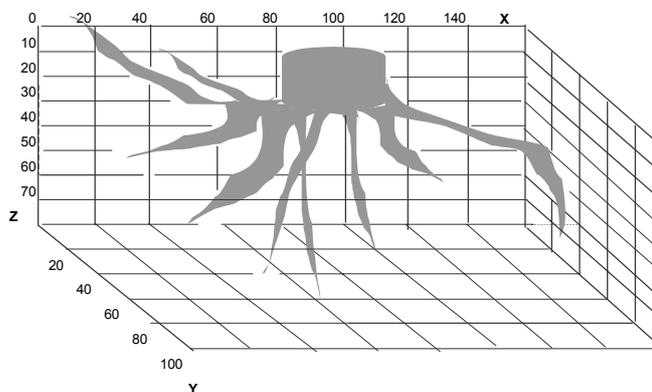


Figura 6.1-2. Esquema de disposición espacial de raíces. Las grillas verticales y la horizontal, definen un espacio x, y, z . Las líneas de división horizontal (ejes x e y) son de 20x 20 cm, en tanto que las verticales (eje z), son de 10 cm.

Una síntesis de las determinaciones realizadas se indica en la Tabla 6.1-1, consignándose también el número y rango de tamaño (dap) de plantas, los compartimentos evaluados, y las variables medidas en el campo o en el laboratorio.

Tabla 6.1-1. Variables de muestreo de árboles individuales. Se detallan los sitios de muestreo de árboles individuales, características de la plantación y el sitio, fecha de muestreo, número de muestras, variables medidas a campo y en laboratorio, por compartimento evaluado.

ESP	SITIO	CARACTERISTICAS	Nº IND	FUSTE	RAMAS	HOJAS	RAIGON	RAICES LAT.
PINO PONDEROSA	CHAPELCO	Plantación 20 años, 850 mm de precipitación anual (junio, 2000)	33 (raíces)				Diámetro basal, peso seco, volumen	Peso seco, distribución espacial (horizontal)
		Plantación 10 años, 850 mm de precipitación, anual rango de dap: 2,6-9,0 cm (nov 2000)	18	Diámetro, edad, altura total, largo entrenudos, peso seco (por volumetría)	Nº y posición verticilos, nº ramas vivas y muertas, longitud total media y longitud verde media por verticilo, diámetro basal, edad, peso seco	Peso seco por verticilo, longitud de acículas	Diámetro basal, peso seco	Peso seco, volumen de suelo explorado
	Plantación 20 años, 900 mm de precipitación anual rango de dap: 11,0-34,0 cm (enero 2001)	16	Diámetro basal, peso seco, volumen					
	SAN IGNACIO	Plantación 5 años, 500 mm de precipitación anual (ag-sept 2005)	3			Diámetro basal, peso seco.	Peso seco, volumen de suelo explorado, distribución espacial	
		Plantación 10 años, 500 mm de precipitación anual (ag-sept 2005)	3			Diámetro basal, peso seco (por volumetría).		
	CATAN LIL	Plantación 15 años, 550 mm de precipitación anual (ag-sept 2005)	3					
	EL BOLSON	Plantines de vivero, 900 mm de precipitación anual (agosto 2005)	50	Diámetro basal, altura total, peso seco		Peso seco total		Longitud total, peso seco, distribución espacial
Bosque nativo multietáneo, 900 mm de precipitación, rango de dap: 1,2-34,0 cm (mar, abr, mayo 2001)		35	Diámetro, edad, altura total, largo secciones fijas de tronco, peso seco (por volumetría)	Nº ramas vivas y muertas, longitud total media y longitud verde media por sección, diámetro basal, edad, peso seco	Peso seco por sección de fuste	Diámetro basal, peso seco.	Peso seco, volumen de suelo explorado	

6.2 ANÁLISIS DE DATOS

Con el peso seco total determinado para las hojas, ramas, fuste, raigón y raíces gruesas de cada árbol, se ajustaron funciones de regresión *peso seco-diámetro* (d_{ap} y d_0) y *peso seco-volumen individual* para cada especie. También se analizaron otras relaciones entre variables de copa y biomasa. La significancia de la pendiente de las funciones fue evaluada mediante análisis de varianza, y se compararon los estimadores de biomasa entre ambas especies con pruebas t (Sokal y Rohlf 1999, Zar 1996). También se compararon mediante análisis no paramétrico (prueba de Wilcoxon, Sokal y Rohlf 1999), las diferencias entre estimaciones de biomasa de pinos de sitios más húmedos (Chapelco, Filo Hua-hum) *versus* individuos de sitios con marcado déficit hídrico (San Ignacio, Catán Lil). La distribución vertical de biomasa aérea fue analizada gráficamente con perfiles de fuste y gráficos de la altura relativa del ancho máximo de copa, para ambas especies forestales. También se calculó el volumen de copas. La distribución espacial de biomasa subterránea de los pinos de los sitios más xéricos (aquellos de precipitación anual menor a 600 mm indicados en la Tabla 6.1.1) fue representada gráficamente, y se calculó el volumen total de suelo explorado (del área excavada, midiendo su diámetro y profundidad medias), el volumen relativo de raíces, y las profundidades y distancias máximas determinadas.

El peso seco de las fracciones de los coirones y las arbustivas fue ajustado por el método de mínimos cuadrados, en función del diámetro y del diámetro-altura. Se realizaron análisis de variancia de la pendiente de las rectas de regresión (Zar 1996).

7 - RESULTADOS

En las secciones siguientes se presentan los resultados de las evaluaciones realizadas. En primer término se muestran los valores de biomasa individual según el tamaño de las plantas (sección 7.1), y las relaciones alométricas que se derivan (sección 7.2). Luego se presentan los datos y análisis referidos a la distribución espacial de la biomasa de árboles (sección 7.3) y finalmente los referidos a la partición aéreo-subterránea de la biomasa (sección 7.4).

7.1 BIOMASA POR CLASES DE TAMAÑO

7.1.1 Biomasa de árboles

En la Tabla 7.1-1 se indican los valores promedio de los árboles de pino y de ciprés analizados, agrupados en cuatro clases diámétricas.

Tabla 7.1-1. Biomasa individual de árboles de pino y ciprés por clase diamétrica y fracción. Se indica el dap medio (cm), el número de observaciones, el peso seco medio (g), y su error estándar (itálica). Las letras distintas en cada fila, indican diferencias significativas ($p < 0,05$) entre clases diamétricas para cada fracción. Las diferencias entre especies (ANOVAs Anexo 2.2) se indican como: (*): $p < 0,10$; *: $p < 0,05$; **: $p < 0,01$; ***: $p < 0,001$, y ns: no significativas. Las muestras fueron tomadas en junio y noviembre de 2000, en enero de 2001 (pinos); y en marzo, abril y mayo de 2001 (cipreses).

CLASE DAP	0-5 cm	5-15 cm	15-25 cm	25-35 cm
<u>PINO PONDEROSA</u>				
dap medio	3.7	9.8	19.7	28.5
n observaciones	7	26	25	7
FUSTE	1.841 ^a 207	17.239 ^a 2.583	65.400 ^b 3.679	145.142 ^c 24.281
RAMAS	821 ^a 99	2.471 ^a 422	18.238 ^b 7.712	32.432 ^c 1.905
HOJAS	2.036 ^a 204	3.696 ^a 496	14.197 ^b 3.259	17.280 ^b 3.399
RAICES GR.	297 ^a 37	1.246 ^{ab} 191	6.620 ^b 1.166	26.927 ^c 8.910
RAIGON	778 ^a 80	3.249 ^a 362	15.406 ^b 1.741	32.907 ^c 3.788
TOTAL	5.773 627	15.137 4.054	119.862 17.757	254.687 42.283
<u>CIPRES DE LA CORDILLERA</u>				
dap medio	2.7	9.9	19.4	29.8
n observaciones	5	9	12	9
FUSTE	946 ^a 337	26.035 ^a 6.607	131.143 ^b 15.362	328.40 ^c 26.012
RAMAS	358 ^a 56	5.531 ^{ab} 1.511	23.767 ^b 2.944	72.615 ^c 11.194
HOJAS	519 ^a 70	2.090 ^{ab} 478	7.854 ^b 1.399	19.704 ^c 2.664
RAICES GR.	350 ^a 102	2.469 ^a 452	8.573 ^b 1.058	20.203 ^c 854
RAIGON	175 ^a 53	1.713 ^a 297	8.672 ^b 1.045	19.087 ^c 1.728
TOTAL	2.348 618	37.837 15.952	180.010 21.808	460.009 42.452
<u>Diferencias entre especies</u>				
FUSTE	*	(*)	***	***
RAMAS	**	*	ns	ns
HOJAS	***	*	(*)	ns
RAICES GR.	ns	ns	ns	ns
RAIGON	***	*	*	**
TOTAL	***	**	***	***

En la Figura 7.1-1 se muestra la proporción de hojas, ramas, fuste, raigón y raíces gruesas en árboles muestreados de tamaño creciente agrupando las plantas de pino de las clases de 10 años (sitio Chapelco), y 20 años de edad (sitio Filo Hua hum), o mostrando árboles (de diferentes cohortes) de un mismo bosque de ciprés (sitio El Bolsón), cuyas clases mayores tenían aproximadamente 90 años de edad.

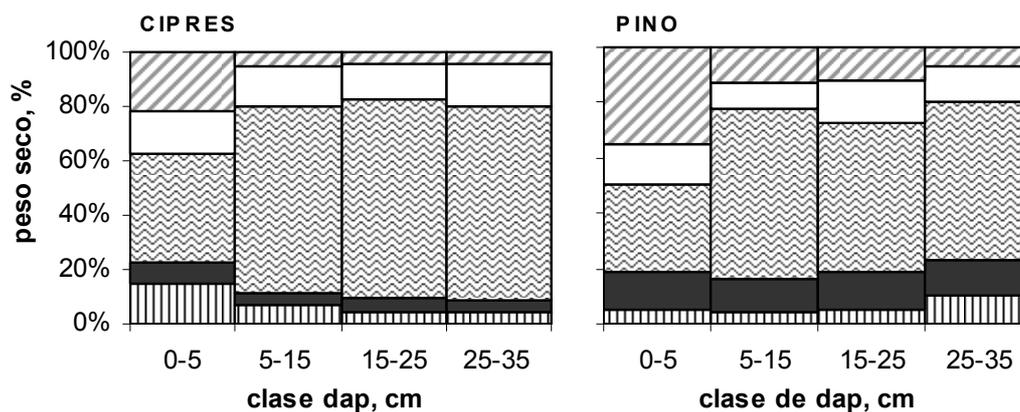


Figura 7.1-1. Distribución porcentual de la biomasa de árboles de pino y ciprés, según su tamaño. Las áreas representan el follaje (rayado grueso inclinado), las ramas (área clara), el fuste (gris, jaspeado), el raigón (gris oscuro) y las raíces laterales (rayado vertical) determinadas en árboles completos. En el eje x se indican las clases diamétricas. Las observaciones sobre pinos fueron realizadas en junio y noviembre de 2000 y en enero de 2001; y sobre ciprés, en marzo, abril y mayo de 2001.

En términos porcentuales, la distribución de biomasa en los compartimentos aéreos y subterráneos evaluados arrojó algunas diferencias entre ambas especies. Analizando las diferencias en la participación relativa de cada compartimento de biomasa entre clases de diámetro (ANOVA y Test de comparación múltiple de Tukey) mostradas en la Figura 7.1-1, pudo observarse que:

- Para ambas especies, el componente foliar fue mayor en la clase 0-5cm ($p < 0,05$), que en las restantes. En pino, la clase de 5-15cm también fue significativamente mayor que las subsiguientes, aunque no hubo diferencias

entre las dos clases mayores. En ciprés, las clases de 5-15cm en adelante, no mostraron diferencias.

- Las ramas no acusaron diferencias significativas entre las clases diamétricas, en ambas especies.
- El fuste en pinos fue mayor ($p < 0,05$) entre la primera y la segunda clase (0-5 y 5-15cm), y entre la tercera y cuarta (15-25 y 25-35cm), aunque no se observaron diferencias entre las clases intermedias. En ciprés, sólo la clase de 0-5cm se diferenció de las restantes.
- Las raíces de los pinos -que en conjunto oscilaron en un nivel cercano al 20% de la biomasa total-, mostraron diferencias entre clases, en las raíces laterales (0,5cm=5-10cm<15-25cm<25-35cm , $p < 0,05$) y sólo entre las clases extremas en el raigón, aunque no entre éstas y las intermedias ($p < 0,05$)
- En los cipreses -cuyas raíces totales oscilaron entre 15 y 20%-, el raigón fue mayor en la clase 0-5cm que en la de 25-35cm, aunque no entre las clases intermedias y estos extremos. Las raíces laterales también fueron significativamente mayores en la clase 0-5cm, pero no arrojaron diferencias en la partición de biomasa entre las clases restantes.
- En ambas especies, el fuste, inicialmente con menos del 40% de la biomasa total, alcanzó una participación del 60-65% en plantas mayores, equilibrándose, en el caso de los cipreses, a partir de la clase de dap: 15-25 cm.
- La biomasa relativa de ramas no manifestaría una tendencia clara en función del tamaño. En los pinos, la casi totalidad de las ramas evaluadas estaban vivas, en tanto que en el ciprés la proporción de ramas muertas adheridas al tronco, cuya abundancia y tamaño es importante en plantas grandes.

7.1.2 Biomasa de arbustos y gramíneas

La Tabla 7.1-2 muestra los resultados del análisis de peso seco para las matas de coirón blanco, las plantas de neneo y de abrojo en cada uno de los momentos de muestreo.

Tabla 7.1-2. Diámetro (cm) y peso seco (PS) por fracción y total, por planta (g.pl^{-1}), y peso seco por unidad de área basal o de cobertura de copa (g.cm^{-2}) observado de *Festuca pallescens* (coirón), *Mulinum spinosum* (neneo) y *Acaena splendens* (abrojo). Los valores corresponden a la media de las muestras de plantas analizadas (n : entre 11 y 15 plantas de cada especie, en cada medición). Las cifras entre paréntesis indican el error estándar. En octubre de 2003 sólo se cosecharon y analizaron muestras de coirón.

Especie / época	Diámetro Medio, cm	Peso seco individual, g.pl^{-1}				Total	PS por unidad de área basal o de copa, g.cm^{-2}
		Aéreo		Subterr.			
		Verde	Amarillo	Seco	Raiz		
<u>Coirón</u>							
Abril 2002	17,3 (1,5)	27,3 (5,6)	17,7 (2,0)	109,6 (23,5)	35,8 (6,4)	190,4 (34,7)	0,74 (0,08)
Noviembre 2002	13,1 (1,9)	40,8 (7,6)	28,9 (7,9)	83,3 (29,9)	28,9 (5,1)	182,0 (17,5)	1,34 (0,17)
Octubre 2003	14,4 (3,3)	20,8 (3,9)	37,0 (10,0)	172,8 (51,4)	35,9 (8,8)	266,5 (36,2)	1,30 (0,13)
<u>Neneo</u>							
Abril 2002	59,0 (8,5)	81,1 (29,4)		364,0 (118)	192,5 (51)	631,8 (181)	0,16 (0,02)
Noviembre 2002	62,7 (7,4)	165,3 (47,5)		327,4 (106)	225,8 (39)	718,5 (71,6)	0,17 (0,02)
<u>Abrojo</u>							
Abril 2002	30,8 (2,6)	48,9 (10,7)		114,5 (18,0)	30,0 (6,7)	193,5 (32,3)	0,25 (0,02)
Noviembre 2002	28,3 (3,7)	127,3 (31,0)		59,1 (18,5)	31,3 (5,3)	217,6 (23,9)	0,31 (0,03)

Las matas de coirón y de abrojo, en el rango diamétrico considerado para cada especie, tuvieron un peso seco promedio entre 180 y 270 g, en tanto que los arbustos de neneo superaron en promedio los 630 g. Estos valores, referidos al área

basal o de canopeo de cada planta según el caso¹¹, arrojaron un peso seco promedio de 0,74 y 1,34 g.cm⁻² para coirón; de 0,16 y 0,17 g.cm⁻² para neneo, y de 0,25 y 0,31 g.cm⁻² para abrojo (abril y noviembre, respectivamente) (Tabla 7.1-2, Figura 7.1-2).

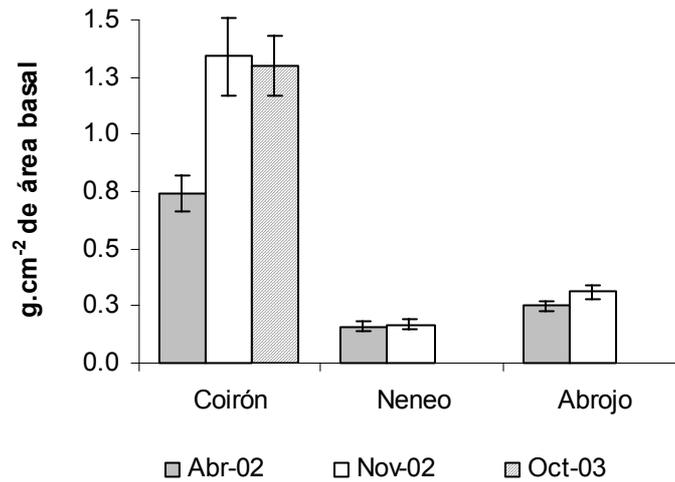


Figura 7.1-2. Peso seco individual, en g.cm⁻² de área basal (matas de coirón blanco), o en g.cm⁻² de copa proyectada (neneo y abrojo), cosechados en abril y noviembre de 2002, y en octubre de 2003 (esta última observación únicamente en coirón). Cada barra del histograma representa la media ± 1 error estándar, de 11 a 15 observaciones en cada caso.

En la Figura 7.1-3 se indica la distribución porcentual del peso seco entre las distintas fracciones, en dos épocas del año (abril y noviembre). Puede observarse que la fracción gris (hojas secas y en el caso del neneo y abrojo, también los tallos vivos) da cuenta del 50% de la biomasa total en otoño y alrededor de un 40% en primavera (excepto en abrojo, cuya fracción no fotosintetizante viva y muerta, es menor al 30% en esta época). La fracción verde tiene fuertes cambios estacionales

¹¹ La conformación de las matas de abrojo, de forma extendida y muy bajas, permitiría asimilar el área de su copa al área basal. En el caso del neneo, arbusto en cojín de forma globosa y cuyos tallos confluyen en una única raíz profunda, las diferencias entre área de copa y área basal son importantes, aunque la primera brinda una idea más precisa de la cobertura de estas plantas.

(también la fracción amarilla del coirón), en tanto las raíces variarían relativamente menos.

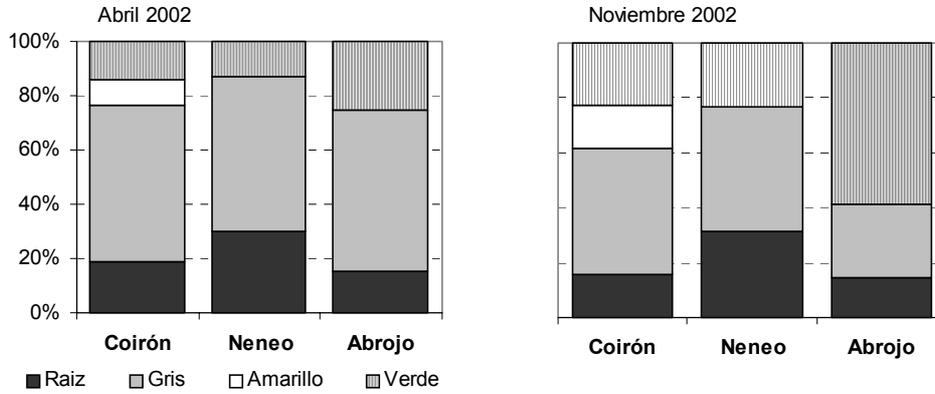


Figura 7.1-3. Distribución porcentual del peso seco individual de plantas de coirón, neneo y abrojo cosechados en abril y noviembre de 2002, entre las fracciones: verde (rayado vertical), amarilla (área sin relleno, sólo en coirón), gris (área grisada, corresponde a material seco en pie de coirón blanco, o seco más vivo sub-leñoso de las arbustivas) y raíces (área oscura). Cada fracción de los respectivos histogramas es el promedio de n=15 plantas de coirón, n=14 (abril 2002) y 15 (noviembre 2002) plantas de neneo, y n= 11 plantas de abrojo. Los datos corresponden a observaciones realizadas en abril y noviembre de 2002, y en octubre de 2003 (únicamente en coirón blanco).

7.2 RELACIONES ALOMETRICAS

7.2.1 Ecuaciones de biomasa individual

Con los valores observados de biomasa de los diferentes órganos de los árboles de ambas especies, y de las porciones aérea y subterránea de las plantas de la estepa, se establecieron relaciones alométricas utilizando el diámetro y el volumen de fuste (transformados logarítmicamente) como variables explicativas. En la Figura 7.2-1 se muestran los valores y las funciones ajustadas para los árboles, basadas en el dap, para estimar su biomasa total individual, la biomasa aérea y la biomasa subterránea (7.2-1A, B y C, respectivamente). En la Figura 7.2-2, se muestran similares observaciones y ecuaciones ajustadas para el coirón blanco y los arbustos. En el Anexo 1 se detallan todas las funciones alométricas ajustadas para todos los compartimentos evaluados en cada especie por análisis de regresión simple, y los estadísticos correspondientes. También se incluyen los análisis de las diferencias entre las regresiones de ciprés y pino.

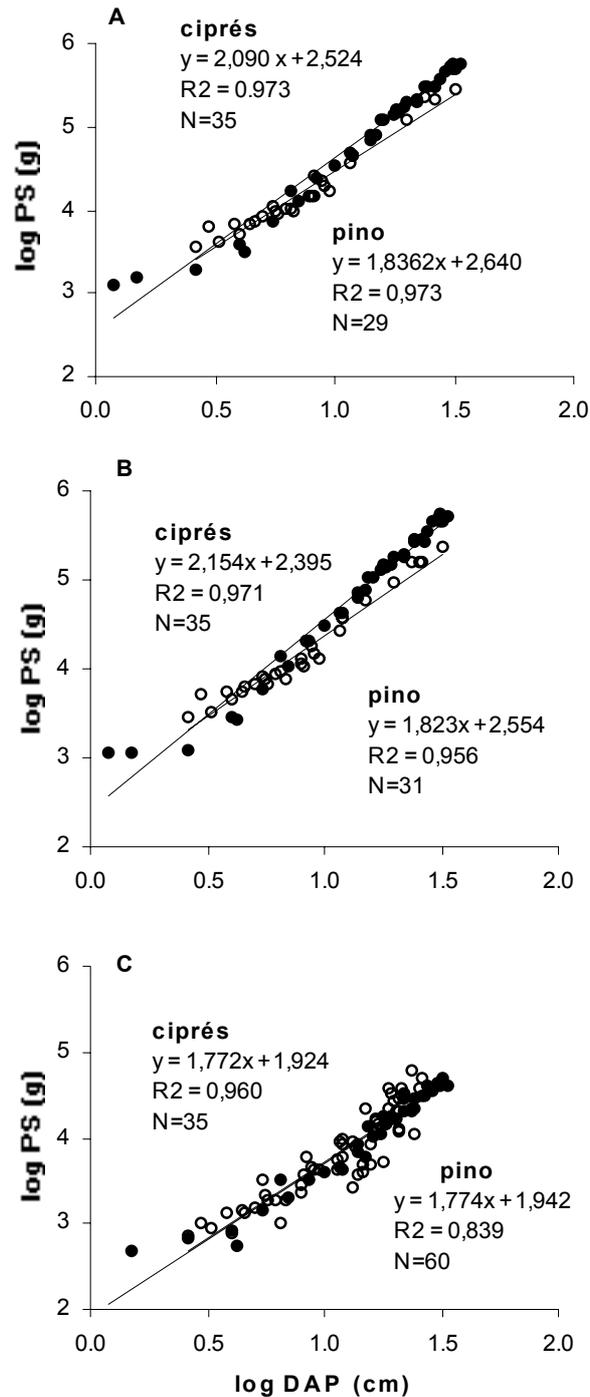


Figura 7.2-1. Biomasa total (A), aérea (B) y subterránea (C) de árboles de diferente diámetro. En cada gráfico, los símbolos llenos representan individuos de ciprés, y los vacíos, de pino ponderosa. Los valores de biomasa y de dap se expresan en forma logarítmica. Se indican además las rectas de regresión, las ecuaciones correspondientes, el coeficiente R^2 , y el número de observaciones (N), para cada especie. En todos los casos las regresiones resultaron altamente significativas ($p < 0,001$). Las observaciones sobre pino fueron realizadas en noviembre de 2000 y enero de 2001; las observaciones sobre ciprés, en marzo, abril y mayo de 2001.

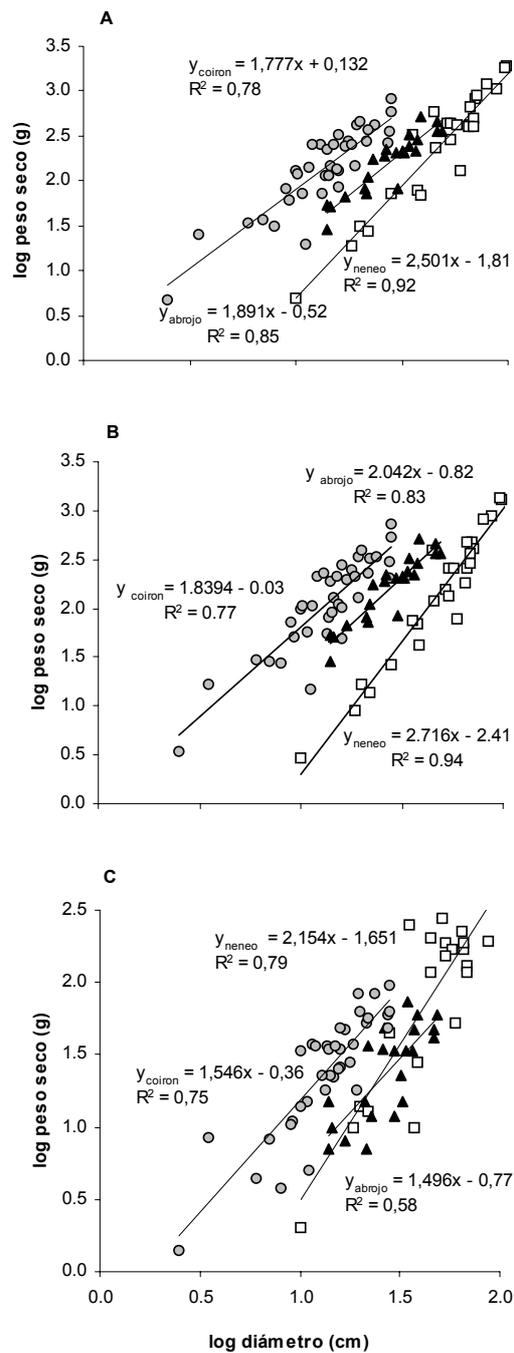


Figura 7.2-2. Biomasa total (A), aérea (B) y subterránea (C) de plantas de coiron blanco (círculos llenos), neneo (cuadros vacíos), y abrojo (triángulos llenos) de diferente diámetro. La biomasa y el diámetro se expresan en forma logarítmica. Se indican además las rectas de regresión, las ecuaciones correspondientes y los coeficientes R^2 . El número de observaciones (plantas) para cada especie fue: $n=37$ para coiron, $n= 29$ para neneo y $n=22$ para abrojo. En todos los casos las regresiones resultaron altamente significativas ($p<0,001$). Los datos corresponden a observaciones realizadas en abril y noviembre de 2002, y octubre de 2003 (únicamente en coiron blanco).

Los modelos de datos transformados y ajustados en función del dap o volumen (Anexo 1), se utilizaron para calcular la biomasa de árboles. En la Figura 7.2-3 se muestran los datos observados (sin transformar) y las curvas de valores esperados de biomasa total individual, según ambas variables explicativas, es decir, las curvas que surgen de la aplicación de las ecuaciones y el cálculo de su antilogaritmo.

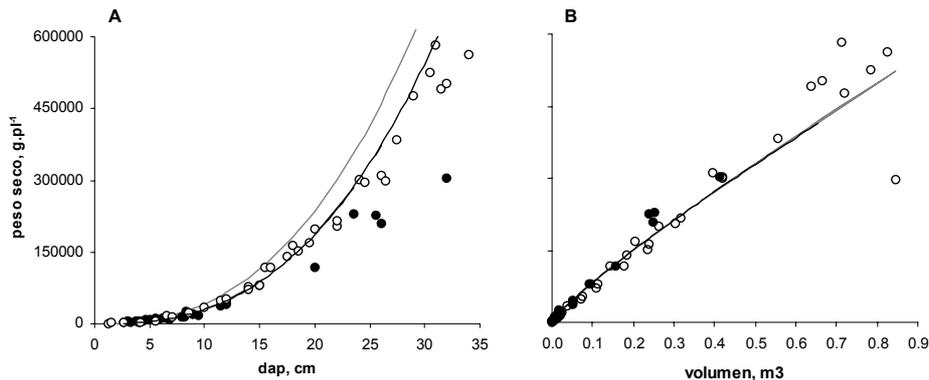


Figura 7.2-3. Peso seco observado en pinos (círculos llenos) y cipreses (círculos vacíos), y curvas de valores estimados a partir de los modelos alométricos ajustados (línea oscura para pinos, y línea gris para ciprés) en función del dap (A) y del volumen de fuste (B). Cada símbolo corresponde a una estimación individual de la biomasa total, obtenida de muestreos realizados en noviembre de 2000 y enero de 2001 (pinos), y en marzo, abril y mayo de 2001 (ciprés).

7.2.2 Análisis de los modelos

Diferencias de biomasa entre especies forestales

Todos los modelos de regresión lineal ajustados para la estimación de biomasa a partir del volumen de fuste o del dap, se presentan en el Anexo 1. La ordenada al origen de las ecuaciones, representa la biomasa al momento en que los árboles alcanzan la altura del pecho (1,30 m), altura a partir de la cual acusan valores de dap. Según estos modelos, las especies presentan diferencias en su tamaño inicial (ordenada al origen de las ecuaciones) y en su tasa de cambio (pendiente de las rectas), respecto de las variables explicativas.

A los efectos de determinar la significancia estadística de estas diferencias, se compararon las regresiones de las distintas fracciones de biomasa de ciprés y pino (cuyas ecuaciones se encuentran en el Anexo 1), mediante pruebas t (Zar 1996) ($H_0:a_1-a_2=0$, $H_1:a_1-a_2\neq 0$ para las ordenadas, y $H_0:b_1-b_2=0$, $H_1:b_1-b_2\neq 0$ para las pendientes, respectivamente). Se encontró que:

(a) En aquellas ecuaciones cuya variable explicativa (x) es el logaritmo del volumen de fuste, las diferencias entre ordenadas (coeficiente a) de ciprés y pino fueron:

- altamente significativas ($p<0,001$) para las regresiones de fuste,
- muy significativas ($p<0,01$) para las de raíces gruesas, y
- no significativas ($p>0,05$) para las de ramas, hojas y raigón.

Para la pendiente de las rectas (coeficiente b) todas las diferencias fueron no significativas ($p>0,05$).

(b) En las regresiones cuya variable explicativa (x) es el dap, las diferencias entre ordenadas (coeficiente a) de ciprés y pino fueron:

- altamente significativas ($p<0,001$) para las regresiones de fuste, raíces gruesas y raigón, y
- muy significativas ($p<0,01$) para las de ramas y hojas.

Al igual que con el modelo anterior, las diferencias de pendiente de las rectas (coeficiente b) fueron no significativas ($p>0,05$).

Es decir que, a partir de estas pruebas estadísticas, los pinos demostrarían en sus etapas iniciales, una mayor biomasa aérea e igual biomasa subterránea que los cipreses. Desagregando en sus componentes respectivos, los pinos darían cuenta

de una mayor o igual biomasa de hojas y raigón, prácticamente igual biomasa de fuste, pero menor biomasa de ramas y raíces laterales. Estas diferencias, dado la no significancia de las diferencias de pendientes, se mantendrían entre ambas especies, con el crecimiento de los árboles. Las tablas de ANOVA correspondientes se presentan en el Anexo 1.

Ecuaciones de biomasa de estepas

Para las tres especies consideradas, los modelos ajustados arrojaron un coeficiente de determinación r^2 próximo o superior a $r^2=0,80$ para la biomasa *total*, *aérea total* y *aérea seca* de las plantas en función del diámetro de la copa (neneo, abrojo) o de la base de las plantas (coirón, Figura 7.2-4). También se observaron ajustes similares para las fracciones porción verde y subterránea de neneo, y algo menor en raíces de coirón blanco ($r^2=0,75$). Sin embargo, los estimadores de las restantes fracciones de coirón y de abrojo arrojaron coeficientes r^2 marcadamente inferiores.

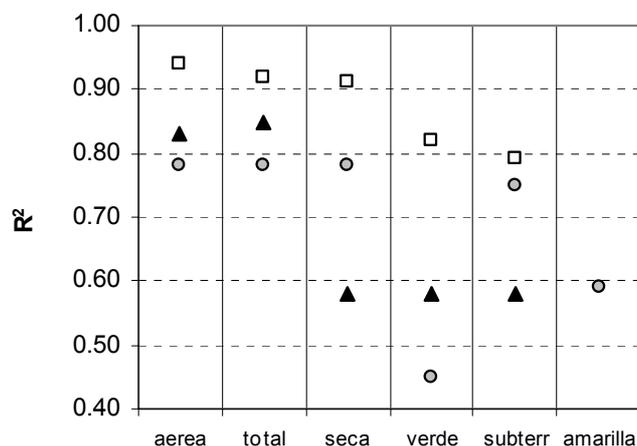


Figura 7.2-4. Coeficientes de determinación R^2 de regresiones de biomasa total, de los componentes aéreo y subterráneo (raíces), y de las fracciones que componen la parte aérea, de neneo (cuadrados), coirón blanco (círculos grisados), y abrojo (triángulos llenos). Las ecuaciones respectivas y sus estadísticos se presentan en el Anexo 1 y en la Figura 7.2-2.

Las ecuaciones desarrolladas para la estimación de la biomasa *total* y *aérea* de cada una de las tres especies (y también el de biomasa *subterránea* en neneo) mostraron algunas semejanzas en las pendientes u ordenadas respectivas (Anexo 1 y Figura 7.2-2). Para comprobar la significancia estadística de estas semejanzas, las ecuaciones se contrastaron mediante pruebas *t* (Sokal y Rohlf 1999, Zar 1996), comparando las ordenadas y pendientes de las regresiones de a pares. En todos los casos, las diferencias entre ecuaciones resultaron no significativas, tanto en las ordenadas como en las pendientes. Cuando se analizaron los datos originales (no transformados logarítmicamente), en este caso mediante ANOVA (con diámetro como covariable) y comparaciones múltiples (test de Tukey), no se encontraron diferencias entre las distribuciones de biomasa *aérea* y *total* para abrojo y coirón ($p > 0,05$), aunque sí para neneo ($p < 0,05$). En las tres especies la biomasa subterránea fue también significativamente diferente de la biomasa aérea y total ($p < 0,05$).

7.3 DISTRIBUCION ESPACIAL DE BIOMASA DE ARBOLES

7.3.1 Biomasa aérea

A un diámetro dado, los cipreses resultaron de mayor altura total que los pinos. La

Figura 7.3-1 muestra esta relación ajustada linealmente.

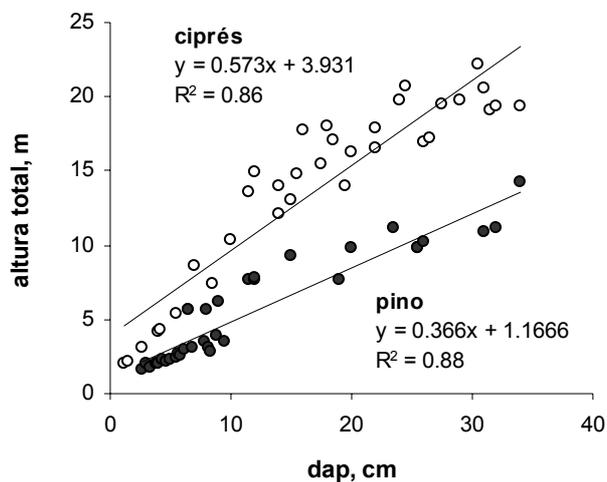


Figura 7.3-1. Altura total (m) en función del dap (cm) de cipreses apeados en un bosque nativo de El Bolsón en marzo, abril y mayo de 2001 (círculos vacíos), y de pinos de Chapelco y Filo Hua-hum (círculos llenos), apeados en noviembre de 2000 y enero de 2001. El número de individuos de ciprés fue $n=35$, y de pinos $n=34$. Se presentan las rectas de regresión y sus valores de r^2 . En ambos casos las regresiones resultaron altamente significativas ($p<0,001$).

En la Figura 7.3-2 se muestra la distribución vertical de biomasa de ramas y follaje (esto último sólo en ciprés), según clase diamétrica. Estos perfiles representan el promedio de algunos individuos medidos en cada clase.

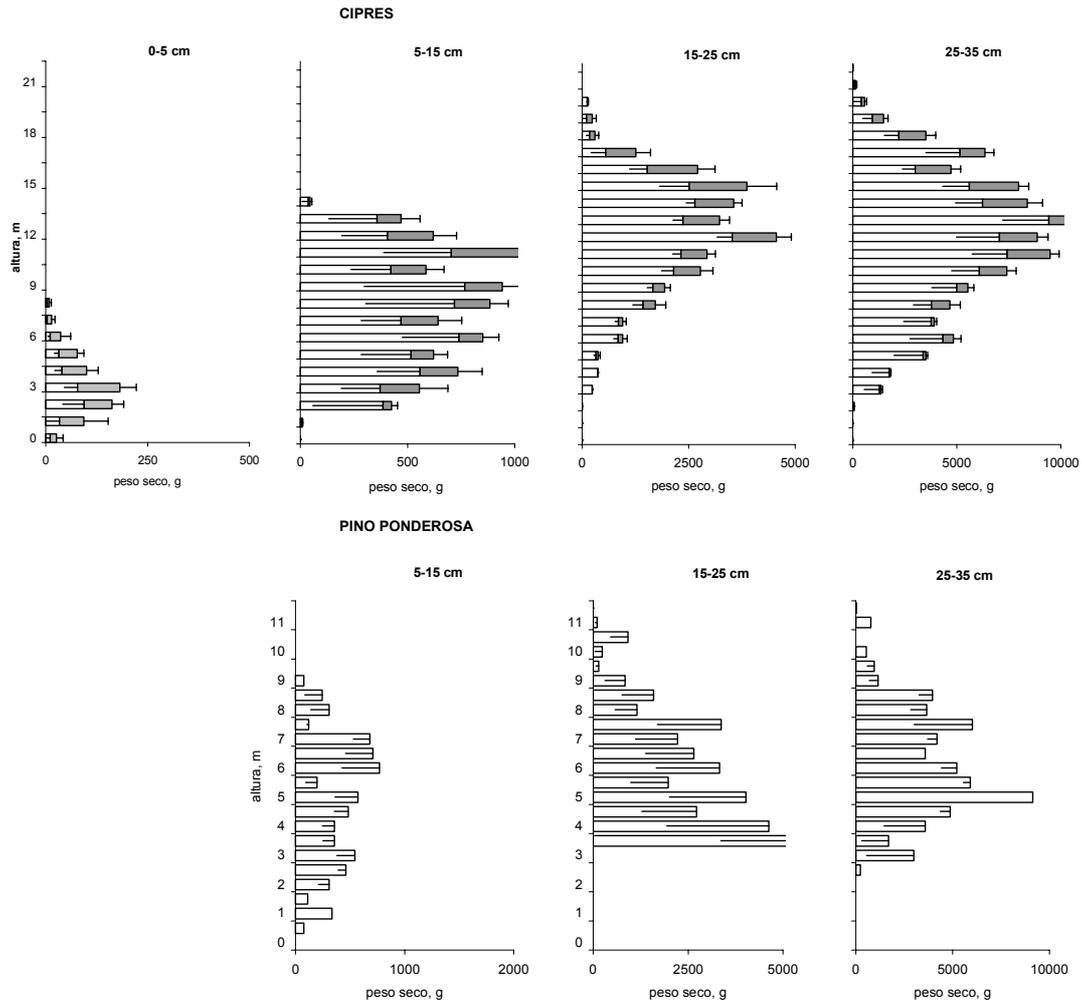


Figura 7.3-2. Perfiles verticales de biomasa de ramas (barras vacías) y follaje (barras grises) de cipreses (gráficos superiores) y pinos (gráficos inferiores), por clase diamétrica. Se indican las barras de error estándar (inferior en el caso de ramas, y superior en el caso de hojas, para mejor visualización). El número de observaciones varió según la clase considerada, entre 4 y 11 para ciprés, y entre 2 y 7 para pinos. Las muestras de pinos fueron tomadas en noviembre de 2000 y enero de 2001; las de ciprés, en marzo, abril y mayo de 2001.

En los gráficos presentados de ciprés, puede observarse que:

- El máximo peso seco de las copas se concentró en la clase diamétrica inferior (0-5 cm) aproximadamente a los tres metros de altura, desde donde decreció hacia ambos extremos del tallo presentando una distribución asimétrica hacia la izquierda.

- En la clase siguiente (5-15 cm), el peso del follaje se distribuyó en forma relativamente homogénea a lo largo del eje de la planta, aunque la variación en ramas fue desuniforme entre segmentos próximos.
- Las clases mayores mostraron una distribución normalizada de las copas, aunque algo asimétrica hacia la derecha. El máximo peso de ramas se verificó aproximadamente a los 13 m de altura del fuste, en tanto que el máximo de hojas se desplazó un metro más hacia el ápice. También se observó la casi ausencia de follaje en los verticilos inferiores, indicando el predominio de ramas muertas. Como puede observarse en la Figura 7.3-3, la participación de ramas muertas en la composición de la copa fue marcada para la especie.
- El peso seco de follaje solo predominó sobre las ramas en la clase diamétrica menor, y las relaciones hojas:ramas, en orden ascendente de clase diamétrica fueron: 1,28→0,31→0,35→0,25.
- Los incrementos de biomasa total de copa en orden ascendente de clase diamétrica fueron (media±1e.e.): 0,7±0,4→8,4±4,4→32,1±10,9→96,8±28,2 kg.

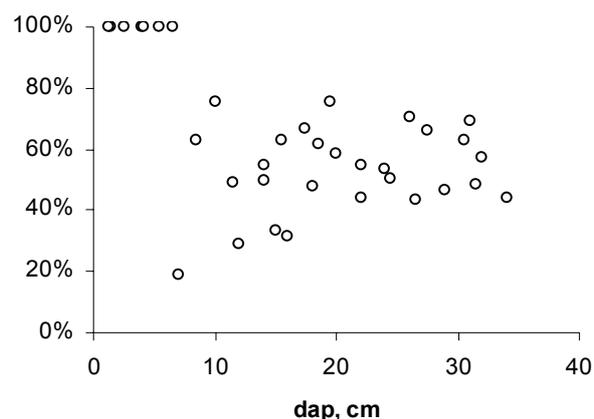


Figura 7.3-3. Porcentaje del número de ramas vivas respecto del total de ramas de árboles de ciprés, en función del diámetro del fuste. Cada círculo representa un árbol (n=35). Datos de muestreo realizado en marzo, abril y mayo de 2001.

En los gráficos de los pinos, se observó que:

- En la clase diamétrica 5-15 cm, las ramas se distribuyeron desuniformemente a lo largo de casi todo el tallo, con el máximo de biomasa entre los 6 y 7 m de altura, y marcada reducción en los extremos basal y apical.
- En la clase siguiente, con discontinuidades, la copa concentró la biomasa en su parte basal, con ausencia de ramas en los primeros 3 m y marcada disminución hacia el ápice.
- Sin embargo, en la clase superior, la biomasa máxima se apartó de la base de la copa, asimilándose a una distribución unimodal y asimétrica a la izquierda.
- Los pesos secos totales de copa en orden ascendente de clase diamétrica fueron (media \pm 1e.e.): 6,7 \pm 2,0 \rightarrow 36,6 \pm 18,8 \rightarrow 58,5 \pm 13,4 kg.

En la Figura 7.3-4 se muestra la biomasa de fuste agrupada según clases de dap, de varios árboles de la muestra.

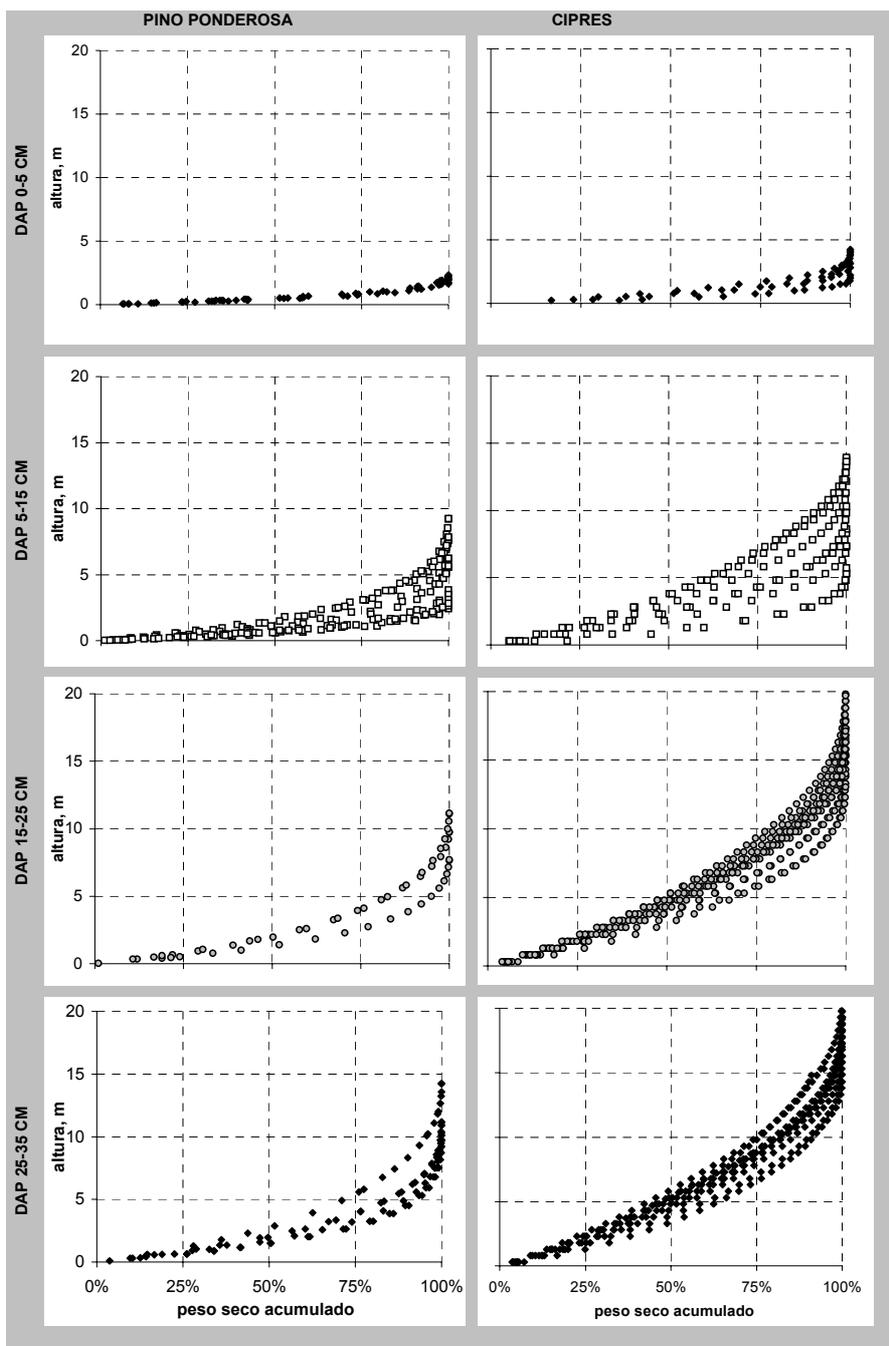


Figura 7.3-4. Distribución vertical de la biomasa de fuste de pinos y cipreses, agrupados en clases de dap. En orden ascendente de clase diamétrica, el número de observaciones (N) fue de 8, 17, 3, 6 (pinos) y 5, 8, 12, 10 (cipreses). Las observaciones en noviembre de 2000 y enero de 2001 (pinos); y en marzo, abril y mayo de 2001 (cipreses).

En los gráficos de fuste presentados, puede observarse que:

- En ambas especies, el peso seco de fuste tendió a concentrarse en el tercio inferior. Así, en el caso de los pinos, el 75% de la biomasa fustal se acumuló por

debajo de los 5 m de altura de las plantas. En los cipreses, el umbral máximo de acumulación del 75% de biomasa fue a aproximadamente 8 m de altura (clase de dap 25-35 cm), aunque en las clases inferiores (0-5 y 5-15 cm de dap) no superó los 5 m.

- Los cambios en la distribución de peso seco en pinos son más marcados entre las dos clases diamétricas inferiores que entre las superiores; tampoco son tan destacados los cambios en ciprés entre las tres clases diamétricas superiores.
- La mayor dispersión de datos para ambas especies se observa en la clase diamétrica de 5-15 cm y la menor en la de 0-5 cm.
- En todos los casos, la proporción de biomasa basal de los pinos es mayor que la de los cipreses, sugiriendo una mayor conicidad de las plantas de la primera especie.
- En las clases de dap mayores, los cipreses excedieron a los pinos en altura en no menos de 5 m, aunque esta distancia entre ambas alturas se redujo en las clases menores de dap.

7.3.2 Biomasa subterránea

El conjunto de raíces gruesas de los árboles analizados, arrojó un peso seco según el diámetro, en el rango de 1,1-59,8 Kg.pl⁻¹ para pino y 0,5-39,3 Kg.pl⁻¹ para ciprés (Tabla 7.3-1). Según se observó en una sub-muestra al azar de 40 raíces laterales del conjunto de 33 raíces tomadas en Chapelco (Tabla 6.1-1), la biomasa se concentra en el raigón y en las porciones próximas de las raíces laterales, decreciendo exponencialmente con la longitud (Figura 7.3-5).

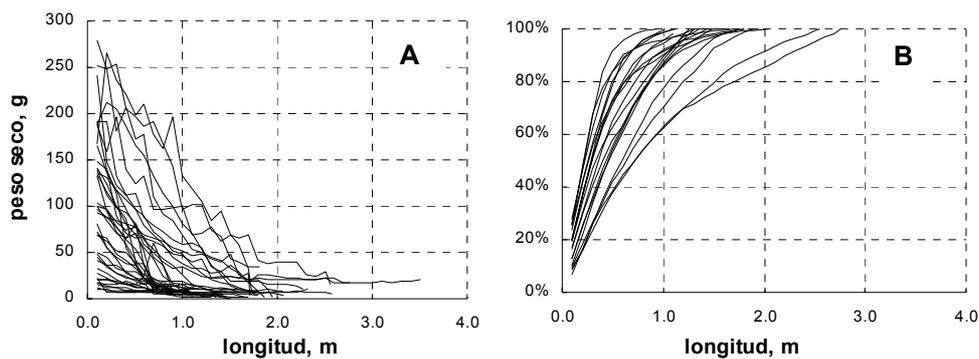


Figura 7.3-5. Peso seco (g) de segmentos sucesivos de 10 cm de largo, de 40 raíces laterales de pinos de 20 años de edad (A), en función de la distancia desde el origen (periferia del raigón). En (B) se muestra la biomasa porcentual acumulada. Cada línea corresponde a una raíz lateral individual. Los datos corresponden a muestras cosechadas en junio de 2000.

En la plantación de pinos de 10 años de edad, en Chapelco, se tomaron las dimensiones de las excavaciones practicadas para remover las raíces. El diámetro promedio de las mismas fue de 91 cm, y la profundidad de 56 cm, totalizando un volumen de suelo removido de $0,361 \text{ m}^3$, aunque se recuperaron raíces individuales más allá de estos límites. Sin embargo, en el inicio de una forestación, el suelo explorado por las raíces individuales fue de 2 dm^3 (valor observado en plantines de vivero destinados a plantación), para aumentar en un rango de 2 a 4 m^3 entre los 5 y 10 años, y superar los 8 m^3 de suelo explorado a los 15 años (Figuras 7.3-6 y 7.3-7). Los diagramas de las Figuras 7.3-7 y 7.3-8 corresponden a pinos de tres edades extraídos de plantaciones de Catan Lil y San Ignacio, Neuquén, en sitios próximos, de características climáticas y edáficas similares. Mediante la metodología descrita en la sección 6.1, se determinó espacialmente la distribución en peso de las raíces gruesas. La Figura 7.3-6 muestra la distribución en el plano horizontal de las raíces de estas plantas, incluyendo además la de plantines de vivero analizados para su comparación (Figura 7.3-6A). Los diagramas ilustran sobre los cambios en la ocupación del suelo, desde el momento de plantación (gráficos de la fila A), a los

cinco años (fila B), a los diez (fila C) y a los quince años (fila D), para tres plantas analizadas de cada edad. Con distintos tonos se indica también la densidad de biomasa (g.cm^{-2}) observada en el área ocupada por cada raíz.

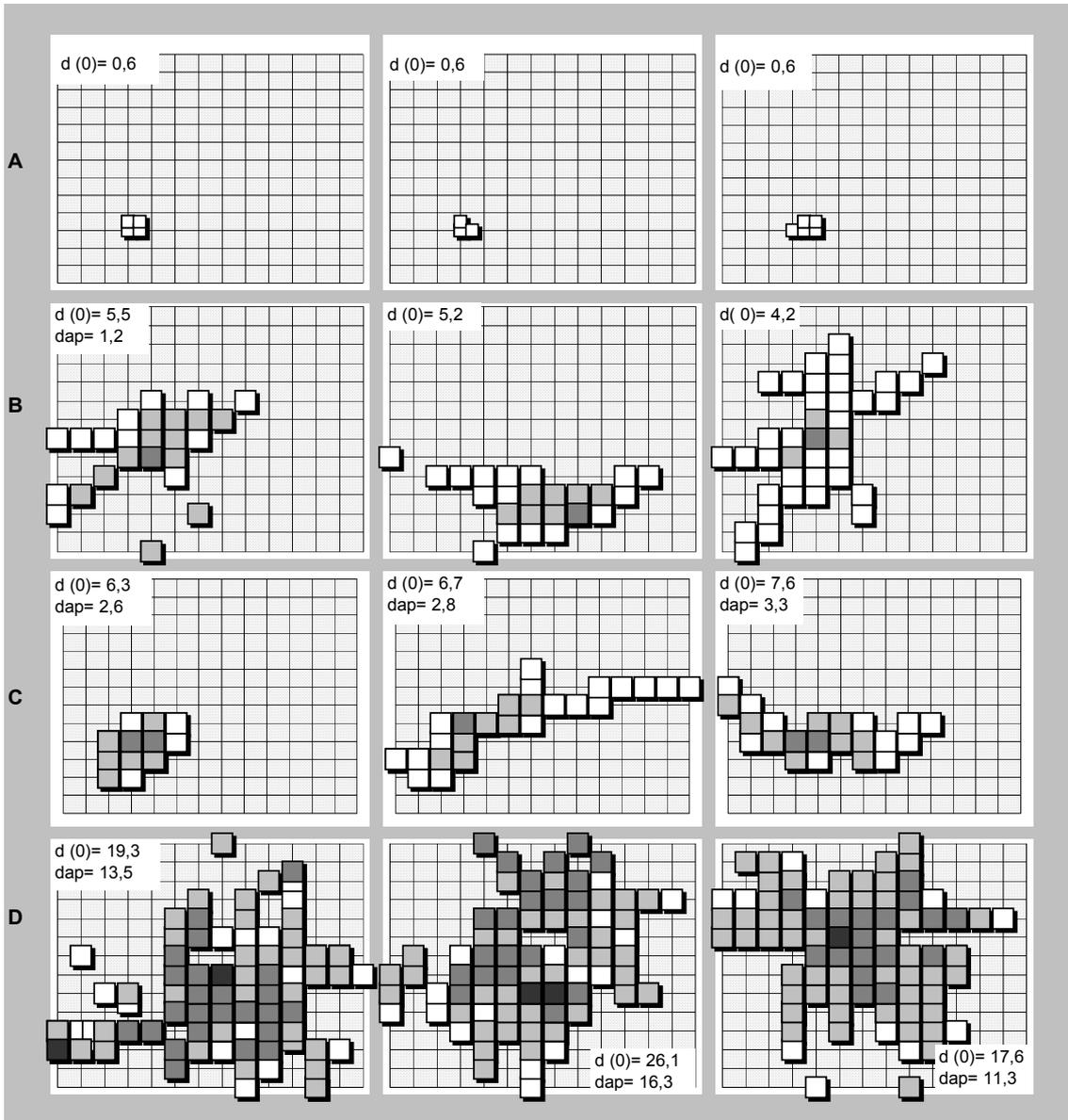


Figura 7.3-6. Diagramas de distribución horizontal de tres raíces de plantines de pino (fila A), de tres árboles de 5 años (fila B), de tres de 10 años (fila C), y de tres de 15 años (fila D) de edad, cosechadas en agosto y septiembre de 2005. Cada recuadro y tamaño de grilla corresponde a un espacio de 20 x 20 cm de suelo en escala horizontal (salvo en el caso de los plantines, donde los recuadros son de 10 x 10 cm). La gama de grises indica diferentes densidades de peso seco observadas dentro de cada espacio de la grilla: □ $\leq 0,0125$; ■ 0,0125-0,125; ■ 0,125-1,25; ■ $> 1,25$ g.cm^{-2} . Se indican los diámetros (cm) en la base del tronco $d(0)$, y en los casos de plantas mayores de 1,30 m de altura, el dap.

La Figura 7.3-7 muestra el perfil de distribución de peso (parcial y porcentual acumulado, en A y B, respectivamente) Puede observarse que al momento de la plantación, los plantines tienen un desarrollo radical concentrado en los primeros 20 cm del perfil de suelo, con una distribución horizontal similar. En etapas sucesivas, conforme la plantación crece, este sistema se expandiría hasta más de dos metros de distancia horizontal (7.3-6B), y un m en profundidad (7.3-7A).

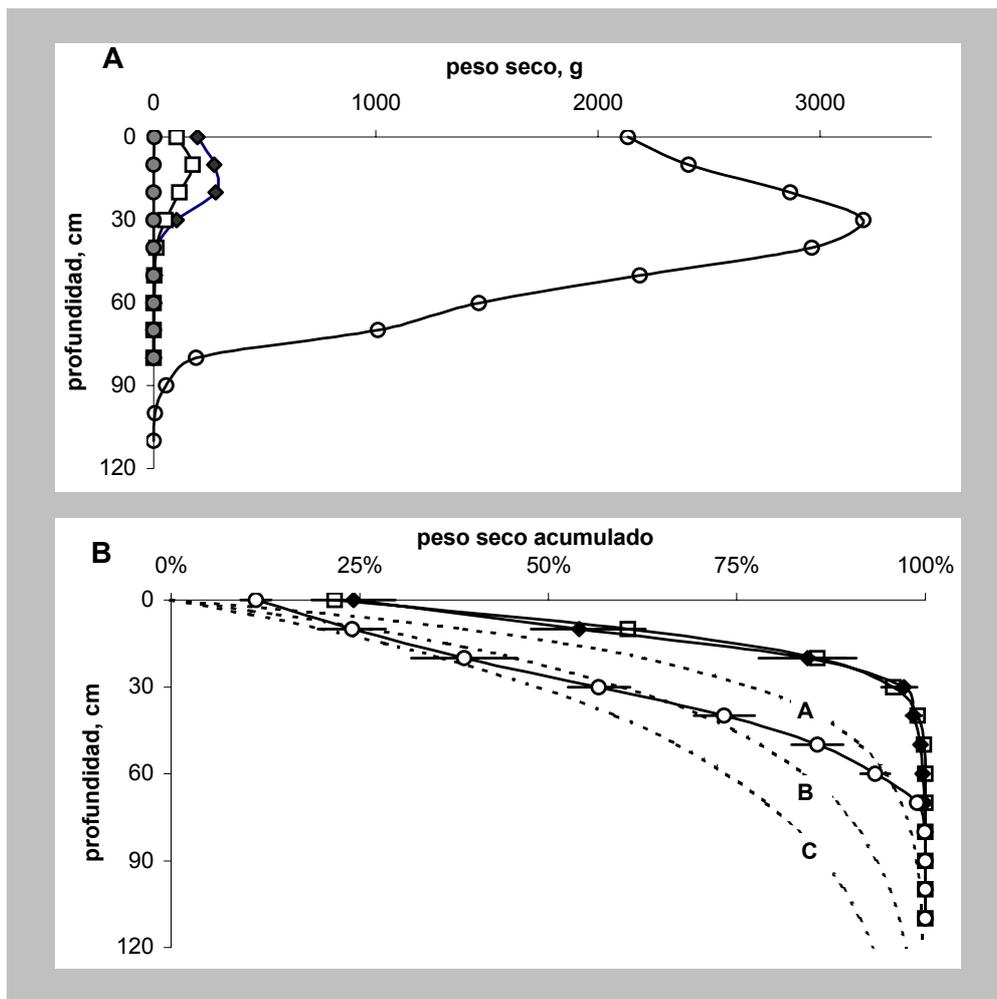


Figura 7.3-7. Distribución (promedio de tres individuos por clase de edad) en peso de las raíces de pinos de 15 años de edad (círculos vacíos), de 10 años (rombos llenos), de 5 años (cuadrados vacíos) y de plantines de vivero (círculos llenos), en valores absolutos (gráfico A) y en porcentaje acumulado desde la superficie (gráfico B), en este caso incluyendo las barras de error estándar. En el gráfico B se indica además la distribución de biomasa subterránea según Jackson *et al.* (1996) para pastos (A), árboles (B) y arbustos (C). Las raíces fueron cosechadas en agosto y septiembre de 2005.

En la Figura 7.3-8 se representa en el histograma a los datos promediados de la biomasa subterránea total de (n=) 3 plantas de cada edad, mostrando la tendencia raíces-edad, para los sitios más xéricos (San Ignacio, Catan Lil), aunque agregando la de un sitio húmedo (Filo Huahum), para mostrar la desaceleración del crecimiento radical a partir de los 15 años. Sin embargo aquí podría haber un efecto de mayor humedad del sitio.

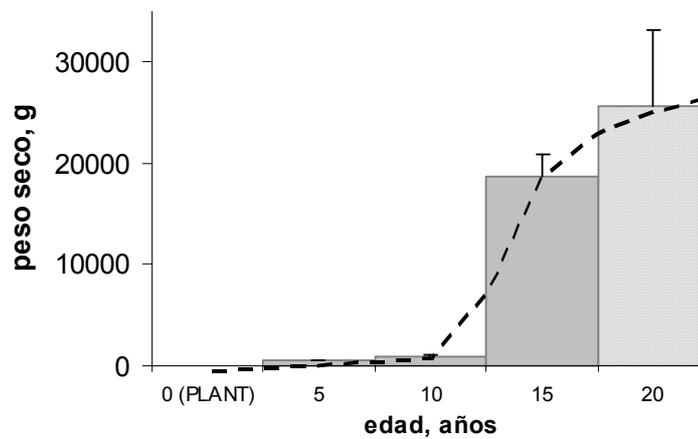


Figura 7.3-8. Peso seco total medio de raíces gruesas de pinos (barras) y líneas de error estándar según edad de los individuos, y línea de tendencia. Las barras grises corresponden a plantas de sitios de baja precipitación anual (< 600 mm), con datos obtenidos en agosto y septiembre de 2005. Se agregó una barra (rayado oblicuo) del peso seco de raíces de un sitio más húmedo (Filo Huahum, 900 mm), datos de muestreo realizado en enero de 2001.

7.4 RELACIONES RAÍZ:TALLO

La partición entre biomasa aérea y subterránea varió sensiblemente entre las plantas analizadas. La relación raíz:tallo de ambas especies de árboles para los diferentes sitios de evaluación se indica en la Figura 7.4-1.

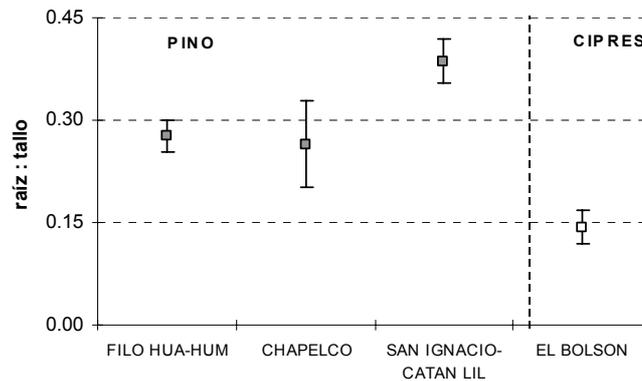


Figura 7.4-1. Relación raíz:tallo de árboles de varios sitios de Neuquén (pinos), y de El Bolsón, Río Negro (ciprés). Los recuadros representan el promedio y las líneas verticales, el error estándar de la media. El número de árboles en cada caso fue: n=12 en Filo Huahum (rango de dap, 6,5-32,0 cm), n=18 en Chapelco (dap: 2,6-9,5 cm), n=9 en San Ignacio- Catan Lil (1,20-16,50 cm), y n=35 en El Bolsón (1,2-34,0 cm). Las observaciones se realizaron en enero de 2001 (Filo Huahum), noviembre de 2000 (Chapelco), agosto y septiembre de 2005 (San Ignacio-Catan Lil); y marzo, abril y mayo de 2001 (El Bolsón).

La diferencia entre pinos y cipreses resultó altamente significativa ($P < 0,001$, Anexo 1), y en promedio, la biomasa subterránea en los cipreses resultó de un 15% de la aérea, *versus* $\geq 25\%$ de relación raíz:tallo en los pinos. No se observaron diferencias entre los pinos de Chapelco y de Filo Hua-hum, aunque pertenecían a clases de edad diferentes (10 y 20 años, respectivamente). Los pinos de San Ignacio-Catán Lil, mostraron la mayor relación raíz:tallo, cercana a 0,40, arrojando una diferencia altamente significativa ($p = 0,001$) con árboles de la misma especie de los sitios más húmedos (Anexo 1). Además, los plantines de pino provenientes de vivero -es decir del tamaño al cual se destinan a plantación-, arrojaron una relación $r:t = 1 \pm 0,04$ (promedio y error estándar, $n = 50$).

Por otro lado, las plantas de coirón blanco y los arbustos evaluados en Chapelco (Figura 7.4-2), arrojaron relaciones raíz:tallo promedio entre 0,25 (coirón blanco, abrojo) y 1,20 (arbustos más pequeños de neneo). Los arbustos de neneo fueron agrupados según su tamaño para observar tendencias en esta relación según el tamaño. Aunque con alta dispersión, los arbustos mayores promediarían un valor raíz:tallo de 0,50, prácticamente el doble que las otras especies.

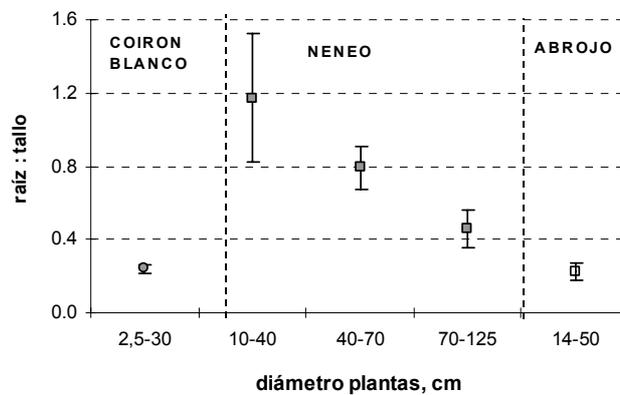


Figura 7.4-2. Relación raíz:tallo de plantas de coirón blanco, neneo (tres clases de tamaño) y abrojo, extraídas en Chapelco, Neuquén. Los símbolos representan el valor promedio de n=37 datos de coirón blanco (círculo grisado), n=10,12,10 datos de neneo de diámetros de copa 10-40, 40-70 y 70-125 cm, respectivamente (cuadros grisados), y n=25 datos de abrojo. Las líneas verticales indican el error estándar de la media. Los datos corresponden a observaciones realizadas en abril y noviembre de 2002, y octubre de 2003 (únicamente en coirón blanco).

8 - DISCUSIÓN

8.1 BIOMASA DE ÁRBOLES POR CLASE DE TAMAÑO Y ESPECIE

Los valores medios de biomasa individual total oscilaron entre 2,3 y 460 kg.pl⁻¹ en cipreses y entre 5,8 y 255 kg.pl⁻¹ en pinos de similares clases diamétricas. En estudios de biomasa de *Pilgerodendron uviferum*, una cupresácea longeva que crece en la selva valdiviana contigua al área de estudio (Dimitri 1972), cuya densidad de la madera (0,41-0,48 kg.dm⁻³) es semejante a la calculada aquí para pino ponderosa, Vann *et al.* (1998) estimaron valores de biomasa aérea individual (fuste más copa), entre 12 y 153 Kg.pl⁻¹ (9,2-28,3 cm dap). Estos valores resultan consistentes con los encontrados para la suma de las partes aéreas de pinos de la clase diamétrica 5-10 cm (Tabla 7.1-1), aunque marcadamente inferiores a los pinos de las clases superiores, y también a los cipreses. Por otra parte, la comparación de la biomasa de raíces (raigón+raíces gruesas) con un modelo de estimación de raíces de diámetro>5mm [peso seco (g)=6,25 dap^{2,7382}] para *Pinus radiata* D.Don en Nueva Zelanda (Jackson y Chittenden 1981), aplicado sobre los datos de la Tabla 7.1-1, arrojó una fuerte semejanza con las raíces de pino ponderosa de las dos clases diamétricas mayores (relación 1:1) y resultaron mayores que las de ciprés para las mismas clases de diámetro (relaciones 1,2 y 1,7, para las clases 15-25 y 25-35 cm de dap respectivamente).

Los valores de peso seco individual de la Tabla 7.1-1 y su proporción relativa (Figura 7.1-1), muestran algunas diferencias entre cipreses y pinos. En la clase menor (dap de 0-5 cm) la biomasa total es mayor en plantas de pinos, aunque como el diámetro medio (marca de clase) es superior al de ciprés, la comparación no sería suficientemente consistente. En cambio, en las clases siguientes, la similitud de dap

medio de las plantas muestra una diferencia importante de peso seco en favor del ciprés, cuya biomasa individual total sería entre 1,5 y 2,5 veces superior ($p < 0,01$). Observando el detalle de los compartimentos de biomasa y las diferencias indicadas de la Tabla 7.1-1, puede notarse que los cipreses de la clase menor (0-5 cm) contenían menos biomasa que los pinos en todos los compartimentos, excepto en las raíces gruesas. Sin embargo en la clase siguiente (5-15 cm) los cipreses mostraron mayor biomasa de fuste y de ramas, menor biomasa de raigón y similar biomasa de raíces gruesas. En las dos clases superiores, las diferencias entre especies radicaron en el fuste (que fue mayor en ciprés) y en el raigón (mayor en pinos). Las diferencias de biomasa fustal pueden explicarse en la mayor altura observada en los cipreses (Figura 7.3-1), que determina un mayor volumen, y también en la densidad específica de la madera, que es un 16% menor en los pinos (valores mencionados en Capítulo 6, sección 6.1).

Por otro lado, el componente de *ramas* incluye ramas vivas y muertas. Estas últimas son de escasa significancia en los pinos estudiados o en plantas finas de ciprés, pero en cambio tienen importante participación en los cipreses mayores de 10 cm de dap (Figura 7.3-3). Llama la atención la diferencia no significativa observada en la biomasa de ramas, en las clases diamétricas superiores, entre cipreses y pinos. A pesar que la densidad de la madera, y el número de ramas por árbol es mayor en ciprés (e.g., en la clase de 15-25 cm, el número promedio de ramas fue de 255 en ciprés y 58 en pino; en la clase de 25-35, de 353 en ciprés y sólo 66 en pino), el mayor desarrollo en longitud y diámetro observado en las ramas de pino compensaría estas diferencias.

En el componente subterráneo, se destacaron tanto la mayor de biomasa de raigón de los pinos (en todas las clases de diámetro), como la ausencia de diferencias significativas en las raíces gruesas.

En la partición relativa de biomasa mostrada en la Figura 7.1-1, para ambas especies resultó notoria la ausencia de cambios en la proporción de raíces en función del diámetro, salvo en las plantas de ciprés, de la clase de dap 0-5 cm. Sin embargo, debe considerarse que los pinos observados eran coetáneos, de 20 años de eap (con posibles diferencias de hasta 3 años, por reposiciones post plantación) y que habían superado su etapa juvenil, donde las raíces suelen ser una considerable proporción del peso seco total de la plantas. Es decir que las plantas de menor tamaño posiblemente se encontraban oprimidas por las de clases de dap superiores. En cambio, las variaciones diamétricas de los cipreses, que provenían de un rodal multiestratificado, podrían estar más vinculadas a diferencias etarias, particularmente en la clase de tamaño menor, ya que estas plantas, en general creciendo en pequeños claros, pertenecerían a cohortes recientes. En las clases intermedias, la combinación de plantas de corta edad con otras más longevas oprimidas podría diluir estas diferencias vinculadas con la ontogenia.

También a título comparativo se graficó el peso seco de fracciones arbóreas de ciprés y pino de este estudio, junto con curvas de estimación análogas (basadas en el dap) citadas por Waring y Running (1998) para pino oregón en el estado de Oregon (fuste, hojas y raíces), y pino ponderosa en California (fuste únicamente, Figura 8.1-1).

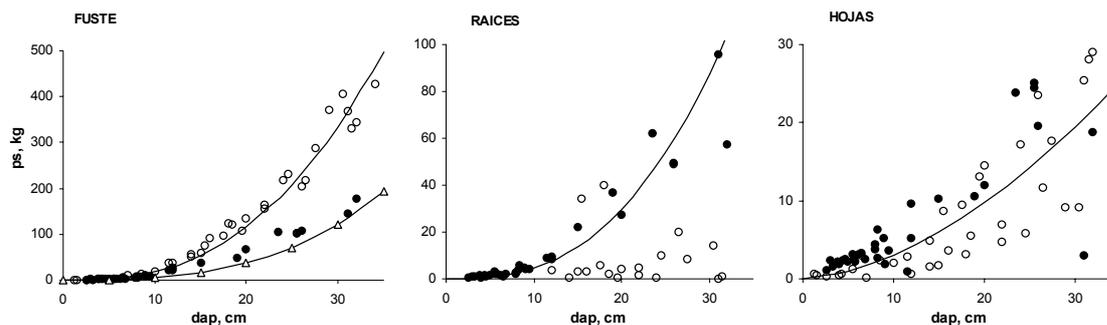


Figura 8.1-1. Peso seco de fuste, raíces y hojas de pino ponderosa (círculos llenos), de ciprés (círculos vacíos) y curvas dap-peso seco según ecuaciones de las mismas fracciones, de *Pseudotsuga mensiezii* en Oregon (líneas llenas) y de fuste únicamente, de pino ponderosa nativo en California (línea con símbolos triangulares).

Resulta por un lado sorprendente observar la fuerte correspondencia entre las observaciones de fuste de ciprés y de pino oregón en USA, conífera templada de ambientes mesófilos o húmedos, que en la Patagonia muestra un alto potencial de crecimiento (Andenmatten 1999, Dimitri 1982). Los valores locales de peso de fuste de pino ponderosa por otra parte, se encuentran por encima de los de la misma especie en California, presumiblemente en sitios más xéricos.

Sin embargo, en el caso de las raíces, la relación entre las especies locales y el pino oregón se invierte, mostrando el pino ponderosa un ajuste importante con el modelo citado para Norteamérica, en tanto que las raíces de ciprés (con excepción de pocos datos) acusan valores marcadamente menores. Por último, en el follaje, los valores observados para pino ponderosa en la región estarían mayormente por encima de la curva de pino oregón en Norteamérica, en tanto que las observaciones de cipreses mostrarían valores similares o menores a los de la misma curva. La menor asignación proporcional de biomasa a los componentes más importantes para la nutrición y la asimilación -raíces y hojas-, explicaría en parte la menor tasa de crecimiento volumétrico observada en los cipreses respecto del pino ponderosa en

sitios semejantes (Loguercio *et al.* 1999). En general se postula que las plantas que crecen en sitios poco fértiles asignan relativamente más biomasa a las raíces que las que lo hacen en sitios más fértiles (Aerts y Chapin 2000). Estos autores señalan sin embargo, que las plantas de rápido crecimiento tendrían mayor biomasa subterránea que las de crecimiento lento, lo que les conferiría una mayor capacidad de absorción de nutrientes.

El pino ponderosa, de alta plasticidad, respondería a estas características (Dimitri 1982). En cambio, la relativamente menor asignación de carbono a las raíces en los cipreses podría vincularse con respuestas más rígidas de la especie a cambios ambientales (Sharpe y Rykiel 1991). Estas diferencias serían consistentes con adaptaciones fisiológicas del ciprés a condiciones de déficit hídrico, como el cierre estomático temprano (Gyenge 2005) y la reutilización de nutrientes foliares (Mazzarino 2005, Mazzarino *et al.* 1998), o ecológicas, como su establecimiento bajo la protección de arbustos (Veblen *et al.* 1996, Letourneau *et al.* 2004). Sin embargo, la biomasa radical relativamente menor del ciprés podría verse compensada con una mayor longitud específica de sus raíces laterales (*i.e.*, la relación entre longitud de raíces y su masa, Aerts y Chapin 2000), o por la promoción del crecimiento de ectomicorrizas (Oren y Sheriff 1995, Perry 1994), lo que podría conducir a nuevas hipótesis de investigación de la especie. También Aerts y Chapin (2000), hallaron que árboles creciendo en sitios con déficit hídrico acentuado pueden desarrollar una mayor densidad de raíces ($m \text{ raíces} \cdot m^{-3} \text{ suelo}$) en contraposición a otras especies que crecen en sitios con adecuado abastecimiento de humedad, cuya estrategia competitiva es desarrollar raíces más vigorosas y profundas (mayor biomasa) que especies competidoras. El pino ponderosa, en los sitios muestreados se comportaría

de este modo. Aunque la masa principal de raíces se encuentra en los primeros 50 cm (Oliver y Ryker 1990), esta especie tiene raíces que crecen en profundidad (Perry 1994, Oliver y Ryker 1990), manteniendo un abastecimiento hídrico adecuado durante la estación seca. De este modo el cierre estomático es menos prolongado que en el ciprés (*Gyenge et al.* 2003), sosteniendo una mayor tasa de crecimiento.

8.2 BIOMASA DE ARBUSTOS Y GRAMÍNEAS

Peso seco individual

De acuerdo con el análisis de los datos presentados en la Tabla 7.1-2 (Anexo 2), los valores de peso seco individual fueron significativamente diferentes entre los individuos de neneo y de coirón blanco en ambas épocas del año, entre los de abrojo y coirón blanco en noviembre de 2002, aunque no entre estas últimas especies en otoño (abril 2002) ($p < 0,05$). En términos individuales, la biomasa de neneo sería tres a cuatro veces mayor que la del abrojo o del coirón blanco, tanto en otoño (abril de 2002) como en primavera (noviembre de 2002, $p < 0,05$ en ambas épocas). Los valores medios de biomasa *aérea* observados para el neneo ($445,1 \text{ g.pl}^{-1}$ en otoño y $492,7 \text{ g.pl}^{-1}$ en primavera, Tabla 7.1-2) son consistentes con los modelos de biomasa propuestos por Schulze *et al.* 1996 para los individuos de la especie en estepas de Chubut. Para individuos de tamaño similar, los valores estimados con los modelos de Schulze *et al.*, arrojaron un peso seco aéreo de $577,4 \text{ g}$ y $673,9 \text{ g}$ (neneos en pastizal de *Festuca*) y de $421,7 \text{ g}$ y $476,9 \text{ g}$ (neneos en pastizal de *Stipa*). Por otra parte la comparación de la porción verde observada en estos arbustos fue comparada con un modelo alométrico de rebrotes anuales en función del diámetro [$y = 0,046d^2$, donde y : peso seco (g) de rebrotes, y d : diámetro (cm) de la copa] para la patagonia extra-andina de Río Negro (INTA 1986). Aplicando este modelo a las plantas muestreadas, se obtuvieron valores de $194 \pm 49,5 \text{ g}$ (media \pm ee) para los arbustos cosechados en abril de 2002, y de $216 \pm 48,4 \text{ g}$ para los cosechados en noviembre de 2002, es decir, de mayor peso seco que los observados en este trabajo ($p < 0,001$). Sin embargo, este modelo fue desarrollado para evaluar la máxima productividad forrajera anual del neneo, que tiene lugar a principios de verano (INTA 1986), y como resulta esperable que en esa

época el peso seco alcanzado de esta fracción sea mayor, las diferencias halladas serían consecuencia del crecimiento estacional¹². También la clasificación de la parte “verde” o “rebrote” -que se apoya en la apreciación subjetiva (Jóbbagy y Sala 2000)-, podrían aportar a esas diferencias. Otro estudio (Sarmiento y Siffredi 1983) en área de mesetas del oeste rionegrino, dan cuenta de una biomasa individual de rebrote anual de $264,5 \pm 32,3 \text{ g.pl}^{-1}$ (media \pm ee) para plantas de diámetro medio de 84 cm en el mes de febrero, cuando estaban en fructificación.

Partición de biomasa

La partición de la biomasa varió intraespecíficamente durante el año. Para el coirón blanco, en otoño y primavera, la fracción de material muerto o senescente (seco + amarillo) dió cuenta del 60-65% de la biomasa total, aunque las fracciones aérea verde y las raíces (hasta la profundidad excavada de 30 cm) acusaron una relación inversa: en otoño, el 19% del peso total correspondía a las raíces, y el 14% al follaje verde. En primavera, sin embargo, la participación de las raíces descendió al 5%, aumentando el follaje verde al 23%. En la medición del mes de octubre del año siguiente, la proporción de material muerto se mantuvo muy alta, alcanzando casi el 80% del peso seco total, seguido de un 13% de las raíces y un 8% del follaje verde. Dado que el material fue cosechado en el mismo sitio y el rango de tamaños de planta en cada época de muestreo fue relativamente similar, la variabilidad estacional en la partición de biomasa estaría causada tanto por el pastoreo (cuya rotación anual se desconocía) como por las condiciones climáticas intra-anales (Jóbbagy y Sala 2000). Sin embargo, en las dos primaveras sucesivas en que se realizaron mediciones, el peso seco por unidad de área basal fue similar

¹² El neneo emite brotes a fines de otoño que permanecen en latencia invernal hasta su desarrollo de hojas de ápice espinescente en la primavera. En el verano florece, alcanzando el pico de biomasa, y

(media \pm e.e.=1,34 \pm 0,17 g.cm⁻² en noviembre de 2002 vs 1,30 \pm 0,13 g.cm⁻² en octubre de 2003) y marcadamente superior ($p < 0,05$) al de otoño (0,74 \pm 0,08 g.cm⁻² en abril de 2002). En el caso del neneo y el abrojo, la mayor cantidad de biomasa en otoño (abril de 2002) ocurrió en su fracción "seca" (tallos más hojas muertas adheridas), que dió cuenta del 57% y 59% de la biomasa total individual, respectivamente. Sin embargo, en ambas especies, en primavera (noviembre de 2002) aumentó la proporción verde entre un 75% y un 130% respectivamente, en detrimento de la fracción seca. Como la productividad aérea del neneo se encuentra fuertemente correlacionada con la precipitación acumulada Jóbbagy y Sala (2000), las diferencias estacionales observadas responderían a las fenología del neneo. Por otra parte, la proporción de raíces en ambas especies permaneció constante entre ambas estaciones (30% en neneo, y 15% en abrojo), presumiblemente por la alta proporción relativa de raíces leñosas o subleñosas en las plantas, de reciclado más lento que las raíces finas. Considerando el peso seco por unidad de área efectivamente cubierta por las plantas (área basal en coirón blanco, y de copas en neneo y abrojo), la biomasa total del coirón blanco superó en 4,6-7,9 veces la del neneo y en 3-4,3 veces la del abrojo ($p < 0,05$) en ambas épocas del año. Por lo tanto, *a una misma cobertura*, toda sustitución de gramíneas en el *stand* por los arbustos mencionados, implicaría una fuerte caída de la biomasa. Es decir que un manejo del pastizal aplicado a la conservación de las gramíneas (por ejemplo, utilizando una combinación de tecnologías como las propuestas por Golluscio *et al.* 1998), no solamente tendría implicancias en la oferta forrajera, sino también en el secuestro de carbono.

Las relaciones raíz:tallo estimadas para las especies de la estepa, muestran una partición similar entre el coirón blanco y el abrojo (promedio $r:t \cong 0,25$), aunque mucho mayor en el caso del neneo y con una importante variación de este índice en función del tamaño de plantas ($0,40 < r:t < 1,20$, Figura 7.3-8). La mayor variabilidad se observó con plantas de menor diámetro, lo cual podría relacionarse con la medición simultánea de plantas provenientes de germinación de semillas (consecuentemente con pocas raíces) o de rebrotes de matas viejas, de mayor masa radical.

8.3 ECUACIONES DE BIOMASA

Ecuaciones alométricas de árboles

Los valores observados de biomasa individual fueron ajustados en función del dap y del volumen de fuste (sección 6.1). Estos modelos alométricos son utilizados con frecuencia en la ciencia forestal (e.g, Bond-Lamberty *et al.* 2002, Flint Hughes *et al.* 1999, Lust *et al.* 1995, Brown *et al.* 1989, Cannell 1984), debido a que permiten la estimación indirecta de la biomasa de árboles, cuya evaluación directa (destruktiva) es sumamente costosa y compleja (Bond-Lamberty *et al.* 2002, Monserud y Marshall 1999, Kuusela y Nyysönen 1981) o no es posible por razones de conservación ambiental (Vann *et al.* 1998). En cambio, no hay demasiadas ecuaciones predictivas de la biomasa subterránea, dado la mayor dificultad que presentan estos estudios (Bond-Lamberty *et al.* 2002, Cooper 1982), y los compromisos que tales inconvenientes imponen, no permiten comparaciones consistentes entre distintas evaluaciones (Jackson y Chittenden 1981). A pesar del uso extendido de los modelos alométricos, no se han realizado localmente muchos estudios de este tipo para la evaluación de bosques nativos o cultivados. En los últimos años, Loguercio (comunicación personal) realizó análisis alométricos de biomasa de pinos en la Patagonia, al sur del área de este estudio (datos no publicados), y también en bosques de lenga [*Nothofagus pumilio* (Poepp. et Endl.)] en Tierra del Fuego. En este último caso, se ajustaron ecuaciones de incremento y disminución de biomasa - debido al desarrollo de podredumbres internas- en función del tamaño de los árboles (Loguercio y Defossé 2001).

Los incrementos de biomasa de ramas, hojas, tallo y raíces gruesas de los árboles muestran una relación exponencial con el diámetro, de la forma $y=ax^b$ (Lambert *et al.*

2005, Monserud y Marshall 1999, Waring y Running 1998, Brown *et al.* 1989). Por ello la medición de esta última variable, a veces combinada con la altura de los árboles, es un buen estimador de la biomasa aérea y subterránea (Waring y Running 1998, Landsberg y Gower 1997, Baker *et al.* 1984, Jackson y Chittenden 1981). A la vez, las masas relativas del tallo, ramas, hojas y raíces varían consistentemente con la edad. En árboles jóvenes, las partes verdes y las raíces dominan sobre los tallos, aunque en plantas maduras, el fuste predomina sobre los otros órganos vegetales (Waring y Running 1998, Kozlowski *et al.* 1991).

Junto con el incremento de la biomasa arbórea en función de su tamaño, la *dispersión* de la variable dependiente se acrecienta con el tamaño de los árboles (Monserud y Marshall 1999, Jackson y Chittenden 1981). Por ello la transformación logarítmica contribuye a satisfacer el supuesto de homogeneidad de varianzas, facilitando a la vez el análisis de regresión lineal (Bond-Lamberty *et al.* 2002, Monserud y Marshal 1999, Brown *et al.* 1989), y su contraste con otras ecuaciones lineales (Zar 1997). No obstante, al estimarse la biomasa individual mediante el cálculo del antilogaritmo de la ecuación de regresión, resulta esperable una mayor correspondencia entre los datos originales (sin transformar) a tamaños menores que a grandes tamaños de planta (Jackson y Chittenden 1981). En este estudio, las estimaciones basadas en el dap (Figura 7.2.-3A), sobrevalorarían la biomasa observada en ambas especies a partir de los diámetros superiores a 15 cm en pinos y 25 cm en ciprés. En cambio, las ecuaciones basadas en el volumen de fuste habrían subestimado la biomasa en las clases de volumen mayores observadas en cada especie (Figura 7.2-3B), aunque con sesgo menos pronunciado que en el caso de las ecuaciones que utilizan el dap como variable explicativa. Por lo comentado

anteriormente, los sesgos observados en el extremo derecho de las curvas de la figura suelen ser comunes cuando se utilizan modelos transformados logarítmicamente. Aún dentro de una misma área de plantaciones de pino radiata en Nueva Zelanda, Baker *et al.* (1984) encontraron sesgos pronunciados en la aplicación de ecuaciones de biomasa individual elaboradas en estudios independientes, con diferencias de hasta un 20% en la estimación de fustes, y 80-90% en los componentes de copa (hojas y ramas). Estas diferencias según el modelo aplicado, pueden explicarse particularmente por variaciones en (1) el factor de forma de los árboles, (2) la compacidad de las copas, y (3) las diferencias en la densidad de la madera en función de la altura y edad de los árboles. Por ejemplo, cuando se estimó el peso seco del fuste de árboles de pino ponderosa creciendo bajo condiciones climáticas contrastantes en Norteamérica, con modelos alométricos sitio-específicos, se observó que las plantas de dap pequeños (10 cm) tenían hasta el doble de biomasa en el sitio más xérico, atribuyéndose esto a diferencias en la forma del tronco (Callaway *et al.* 1994). También las pronunciadas varianzas en las estimaciones de follaje observadas por Baker *et al.* (1984) y también en este estudio, se encontrarían relacionadas con la oportunidad de muestreo en relación con la fase fenológica de las plantas. Waring y Running (1998) destacan que los cambios estacionales en la asignación de carbono requieren conocer la fenología, los límites de crecimiento de varios órganos, y la capacidad de almacenaje de los órganos de reserva. Para el abeto rojo (*Picea rubens* Sarg.) -una conífera de bosques templados del Hemisferio Norte-, observaron que el despliegue de hojas ocurre entre mediados de primavera y principios de verano, en tanto que las raíces finas crecen antes de este período, y recién en el verano y otoño el crecimiento se polariza a las partes leñosas.

Cuando se trata de estimar la biomasa de los árboles de mayor tamaño de la distribución de datos, es más conveniente ajustar modelos exponenciales, sin transformación de datos (Jackson y Chittenden 1981). No obstante, en este estudio, se utilizaron los modelos con transformación logarítmica, debido a que el dap promedio de los rodales evaluados (Parte III) se hallaba en la clase diamétrica de 15-20 cm en ambas especies (Parte III, sección 7.1, Tabla 7.1-1).

Aunque este análisis (Figura 7.2-3) no constituye una prueba completa de la capacidad predictiva de los estimadores desarrollados, que requeriría de un muestreo independiente y una evaluación de la biomasa por métodos alternativos para su comparación, puede señalarse que para las muestras observadas, el volumen del fuste es un estimador más confiable que el dap. Como el volumen de fuste se encuentra definido por el dap y la altura, y esta variable está positivamente correlacionada con el dap, resulta esperable encontrar una mayor precisión estimativa utilizando esta variable adicional (Bond-Lamberty *et al.* 2002). Sin embargo, un modelo alométrico apropiado es aquel que balancea los criterios estadísticos con su aplicación práctica (Bond-Lamberty *et al.* 2002). Por eso los modelos más comunes se basan únicamente en diámetros, ya que variables adicionales (altura, edad) son más difíciles de medir y el mayor ajuste agregado suele ser leve (Bond-Lamberty *et al.* 2002, Woomey y Palm 1998). Un riesgo de ello - si ocurren inflexiones-, sería subestimar o sobreestimar árboles inconsistentemente en el rango de la aplicación de la ecuación (Bond-Lamberty *et al.* 2002). Vann *et al.* (1998) encontraron que la precisión de las ecuaciones alométricas fue mayor a nivel de rodal que cuando se utilizaron para estimar la biomasa de un individuo en

particular. Posiblemente esto se deba a la compensación de sesgos del modelo al aplicarse a un conjunto de plantas de diferentes tamaños. En ese sentido, debe señalarse que para la obtención de volúmenes, en el muestreo aquí realizado se aseguró una medición precisa de la longitud del fuste con cinta, sobre las plantas apeadas. Pero en la práctica usual de inventario forestal sólo es posible medir la altura de algunos árboles de borde, o relativamente aislados, con métodos indirectos (con clinómetro, relascopio, etc). Esto genera una importante fuente de errores accidentales y sistemáticos, vinculados al instrumento utilizado, al árbol elegido y al sesgo del observador, por lo cual el volumen así calculado puede ser un estimador aún más impreciso que el diámetro. Sin embargo, el uso de esta única variable (dap) no daría cuenta de la variación de biomasa debido a la altura de los árboles -que en los árboles dominantes está correlacionada con la calidad de sitio, ver sección 2.3-, y por lo tanto estas ecuaciones serían menos confiables en un sitio diferente al de los datos originales del modelo (Lambert *et al.* 2005, Callaway *et al.* 1994, Andenmatten E., com. pers.).

Ecuaciones alométricas de arbustos y gramíneas

En el caso de hierbas o arbustos, es común hallar relaciones alométricas similares a las de los árboles, con la cobertura de sus copas o basal (Waring y Running 1998). En la región, los modelos alométricos de biomasa individual de pastos y arbustos son escasos, y mayormente desarrollados en la patagonia árida o semiárida (Loguercio *et al.* 2004, informe sin publicar, Schulze *et al.* 1996, González Arzac 1995, Defossé y Bertiller 1991, Defossé *et al.* 1990, INTA 1886, Fernández y Paruelo 1988, Sarmiento y Siffredi 1983), o en áreas de transición con la provincia fitogeográfica del Monte (González Arzac 1995). Las variables predictivas

generalmente utilizadas han sido: el área proyectada del canopeo o el volumen de un cilindro basado en el área proyectada de copa (o en su diámetro promedio) y la altura de las plantas. En este estudio, si bien la altura de las plantas fue medida, se descartó su uso porque (1) al igual que con los árboles, es una variable de apreciación relativamente subjetiva, particularmente en gramíneas o el abrojo, y fuertemente dependiente de la etapa fenológica de las plantas y de la herbivoría (González Arzac 1995), (2) a menos que se mida la máxima longitud de hojas o tallos, factores como viento o nieve pueden afectar la altura del canopeo achatando las matas, (3) la inclusión de esta variable no aumentó la capacidad predictiva de las ecuaciones. Por razones similares no se consideró utilizar la proyección del canopeo en pastos, sino su diámetro basal.

Las ecuaciones de regresión mostraron ajustes relativamente altos para todas las fracciones de neneo (r^2 cercanos o superiores a 0,80), en las fracciones aérea y total de abrojo ($r^2 > 0,80$) y próximos a este valor en las fracciones total, aérea, subterránea y seca de coirón ($r^2 \sim 0,75-0,80$). Sin embargo resultaron notablemente inferiores en las partes verdes de coirón y abrojo, amarilla de coirón y seca y subterránea de abrojo ($r^2 < 0,60$; Figura 7.2-4). Algunas causas posibles de esta menor calidad de los estimadores serían: (1) mayor variabilidad natural de las raíces de coirón y abrojo con respecto al diámetro explicativo, (2) en abrojo, la imprecisión en la medición del diámetro de la copa, de forma en general oblonga pero de bordes irregulares, calculado como el promedio entre el diámetro mayor y el menor, (3) la dificultad de separación de la fracción verde (también la amarilla en coirón), que en todos los casos era una proporción menor de la biomasa total, y donde pequeños

errores de clasificación generan alta variabilidad. No obstante ello, las pendientes de todas las regresiones resultaron altamente significativas ($p < 0,001$)

Por otra parte, no se encontraron diferencias significativas entre las ecuaciones de biomasa total y aérea de cada una de las tres especies. La ausencia de diferencias significativas entre estos estimadores, se debe a que la parte aérea de estas plantas contribuye en muy alta proporción a la biomasa total (proporción que se acentúa al transformar los datos), lo que se combina con el error aleatorio asociado a cada estimador ajustado. Graficando los límites de confianza de los respectivos modelos de biomasa total y de biomasa aérea (Figura 8.3-1), presentados en el Anexo 1, puede observarse que ambas bandas de confianza quedan prácticamente superpuestas en el caso del coirón y con leves desfasajes en neneo y abrojo.

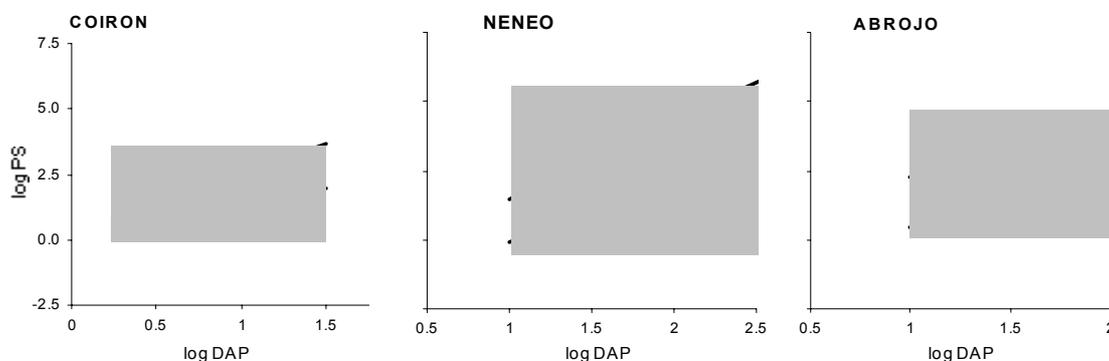


Figura 8.3-1. Bandas de confianza (95%) de los estimadores de la biomasa total (intervalo entre líneas llenas) y de la biomasa aérea (área grisada). Se observa en neneo y abrojo el leve desfasaje entre las bandas de biomasa total y aérea.

En estos casos, los datos individuales podrían unificarse, ajustando un modelo único. Sin embargo, con ello se afectaría el objetivo predictivo de las ecuaciones ajustadas (Figura 7.2-2), dado que un mismo modelo estimaría a la vez la biomasa total y la biomasa aérea de las especies consideradas, lo cual es biológicamente

objetable. Por ello, para los cálculos aplicados en la sección siguiente a nivel de *stand*, se mantiene cada modelo separadamente (Figura 7.2-2, Anexo 1).

8.4 DISTRIBUCIÓN DE LA BIOMASA AÉREA DE LOS ÁRBOLES

La distribución del peso seco de las copas es función de la cantidad de ramas y hojas encontradas a lo largo del fuste, y su peso seco unitario. La aproximación aquí utilizada fue subdividir el fuste en tramos fijos (cipreses), o en cada entrenudo y su correspondiente verticilo con ramas (pinos), para realizar el conteo de ramas con o sin hojas, y luego extraer submuestras para secado. Esto permitió una estimación razonable en términos de esfuerzo y precisión, de la biomasa de copas y su distribución vertical. Las ramas separadas en el campo de cada tramo del tronco para secado en laboratorio, fueron las que más se asemejaron al promedio diamétrico y longitudinal del conjunto correspondiente. Con la elaboración de esta información se obtuvieron los perfiles de copas indicados en la Figura 7.3-2. Asimismo, la dispersión de observaciones de peso seco de fuste en función de la altura de los árboles de la Figura 7.3-4, fue obtenida por cálculo del volumen de cada tramo de fuste considerado, asimilado a un cono trunco, y multiplicado por la densidad de la madera. Este cálculo se apoya en el supuesto de una densidad constante de la madera a lo largo del fuste.

Las figuras presentadas muestran un cambio importante en la distribución vertical de biomasa en función del tamaño. En el caso de los cipreses, las muestras observadas de las clase diamétrica menor (0-5 dap) corresponden al muestreo de El Bolsón, donde las plantas de tales diámetros crecían en pequeños claros del bosque alto, y por lo tanto aún relativamente libres de competencia por luz, situación que habitualmente sí se verifica en la clase diamétrica siguiente, tanto en los cipresales medianamente densos, como en las plantaciones coetáneas de pinos en la región. El perfil de biomasa observado fue marcadamente cónico (Figura 7.3-2),

característico de plantaciones jóvenes, donde se verifica también la mayor proporción de hojas respecto de las ramas (*peso hojas:peso ramas*=1,28). Casi toda la biomasa de fuste en este tamaño de plantas, se encontraba en la porción basal, y con baja dispersión entre observaciones (Figura 7.3-4). Aunque con los pinos no se disponía de datos similares para la distribución del peso de copas para esos tamaños de planta, la forma similar del fuste entre cipreses y pinos en esa clase, sugiere una distribución similar de la biomasa.

La clase de tamaño siguiente (5-15 cm) mostró una distribución relativamente extendida del peso de las copas a lo largo del fuste, aunque con marcada desuniformidad entre segmentos (Figura 7.3-2), especialmente en las ramas. Aquí la partición (en ciprés) entre hojas y ramas se invirtió, predominando las ramas en una proporción cercana a 3:1. La heterogeneidad de copas observada puede deberse a: (1) en ciprés, que este tamaño correspondía presumiblemente al estrato de plantas oprimidas de la masa principal, promediadas con otras de cohortes más jóvenes pero que crecieron con limitaciones variables de luz u otros factores (3) en pinos, el promedio de plantas de 5-15 cm provenientes de Chapelco, de una plantación de 10 años aún sin cierre del canopy, -y por lo tanto aún exento de competencia evidente por luz-, se promedió con otras de ese mismo rango de dap provenientes de Filo Huahum, donde las plantas de esta categoría, de veinte años de edad, se encontraban dominadas en el rodal. En los fustes, con respecto a la situación anterior, la biomasa tendió a expandirse más en altura, aunque siempre con fuerte predominio de la porción basal. En el caso de plantaciones de pino manejadas, dentro de estos tamaños de planta se suelen realizar las primeras podas (Parte I, sección 3.4). Observando el gráfico correspondiente de la Figura 7.3-2, la

eliminación de ramas hasta unos 2 a 3 metros de altura, no tendría implicancias importantes en la eliminación de biomasa de copas. Lo mismo ocurriría con ciprés, especie que al no presentar desrame natural (Kalela 1941, en: Bava y Gonda 1993) acumula una gran cantidad de ramas secas en el fuste (Figura 7.3-2), particularmente en las porciones internas o basales (Figura 7.3-2), más sombreadas. Existen propuestas de manejo de producción de madera de calidad de ciprés basado en la poda de ejemplares seleccionados en el rodal (Bava y Gonda 1993, Schmaltz y Gonda 1991), y algunas experiencias preliminares abonan su viabilidad (Mayol y van Konynnenburg 1991). Los datos de este estudio demuestran que este manejo sería compatible con objetivos de secuestro de carbono,

En los gráficos de copas de ciprés de las dos clases de dap superiores (Figura 7.3-2) las distribuciones de copa se asimilan a curvas normales, tanto para las ramas como para las hojas. Estos árboles constituían el estrato subdominante e intermedio en el rodal muestreado, con tendencia a reemplazar en el techo del dosel a los árboles de clases mayores (no muestreados) mucho más gruesos pero escasos y dispersos en el bosque. Los fustes de esas clases (Figura 7.3-4) aumentaron la proporción de peso en altura, con un 50% de la biomasa por encima de los primeros 5 m.

Las copas de los pinos de las clases 15-25 cm (ramas únicamente en la Figura 7.3-2) mostraron una mayor acumulación de biomasa en los tres metros de altura y con tendencia decreciente hacia el ápice. Las variaciones observadas entre segmentos sucesivos serían consecuencia de promediar árboles de distintas posiciones jerárquicas dentro de la misma clase de dap, lo que de algún modo sugieren los

datos de biomasa de fuste para esa clase, de la Figura 7.3-4. Por otra parte, la ausencia de ramas por debajo de los 3 m de altura en esta clase, indicaría que los árboles de este grupo han tenido una primera poda baja, posiblemente en la etapa de tamaño precedente, aunque podría haber ocurrido también algo de desrame natural por sombreado y muerte de ramas. Las ramas de la clase de dap siguiente (25-35 cm) tendieron a normalizarse, con su máximo de peso seco a los 5 m de altura y tendencia decreciente hacia ambos extremos del fuste. Esta conformación, similar a la de las clases superiores de ciprés, corresponde a los árboles dominantes del rodal.

8.5 BIOMASA SUBTERRÁNEA DE ÁRBOLES

Métodos y porcentaje de extracción de raíces

Una de las cuestiones metodológicas críticas en los estudios de biomasa subterránea es la profundidad de remoción de raíces, ya que dependiendo de la misma podrá darse cuenta de una proporción asimilable (o no) a la totalidad de este componente. A nivel global, las profundidades máximas raíces de pastos medidas superaron los dos metros, pero las de árboles o arbustos alcanzaron promedios de 5-7 m (Canadell *et al.* 1996). Sin embargo, desde una visión práctica cabe preguntarse cuánto se gana en estudios de raíces a gran profundidad, dado que salvo casos extremos (como algunos *Eucalyptus*) las raíces de las plantas tienden a concentrarse cerca de la superficie (Jackson *et al.* 2000, 1996). Las raíces se distribuyen en el perfil del suelo de acuerdo con las formas de vida vegetales, cuya distribución a nivel mundial se relaciona con la precipitación y la temperatura. Dentro de cada grupo, esta distribución se debe tanto a la especie y su ontogenia, como a las características del suelo (Cairns *et al.* 1997, Jackson *et al.* 1996). A pesar de estas fuentes de variación, Jackson *et al.* (1996), en meta-análisis de investigaciones en distintas regiones, determinaron coeficientes de extinción de raíces en profundidad (β) para diferentes biomas terrestres [$Y=1-\beta^d$, donde: Y es la proporción acumulada de raíces desde la superficie hasta la profundidad d (cm), Figura 7.3-7]. Aunque los bosques templados de coníferas (y los desiertos) mostraron los mayores valores de β -es decir, que estos ecosistemas alcanzan mayor proporción de raíces en profundidad-, estos sistemas acumularon el 50% de la biomasa total en los primeros 30 cm de profundidad. Todos los grupos funcionales analizados aquí acumulan entre el 90 y 99% de su biomasa en los primeros 100 cm de profundidad (Figura 7.3-7). En Chapelco -con un dap medio de los árboles de 5,7

cm-, el diámetro de los hoyos fue de $0,91\pm 0,03$ m, y la profundidad explorada de $0,56\pm 0,0$ m (promedio y error estándar, $n=18$). En El Bolsón, el diámetro promedio de las excavaciones fue de $2,3\pm 0,11$ m, y la profundidad de remoción de $1,4\pm 0,10$ m (promedio y error estándar, $n=33$), para un dap medio de los cipreses de 17,4 cm. En Filo Huahum, aunque estas dimensiones no fueron medidas, la longitud máxima promedio de raíces fué de $1,8\pm 0,17$ m (promedio y error estándar, $n=13$), lo que sugiere una remoción similar a la de El Bolsón. La excavación y remoción de suelo en las profundidades comentadas, en los últimos sitios mencionados darían cuenta del 99% de la biomasa total de raíces de acuerdo lo analizado por Jackson *et al.* (1999) para bosques templados de coníferas. En un estudio en plantaciones de *Pinus resinosa* L. de 32-36 años, Fayle (1975) observó sobre árboles manualmente excavados que, aunque en algunos casos las raíces se extendían horizontalmente entre 10-16 m y unos 3 metros en profundidad, el 80-90% del volumen de raíces leñosas se encontraba en un metro de radio desde la base del tallo. En Chapelco -al igual que en el sitio Catán Lil, con árboles de 5 y 10 años de edad, Figura 7.3-7)-, la distribución de raíces en profundidad se aproximaría más a la de pastos (debido al menor desarrollo de las plantas), por lo que la excavación y remoción practicada abarcaría también la casi totalidad de la biomasa radical.

Distribución espacial

Los estudios tendientes a conocer la distribución horizontal de raíces han sido realizados generalmente para conocer tasas de crecimiento longitudinal bajo distintas condiciones de estrés hídrico o de fertilidad, aunque son menos numerosos que los estudios de distribución en profundidad (Jackson *et al.* 1996). La distribución longitudinal del peso seco de raíces laterales de pino representada en la Figura 7.3-

5 -correspondiente a una plantación de 20 años en Chapelco-, resultó consistente con la distribución horizontal de biomasa subterránea de árboles de 15 años en Catan Lil, sitio con mayor déficit hídrico, donde las raíces cosechadas se distribuyeron íntegramente dentro de un recuadro de 2,6 m (Figura 7.3-6D). En los casos estudiados de raíces de diferentes edades en sitios secos, la distribución espacial no parece haber cambiado significativamente entre los 5 y los 10 años (7.3-6B, C), observándose en las plantas de esas edades, una marcada asimetría en las raíces laterales. Como en las excavaciones realizadas no se observaron impedimentos evidentes al crecimiento radial de las raíces, las asimetrías podrían ser consecuencia de las técnicas de plantación. Si bien en la región se utilizan diferentes herramientas manuales para la plantación (Parte I, sección 3.2), la técnica usual con cualquiera de ellas consiste en comprimir lateralmente la planta con la herramienta una vez colocada en el suelo, empujando la tierra desde una hendidura próxima. También el manipuleo o acopio de los plantines en el campo previo a su plantación, podría influir en el mismo sentido. Entre los cinco y diez años de plantación, aunque la exploración del suelo no se habría incrementado apreciablemente, la biomasa habría aumentado en términos moderados (7.3-7A), consistente con el cambio de diámetros observado (7.3-6B, C). En la etapa siguiente, a los 15 años de edad de la plantación, la ocupación del suelo habría aumentado considerablemente, horizontal y verticalmente (7.3-6D, 7.3-7B) lo mismo que su biomasa (7.3-7A); balanceándose además el crecimiento en sentido radial (7.3-6D). Los valores hallados de biomasa en profundidad en los árboles de 15 años, coinciden con lo postulado por Schulze *et al.* (1996) sobre la distribución vertical de raíces de bosques templados (Parte I, sección 2.1). La profundización y el aumento de tamaño de las raíces independizan a las plantas del nivel de humedad superficial

del suelo durante la estación de crecimiento, y a la vez provee del anclaje necesario para soportar una mayor carga aérea. Además, las raíces gruesas, si bien son de limitada capacidad de absorción de agua (lo que ocurre principalmente a través de los pelos capilares próximos a los ápices radicales), aumentan exponencialmente la comunicación vascular con el vástago con el incremento lineal de su diámetro (Perry 1994). Esto contribuye significativamente a la facilitación del transporte de agua y nutrientes por el xilema en condiciones de alta demanda atmosférica (Callaway *et al.* 1994). Por otro lado, el patrón de crecimiento subterráneo de la Figura 7.3-8, de tendencia sigmoidea, sugiere una próxima estabilización del crecimiento de mantenerse esa tendencia, posiblemente entre los 20 y los 25 años. Esto acuerda parcialmente con Fayle (1975), quien sugirió para *Pinus sylvestris* L., que esta especie tendería a estabilizar su biomasa de raíces a partir de los 15-20 años, que luego se sostendría balanceando su tasa de renovación y mortalidad. En las forestaciones de pinos locales se ha observado que los crecimientos máximos anuales en altura comienzan a verificarse a partir de los 10-15 años, lo que podría asociarse a un cambio en la asignación de carbohidratos al estabilizarse el crecimiento radical. Esto se correlacionaría con lo que aquí fue observado -aunque algo más desplazado en edad, posiblemente por tratarse de un sitio seco-, demostrando la estrecha relación fuente-destino entre las fracciones aérea y subterránea de los árboles. Al margen de las diferencias climáticas y edáficas, estos datos confirman una regulación ontogénica del crecimiento entre la biomasa aérea y subterránea (Kozlowski *et al.* 1991).

Relación raíz: tallo

En plántulas de pino ponderosa de bosques nativos de USA, se encontró una relación raíz:tallo de 1,38 (Gulke y Retzlaff 2001), proporción que puede disminuir hasta una relación $r:t=0,20$ o aún menor, en árboles adultos (Laclau 2003a, Gulke y Retzlaff 2001, Gulke y Balduman 1999), en tanto que en etapas subsecuentes (renuevos) esta mayor biomasa relativa se encontró en el follaje, y en plantas grandes, en los tejidos leñosos (Gulke y Retzlaff 2001). Callaway *et al.* (1994) reportan una proporción de raíces del 29-33% de la biomasa total ($r:t= 0,4-0,5$) en plantas de pino ponderosa de 10 cm de dap en Norteamérica, con una reducción de esta proporción al 5-7% en pinos de 50 cm de dap. La proporción hallada aquí en plantines destinados a plantación fue $r:t=1$, es decir algo menor a la antecitada, aunque las podas practicadas en la salida del vivero, podrían haber excluído una porción significativa de la biomasa subterránea, de modo que cabe esperar que estas plantas tuvieran más biomasa de raíces que aérea ($r:t>1$). Para *Pinus sylvestris*, Kozlowski *et al.* (1991) encontraron que la máxima relación $r:t$ se encontró a la edad de 7 años, en tanto a los 20 años se verificó un significativo decrecimiento, y con pino ponderosa en bosques nativos se observó una tendencia similar (Gulke y Retzlaff 2001). Sin embargo no se observó más que una leve caída de esta relación entre árboles de 10 años de Chapelco y los de Filo Huahum, de 20 años de edad (diferencias no significativas, Figura 7.4-1), aunque sí entre la relación $r:t$ de los árboles de la zona más seca (San Ignacio-Catan Lil), de edad promedio de 10 años y $r:t=0,39$ y los de Filo Huahum, diez años mayores, y $r:t=0,28$.

Las diferencias encontradas en la relación $r:t$ entre pino y ciprés resultaron altamente significativas (Anexo 1). Como el nivel de precipitación anual es similar en Filo

Huahum, Chapelco y El Bolsón (900-1000 mm), sitios donde fueron cosechadas las plantas comparadas, cabe esperar que las diferencias observadas sean inherentes a las especies y no al ambiente. En cambio, los pinos de San Ignacio-Catan Lil (considerados conjuntamente) mostraron una mayor relación $r:t$ que árboles de la misma especie de los sitios más húmedos (Anexo 1). El decrecimiento de la humedad del suelo aumenta la relación raíz:tallo en árboles (Cairns *et al.* 1997). Estas relaciones sugieren también un cambio en la partición de biomasa dentro de la especie asociado al ambiente. Las plantas sujetas a estrés hídrico, nutricional, o con alta exposición al viento -todas estas características más marcadas en el sitio xérico evaluado-, suelen presentar una mayor proporción $r:t$ (Coutts *et al.* 1999, Kozlowski *et al.* 1991, Kozlowski 1968). Sin embargo, también ocurre en estos ambientes una mayor asignación de biomasa al xilema activo (albura), lo cual aumenta su costo respiratorio de mantenimiento (Callaway *et al.* 1994).

9 - CONCLUSIONES

- Las ecuaciones alométricas desarrolladas permiten estimar por medio de variables de fácil medición, la biomasa total y su partición en los diferentes órganos aéreos y subterráneos
- Salvo en diámetros menores, para una clase de dap determinada, los cipreses acumulan más biomasa, y consecuentemente carbono, que los pinos. Esta mayor acumulación se vincula con su mayor altura relativa y densidad de la madera.
- El crecimiento relativamente más lento de los cipreses puede explicarse en parte por un menor desarrollo relativo de raíces y follaje, órganos fundamentales para la nutrición y asimilación. En contrapartida, el mayor desarrollo de estos compartimentos en los pinos resultaría en una tasa de crecimiento varias veces superior.
- Las podas destinadas a producir madera de calidad, tanto en pinos como en cipreses, no tendría implicancias adversas ante un manejo cuyo objetivo sea el secuestro de carbono. Es decir, que es posible compatibilizar ambos objetivos bajo un sistema de manejo integral.
- La partición de biomasa aérea y subterránea observada en los árboles, es específica de cada especie. Además, los pinos responden a condiciones crecientes de estrés hídrico aumentando su relación raíz:tallo. Es posible que un cambio similar también ocurra en el ciprés.
- El desplazamiento del coirón por arbustos como neneo o abrojo, tenderá a disminuir la cantidad de biomasa (peso seco.cm^{-2} de área basal o de canopeo). A la vez, el reemplazo de coirones por neneo, aumentará la proporción de biomasa subterránea del sistema.

10 - BIBLIOGRAFÍA

Aerts, R., y F.S. Chapin III, 2000. The Mineral Nutrition of Wild Plants Revisited: A Re-evaluation of Processes and Patterns. *Advances in Ecological Research*, 30, 45 pags.

Assmann E. 1970. The principles of forest yield study. Studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Pergamon Press, Oxford, 503 pgs.

Baker, T.G., Attiwill, P.M. y H.T.L. Stewart 1984. Biomass equations for *Pinus radiata* in Gippsland, Victoria. *New Zealand Journal of Forestry Science* 14(1): 89-96.

Bava, J.O., y H.E. Gonda 1993. Propuesta silvícola preliminar de manejo para ciprés de la cordillera. Primer Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, Paraná, 11 pgs.

Bertiller, M.B., y A. Bisigato 1998. Vegetation dynamics under grazing disturbance. The state-and-transition model for the Patagonian steppes. *Ecologia Austral*, 8: 191-199.

Bond-Lamberty, B., Wang, C. y S.T. Gower 2002. Aboveground and belowground biomass and sapwood area allometric equations for six boreal tree species of northern Manitoba. *Can. J. For. Res.*, 32:1441-1450.

Bonvissuto, G. L., y R. C. Somlo 1998. Guías de condición para los Campos Naturales de Precordillera y Sierras y Mesetas de Patagonia. Proyecto Prodesar, INTA/GTZ.

Brown, S., Gillespie, A.J.R., y A.E. Lugo 1989. Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data. *Forest Science*, 35 (44): 881-892.

Callaway, R.M., De Lucía, E.H., y W.H. Schlesinger 1994. Biomass allocation of montane and desert ponderosa pine: an analog for response to climate change. *Ecology*, 75 (5): 1474-1481.

Canadell, J.G., Jackson, R.B., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., y O.E. Sala 1996. Maximum rooting depth for vegetation types at global scale. *Oecología* 108:583-595.

Cannell M.G.R. 1984. Woody biomass of forest stands. *Forest Ecology and Management*, 8:299-312.

Cooper C.F. 1982. Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 13:155-166.

Coutts, M.P., Nielsen, C.C.N., y B.C. Nicoll 1999. The development of symmetry, rigidity and anchorage in the structural root system of conifers. *Plant and soil*, 217:1-15

Cox G.E. 1863 (reimpr. 1999). Viaje en las Rejiones Septentrionales de la Patagonia (1862-1863). Ed. El elefante Blanco, Buenos Aires, 293 pgs.

de Amador F.F. 1948 (2da. Ed. 1998). San Martín de los Andes. Reseña histórica publicada por la comisión de homenaje al cumplirse el cincuentenario de su fundación. Impr. Didot, San Martín de los Andes, 214 pgs.

Defossé, G.E., Bertiller, M.B., y J.O. Ares 1990. Above-ground phytomass dynamics in a grassland steppe of Patagonia, Argentina. *Journal of Range Management* 43(2): 157-160.

Defossé, G.E., y M.B. Bertiller 1991. Comparison of four methods of grassland productivity assessment based on *Festuca palleescens* phytomass data. *Journal of Range Management* 44(3): 199-203.

Dimitri M.J. 1982. La Región de los Bosques Andino-Patagónicos. Tomo II: Flora dendrológica y cultivada. Col. Científica del INTA, Buenos Aires, 179 pgs.

Fayle D.C.F. 1975. Distribution of radial growth during the development of Red Pine root systems. *Canadian Journal of Forest Research*, 5: 608-625.

Fernández, R.J., y J.M. Paruelo 1988. Root systems of two Patagonian shrubs: a quantitative description using a geometrical method. *Journal of Range Management* 41(3): 220-223.

Flint Hughes, R., Boone Kauffman, J., y V.J. Jaramillo 1999. Biomass, carbon, and nutrient dynamics of secondary forests in a humid tropical region of México. *Ecology*, 80(6):1892-1907.

Golluscio, R.A., Deregibus, V.A., y J.M. Paruelo 1998. Sustainability and range management in the Patagonian steppes. *Ecologia Austral* 8: 265-284.

Gonda H.E. 1998. Height-Diameter and Volume Equations, Growth Intercept and Needle Length, Site Quality Indicators and Yield Equations for Young Ponderosa Pine Plantations in Neuquén, Patagonia, Argentina. Tesis de Postgrado. Oregon State University, 198 pgs.

González Arzac, E. 1995. Productividad de los Pastizales Naturales del Neuquén. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires, 5 Tomos y Anexo.

Grulke, N.E., y L. Balduman 1999. Deciduous conifers: High deposition and O₃ exposure effects on growth and biomass allocation in ponderosa pine. *Water, Air, and soil Pollution*, 116: 235-248.

Gulke, N.E., y W.A Retzlaff 2001. Changes in physiological attributes of ponderosa pine from seedling to mature tree. *Tree Physiology*, 21: 275-286.

Gyenge J. 2005. Uso del agua y resistencia a la sequía de pino ponderosa y ciprés de la cordillera. Tesis doctoral. Centro Universitario Regional Bariloche, Universidad Nacional del Comahue, 210 pgs.

Gyenge, J.E., Fernández, M.E., y T.M. Schlichter 2003. Water relations of ponderosa pines in Patagonia Argentina: implications for local water resources and individual growth. *Trees Structure and Function*, 17(5):417-423.

INTA 1986. Los Arbustos forrajeros. Productividad del Neneo y del Manuel Choique. *Revista Presencia*, EEA Bariloche, (5), 6-10

Jackson, R.B., Schenk, H.J., Jónbágy, E.G., Canadell, J., Colello, G.D., Dickinson R.E., Field, C.B., Firelingstein, P., Neimann, M., Hibbard, K., Kicklighter, D.W., Kleidon, A., Neilson, R.P., Parton, W.J., Sala O.E. y M.T. Sykes 2000. Belowground consequences of Vegetation Change and Their Treatment in models. *Ecological Applications*, 19 (2):470-483.

Jackson, R.B, Canadell J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E., y E.D. Schulze 1996. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108:389-411.

Jackson, D.S., y J. Chittenden 1981. Estimation of dry matter in *Pinus radiata* root systems. I. Individual trees. *N. Z. Jour. of For. Scie.*, 11(2): 164-182.

Jónbágy, E.G., y O.E. Sala 2000. Control of grass and shrub aboveground production in the patagonian steppe. *Ecological Applications*, 10 (2):541-549.

Kozlowski, T.T., Kramer, P.J., y S.G. Pallardy 1991. *The Physiological Ecology of Woody Plants*. Academic Press Inc, 611 pgs.

Kozlowski, T.T. (Ed.) 1968. *Water deficits and plant growth*. Vol II: Plant water consumption and response. Academic Press, N.Y., 333 pgs.

Kuusela, K., y A. Nyssönen 1981. Cuantificación de la energía forestal. Métodos de determinación de la biomasa. *Unasylva*, 133:31-34.

Laclau P. 2003a. Root biomass and carbon storage of ponderosa pine in a northwest Patagonia plantation. *Forest Ecology and Management*, 173: 353-360.

Laclau P. 2003b. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 180: 317-333

Lambert, M.-C., Ung, C.-H., y F. Raulier 2005. Canadian national tree aboveground biomass equations. *Canadian Journal of Forest Research*, 35:1996-2018.

León, R.J.C., Bran, D., Collantes, M., Paruelo, J.M., y A. Soriano 1998. Grandes unidades de vegetación de la Patagonia extra andina. *Ecología Austral*, 8:125-144.

Letourneau, F.J., Andenmatten, E., y T. Schlichter 2004. Effect of climatic conditions and tree size on *Austrocedrus chilensis*-shrub interactions in northern Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 191: 29-38.

Loguercio, G.A., Lencinas, J.D., Antequera, S., Defossé, G., Giménez, M., Gonda, H., Martínez, D., Ríos Campano, F., y A. Siebert 2004. Bases estratégicas para proyectos de forestación en la Patagonia como Mecanismo para un Desarrollo Limpio. Estudio de caso en la provincia del Chubut, Informe Final. Proyecto PIA 05/02, PFD/SAGPyA-CIEFAP, Esquel, Chubut, 72 pgs. y anexos.

Loguercio, G. A., y G. Defossé 2001. Ecuaciones de Biomasa Aérea, Factores de Expansión y Reducción de la Lengua "*Nothofagus pumilio*" (Poepp. Et End) Frasser, en el Sudoeste de Chubut, Argentina. En: Simposio Internacional: Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales, Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile, 18 al 20 de octubre de 2001. IUFRO World Series, vol 13: 115-120.

Loguercio, G.A., Rajchenberg, M., Rodríguez, N., y P. Pantaenius 1999. Informe del Curso-Taller de Actualización en Silvicultura de los Bosques de Ciprés de la Cordillera. CIEFAP/GTZ. El Bolsón, 13 y 14 de Mayo de 1999, 104 pgs.

Lust, N., van Camp, L., Muys, B., y L. Nachtergale 1995. Comparative Study of C Sequestration by New Forests on Former Pasture Lands. *Silva Gandavensis*, 60: 81-94.

Matteucci, S.D., y A. Colma 1982. Metodología para el Estudio de la Vegetación. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos (OEA), Programa Regional de Desarrollo Científico y Tecnológico, serie de biología, monografía n° 22, 168 pgs.

Mayol, E.E., y E. van Konynenburg 1991. Evaluación preliminar de trabajos de poda en *Austrocedrus chilensis* en la reserva forestal "El Guadal", El Bolsón, Pcia. de Río Negro. Tesis de graduación de la carrera de técnico forestal. AUSMA, Universidad Nacional del Comahue, San Martín de los Andes. Inédito.

Mazzarino M.J. 2005. Indicadores de economía de nutrientes y fertilidad de suelos en bosques de ciprés. En: Actas I Reunión sobre Ecología, Conservación y Uso de los Bosques de Ciprés de la Cordillera. Centro de Investigación y Extensión Forestal Andino Patagónico (CIEFAP) / Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco/ Universidad Nacional del Comahue. Esquel, 28-30 de Abril de 2005, pgs: 29-33.

Mazzarino, M.J., Bertiller, M., Schlichter, T., Y M. Gobbi 1998. Nutrient cycling in Patagonian ecosystems. *Ecología Austral*, 8: 167-181.

Monserud, R. A., y J.D. Marshall 1999. Allometric crown relations in three northern Idaho conifer species. *Can. J. For. Res.*, 29: 521–535.

Oliver, W.W., y R.A. Ryker 1990. *Pinus ponderosa* Dougl. ex Laws - Ponderosa pine. En: Burns, R.M. y B.H. Honkala, Tech. Coords. *Silvics of North America, Volume 1, Conifers*. USDA Forest Service. Agriculture Handbook 654, Washington D.C.

Prodan, M., Peters, R., Cox, F., y P. Real 1997. *Mensura Forestal*. Ed. IICA, 586 pgs.

Sarmiento, A., y G. Siffredi 1983. Estimación de la producción anual por planta y por hectárea de *Mulinum spinosum* (neneo) en un sitio de Sierras y Mesetas Occidentales. Trabajo presentado al taller sobre Arbustos Forrajeros de Zonas Áridas y Semiáridas, Medoza, IADIZA-FAO:19-29.

Schlichter, T., y P. Laclau 1998. Ecotono estepa-bosque y plantaciones forestales en la Patagonia norte. *Ecología Austral*, 8: 285-296.

Schmaltz, J., y H.E. Gonda 1991. Descripción de un bosque nativo de ciprés y propuestas para su futuro manejo. Actas del II Congreso Internacional de Gestión en Recursos Naturales, Valdivia, Chile.

Schulze, E.D., Mooney, H.A., Sala, O.E., Jóbaggy, E., Buchmann, N., Bauer, G., Canadell, J., Jackson, R.B., Loreti, J., Oesterheld, M., y J.R. Ehleringer 1996. Rooting depth, water availability, and vegetation cover along an aridity gradient in Patagonia. *Oecologia*, 108: 503-511.

Sokal, R.R., y F.J. Rohlf 1999. *Introducción a la Bioestadística*. Ed. Reverté, México, 362 pgs.

Soriano, A., Golluscio, R.A., y E. Satorre 1987. Spatial heterogeneity of the root system of grasses in the Patagonian arid steppe. *Bulletin of the Torrey Botanical Club*, 114 (2):103-108.

Soriano, A., y O.E. Sala 1983. Ecological strategies in a Patagonian arid steppe. *Vegetatio* 56:9-15.

Suzuki, M., y T. Hiura, 1999. Allometric differences between current-year shoots and large branches of deciduous broad-leaved tree species. *Tree Physiology*, 20:203-209.

Vann, D.R., Palmiotto, P.A., y G. R. Strimbeck 1998. Allometric equations for two South American conifers: Test of a non-destructive method. *Forest Ecology and Management*, 106:55-71.

Veblen, T.T., Kitzberger, T., Burns, B.R., y A. Rebertus 1996. Perturbaciones y dinámica de regeneración en bosques andinos del sur de Chile y Argentina. En: Armesto J.J., Villagrán, C., y M.K. Arroyo 1996. *Ecología de los Bosques nativos de Chile*. Editorial Universitaria, Cap 9: 169-198.

Verwijst, T., y Da-Zhi-Wen 1996. Leaf allometry of *Salix viminalis* during the first growing season. *Tree Physiology*, 16:655-660.

Waring, R.H, y S.W. Running 1998. *Forest Ecosystems. Analysis at multiple Scales*. 2nd. Ed., Academic Press, San Diego, USA, 370 pgs.

Woomer, P.L., y C.A. Palm 1998. An approach to estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. *Commonwealth Forestry Review*, 77(3):191-190.

Zar J.H. 1996. *Biostatistical Analysis*. Prentice Hall Inc., third ed., 662 pgs.

PARTE III - BIOMASA Y CARBONO EN BOSQUES Y ESTEPA

11 - MATERIALES Y MÉTODOS

11.1 ESTIMACIÓN DE BIOMASA Y CARBONO DE BOSQUES Y ESTEPAS

Para estimar el carbono secuestrado a nivel de rodal, entre los años 2000 y 2003 se relevaron parcelas de prueba apareadas de plantaciones de pino y bosques de ciprés, en un amplio rango ambiental, desde el sur de Neuquén hasta el norte de Chubut, entre los paralelos 39°55' y 42°14' de latitud sur y los meridianos 70°58' y 71°35' de longitud oeste (Figura 11.1-1). Estos sitios fueron caracterizados fisonómicamente, y en las parcelas forestales se realizaron inventarios y análisis de suelos. En estepas contiguas a los bosques, se registró la condición del pastizal (Bonvissuto y Somlo 1998, Sifredi y Becker s/f), y se tomaron muestras de suelo. Luego, durante 2003 y 2004, se estudiaron varios sitios con plantaciones de pino ponderosa, en sectores intervenidos con raleos comerciales y en otros sin raleo previo o mínimamente raleados. Estos estudios incluyeron observaciones de estructura forestal, cantidad y tipo de mantillo, y contenido de carbono en suelos y en la interfase mantillo-suelo. Además se evaluaron los efectos del tránsito y arrastre en la operación forestal sobre estas variables.

La biomasa arbórea actual del rodal se calculó aplicando las ecuaciones alométricas ajustadas para la estimación de biomasa individual (Parte II, sección 7.2), a cada uno de los individuos observados en las parcelas de prueba. Con las edades del rodal determinadas por conteo de anillos o información histórica, se derivó el crecimiento medio anual de biomasa.



Figura 11.1-1. Ubicación de sitios de evaluación a nivel de rodal o *stand*. Cada círculo lleno corresponde a un sitio de muestreo de rodales de ciprés, plantaciones de pino y estepas contiguas. Las líneas gruesas grises representan límites políticos y las restantes, la red hidrográfica regional.

La biomasa en las estepas se estimó a partir de observaciones independientes en varios sitios del sur de Neuquén (Figura 11.1-3), en general cercanos a las parcelas apareadas, donde se estimó la biomasa de los componentes herbáceo y arbustivo por alometría (Parte II, sección 7.2). Los métodos seguidos se describen a continuación con mayor detalle.

En las parcelas de ciprés de la cordillera y de pino ponderosa se evaluó la densidad de árboles y la distribución de diámetros y alturas en cada rodal. Además, en el

marco de un proyecto más amplio¹³, -que incluyó algunos de los estudios aplicados a biomasa de esta tesis-, se midieron características físico-químicas del suelo (de Koning *et al.* 2002). En 23 sitios se establecieron parcelas apareadas de pino, ciprés y estepa, en tanto que en otros 26, las parcelas arbóreas fueron únicamente de ciprés o de pino. En estos casos se tomaron dos parcelas de clases de diámetro-edad diferentes. Las parcelas para la medición de estructura forestal, de forma circular y de 500 m² de superficie (con excepción de algunas más reducidas, de 400 y 450 m², para reducir efectos de borde) se encontraban incluidas dentro de un área mayor de 50x50 m (Figura 11.1-2), donde se tomaron muestras de suelo y de mantillo al azar, a partir del eje central de cada área. En total se midieron variables dasométricas en 49 parcelas de pinos y 37 de ciprés, y se tomaron muestras de suelos en 18 parcelas de ciprés, 23 de pinos y 22 de pastizal. Los criterios para la instalación de parcelas apareadas según el uso, fueron la similitud fisiográfica y edáfica, y la proximidad de los ambientes de cada uso. Donde fue posible, las parcelas fueron contiguas (descartándose las áreas con efectos de borde) y en los casos de parcelas alejadas, la distancia no excedió en ningún caso los 2.000 m.

En las parcelas apareadas ciprés-pino (o en los pares de la misma especie) se evaluó únicamente el mantillo fino, conformado por hojarasca, ramas finas y material sub-leñoso o herbáceo semi-descompuesto. Dado que la mayoría de estas parcelas no acusaban manejo reciente de poda o raleos, el material leñoso grueso era escaso y disperso. Por ello, el mantillo grueso conformado por ramas, tocones, despuntes de raleo y estróbilos fue evaluado únicamente en el análisis de plantaciones manejadas de pino ponderosa (sección 11.2).

¹³ Proyecto: Evaluación del potencial de secuestro de carbono de proyectos de forestación y bosques secundarios en dos zonas climáticas de Sudamérica, INTA-GTZ/TÖEB.

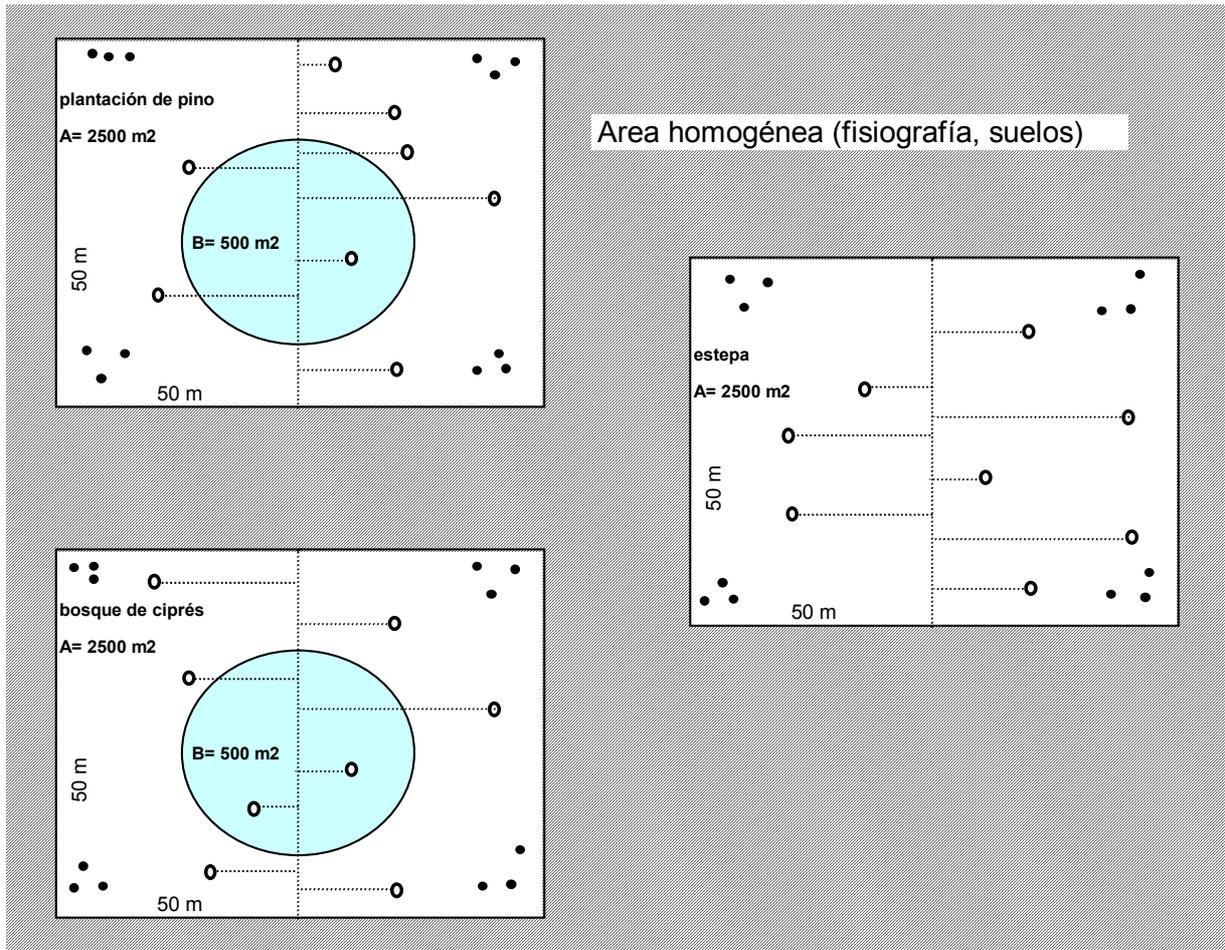


Figura 11.1-2. Diseño de muestreo de bosques y estepas contiguas. Dentro de un área de 50x50 m (recuadro **A** de cada diagrama de parcelas de ciprés, pino y estepa) y a partir de un eje central (línea de puntos vertical), se tomaron al azar muestras compuestas de suelo con barreno a dos profundidades (símbolos vacíos), para el análisis de carbono orgánico. En proximidades de los extremos se tomaron muestras de suelo para densidad aparente (símbolos llenos). Para los inventarios forestales, se delimitó una parcela menor en el centro (circunferencia **B** de cada parcela forestal).

Las estimaciones de hojarasca de las parcelas forestales se realizaron a partir de muestras compuestas tomadas de 10 micro-parcelas de 40 x 50 cm, establecidas al azar dentro de cada parcela de 2.500 m² de bosque o plantación evaluados, por sorteo de distancias a partir del mismo eje central indicado en la Figura 11.1-2. El material recolectado se secó en estufa (70° C, 48-60 h) y se pesó.

La evaluación de carbono en suelos comprendió por una parte, la recolección de muestras con cilindro de 250 cm³ para determinación de la densidad aparente, próximas a los cuatro vértices de la parcela, a razón de tres muestras en cada lugar, y a dos profundidades: 0-25 cm y 25-50 cm. Estas muestras fueron secadas en estufa (24 h, 105°C), obteniéndose la densidad aparente por pesada con balanza digital (precisión 1 g). Por otro lado, en ocho puntos establecidos por sorteo en dirección normal al eje central de cada parcela, se tomaron muestras compuestas de suelo con barreno a las profundidades de 0-25 cm y 25-50 cm, que fueron secadas al aire, tamizadas y remitidas a laboratorio para su análisis por combustión seca con un analizador automático (datos del Proyecto INTA/ GTZ-TOEBB, de Koning *et al.* 2002).

Con los datos de inventario forestal, se calcularon en gabinete, el área basal, la densidad relativa del rodal y el índice de sitio. El volumen de fuste de cada parcela se estimó aplicando ecuaciones de volumen individual basadas en el dap, o en el dap y la altura, de aplicación en la región para ciprés y pino ponderosa (Chauchard *et al.* 1991, Andenmatten y Letourneau 1997). La biomasa del rodal se estimó aplicando las funciones individuales a cada árbol de las parcelas y expandiendo¹⁴ los resultados a hectárea. Estas estimaciones del contenido de biomasa aérea de los rodales de pino y ciprés se ajustaron en función de la densidad de plantas. La variable considerada fue la *densidad relativa de Curtis* (DR), dada su utilidad en la aplicación de modelos de proyección de crecimiento (Parte IV, sección 16.1).

¹⁴ Para relacionar la biomasa individual con la superficie ocupada por las plantas según las distribuciones observadas (en valores por ha), se utiliza el término *expandir*, de uso habitual en ciencias forestales, para indicar la aplicación de un multiplicador, y no *extrapolar*, que implica la aplicación de un valor más allá de los límites para los que fue estimado o medido.

Para la estimación de la biomasa de las estepas, durante diciembre de 2005 y enero de 2006, se observaron 26 sitios seleccionados al azar con estepas de condición y ambiente variable en el sur de Neuquén (Figura 11.1-3). En cada uno de estos sitios se determinó la condición del pastizal utilizando una guía para estepas de coirón blanco, de INTA (Siffredi y Becker *s/f*). Además, se establecieron aleatoriamente entre 3 y 6 microparcels rectangulares de 2x1 m, donde se determinó la cobertura vegetal total, la composición específica y la cobertura de las especies principales, la frecuencia y diámetro basal de plantas de coirón blanco, de coirón amargo (*Stipa spp*) y de otros pastos de similar morfología. También se determinó la frecuencia y los diámetros mayor y transversal de la copa de arbustos de neneo y abrojo. Con los valores diamétricos se estimó la biomasa parcial y total de pasto y arbustos por alometría, y se expandieron a los valores hallados. Para coirones del género *Stipa*, que en algunos sitios tenían alta densidad y cobertura, y otros géneros menos frecuentes como *Poa*, *Bromus* u *Hordeum*, se utilizaron las mismas ecuaciones alométricas que para el coirón blanco, dado la carencia de estimadores específicos. Se excluyó por lo tanto de la estimación de biomasa, a algunas plantas presentes aunque de baja cobertura, como el vinagrillo (*Rumex acetosella* L.), la frutilla (*Fragaria chiloensis* (L) Ehrh.), diente de león (*Taraxacum officinale* Weber), y eventualmente algunos arbustos de los géneros *Senecio*, *Baccharis* y *Berberis*. El mantillo del suelo, muy escaso en la mayoría de las parcelas tampoco fue considerado, asumiéndose que la fracción seca en pie contenía la mayor parte de la materia orgánica muerta presente. Las estimaciones de cobertura y biomasa realizadas en estos sitios de estepa, fueron analizadas en función de diferentes atributos específicos, como la cobertura y densidad de las especies principales, y de variables ambientales, como la precipitación y la condición de pastizal. Las

estimaciones de biomasa a nivel de stand, fueron ajustadas en función de la *cobertura específica* (%) de cada especie evaluada. También se realizó un análisis de regresión de la biomasa total observada del conjunto de coirones, neneo y abrojo en función de la *cobertura total* de las estepas, y de la *cobertura parcial* del conjunto de los coirones, neneo y abrojo.



Figura 11.1-3. Ubicación de sitios de evaluación de pastizales de estepa en el sur de Neuquén. Cada círculo lleno corresponde a un sitio de medición de cobertura y dimensiones de plantas para estimación de biomasa de coirones, abrojo y neneo (4-6 parcelas al azar por sitio). Se indican algunas localidades del área y la red hidrográfica.

También se analizó la correlación entre la distribución de biomasa de bosques de ciprés o pino y el carbono de los suelos, con variables topográficas y ambientales. La precipitación media anual fue probada como estimador de la biomasa de cada ecosistema, en ajustes de regresión lineales. Los datos pluviométricos regionales, en general escasos y de baja precisión (Parte I, sección 3.1), fueron tomados para cada sitio evaluado, de un modelo cartográfico de distribución de isohietas anuales ajustado en base a los aforos de caudales hidrográficos, elaborado por Drasckler *et al.* (1990), que cubre la mayor parte del área estudiada (sur de Neuquén y parte del área cordillerana de Río Negro). La pluviometría de los sitios del suroeste de Río Negro y Chubut, próximos al paralelo 42°S, se completó con estadísticas del Campo Forestal General San Martín (INTA) y con datos de Córdón *et al.* (1993). Los datos de biomasa de estepas también fueron analizados en función de la pluviometría anual y de otras variables como la cobertura y condición de pastizal.

11.2 MANEJO Y BALANCE DE CARBONO EN FORESTACIONES DE PINO PONDEROSA

En una etapa posterior, durante 2003 y 2004, atendiendo al objetivo específico de evaluar el secuestro de carbono en plantaciones *manejadas* de pino ponderosa y los cambios en el almacenaje de carbono resultantes del manejo, se estudiaron algunas plantaciones de pino en el sur de Neuquén. Las etapas proseguidas fueron: (1) selección y caracterización de sitios, (2) estimación de biomasa y carbono de los árboles y del sotobosque, (3) estimación de mantillo y (4) cuantificación del carbono en los suelos de las plantaciones. A continuación se describe la metodología aplicada en cada una de estas etapas.

Selección y caracterización de sitios

Para la selección de sitios se atendió a los siguientes criterios:

- Forestaciones en macizos inicialmente densos, sometidas a un primer raleo reciente con destino industrial (tratamiento), con plantaciones próximas o contiguas de similar edad pero sin raleo o con raleos tempranos preferentemente suaves (testigo).
- Productividad forestal media, asimilable a sitios localmente clasificados como *aptos* para el crecimiento de pino ponderosa (Irisarri y Medía 1991, Ferrer *et al.* 1990).
- Homogeneidad apreciable en diámetro de los árboles.
- Baja pendiente, ausencia de rocas en superficie.
- Disponibilidad de información histórica relativa a fecha de plantación, densidad inicial y manejo silvícola.

- Fácil accesibilidad en términos de distancia y calidad de camino durante el invierno, apoyo local, y costos de viaje.

De acuerdo con estos criterios, se identificaron tres sitios con rodales de pino ponderosa en tres zonas del sur de Neuquén: Meliquina, Junín de los Andes y Abra Ancha, con bosques cuyas edades actuales oscilaron entre 19 y 28 años. En estas plantaciones se evaluaron parcelas coetáneas y contiguas de bosque de 50x50 m *con* y *sin* raleo comercial reciente, aunque algunas fueron de menor tamaño, para excluir bordes (Tabla 11.2-1). Uno de los rodales raleados (identificado como LS1) corresponde a una parcela experimental de establecimiento de un sistema silvopastoril, con pastos naturales creciendo bajo el dosel, una baja densidad de árboles que han sido podados en altura, y con muy escasos residuos forestales en el suelo, aunque no pastoreado aún (Fernández *et al.* 2006). Los restantes rodales se encuentran manejados únicamente para la producción maderable. La mayoría de estos pares *con/ sin* raleo pertenecía a una misma plantación original, abonando la presunción que las diferencias observables en biomasa serían únicamente consecuencia del manejo diferencial de raleo. El par C6/ C6₍₂₀₀₀₎ de Junín de los Andes, corresponde a un mismo rodal, medido antes y después del raleo comercial. Dentro de cada parcela raleada, se evaluaron efectos de la compactación del suelo por tránsito y arrastre sobre la densidad aparente y el contenido de carbono orgánico (Figura 11.2-1). En la Tabla 11.2-1 se indican los sitios seleccionados y los tratamientos evaluados.

En las parcelas de inventario forestal se midió el diámetro a la altura del pecho (dap) de todos los individuos presentes, la altura de algunos (n=3-6) árboles dominantes, y

se contabilizó el número de plantas. También se midió la longitud de los 5 entrenudos por encima de 1,30 m de los árboles dominantes (n=3-6), como estimador alternativo del índice de sitio (Gonda 1998, Thrower 1989, Hägglund 1981). Salvo en la parcela LS1, de marcada homogeneidad, en todas las parcelas se subdividió el inventario en cuatro sub-parcelas para analizar la homogeneidad diamétrica interna del rodal mediante la estimación y análisis de su varianza. Con los datos de campo se estableció luego el área basal, la densidad del rodal y el índice de sitio.

Tabla 11.2-1. Ubicación, edad (años), superficie (m²) y tratamientos de las parcelas de pinos para evaluación del carbono almacenado y los efectos del aprovechamiento forestal. Los tratamientos evaluados son: R= raleo comercial reciente, SR= sin raleo o raleo antiguo a deshecho; SS= Sistema raleado con objetivo silvopastoril. Los subtratamientos en las parcelas raleadas son: Cp₀= suelos sin compactación, Cp₁= suelos con compactación por arrastre, Cp₂= suelos compactados por arrastre y tránsito de maquinaria (vías de saca). Entre líneas horizontales se separan los pares (con/ sin raleo) de cada sitio. Muestreos realizados entre junio de 2003 y enero de 2004.

SITIO / RODAL	UBICACIÓN	EDAD	SUPERF	TRATA-MIENTO	SUBTRATAM	VARIABLES ESTRUCTURALES MEDIDAS
<u>Meliquina</u>						Densidad, Area basal, Densidad relativa, Altura dominante
L5A	40°29'20"S, 71°16'03"W	25	2500	R	Cp ₀ , Cp ₁ , Cp ₂	
L5B	40°29'06"S, 71°16'34"W	25	2500	SR	Cp ₀	
LS1	40°29'S, 71°14'W	19	600	SS	Cp ₀	
L23	40°29'10"S, 71°16'22"W	21	2500	SR	Cp ₀	
<u>Junín de los Andes</u>						
C6 (2000)	39°56' S, 71°05' W	19	500	SR	Cp ₀	
C6	39°56'54"S, 71°05'30"W	23	450	R	Cp ₀ , Cp ₂	
C10	39°57'21"S, 71°05'47"W	25	2500	R	Cp ₀ , Cp ₁ , Cp ₂	
C11	39°57'11"S, 71°05'45"W	25	2500	SR	Cp ₀	
<u>Abra Ancha</u>						
AAR	39°19'09"S, 70°56'52"W	28	2500	R	Cp ₀ , Cp ₂	
AAT	39°19' S, 70°56' W	28	730	SR	Cp ₀	

Biomasa y carbono en los componentes arbóreo y herbáceo

Para conocer el contenido actual de biomasa y carbono a nivel de rodal ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los diferentes compartimentos del sistema arbóreo: follaje, ramas, fuste, y raíces leñosas, se aplicaron a cada árbol relevado en las parcelas de inventario, las ecuaciones alométricas de biomasa individual desarrolladas (Parte II, sección 7.2). Estos resultados fueron expandidos a hectárea, y convertidos a unidades de carbono con el coeficiente $C/\text{biomasa}=0,5$ (IPCC 1996), algo menor que el citado por Lamtom y Savidge (2003) para pino ponderosa y otras coníferas del Hemisferio Norte¹⁵. En la Tabla 11.2-2 se indican los compartimentos y fracciones de carbono hallados y evaluados en las parcelas. Con excepción del rodal LS1, la vegetación del sotobosque estaba ausente o era exigua, aún en las parcelas raleadas, y por lo tanto, no fue considerada. En el rodal LS1, se cuantificó la biomasa del pastizal subyacente aplicando ecuaciones alométricas para las tres especies más conspicuas: coirón blanco, neneo y abrojo.

Detritos de las plantaciones

Los detritos de las plantaciones fueron cuantificados separando las siguientes fracciones: (a) ramas y conos leñosos, (b) hojarasca, (c) tocones arraigados y (d) despuntes y trozas residuales del raleo. Los componentes (a) y (b) se encontraban en todos los rodales en tanto que los últimos (c) y (d), solamente se hallaron en los aprovechados antigua o recientemente. El muestreo de ramas y conos leñosos (a), y de hojarasca (b) se realizó en cada parcela sobre tres transectas de 50 m

¹⁵ El IPCC recomienda utilizar por defecto el valor $C/\text{biomasa}=0,5$ aunque Lamtom y Savidge (2003) hallaron que en general varias coníferas tienen más del 50% de carbono en la madera, y más que las latifoliadas, debido al mayor contenido relativo de lignina. También encontraron diferencias entre el contenido de carbono entre leño temprano (mayor) y tardío (menor) de los árboles. Por no disponerse de referencias específicas para las otras especies evaluadas, en este trabajo se optó por utilizar el índice recomendado por IPCC en todas ellas.

perpendiculares a la pendiente principal -una, próxima al borde inferior de la parcela, otra en el medio y la restante, cercana al borde superior (A, B y C, respectivamente, en la Figura 11.2-1). En cada transecta se recolectaron tres muestras al azar de las fracciones mencionadas, con un marco de 0,220 m², evitando tomar material apilado en cordones, que se evaluó aparte (ver más abajo). Cada una de las muestras fue pesada en fresco, al igual que la fracción de mantillo semi-incorporada al suelo (ver apartado siguiente). Con estas tres muestras por cada transecta se formaron muestras compuestas (una por transecta) que fueron pesadas *in situ* y secadas luego en estufa durante 72h a 70°C, determinándose su peso seco. La biomasa fue estimada aplicando a las muestras los coeficientes de peso seco obtenidos (la relación peso seco/ peso fresco), promediando y expandiendo estos valores a nivel de rodal. Del mismo modo que para la biomasa de árboles, se asumió un contenido de carbono en los detritos del 50% del peso seco (IPCC 1996). En los rodales C6, C10, C11 y AAR, los residuos de poda y raleo se acumulaban también en cordones leñosos de 2 a 4 m de ancho y cada tres a cuatro filas de árboles aproximadamente. Para evaluar estas pilas se estimó en primer lugar la proporción de terreno ocupada por las mismas, promediando la intercepción de línea sobre tres transectas normales al eje de la parcela medidas con cinta métrica. Luego se tomaron muestras al azar de segmentos de al menos un metro de longitud (por el ancho de la pila) de cada cordón leñoso encontrado en la parcela (3 observaciones en C6, 6 observaciones en C10, 4 observaciones en C11, y 3 en AAR). En esas muestras se pesaron separadamente las ramas, las acículas adheridas a éstas y los despuntes, para ponderarlos separadamente en función del área ocupada y añadir estos datos a las determinaciones previas de cada fracción. Las pilas del rodal C11 contenían solamente ramas viejas de poda, sin hojarasca adherida. Por otra parte, el muestreo

de tocones (fracción c), y de trozas y despuntes no apilados (d), se realizó por inventario de existencias midiendo la frecuencia, diámetro de tocones, diámetro y longitud de trozas y despuntes (Woomer y Palm 1998), en franjas de 3 m de ancho sobre las transectas (3 franjas de 3x50 m en cada parcela, Figura 11.2-1). En el rodal L5A, los tocones fueron alternativamente relevados en las mismas sub-parcelas de inventario de estructura arborea, y en la parcela del rodal LS1 no se encontraron trozas ni tocones.

El peso seco de los tocones fue estimado aplicando una ecuación alométrica: diámetro a la altura del tocón/biomasa del raigón, desarrollada en el estudio de biomasa individual. Se asumió en forma conservadora, una deducción del 50% del peso seco por descomposición del material con posterioridad al raleo, aunque se desconoce la tasa de descomposición de este material en las plantaciones locales¹⁶. La biomasa de despuntes y trozas fue obtenida ajustando el volumen calculado según el inventario por la densidad de la madera determinada en observaciones previas (0,434 kg.dm⁻³). Análogamente a las otras determinaciones ya mencionadas, el contenido de carbono se estimó en un 50% del peso seco total (IPCC 1996).

Carbono en los suelos de las plantaciones

Para la evaluación del carbono en los suelos, se consideraron tres fracciones de este compartimento: (a) mantillo semi-incorporado, (b) suelo mineral de 0 a 25 cm de profundidad y (c) suelo mineral de 25 a 50 cm de profundidad. La fracción (a) consiste en una mezcla de mantillo vegetal en descomposición avanzada, humus y

¹⁶ Barrera *et al.* (2004), citan una vida media de 10 a 63 años para mantillo grueso leñoso de varias especies del género *Pinus* y *Picea*, con tasas de decaimiento $k=0,055-0,011$. En el caso de los tocones, cuyas raíces se encuentran en mayor contacto con los descomponedores del suelo que el

suelo mineral, asimilable a un horizonte 0. El abundante micelio fúngico aglutinando el material orgánico, es característico de esta capa. En la subyacente (0-25 cm), la materia orgánica del suelo se encuentra íntimamente incorporada a la fracción mineral en tanto que por encima de ella, los detritos de hojarasca, conos y ramas aún se encuentran con mínima descomposición. El mantillo semi-incorporado fue recolectado en las parcelas tomando tres muestras al azar en cada transecta (A, B y C) con el marco de 0,220 m² (Figura 11.2-1) Las muestras fueron pesadas en fresco, mezclándose luego en muestras compuestas (una por transecta) y enviadas a laboratorio para análisis químico de carbono, previo secado al aire. En laboratorio, el carbono total del mantillo fue obtenido por calcinación, metodología aplicada para material predominantemente orgánico (Nelson y Sommers 1996). En todos los rodales estudiados se determinó la densidad aparente del suelo en el perfil superficial (0-25 cm) utilizando un cilindro de acero de 250 cm³. Para ello se tomaron entre tres y cinco muestras sobre una diagonal de la parcela (en las parcelas L5A, C6, C10 y AAR: 3-5 muestras por sub-tratamiento), en cercanías de un vértice inferior de la misma, en el área central y en proximidades del vértice superior más distante del primero. Cada una de ellas fue secada en estufa (24 h, 105°C) y pesada, obteniéndose así al menos tres lecturas de densidad aparente por parcela. Las muestras de suelos para análisis de carbono se tomaron siguiendo la misma metodología, en las capas de 0-25 cm y 25-50 cm de profundidad, utilizando un barreno de suelos de acero, semicilíndrico. Se tomaron tres muestras compuestas por parcela y por sub-tratamiento (entre tres y nueve muestras, según parcela), que se rotularon y enviaron a laboratorio. Similar procedimiento se siguió para la toma de muestras en la capa de suelos de 25-50 cm. En algunas parcelas no se realizaron

mantillo, presumiblemente la descomposición -al menos de la fracción subterránea- sería mucho más acelerada.

determinaciones químicas a 25-50 cm de profundidad. Los análisis químicos se realizaron en el laboratorio de suelos del Centro Regional Universitario de Bariloche (CRUB). El carbono y la materia orgánica se determinaron por digestión húmeda siguiendo el método Walkley-Black (Nelson y Sommers 1996).

Las evidencias de arrastre combinadas con tránsito de maquinaria fueron claramente visibles en el terreno (sub-tratamiento Cp_2). Para los sectores sin alteración evidente (Cp_0) se muestreó preferentemente entre árboles muy próximos entre sí, de manera de asegurar la ausencia de perturbación. La situación intermedia (Cp_1) fue más difícil de determinar claramente, debido a que la abundancia de ramas y hojarasca oculta las evidencias de arrastre. Para determinar el área relativa de la parcela afectada por arrastre y tránsito de maquinaria, en los rodales raleados L5A y C10, se midió la intercepción lineal de las transectas A, B y C sobre suelo sin evidencias de compactación o arrastre de material (Cp_0), suelo con evidencias de arrastre de material grueso (Cp_1), y suelo con evidencias de arrastre y compactación por tránsito de maquinaria (Cp_2). En las parcelas C6 y AAR se pudieron observar solamente dos sub-tratamientos: Cp_0 y Cp_2 (Tabla 4.2-2). Los valores de intercepción lineal de las tres transectas se promediaron y ponderaron por su longitud, obteniéndose así la superficie de cada sub-tratamiento. En la Figura 11.2-1 se esquematiza el diseño general de muestreo para los rodales con raleo y sin raleo.

Tabla 11.2-2. Compartimentos de carbono evaluados en rodales de pino ponderosa en tres sitios de la provincia de Neuquén: Meliquina, Junín de los Andes y Abra Ancha. Las celdas marcadas con (X) corresponden a los compartimentos evaluados, las celdas sombreadas representan la ausencia del compartimento correspondiente en la parcela.

SITIO / RODAL	BIOMASA		DETRITOS					SUELOS		
	ARBOLES	PASTIZAL	TRONCOS, DESPUNTES	RAMAS	HOJARASCA	TOCONES	PILAS LEÑOSAS	MANTILLO SEMIDESC.	0-25 CM	25-50 CM
MELIQUINA										
L5B	X		X	X	X	X		X	X	X
L5A	X		X	X	X	X		X	X	X
LS1	X	X		X	X			X	X	X
L23	X		X	X	X	X		X	X	X
JUNIN DE LOS ANDES										
C6 (2000)	X									
C6	X			X	X	X	X	X	X	X
C10	X		X	X	X	X	X	X	X	X
C11	X		X	X	X	X		X	X	X
ABRA ANCHA										
AAR	X		X	X	X	X	X	X	X	X
AAT	X			X	X			X	X	X

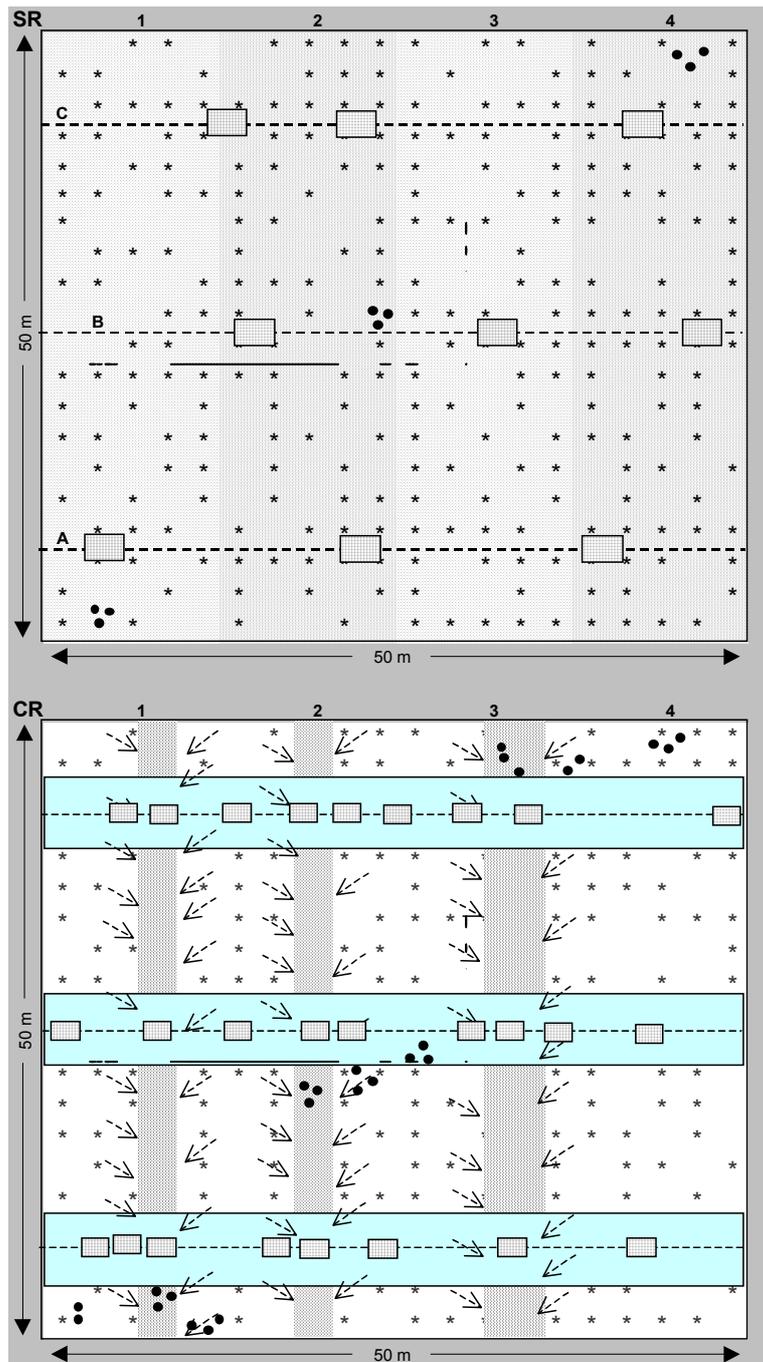


Figura 11.2-1. Diseño de muestreo en rodajes *sin* y *con* raleo (SR, CR) en parcelas de 50x50 m. Los asteriscos (*) simbolizan los árboles. Sobre las transectas A, B y C (----) se tomaron muestras de mantillo (marcos de 0,220 m², rectángulos pequeños). Los puntos de muestreo de densidad aparente y de carbono del suelo se indican con círculos negros. Se indican las subparcelas de inventario forestal (numeradas de 1 a 4) con diferente sombreado en el gráfico superior. En el gráfico CR se indican vías de saca (franjas verticales de líneas interrumpidas) y zonas de arrastre de troncos (flechas). Sobre franjas de 3x50 m (rectángulos mayores sobre las transectas) se realizó el inventario de tocones y despuntes. En las parcelas raleadas (CR), el muestreo de mantillo y de suelos se realizó en forma similar a SR, para: (1) cada uno de los sectores con arrastre y tránsito de maquinaria, (2) con arrastre solamente, y (3) sin estos efectos.

12- RESULTADOS

12.1 BIOMASA DE BOSQUES Y DE ESTEPAS

Biomasa de plantaciones de pino y bosques de ciprés

Los valores estimados de biomasa a nivel de rodal corresponden a plantaciones de pino ponderosa de dap $17,0 \pm 0,8$ cm (promedio \pm error estándar) en un rango de edades (eap) de 8-42 años, y a bosques de ciprés de la cordillera de dap $18,9 \pm 1,2$ cm (promedio \pm error estándar) en un rango de edades de 18-90 años (eap de los árboles dominantes de cada rodal, Figura 12.1-1). Se excluyeron todas las parcelas cuyos dap promedio excedieron el rango de aplicación de las ecuaciones de biomasa individual. La Tabla 12.1-1 indica los parámetros de estructura, desagregando los valores de biomasa estimados en: fuste, copa (ramas y follaje) y raíces.

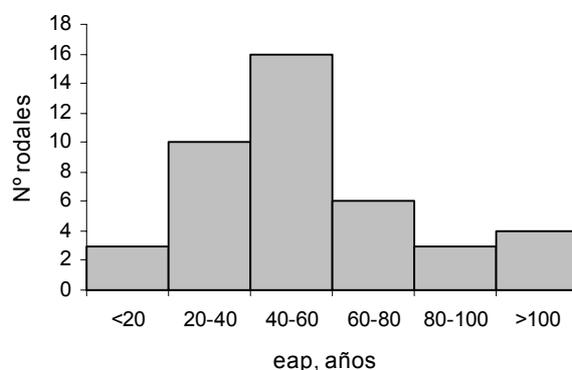


Figura 12.1-1. Histograma de frecuencia de parcelas con bosques de ciprés de la cordillera, en función de clases de eap. Las parcelas de la clase superior (>100 años), y varias de las clases menores, no formaron parte de la muestra de evaluación de biomasa, ya que sus diámetros individuales medios excedían el rango de aplicación de las ecuaciones. Evaluaciones de campo entre mayo-junio y sept-diciembre de 2000, y enero-marzo de 2001.

Tabla 12.1-1. Parámetros de estructura a nivel de rodal, incluyendo la biomasa de fuste, copa (ramas más follaje) y raíces de los dos tipos forestales evaluados. Los promedios corresponden a n=49 parcelas de pino ponderosa y a n=35 parcelas de ciprés de la cordillera. Se excluyeron todos los rodales cuyo dap medio excedió el rango de aplicación de las ecuaciones de biomasa individual. Los valores en cursiva indican el error estandar de la media. Las diferencias entre ambos tipos de bosque para cada variable se indican en la última columna, donde *ns*: no significativo ($p > 0,10$), (*): levemente significativo ($p < 0,10$), (**): altamente significativo ($p < 0,05$) y muy altamente significativo ($p < 0,001$). Evaluaciones de campo entre mayo-junio y sept-diciembre de 2000 y enero-marzo de 2001.

VARIABLE	UNIDAD	PINO PONDEROSA		CIPRES		DIF
DENSIDAD DE PLANTAS	pl.ha ⁻¹	1.057,0	77,3	992,9	101,6	<i>ns</i>
DAP MEDIO	cm	17,0	0,8	18,9	1,2	<i>ns</i>
ALTURA DOMINANTE	m	9,7	0,6	13,1	1,0	**
AREA BASAL	m ² .ha ⁻¹	28,0	2,3	32,5	4,4	<i>ns</i>
EDAD AL PECHO (EAP)	años	15,6	1,1	44,9	3,1	***
DENSIDAD RELATIVA (DR)		6,4	0,5	6,8	0,7	<i>ns</i>
VOLUMEN DE FUSTE	m ³ .ha ⁻¹	147,4	13,2	167,4	28,0	<i>ns</i>
BIOMASA						
FUSTE	Mg.ha ⁻¹	58,5	5,1	98,7	24,4	*
COPA	Mg.ha ⁻¹	20,6	1,5	21,1	3,7	<i>ns</i>
SUBTERRANEA	Mg.ha ⁻¹	15,6	1,2	11,4	1,9	*
TOTAL	Mg.ha⁻¹	94,8	7,8	131,2	30,0	*
BIOMASA TOTAL / AREA BASAL	Mg.m ⁻²	3,4	0,1	4,0	0,2	<i>ns</i>
BIOMASA TOTAL / EAP	Mg.(ha.año) ⁻¹	6,8	0,6			

En la Figura 12.1-2 (gráficos A, B, C, D), se indica la biomasa aérea y subterránea secuestrada en fustes, follaje, ramas y raíces (raigón + raíces gruesas) en función del volumen de fuste del rodal.

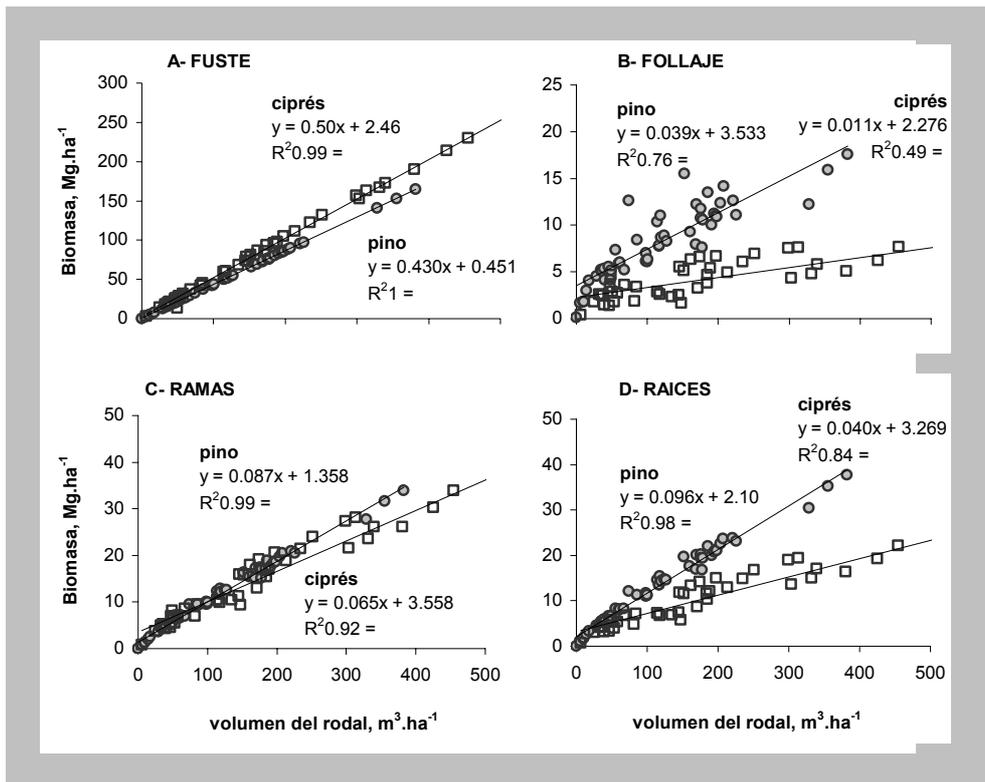


Figura 12.1-2. Biomasa en fuste (A), follaje (B), ramas (C) y raíces (D), en función del volumen del rodal para bosques de ciprés de la cordillera (símbolos vacíos) y plantaciones de pino ponderosa (símbolos llenos). Se indican las rectas de regresión y las correspondientes ecuaciones y valores de r^2 . El número de observaciones de ciprés fue $n=41$, y de pino, $n=52$. En todos los casos la pendiente de las rectas resultó altamente significativa ($p<0,001$). Evaluaciones de campo entre mayo-junio y sept-diciembre de 2000, y enero-marzo de 2001.

Biomasa de estepas

En la Tabla 12.1-2 se indican los valores promedio estimados de biomasa para el total de los 26 sitios de estepa evaluados, agrupados en cuatro categorías según su condición de pastizal: excelente/muy bueno, bueno, regular, y pobre. La biomasa por especie, su magnitud y su distribución espacial varió con la condición del pastizal (Figura 12.1-3). En la Tabla se consigna además el porcentaje de la cobertura total aérea estimada, y la cobertura total de las especies: coirón blanco, coirón amargo, neneo y abrojo. La diferencia entre ambos valores de cobertura corresponde a otras especies herbáceas o arbustivas acompañantes, cuya biomasa no fue evaluada.

Tabla 12.1-2. Valores medios de cobertura (%) y biomasa ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), y relaciones raíz:tallo, de estepas de condición de pastizal: *excelente/muy bueno* ($n=6$), *bueno* ($n=8$), *regular* ($n=8$) y *pobre* ($n=4$), clasificadas según guías de condición. Se indica el promedio de las 26 evaluaciones (realizadas en diciembre 2005 y enero 2006), el error estándar y el coeficiente de variación de la media.

CONDICION DE PASTIZAL	COBERTURA VEG. (%)		BIOMASA ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$)			RAIZ: TALLO
	TOTAL	PARCIAL ¹	AEREA	SUBTERR	TOTAL	
EXC/MBUENO	67,0	64,1	10,4	1,8	12,3	0,18
BUENO	67,5	52,5	6,9	2,2	9,1	0,36
REGULAR	48,4	46,7	7,9	2,3	10,2	0,34
POBRE	46,5	41,2	5,3	2,4	7,7	0,47
PROMEDIO	58,3	51,4	7,8	2,2	10,0	0,33
ERROR ESTÁNDAR	3,3	3,0	0,6	0,2	0,6	0,04
CV% _{media}	5,7	5,8	7,8	7,1	6,2	11,1

¹Cobertura agregada de coirones (*Festuca pallescens*, *Stipa speciosa* y otros), neneo y abrojo, únicamente.

En la mejor condición de pastizal, se observó que la biomasa se concentró casi exclusivamente en el coirón blanco (*Festuca*), y las plantas de neneo y de coirón amargo (*Stipa*) estuvieron totalmente ausentes; en la condición siguiente (*Buena*), la biomasa se distribuyó entre las especies: coirón blanco, neneo y abrojo, en partes relativamente similares, aunque con diferente distribución aérea/subterránea (gráficos superiores de la Figura 12.1-3). En la condición *Regular* y *Pobre*, la presencia de coirón blanco disminuyó notablemente, creciendo la participación de *Stipa* y de neneo, predominando esta última especie en la peor condición de pastizal (gráficos inferiores de la Figura 12.1-3). Asimismo, la partición biomasa subterránea: biomasa aérea fue creciente con el aumento de deterioro del pastizal (Tabla 12.1-2)

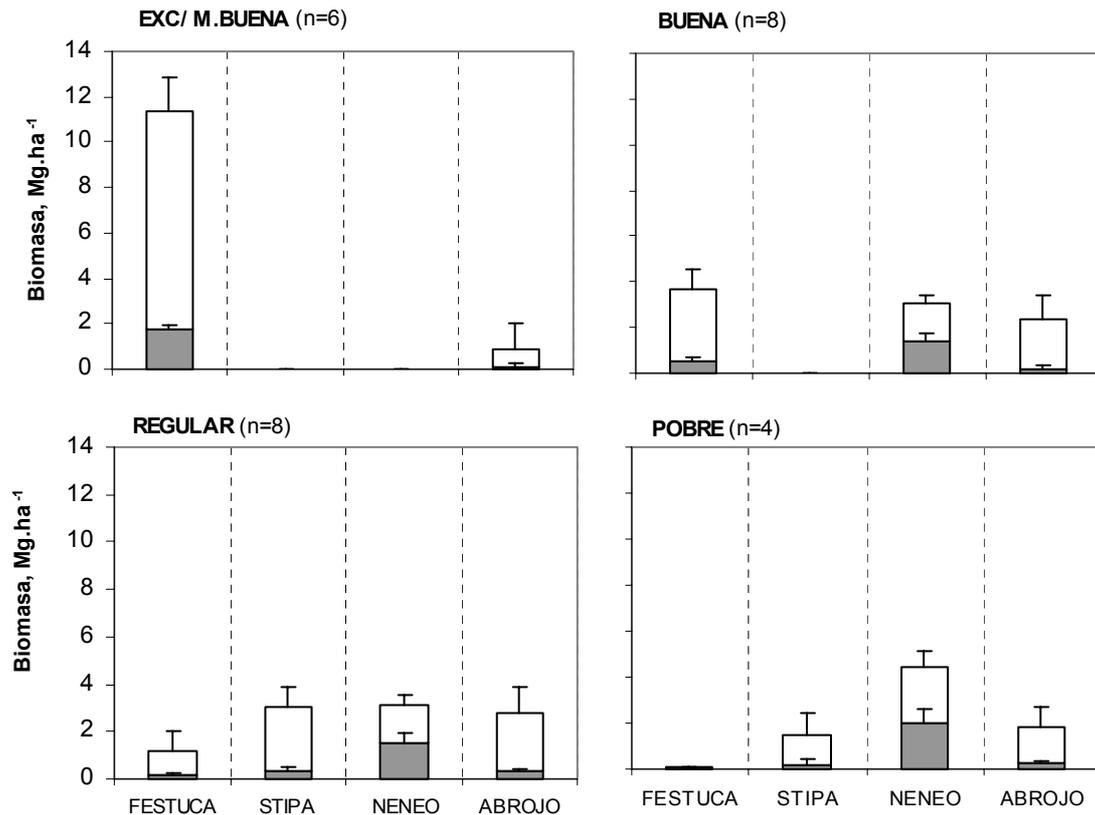


Figura 12.1-3. Biomasa media por especie en diferentes sitios de pastizal (n), y clase de condición. Las barras representan la biomasa total promedio de cada especie; en color blanco se indica la biomasa aérea, y en gris, la subterránea. Las líneas de error representan el error estándar de la media. Los datos de cada sitio (n) son el promedio de 3 a 5 observaciones. En la situación *BUENA*, hay presencia de *Stipa* ($0,1 \text{ Mg.ha}^{-1}$), que no es visualizable a la escala del gráfico. Observaciones de campo realizadas en diciembre 2005 y enero 2006.

Analizando biomasa y cobertura relativa (Figura 12.1-4), con datos agrupados en clases de 10% de cobertura, se observó una relación lineal directa de la biomasa aérea con el cambio de cobertura agregada de coirones, neneo y abrojo, y una relativa estabilidad en la biomasa subterránea; arrojando consecuentemente una menor relación raíz:tallo con coberturas crecientes (Tabla 12.1-2).

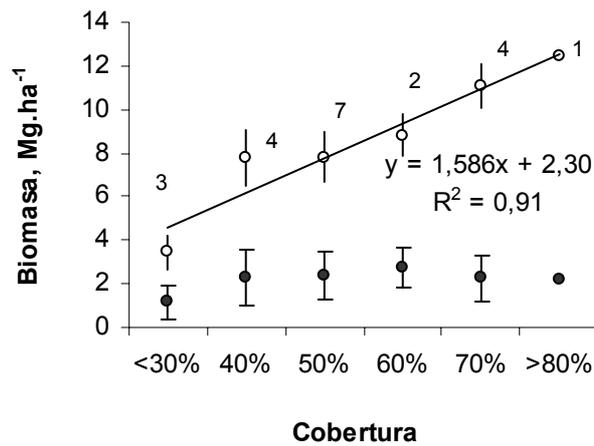


Figura 12.1-4. Biomasa aérea y subterránea promedio (círculos vacíos y llenos, respectivamente) en función de la cobertura agregada de las especies analizadas. Se indican las barras de error estándar respectivas, y el ajuste lineal ($p < 0,001$), y su valor de R^2 para la biomasa aérea. Junto a cada símbolo se indica el número de observaciones promediadas (n). Observaciones de campo realizadas en diciembre 2005 y enero 2006.

Por otra parte, en la Figura 12.1-5 se muestra la relación entre la cobertura parcial y total observada en los stands evaluados, indicándose el ajuste lineal de regresión con su coeficiente de determinación r^2 .

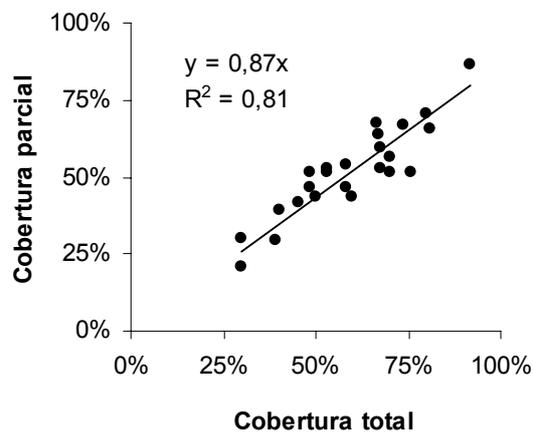


Figura 12.1-5. Análisis de regresión lineal entre la cobertura total y la cobertura parcial de coirones, neneo y abrojo (círculos llenos), de los sitios de estepa estudiados. Se indica el coeficiente r^2 y la ecuación de regresión ($n=21$, $p < 0,001$). Observaciones de campo realizadas en diciembre 2005 y enero 2006.

Biomasa, precipitación anual y variables fisiográficas

La relación entre la biomasa y la precipitación media anual estimada, de plantaciones de pino, bosques de ciprés y estepas se muestra en los gráficos de la Figura 12.1-6.

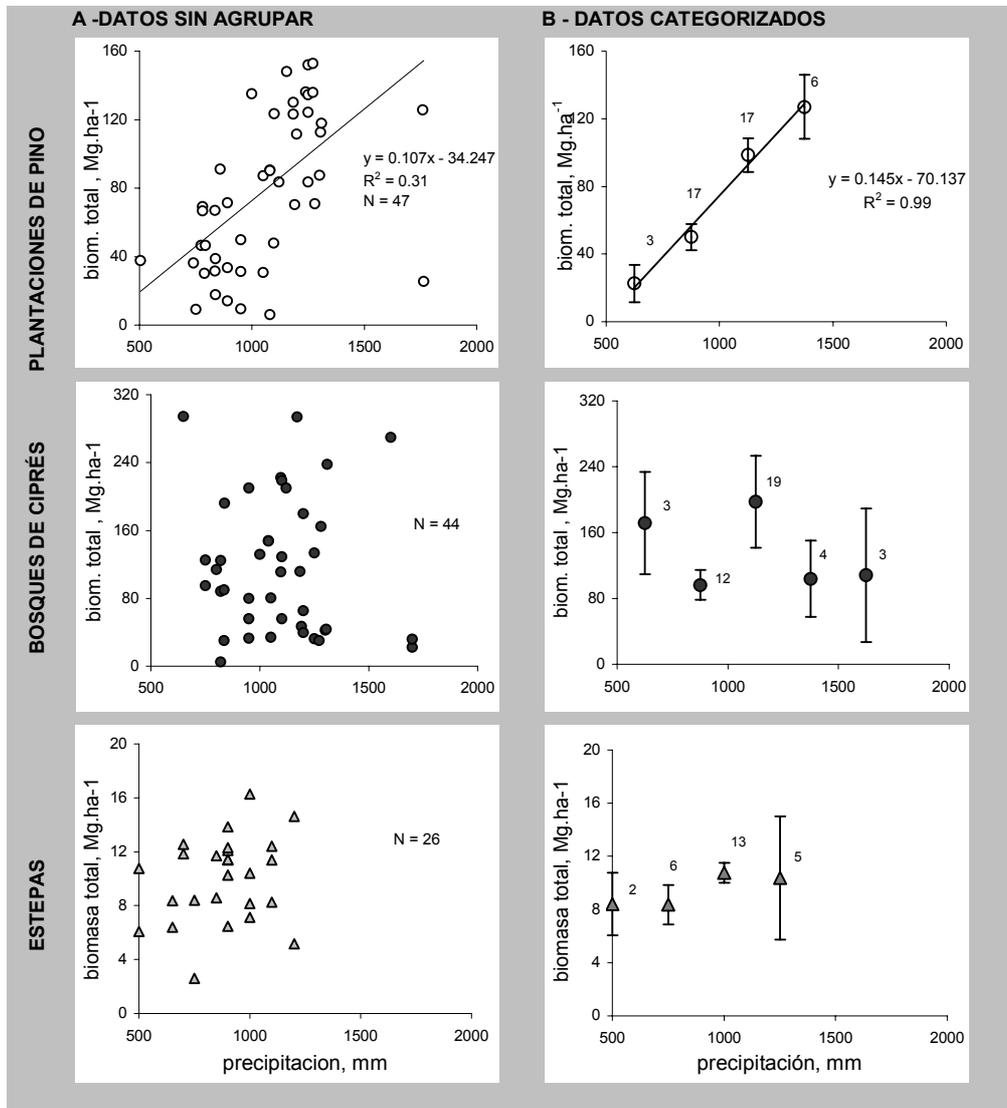


Figura 12.1-6. Biomasa de rodales de pino (círculos vacíos), de ciprés (círculos llenos), y de estepas (triángulos grisados) en Mg.ha⁻¹, bajo diferentes rangos de precipitación anual, en observaciones sin agrupar (paneles de la columna A), y agrupadas (paneles de la columna B). Se indican las barras de error estándar de cada promedio categorizado, el número de observaciones (n) de cada categoría, y en el caso de los rodales de pino, las líneas de regresión ajustadas ($p < 0,001$ en ambos casos). Las regresiones de los (bosques de ciprés y estepas resultaron no significativas ($p > 0,10$). Evaluaciones de campo entre mayo-junio y sept-diciembre de 2000, y enero-marzo de 2001.

Los valores de biomasa total (aérea + subterránea) hallados en cada uno de los sitios de muestreo se indican en los gráficos de la izquierda. Puede observarse la correlación positiva en los valores de biomasa de plantaciones de pino y en las estepas (aunque con gran dispersión), pero no así en los bosques de ciprés en el rango de precipitaciones representado en cada caso. Agrupando los datos de biomasa en clases de 250 mm, la tendencia creciente de la biomasa de pinares respecto de la precipitación se vuelve más evidente (gráficos de la columna derecha de la Figura 12.1-6) con alto ajuste de regresión lineal ($r^2= 0,99$). Para el ajuste de datos agrupados en clases de precipitación, se estableció previamente la no correlación entre la distribución de edades de los rodales con esta variable ambiental (coefic. de correlación de Spearman=0,11; $p=0,43$). En ciprés, los datos agrupados en clases de precipitación tampoco mostraron una tendencia clara respecto de esta variable y en las estepas, la tendencia positiva arroja altos niveles de error (Figura 12.1-6B).

En el Anexo 2.9 se muestran los coeficientes de correlación de Spearman y sus probabilidades, entre: biomasa forestal (por compartimiento), precipitación, variables fisiográficas (altura, exposición, pendiente) otras físico-químicas del sitio (pedregosidad, clase de drenaje, densidad aparente del suelo, contenido de carbono) para el conjunto de plantaciones de pino ponderosa (Anexo 2.9.1) y de bosques de ciprés (Anexo 2.9.2). En ambos casos se observó una relación débil entre el coeficiente raíz:tallo y la precipitación, y de características opuestas: inversa en las plantaciones de pino (coefic. de correlación de Spearman= -0,42, $p=0,01$) y directa en los cipresales (coefic. de correlación de Spearman= 0,29, $p=0,05$). Con respecto a otros factores distintos de la precipitación, los cipresales mostraron una

tendencia al incremento de la relación raíz:tallo con el aumento de la *pendiente* (coef. de correlación=0,43, $p=0,005$), los pinares a la presencia de *gravas* (coef. de correlación 0,49, $p=0,01$), y ambos tipos forestales, a la presencia de material más grueso en superficie (*pedras, rocas*) y al empobrecimiento del *drenaje* (coeficientes de correlación entre 0,36 y 0,59, $p<0,04$). La *altitud* también fue un factor de incremento de la relación raíz: tallo en cipresales (coefic. de correlación=0,33, $p=0,03$).

Biomasa de forestaciones y estepa, y densidad relativa

En la Tabla 12.1-3 se presentan las ecuaciones de regresión lineal ajustadas y sus coeficientes de determinación a nivel de rodal forestal o *stand* de pastizal. En el caso de las forestaciones, se transformaron los datos para el ajuste lineal. Los estadísticos de la regresión, significancia de los coeficientes y límites de confianza de las ecuaciones de la Tabla 12.3-1, se muestran en el Anexo 2.10.

Tabla 12.1-3. Ecuaciones de biomasa por tipo de ecosistema a nivel de rodal o *stand*. Se indica el coeficiente r^2 y el número de observaciones (N) de las funciones ajustadas. En las ecuaciones de biomasa total de la estepa, el valor N corresponde al total de observaciones agrupadas en seis clases de cobertura de intervalos fijos. La pendiente b fue *altamente significativa* en todas las ecuaciones ($p < 0,001$), excepto en las de biomasa total de estepas, donde resultó *muy significativa* ($p < 0,01$). DR: densidad relativa. Evaluaciones de campo de las forestaciones entre mayo-junio, sept-diciembre de 2000, y enero-marzo de 2001; y de las estepas, en diciembre 2005 y enero 2006

ESTIMADOR DE BIOMASA		r^2	N
Rodales de ciprés de la cordillera			
Log (biomasa aérea, Mg.ha ⁻¹) =	0,8932+1,334 x log DR	0,89	33
Log (biomasa subterránea, Mg.ha ⁻¹) =	0,0829+1,142 x log DR	0,96	33
Plantaciones de pino ponderosa			
Log (biomasa aérea total, Mg.ha ⁻¹) =	0,6899+1,367 x log DR	0,91	48
Log (biomasa fuste, Mg.ha ⁻¹) =	0,9608+1,070 x log DR	0,94	52
Log (biomasa acículas, Mg.ha ⁻¹) =	0,4000+0,742 x log DR	0,92	52
Log (biomasa ramas, Mg.ha ⁻¹) =	0,3871+0,991 x log DR	0,94	52
Log (biomasa subterránea, Mg.ha ⁻¹) =	0,0403+1,298 x log DR	0,91	48
Stand de abrojos			
Biomasa aérea, Mg.ha ⁻¹ =	0,0923+0,248 x Cobertura específica	0,96	14
Biomasa subterránea, Mg.ha ⁻¹ =	0,0753+0,024 x Cobertura específica	0,94	14
Stand de neneos			
Biomasa aérea, Mg.ha ⁻¹ =	0,1847+0,081 x Cobertura específica	0,97	15
Biomasa subterránea, Mg.ha ⁻¹ =	0,0923+0,074 x Cobertura específica	0,92	15
Stand de coirón blanco			
Biomasa aérea, Mg.ha ⁻¹ =	0,0289+0,159 x Cobertura específica	0,75	14
Biomasa subterránea, Mg.ha ⁻¹ =	-0,0146+0,029 x Cobertura específica	0,83	14
Estepas de coirones, abrojo y neneo			
Biomasa total, Mg.ha ⁻¹ (a) =	1,5050+14,163 x Cobertura total	0,93	26
Biomasa total, Mg.ha ⁻¹ (b) =	1,1083+17,470 x Cob. parcial ¹	0,88	21

¹Cobertura agregada de coirones (*Festuca pallescens*, *Stipa speciosa* y otros), neneo y abrojo únicamente.

12.2 BIOMASA EN EL MANTILLO Y CARBONO EN EL SUELO

Mantillo forestal

En las parcelas apareadas ciprés/ pino (o en los pares de la misma especie), el componente más conspicuo y abundante del mantillo en los 49 sitios observados fue la hojarasca. En promedio, para 40 parcelas de pinos, el contenido de hojarasca fue de 18,4 Mg.ha⁻¹, y de 24,4 Mg.ha⁻¹ para 29 parcelas de ciprés, aunque con una alta dispersión (coeficientes de variación de 90 y 100%, para ambos casos). Sin embargo las diferencias entre hojarasca proveniente de los árboles y de otras especies acompañantes fueron significativas entre ambos tipos forestales: el 100% de la hojarasca de las plantaciones de pino provenía únicamente de estas plantas, en tanto sólo un 45% provenía de los cipreses en los bosques de esta última especie, destacándose el aporte de mantillo de especies acompañantes del sotobosque. En la Figura 12.2.1 se muestra la distribución de hojarasca de bosques de pino y ciprés en función de la densidad relativa de los rodales.

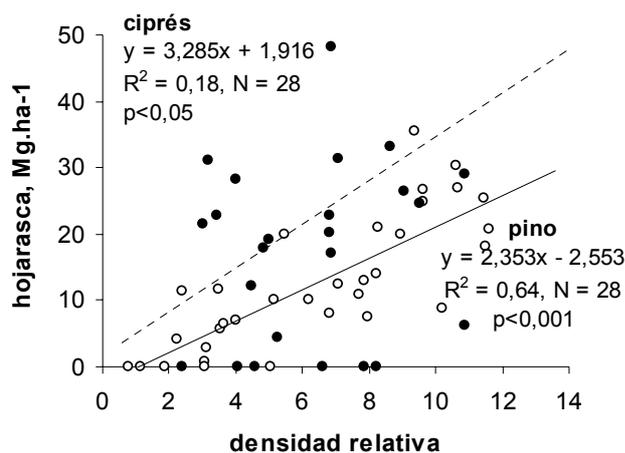


Figura 12.2-1. Valores observados y tendencia del contenido de hojarasca de pino (símbolos vacíos y línea llena) y ciprés (símbolos llenos y línea interrumpida) en rodales de distintas densidades relativas de ambas especies, en Mg.ha⁻¹. Evaluaciones de campo entre mayo-junio y sept-diciembre de 2000, y enero-marzo de 2001.

En la evaluación de manejo de pino ponderosa *con/sin* raleo se realizó una evaluación más detallada de la biomasa de todas las fracciones de mantillo (fino y grueso). La Figura 12.2-2 representa el promedio de sus componentes en las plantaciones entre 19 y 28 años de edad mencionadas en la Tabla 12.3-2, de parcelas apareadas *con-sin* raleo (un par por sitio). Los valores de carbono de esa Tabla fueron transformados a biomasa (coefic.=2) para su representación en la Figura 12.2-2. Se observa el aumento de los componentes leñosos como resultado del raleo, que pasan a ser dominantes en el mantillo. Sin embargo, este aumento solamente fue significativo en la fracción de ramas ($p<0,01$), y en el total del mantillo ($66,87\pm 15,67 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en parcelas raleadas vs $27,60\pm 5,13 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en parcelas sin raleo, $p<0,01$)

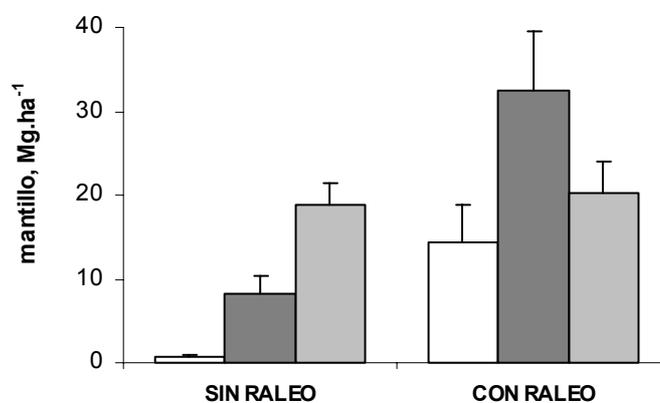


Figura 12.2-2. Biomasa de mantillo ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de plantaciones de pino, *sin raleo*, y *con raleo* ($n=3$ parcelas por tratamiento). Las barras blancas representan el material más grueso de tocones, despuntes y trozas, las grises oscuras, las ramas y las grises claras, la hojarasca. Se indican los errores estándar respectivos. Datos de muestreos realizados entre junio de 2003 y enero de 2004.

Carbono del suelo

La Tabla 12.2-1 indica los valores medios de carbono en el suelo mineral hasta 50 cm de profundidad para el conjunto de parcelas evaluadas en el área de estudio, de estepas, bosques de ciprés y plantaciones de pinos. Se observa el mayor contenido de carbono en bosques de ciprés, un valor intermedio en estepas y otro menor en plantaciones de pino, aunque las diferencias resultaron significativas ($p < 0,05$) únicamente entre cipresales y pinares. El horizonte más superficial (0-25 cm) del suelo es el mayor reservorio de carbono en todos los ambientes ($p < 0,001$), y aproximadamente un 40% mayor que en la capa subyacente (Tabla 12.2-1). Si bien las diferencias fueron significativas entre los cipresales y pinares en el horizonte superior, no hubo diferencias de carbono en profundidad (25-50 cm) entre los tres ambientes.

Tabla 12.2-1. Valores medios de carbono orgánico ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de estepas, bosques de ciprés y plantaciones de pino, en las parcelas del área de estudio (analizados con datos del proyecto de *Evaluación del potencial de secuestro de carbono de proyectos de forestación y bosques secundarios en dos zonas climáticas de Sudamérica, INTA-GTZ/TÖEB* (de Koning *et al.* 2002). Se indica el número de parcelas evaluadas (N), y el error estándar de las medias (itálica), las diferencias entre profundidades y ambientes (ANOVA y Test de Tukey). Las letras distintas indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

CO SUELO MINERAL				
AMBIENTE	N	0-25 CM	25-50 CM	TOTAL SUELOS
ESTEPA	39	60,4 (6,3) ^a	41,3 (3,8) ^c	101,7 (9,8) ^{d,e}
BOSQUE DE CIPRES	31	70,3(4,38) ^b	42,3 (3,9) ^c	114,7 (6,9) ^d
PLANTACION DE PINO	43	46,7(4.3) ^a	34,3 (2,7) ^c	80,9 (6,9) ^e

En los pares de parcelas de plantaciones *con/sin raleo*, al igual que en el caso del mantillo, se realizó una evaluación más detallada del contenido de carbono orgánico en los suelos con los datos indicados en la la Tabla 12.3-2 (un par por sitio),

incluyendo la capa orgánica semi-incorporada (*horizonte 0*). El promedio y error estándar se muestran en la Figura 12.2-3, donde puede observarse que el horizonte de 0-25 contiene aproximadamente el 50% del carbono orgánico total del perfil evaluado. Por otra parte, no se hallaron diferencias significativas entre ambos tratamientos con ninguna de las tres fracciones. La suma del contenido de la tres fracciones -es decir, el carbono orgánico total del suelo hasta la profundidad considerada-, fue de $65,70 \pm 4,83 \text{ Mg.ha}^{-1}$ en parcelas *sin raleo*, y de $78,37 \pm 10,1 \text{ Mg.ha}^{-1}$ en parcelas *con raleo* (diferencias no significativas).

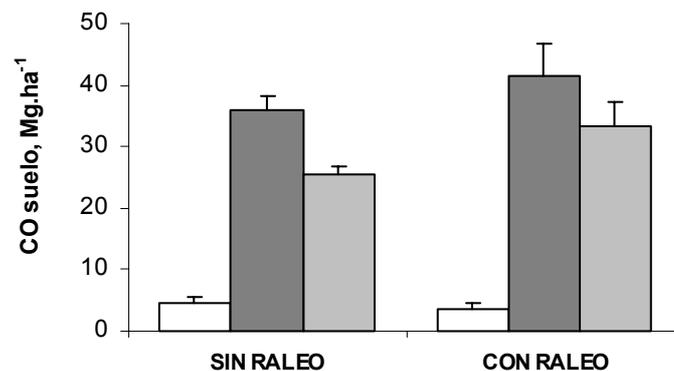


Figura 12.2-3. Carbono orgánico en plantaciones de pino manejadas, sin raleo y con raleo. Las columnas representan el carbono promedio de n=3 observaciones en cada tratamiento) del material orgánico semi-incorporado (blanco), del horizonte mineral de 0-25 cm (gris oscuro) y del horizonte profundo de 25-50 cm (gris claro). Se indican los errores estándar correspondientes. Muestreos realizados entre junio de 2003 y enero de 2004.

12.3 MANEJO FORESTAL Y BALANCE DE CARBONO

Estructura forestal y biomasa

Los parámetros de cada rodal evaluado se indican en la Tabla 12.3-1, en tanto que las distribuciones de frecuencias diamétricas y de la biomasa, se representan en la Figura 12.3-1.

Tabla 12.3-1. Parámetros de los rodales de pino ponderosa. Número de árboles por ha (N), área basal (AB, $m^2 \cdot ha^{-1}$), diámetro medio cuadrático (dap_c , cm), altura dominante (H_d , m), edad total, densidad relativa (DR) e índice de sitio (IS_{20}). Los pares de parcelas (con/ sin raleo) se separan con líneas. Los valores de N, dap_c y los que derivan de estos (AB, DR) fueron obtenidos por inventario de cada parcela, cuya superficie se indica en la Tabla 11.2-1. Los datos de H_d , edad, y los que derivan de estos (IS_{20}), son el promedio de observaciones sobre $n=3-5$ árboles dominantes de las mismas parcelas. Muestreos realizados entre junio de 2003 y enero de 2004.

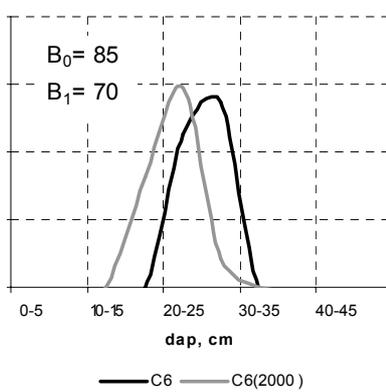
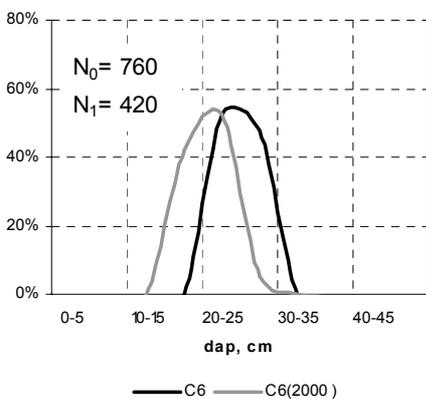
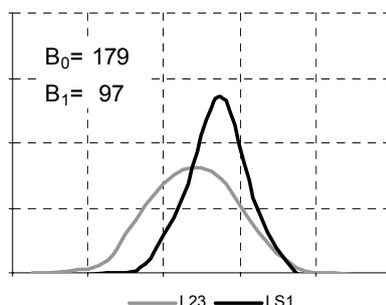
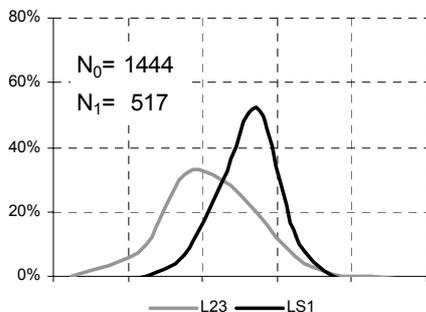
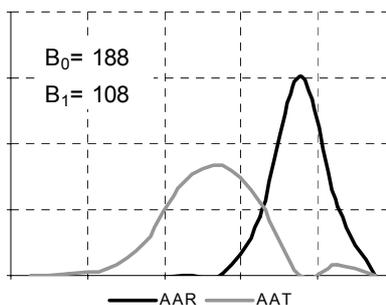
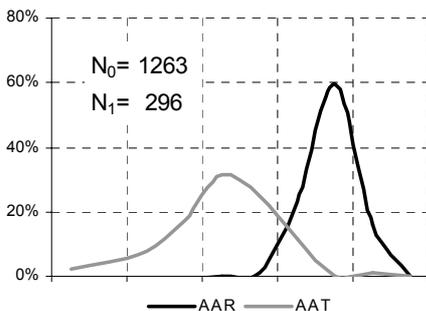
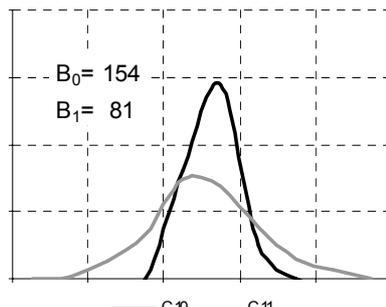
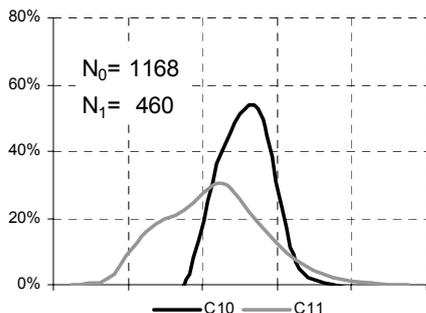
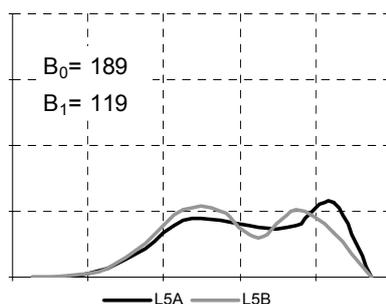
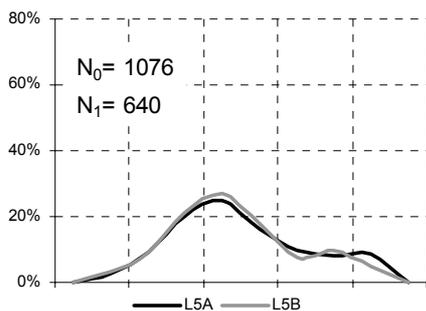
Sitio / rodal	N	AB	dap_c	H_d	Edad	DR	IS_{20}
<u>Meliquina</u>							
L5A	640	34,6	26,2	16,9	25,0	6,8	17,0
L5B	1.076	55,1	25,5	18,9	25,0	10,9	17,2
LS1	517	28,6	26,6	12,5	21,0	5,6	16,8
L23	1.444	52,3	21,5	S/d	21,0	11,3	15,0
<u>Junín de los Andes</u>							
C6 (2000)	760	24,7	20,3	12,8	19,0	5,5	17,1
C6	420	20,6	25,0	14,3	21,0	4,1	17,1
C10	460	23,8	25,6	12,2	25,0	4,7	16,4
C11	1.168	44,9	22,1	14,6	25,0	9,5	15,8
<u>Abra Ancha</u>							
AAR	296	31,5	36,8	S/d	28,0	5,2	16,4
AAT	1.236	54,9	23,8	S/d	28,0	11,3	16,5
MEDIA RALEADAS	465	30,0	29,5	14,6	26	5,6	16,5
MEDIA SIN RALEO	1.160	51,6	23,8	16,8	26	10,6	16,6

Los pares presentados en cada panel de la Figura 12.3-1 corresponden a la situación *sin raleo* (testigo) y *con raleo*, en cada sitio estudiado. Puede observarse que - salvo en el caso del par L5A-L5B, cuyas distribuciones son casi coincidentes-, las distribuciones de frecuencias post-raleo tienden a concentrarse en torno a diámetros superiores, desplazándose entre una y dos clases diamétricas (Figura 12.3-1, paneles de la columna izquierda). Además, las distribuciones post-raleo presentan una menor dispersión y mantienen la simetría, lo que indicaría que además de la remoción de individuos pequeños (*raleo por lo bajo*), se han eliminado árboles dominantes, o que la respuesta de crecimiento al raleo ha sido superior en los árboles intermedios u oprimidos remanentes. A nivel de biomasa (Figura 12.3-1, gráficos de la columna derecha) las distribuciones han seguido similar trayectoria. El manejo realizado en el rodal L5A, mantuvo la distribución prácticamente inalterada respecto de L5B, es decir sin un efecto particular sobre alguna clase. El raleo más intenso ocurrió en el par AAR-AAT, separándose notoriamente ambas distribuciones, aunque en este caso la parcela AAR ya había sido sometida a un raleo previo (en 1995, disminuyendo la densidad desde 1300 hasta 550 pl.ha⁻¹). En las parcelas C6-C6₍₂₀₀₀₎, el desplazamiento de la distribución raleada (C6) hacia la derecha de C6₍₂₀₀₀₎, es producto combinado del raleo y del crecimiento experimentado en los cuatro años transcurridos entre ambas mediciones.

Figura 12.3-1 (*página siguiente*). Distribuciones de frecuencias relativas (%) de las densidades de árboles (paneles de la columna izquierda) y su biomasa (columna derecha), por clase diamétrica, de parcelas apareadas de plantaciones de pino. Las líneas grises representan las distribuciones *sin raleo* (situaciones testigo: L5B, C11, AAT, L23, C6₂₀₀₀), en tanto que las líneas negras corresponden a los rodales apareados *con raleo*, de desarrollo similar (L5A, C10, AAR, LS1, C6). En los paneles de la izquierda se indica el número de árboles *sin raleo* (N_0) y *con raleo* (N_1), en pl.ha⁻¹, y en los de la derecha, la biomasa correspondiente (B_0 y B_1 respectivamente), en Mg.ha⁻¹. Muestreos realizados entre junio de 2003 y enero de 2004.

DISTRIBUCIONES DIÁMETRICAS

DISTRIBUCIONES DE BIOMASA



Carbono en biomasa, detritos y suelos

En la Figura 12.3-2 se muestran los valores de carbono hallados en las fracciones de biomasa (aérea y subterránea), detritos y suelos (datos numéricos en Tabla 12.3-2). En mayor detalle, los valores medios y el error estándar del carbono en la biomasa (materia seca), detritos y el carbono orgánico del suelo, de cada una de los componentes de estas fracciones se presentan en la Figura 12.3-3 (A, B y C).

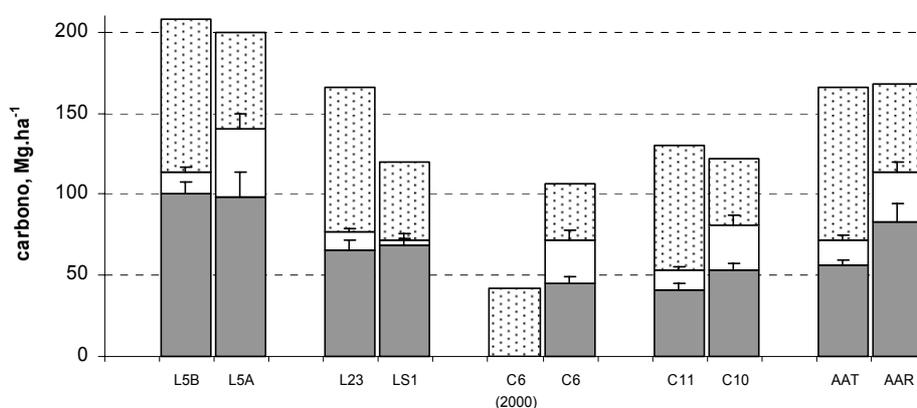


Figura 12.3-2. Contenido de carbono orgánico total en suelos (gris), detritos (blanco) y biomasa (trama punteada) en los pares analizados, y barras de error estándar del suelo y los detritos. La primera columna de cada par corresponde a las parcelas *sin raleo*, en tanto que la segunda corresponde a parcelas *con raleo*. En la parcela C6₂₀₀₀ sólo se estimó la biomasa en pie. Cada compartimento representado (biomasa, detritos, suelo) se compone de la suma de distintas fracciones (n= entre 2-3 muestras compuestas, o 6-15 muestras simples, según la fracción considerada), cuyos medias y errores se indican en la Tabla 12.3-2. Muestreos realizados entre junio de 2003 y enero de 2004.

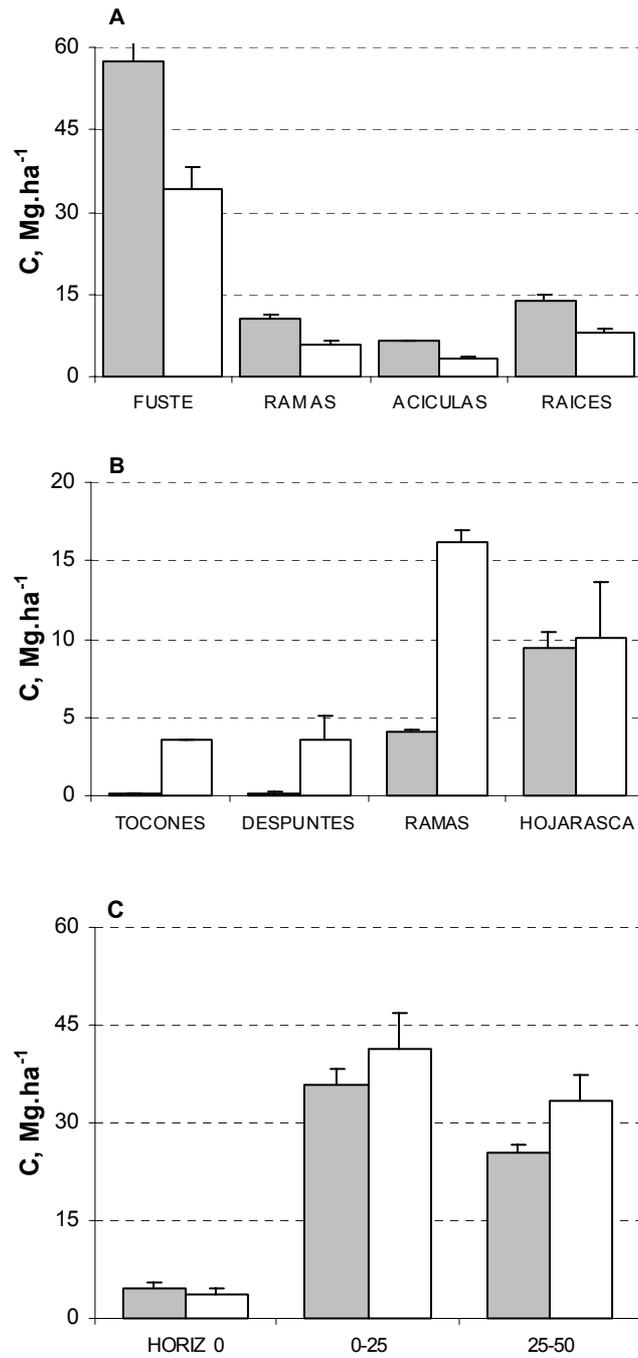


Figura 12.3-3. Carbono orgánico de las fracciones de biomasa (A), detritos (B), y suelo (C), en Mg.ha^{-1} . Las barras grises representan el promedio de rodales *sin raleo* (L5B, C11, AAT, $n=3$) y las blancas, los correspondientes *con raleo* (L5A, C10, AAR, $n=3$). Se indican los respectivos errores estándar de la media. Muestreos realizados entre junio de 2003 y enero de 2004.

Tabla 12.3-2. Contenido de carbono ($\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en biomasa, detritos, y suelos de los rodales evaluados, y en sus respectivas fracciones. Entre paréntesis junto a los promedios, se indica el error estándar. La sigla *SD* en el rodal C6(2000) indica *sin datos*. El número de observaciones varió según la fracción (ver metodología, sección 11.2), entre n=3 para detritos y suelos en parcelas con distribución homogénea de residuos o sin compactación, y hasta n=18 en el caso de estratificación de la parcela según disposición de residuos o compactación de suelos. La biomasa forestal se evaluó a través del inventario del total de individuos presentes en las parcelas. Los promedios al final de la tabla fueron calculados sobre las parcelas *con raleo* L5A, C10 y AAR (sombreado oscuro) y *sin raleo* L5B, C11, AAT (sombreado claro), únicamente. Muestreos de junio 2003 a enero de 2004.

SITIO / RODAL	BIOMASA VIVA					DETRITOS				SUELOS			CARBONO TOTAL				
	FUSTE	RAMAS	HOJAS	RAICES	HIERBAS	TOCONES	DESPUNTES	RAMAS	HOJARASCA	HORIZ 0	0-25	25-50	BIOMASA	DETRITOS	SUELOS	TOTAL	EE
Meliquina																	
L5A	39,3	7,0	3,9	9,2	0 (0)	5 (0,5)	9,2 (1,8)	18,9 (5,3)	8,3 (1,3)	2,2 (0,9)	54,7 (7,9)	42 (6,4)	59,3	41,4 (8,9)	98,8 (15,2)	199,5	24,1
L5B	62,2	11,2	6,3	14,7	0 (0)	0 (0)	0,2 (0,1)	3,7 (1,3)	9,6 (1,2)	3,6 (0,7)	59 (4)	37,7 (2,3)	94,4	13,5 (2,6)	100,4 (7,1)	208,3	9,7
LS1	31,9	5,9	3,3	7,7	0,9 (0,4)	0 (0)	0 (0)	0,3 (0,3)	2,2 (1)	0,8 (0,2)	38,7 (3,4)	29,3 (2,9)	48,7	2,5 (1,3)	68,9 (6,5)	120,1	7,8
L23	56,7	11,1	7,3	14,6	0 (0)	0,1 (0,1)	0,4 (0,2)	4,2 (0,9)	6,5 (1,1)	5 (0,6)	37,3 (3,6)	23 (1,9)	89,5	11,1 (2,3)	65,3 (6,1)	165,9	8,4
Junín de los Andes																	
C6 (2000)	26,3	5,4	3,7	7,1	0 (0)	SD	SD	SD	SD	SD	SD	SD	42,3	SD	SD	SD	
C6	22,7	4,3	2,6	5,6	0 (0)	2,1 (0,3)	0 (0)	12,9 (2,8)	11,7 (3,5)	2 (1,6)	22,8 (1,5)	19,8 (1)	35,1	26,8 (6,5)	44,6 (4,2)	106,5	10,7
C10	26,3	4,9	2,9	6,5	0 (0)	2,9 (0,9)	1,3 (0,3)	15,8 (3,4)	8,2 (1,6)	2,7 (0,6)	26,3 (2,8)	24,1 (0,8)	40,5	28,1 (6,2)	53,2 (4,2)	121,8	10,4
C11	49,2	9,4	6,0	12,4	0 (0)	0,5 (0,1)	0,3 (0,2)	5 (1,3)	6,8 (0,7)	7,8 (1,4)	18,8 (2)	14,1 (1)	76,9	12,7 (2,2)	40,7 (4,3)	130,3	6,5
Abra Ancha																	
AAR	37,3	6,1	2,7	8,0	0 (0)	2,9 (1,2)	0,2 (0,1)	13,9 (2,1)	13,7 (3)	5,9 (1,1)	43,4 (5,2)	33,8 (4,6)	54,0	30,7 (6,4)	83,2 (10,8)	167,9	17,2
AAT	60,7	11,4	6,9	15,0	0 (0)	0 (0)	0 (0)	3,6 (0,7)	11,7 (2,1)	2,1 (0,8)	29,8 (1,4)	24,2 (0,9)	93,9	15,3 (2,8)	56,2 (3,1)	165,4	5,9
MEDIA CON RALEO	34,3	6,0	3,1	7,9	0 (0)	3,6 (0,8)	3,6 (0,7)	16,2 (3,6)	10,1 (2)	3,6 (0,9)	41,5 (5,3)	33,3 (3,9)	51,3	33,4 (7,2)	78,4 (10,1)	163,1	17,2
MEDIA SIN RALEO	57,4	10,7	6,4	14,0	0 (0)	0,2 (0)	0,2 (0,1)	4,1 (1,1)	9,4 (1,3)	4,5 (1)	35,9 (2,5)	25,3 (1,4)	88,4	13,8 (2,5)	65,7 (4,8)	168,0	7,37

Homogeneidad interna de parcelas y apareamiento

La homogeneidad en la distribución de árboles de cada rodal (parámetros en la Tabla 12.3-1) se analizó comparando las distribuciones diamétricas de individuos entre subdivisiones de la parcela (Sección 11.2). También se analizó la homogeneidad de la distribución de detritos leñosos, hojarasca y suelo orgánico, mediante análisis de varianza de los resultados de cada transecta de medición intra-parcela. No se encontraron diferencias significativas en estas variables en las parcelas analizadas, excepto para el rodal L5A, donde se hallaron diferencias altamente significativas ($p < 0,01$) en la distribución de despuntes leñosos entre las tres transectas.

Análisis grupal

A los efectos de evaluar diferencias entre sitios, se analizó la varianza en los sitios observados de las variables: densidad aparente del suelo, contenido de carbono orgánico en el horizonte de 0-25 cm, e índice de sitio. En las profundidades mayores de suelo (horizonte de 25-50 cm) no se analizaron diferencias, dado que la correlación encontrada entre el contenido de carbono de este horizonte y el superior en el conjunto de todos los sitios y usos evaluados (63 parcelas con bosques de ciprés, de pino o pastizales, sección 11.1) fue muy estrecha (coeficiente de correlación de Pearson $> 0,90$). Dentro del conjunto de rodales estudiados, se consideró que el apareamiento de los pares de parcelas L23-LS1 (Meliquina) y C6₂₀₀₀-C6 (Junín de los Andes) no era suficientemente adecuado. En el primer caso, por diferencia apreciable en los índices de sitio de cada rodal (Tabla 12.3-1) y diferente posición fisiográfica de las parcelas. En el segundo caso, la parcela C6₂₀₀₀ (situación *sin raleo*), porque si bien se correspondía espacialmente con la misma

parcela *con raleo*, no fueron evaluados en ese momento el mantillo y el carbono del suelo. Por ello, estos pares de parcelas fueron descartados para el análisis conjunto, utilizándose únicamente los resultados de los sitios L5A y L5B de Meliquina, C10 y C11 de Junín de los Andes, y AAR y AAT de Abra Ancha. En los ANOVAs realizados no se hallaron diferencias significativas en la densidad aparente ni en el índice de sitio, aunque sí en el contenido de carbono, cuya diferencia entre tratamiento y testigo fue significativa ($p < 0,05$). Por ello se realizó un test de comparación múltiple de medias (Test de Tukey) (resultados en Tabla 12.2-3 y análisis estadístico en Anexo 2.5).

Por otra parte, también se realizó el análisis de varianza de los tratamientos *con / sin raleo*, agrupando los 3 pares de parcelas (uno por sitio: L5B-L5A, C11-C10 y AAT-AAR). Las variables comparadas fueron: biomasa en pie, detritos, densidad aparente y contenido de carbono en suelo orgánico y mineral. Los impactos de la operación de raleos sobre los suelos, se evaluaron analizando cambios en la densidad aparente y contenido de carbono en las áreas sometidas a diferente presión de compactación y arrastre (sub-tratamientos Cp_0 , Cp_2). El subtratamiento Cp_1 fue observado sólo en dos sitios: Meliquina (L5A) y Junín de los Andes (C10), resultando insuficiente ese número de datos para analizar la varianza. La significancias de las diferencias a nivel de sitio, tratamiento o sub-tratamiento se indican en la Tabla 12.3-3, en tanto que las Tablas de ANOVA se presentan en el Anexo 2.5.

Tabla 12.3-3. Significancia de las diferencias halladas mediante ANOVA a nivel de sitio, tratamientos y sub-tratamientos para distintas variables de cada sitio, parcela o subparcela. Los tratamientos evaluados son: CR=raleo comercial reciente, SR=sin raleo o raleo antiguo a deshecho. Los subtratamientos (sólo en las parcelas raleadas) son: Cp₀=suelos sin compactación, Cp₂=suelos compactados por arrastre y tránsito de maquinaria (vías de saca). Las diferencias no significativas se indican con *ns*, las significativas se indican con (*) ($p < 0,05$), las altamente significativas con (**) ($p < 0,01$) y las muy altamente significativas ($p < 0,001$) con (***). Los cuadros sombreados indican que no se analizó esa variable al nivel indicado.

VARIABLE ANALIZADA	SITIOS	TRATAMIENTOS	SUBTRATAMIENTOS
	(Meliquina - Junín - A.Ancha)	CR, SR	Cp ₍₀₎ , Cp ₍₂₎
Índice de sitio	<i>Ns</i>		
Biomasa total en pie		**	
C total en detritos		*	
C hojarasca		<i>ns</i>	
C ramas		**	
C tocones		**	
C despuntes		<i>ns</i>	
C% suelos, 0-25 cm	Entre Meliquina y Junín (*)		<i>ns</i>
C total suelos		<i>ns</i>	
C suelo orgánico		<i>ns</i>	
C suelo mineral 0-25 cm		<i>ns</i>	
C suelo mineral 25-50 cm		<i>ns</i>	
Densidad aparente	<i>ns</i>	<i>ns</i>	Entre Cp ₀ y Cp ₂ (*)

Como se puede apreciar en la tabla, a nivel de sitio se encontraron diferencias significativas en el contenido de carbono del suelo (C%, 0-25 cm) solamente entre Meliquina y Junín, aunque no para el índice de sitio ni la densidad aparente del suelo. A nivel de tratamientos, las diferencias en biomasa entre parcelas *con-sin raleo* demuestra el efecto de remoción de cosecha sobre la masa viva. A nivel de detritos hubo diferencias significativas entre tratamientos (de carbono total) que se

explican por las fracciones gruesas del mantillo (ramas y tocones), pero no en la hojarasca ni en los despuntes (diferencias no significativas). En cuanto a los subtratamientos fueron significativos los cambios en la densidad aparente entre los sectores sin evidencias de compactación (Cp_0) y los de mayor tránsito y arrastre (Cp_2), aunque no entre estos y el nivel moderado de alteración por arrastre (Cp_1). No se verificaron cambios en el contenido porcentual de carbono por las operaciones de raleo.

13. DISCUSIÓN

Biomasa forestal

Los valores de biomasa total hallados para plantaciones de pino, bosques de ciprés y estepas observados, cuyos promedios aproximados fueron de 95, 141 y 10 Mg.ha⁻¹ respectivamente (Tablas 12.1-1, 12.1-2), demuestran un alto potencial de secuestro de carbono en ambos sistemas forestales respecto de las estepas. Callaway *et al.* (1994), reportaron valores de biomasa de pino ponderosa nativo en ambientes montañosos, de 27 y 189 Mg.ha⁻¹ para rodales de dap medio de 10 y 25 cm, respectivamente. En ambientes más xéricos la biomasa estimada por estos autores fue de 14 y 137 Mg.ha⁻¹ para las mismas clases diamétricas.

Promediando estos valores, la biomasa se encuentra en el rango de 105-75 Mg.ha⁻¹ para un dap intermedio (17,5 cm), valores consistentes con los indicados aquí para esta especie en la Tabla 12.1-1. En bosques tropicales del Centro y Sudamérica, Brown *et al.* (1989) hallaron valores de biomasa aérea total en canopeos densos, en el rango de 144-513 Mg.ha⁻¹, y en bosques abiertos, de 28-82 Mg.ha⁻¹, aunque se han reportado máximos de biomasa total (aérea y subterránea) de hasta 1200 Mg.ha⁻¹ (Cooper 1982). También esos autores hallaron importantes diferencias entre sitios húmedos y otros con déficit hídrico (195 vs 70 Mg.ha⁻¹), valores por otro lado similares a los hallados para bosques amazónicos (Cooper 1982).

Otros ecosistemas forestales de coníferas, como bosques jóvenes de *Pseudotsuga menziesii* de 40 años, o plantaciones de *Pinus elliotii* Engelm. de 34 años en Norteamérica, arrojaron valores de biomasa arbórea total de alrededor de 100

Mg.ha⁻¹, es decir, consistentes también con los valores aquí obtenidos (Cooper 1982).

Considerando que la edad media de las plantaciones de pino evaluadas era aproximadamente de 16 años (edad a la altura del pecho), cabe esperar un importante incremento de la biomasa en las forestaciones de pino durante los años que siguen hasta completar el turno, estimado en 35-40 años. Como su crecimiento volumétrico es sostenido y aún creciente en los años sucesivos de la rotación (Andenmatten y Letourneau 1997), la biomasa acumulada podría más que duplicarse en plantaciones que mantengan la cobertura completa.

Por otro lado, los cipresales, que mayormente han sido intervenidos en forma desordenada e irregular, muestran un interesante nivel de acumulación de biomasa, con una edad promedio de las plantas dominantes de 47 años (promedio de edades al pecho de los árboles más gruesos). Esta edad, posiblemente no es representativa de la edad promedio actual de los rodales, que pueden estar constituidos por varias cohortes (Bava y Gonda 1993, Loguercio *et al.* 1999). Por ello, el potencial de secuestro de carbono de estos bosques nativos en ausencia de estos disturbios, posiblemente sería superior. Al respecto Cooper (1982) destaca que la mayor parte de los bosques templados o tropicales maduros se encuentran dentro del rango de biomasa total de 200-400 Mg.ha⁻¹.

Las ecuaciones de biomasa desarrolladas en este trabajo, cuando fueron aplicadas a un rodal de pino ponderosa en la Isla Victoria (Río Negro), que es la plantación en macizo más antigua conocida en la región (81 años de edad al momento de

evaluación), arrojaron una biomasa total de $555 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. De todos modos, este rodal no fue considerado entre los analizados en las secciones precedentes, ya que las plantas excedían el rango diamétrico de las ecuaciones. No obstante ello, brinda una idea del potencial de la especie en bosques maduros en la región.

Los valores de biomasa aérea y subterránea determinados en función del volumen del rodal (Figura 12.1-2) indican que -a un volumen dado-, los cipreses contienen una mayor cantidad de biomasa en el fuste que los pinos (diferencias significativas en la ordenada al origen de la regresión, $p < 0,001$); la pendiente de cada recta de regresión (diferencias no significativas) es la densidad específica de la madera (Fig. 12.1-2A). Sin embargo, existe una diferencia sensible -similar a lo observado en plantas individuales en función del dap (Parte II, sección 7.1)-, en follaje (diferencia significativa en ordenadas, $p < 0,001$) y raíces (diferencia significativa en la ordenada: $p < 0,001$, y en la pendiente: $p > 0,05$) a favor del pino ponderosa (Figuras 12.1-2B y D). Es decir que hay una mayor biomasa de los tejidos relacionados con la captación de energía y de absorción de agua y nutrientes en los pinares, con las implicancias ya comentadas (Parte II, sección 8.1). Además, la dispersión de valores es mayor en estos compartimentos que en fuste y ramas.

En el caso del follaje, esta dispersión posiblemente se debe a la mayor velocidad de cambio y la variación entre individuos según su dominancia, y a la oportunidad de toma de muestras. En el caso de las raíces y también del follaje, la variación posiblemente sea consecuencia de un mayor error experimental asociado a la dificultad de medición de estos componentes.

Por otra parte, la biomasa de ramas, similar en ambas especies (diferencias no significativas entre las regresiones), muestra una estrecha relación alométrica con el volumen respectivo de fuste (Figura 12.1-2C), como es característico en las coníferas (Gower *et. al.* 1995). Desde el punto de vista de acumulación de carbono, las ramas constituyen una extensión del tallo, aunque su tasa de incremento sería algo menor (Cooper 1982).

La biomasa total observada en las plantaciones de pinos demostró una relación directa con la precipitación anual ($p < 0,001$, Figura 12.1-6, columna A). En los bosques de ciprés en cambio, no se observó una tendencia clara respecto de esta variable, observándose además una variación importante en la biomasa total dentro de una misma clase de precipitación (Figura 12.1-6 col. B). Los valores de biomasa relativamente mayores de los sitios xéricos (600 mm aprox.) o méxicos (1.100 mm aprox.) respecto de los más húmedos, podrían indicar tanto diferencias ambientales locales como genotípicas.

Algunas características del relieve y el suelo de los sitios evaluados (pendiente y piedras en los bosques de ciprés; rocas y drenaje en ambos tipos de bosques), que se correlacionaron positivamente con las precipitaciones (Anexo 2.9), podrían explicar la ausencia de respuestas climáticas en la partición de biomasa a nivel de rodal. Las variables del relieve, al menos en casos de déficit de drenaje o de mediana pedregosidad, contrarrestarían la contribución de la precipitación al mantenimiento de bajas relaciones raíz:tallo. De otro modo se plantearía una contradicción entre lo observado a nivel de rodal y de individuo, ya que en los estudios de árboles de pino sobre suelos bien drenados y de escasa pedregosidad,

se observaron diferencias importantes en la partición de la biomasa aérea y subterránea entre sitios húmedos y secos (Parte II, sección 7.4).

En sitios áridos de la Patagonia, Paruelo *et al.* (1987) encontraron una marcada disminución en la retención hídrica en los primeros 45 cm de suelo, en función del incremento del tamaño de partículas. En estas condiciones, la implantación y el crecimiento de los árboles sólo estarían asegurados con un mayor desarrollo subterráneo. Todo ello conduce a aceptar la hipótesis planteada en el nivel de individuo con respecto a la pluviometría, y a nivel de rodal con respecto a las condiciones favorables para el crecimiento. Resulta también de interés señalar que los contenidos de carbono orgánico y de nitrógeno del suelo se correlacionaron más fuertemente con la clase de drenaje que con la biomasa forestal (Anexo 2.9). Es decir, los suelos de drenaje impedido, posiblemente más ricos en arcillas, contienen más carbono y nitrógeno, aunque esto no ha implicado una mayor acumulación de biomasa forestal, posiblemente por limitaciones físicas al crecimiento.

En las plantaciones manejadas de pino, se observó que las diferencias de biomasa entre los pares *con-sin* raleo de Meliquina, Abra Ancha y Junín de los Andes resultaron significativas, tanto a nivel individual como conjuntamente. ($p < 0,01$, Anexo 2.5). La caída de biomasa en el sistema experimentada por los raleos debe considerarse temporaria, y cabe esperar que la reacción de los árboles residuales se compense rápidamente con la mayor oferta de luz y nutrientes que promueve este disturbio, hasta cerrarse nuevamente el canopy (Medhurst y Beadle 2001, Cooper 1982). Particularmente la recuperación de la biomasa foliar se acelera, y en el caso de los bosques tropicales, ante disturbios moderados esta recuperación del follaje se

alcanza en unos tres meses (Cooper 1982). Dado el crecimiento estacional de los bosques templados, en los rodales raleados, esto ocurriría posiblemente en más de una temporada de crecimiento. De todos modos, los efectos del raleo en el almacenaje de carbono no serían muy pronunciados si las intervenciones son apropiadas particularmente porque una alta proporción del carbono suele encontrarse en el suelo (Waring y Running 1998). Si esta operación fuera un proceso continuo, a nivel de rodal no se percibirían cambios (Cooper 1982), aunque no es el caso del manejo de pino ponderosa en la Patagonia. En el componente de mantillo también se encontraron diferencias entre esos tratamientos ($p < 0,05$), pero debidas únicamente a la mayor proporción de ramas y tocones en los rodales raleados ($p < 0,01$). Las fracciones de *despunte* y *hojarasca* no tuvieron variaciones significantes (Tabla 12.3-3, Figura 12.3-3). En el caso de las hojas, la ausencia de diferencias podrían deberse al incremento de la descomposición en el lapso transcurrido desde el raleo hasta el momento de evaluación (hasta 2 años), debido a: (1) el aumento en la temperatura y humedad del suelo, y (2) la mayor disponibilidad de nutrientes para organismos descomponedores (Cooper 1982). En el caso de los despuntes, probablemente la ausencia de diferencias se deba a que en algunas de las parcelas raleadas se extrajeron troncos completos, incluyendo la porción apical más fina¹⁷.

Biomasa de estepas

En promedio, las estepas acumularon $10,0 \pm 0,6 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ (promedio \pm error estándar) de materia seca, distribuidos entre la biomasa aérea (82%) y la subterránea (18%). Como las observaciones fueron realizadas a principios del verano (diciembre y

¹⁷ La modalidad de manejo de plantaciones de los sitios de Meliquina y Junín de los Andes, pertenecientes a una misma empresa, incluye la remoción de material leñoso grueso en los raleos.

enero), las plantas se encontraban en su pico de biomasa con respecto al material verde, aunque no en cuanto a la presencia de material seco.

Por ejemplo, en estepas de coirón blanco al sur de Chubut -con menor temperatura y precipitación media que las de los sitios aquí estudiados-, los picos de biomasa verde tienen lugar en diciembre-enero (Jóbbagy y Sala 2000, Deffosé y Bertiller 1991, Fernández *et al.* 1991) con repuntes menores en otoño (Deffosé y Bertiller 1991), y la acumulación de material muerto es máxima en mayo y junio, y mínima en primavera (Jóbbagy y Sala 2000, Deffosé y Bertiller 1991, Fernández *et al.* 1991). En ese sentido, es posible que las ecuaciones de estimación aplicadas en esta investigación (desarrolladas sobre observaciones realizadas en abril y octubre-noviembre de años previos) pudieran introducir sesgos en el cálculo de la biomasa de cada fracción. Sin embargo, como la proporción entre las fracciones viva, muerta, y las raíces es alternante durante el año, estos sesgos serían poco pronunciados en la estimación de la biomasa total.

El análisis de las estepas observadas según su *condición de pastizal*, un concepto utilitario sobre la productividad, basado en la proporción de especies deseables e indeseables desde el punto de vista forrajero (Dysterhuis 1949, en: Paruelo *et al.*, Eds. 1993), muestra el cambio en la asignación específica de la biomasa y su partición aéreo-subterránea. Conforme se pasa de la mejor a la peor condición, se incrementa la frecuencia de arbustos y gramíneas no forrajeras, en detrimento de las especies más palatables (*Festuca pallezens* y otros coirones *dulces*).

En este estudio, la biomasa aérea total (Tabla 12.1-2) fue significativamente diferente entre las condiciones intermedias (*bueno*), o *pobre* y la mejor condición de pastizal ($p=0,04$ y $p=0,01$ respectivamente, prueba de Kruskal-Wallis, Anexo 2.12). Sin embargo, no se verificaron diferencias en la biomasa subterránea y total ($p>0,05$ en ambos casos) entre las diferentes clases de condición. Estos resultados confirmarían lo señalado en la Parte II de este estudio (sección 8.2) sobre la complementariedad entre un manejo ganadero conservativo de la cobertura de gramíneas y objetivos de secuestro de carbono.

A la vez, las relaciones raíz:tallo de la Tabla 12.1-2 arrojaron diferencias significativas entre el pastizal *excelente/muy bueno* y cada una de las restantes clases de condición ($p<0,05$ en todos los casos, Anexo 2). Es decir que la historia de uso de las estepas (asociada a su condición actual de pastizal) afectó principalmente su composición específica (Figura 12.1-3) y la partición raíz:tallo. La biomasa aérea cayó fuertemente sólo en la situación más extrema de degradación, con respecto a la mejor condición de pastizal (test de Tukey, $p<0,05$), aunque no en relación con las clases intermedias ($p>0,05$).

En las condiciones intermedias, se verificaron cambios en la participación específica (dismuyó *Festuca*, apareció *Stipa* -de baja palatabilidad-, y se incrementaron el neneo y el abrojo), con caída (no significativa) de la biomasa total (Tabla 12.1-1). Esta menor biomasa, respecto del pastizal *excelente/muy bueno* podría explicarse por la pérdida de cobertura (Tabla 12.1-2) y también por los cambios específicos (Figura 12.1-3). En el análisis de cobertura *parcial* (del conjunto de coirones, neneo y abrojo) con datos estratificados (Figura 12.1-4), se encontró una alta correlación

entre la cobertura aérea y la biomasa total de la estepa. A modo de síntesis de estos resultados, cabrían esperar los siguientes cambios dinámicos de estas estepas: (1) un estado inicial sin deterioro, con predominio de gramíneas, máxima cobertura y mínima relación $r:t$, seguido de (2) distintos estados intermedios, con sustitución de gramíneas por otras gramíneas e ingesión de arbustos, caída y estabilización de cobertura y biomasa aérea, y aumento de la relación $r:t$, para concluir en (3) estados avanzados de degradación, con mínima expresión graminosa y máxima arbustiva, mínima cobertura y biomasa aérea, y partición $r:t$ en partes similares. Estos cambios en cobertura y composición específica observados son consistentes con el enfoque de secuencias de deterioro basado en el análisis de estados y transiciones de estepas de coirón blanco del sudoeste de Chubut (Bertiller y Defossé, en: Paruelo *et al.*, Eds.1993). Milchunas y Lauenroth (1993) encontraron que los cambios en la composición de los pastizales sometidos a pastoreo a nivel mundial, podían explicarse fuertemente por la productividad primaria y por la historia evolutiva del pastoreo en la comunidad vegetal, más que por el nivel de consumo. En las estepas patagónicas, si bien se han postulado hipótesis de una evolución vegetal con herbivoría (Lauenroth 1998), los patrones de consumo de los herbívoros domésticos habrían afectado fuertemente la composición y cobertura de las estepas (Aguiar y Sala 1998, Soriano 1986). En ese sentido, cabría esperar que la restauración de estepas degradadas no aporte cambios importantes en la cantidad de biomasa - aunque sí en su partición-, a menos que se pudiera lograr restituir las a la mejor condición de pastizal.

Por otro lado, la acumulación actual de biomasa en las estepas evaluadas, no respondería al nivel de precipitación (tendencia no significativa, Figura 12.1-6), factor

fuertemente correlacionado con productividad primaria neta en los pastizales (Austin y Sala 2002, Fernández *et al.* 1991). En pastizales semiáridos del Monte pampeano, Giorgetti *et al.* (1997) encontraron una relación positiva y estrecha entre la precipitación y la producción de biomasa aérea, aún bajo impactos de sobrepastoreo, quema, o abandono previo agrícola. Posiblemente en el caso de las estepas de ecotono evaluadas -donde el factor pluviométrico es menos limitante-, el grado de utilización y deterioro históricos afecte más la condición del pastizal que las diferencias ambientales. Esto resulta coincidente con lo postulado por Schlichter *et al.* (1994) para la estepa patagónica, quienes señalan que el desencadenamiento de la desertificación encuentra su origen en variables políticas y socioeconómicas (incluyendo el manejo inadecuado de cargas), y no en variables climáticas.

En otros ambientes semiáridos se observó también que el cambio de condición de pastizal, por reemplazo de gramíneas palatables (sujetas a pastoreo) por otras menos palatables presentes en la comunidad, podría verse favorecido (en vez de deprimido), por un mayor abastecimiento hídrico, al favorecer la competencia de las especies no pastoreadas (Flemmer *et al.* 2003). Sin embargo, esto no parecería ser la causa del reemplazo del coirón blanco observado en las condiciones *buena*, *regular* y *pobre* (Figura 12.1-3), ya que no solamente ocurre este reemplazo, sino que también hay pérdidas de cobertura y biomasa (Tabla 12.1-2).

El alto error de la biomasa promedio en la clase de precipitación superior (Figura 12.1-6 col.B) sugiere además que otros factores diferentes de la precipitación afectarían la distribución de biomasa en los sitios más húmedos. Por otra parte, para sitios secos con valores de precipitación cercanos al límite inferior de este estudio,

Fernández *et al.* (1991) encontraron que en años de precipitaciones superiores al promedio, la producción de biomasa no fue mayor que en años normales, sugiriendo que los excesos hídricos, mayormente invernales, se podrían perder por percolación profunda. Podría así especularse que mayores precipitaciones también aparejarían mayores pérdidas de agua por drenaje y escurrimiento, particularmente en áreas elevadas o inclinadas, y consecuentemente una mayor disponibilidad en áreas bajas o planas, explicando de este modo la alta variación observada. No obstante, los datos de este estudio son insuficientes para probar tal hipótesis.

En este trabajo se ha recurrido a un método indirecto de estimación de biomasa de las estepas que puede resumirse en: (1) la medición a campo de individuos de coirón blanco y amargo, neneo y abrojo, (2) la aplicación de ecuaciones alométricas de biomasa, y (3) su expansión a nivel de *stand*. Este abordaje, quizás menos preciso que la medición directa por cosecha y secado de muestras de toda la vegetación presente en las parcelas, reconoce ventajas prácticas. Por una parte se evita un laborioso trabajo y aumentan las posibilidades de generalización de resultados, en tanto la composición específica y la cobertura de copas de arbustos o el área basal de los coirones, sean atributos considerados en la evaluación de pastizales. Como una cantidad de especies -en su mayoría herbáceas anuales o perennes de menor tamaño-, no fueron consideradas en la estimación, se consideró que la relación entre la cobertura de las especies estudiadas y la cobertura total de las parcelas sería una medida efectiva de la calidad de la estimación de biomasa.

De acuerdo con la ecuación de la Figura 12.1-5, la cobertura parcial (de coirones, neneo y abrojo en conjunto), daría cuenta del 87% de la cobertura total. Asumiendo

que la relación *biomasa parcial (de las mismas especies): biomasa total* es similar a la relación de coberturas respectivas, esta pendiente (0,87) también indicaría que proporción de la biomasa total se habría cuantificado. Una fuente posible de error de estimación de biomasa, sería la aplicación generalizada de funciones desarrolladas para coirón blanco, a otros coirones (*Stipa speciosa* y otras). En estos últimos no se han realizado estudios alométricos, aunque se asume que el aporte diferencial que podrían establecer estimaciones más precisas, no afectaría significativamente los resultados a los fines de esta investigación.

Carbono del suelo

En las estepas, el carbono promedio del suelo hasta una profundidad de 50 cm superó al de plantaciones de pino en un 25% (101,7 vs 80,9 Mg.ha⁻¹), aunque fue menor al contenido en los cipresales (111,1 Mg.ha⁻¹). Sin embargo, dados los altos desvíos (Tabla 12.2-1), estos valores no fueron significativamente diferentes y por lo tanto, las diferencias observadas no podrían atribuirse al reemplazo de estepas por la forestación. Los mayores aportes orgánicos al suelo por descomposición del mantillo y reciclado de raíces, que harían esperable un aumento del carbono del suelo, no se evidenciarían dentro de las primeras rotaciones forestales, como es el caso de las plantaciones actuales de Patagonia. Es posible que las plantaciones produzcan inicialmente un decrecimiento del carbono lábil de recambio rápido, consistentemente con la pérdida de especies presentes en la estepa. Los resultados sugieren que la dinámica del carbono en el suelo como resultado del uso parece tener una respuesta más lenta que la de la vegetación que sostiene. En un estudio de cambio temporal de carbono en sitios repoblados con bosques, Johnston *et al.* (1996) observaron que en un período de 40 años el almacenaje de carbono se

incrementó un 13% en los árboles, en tanto que el suelo mineral incrementó su contenido en un 4%. Bruce *et al.* (1999) señalan que los pastizales naturales, bajo buenas prácticas de manejo ganadero, -incluyendo riego, fertilización y mejoramiento de especies-, podrían tener ganancias de carbono en el suelo de unos 200 kg.ha⁻¹.año⁻¹. En cambio Schlesinger (1990), para una variedad de tierras altas a nivel mundial, propone un incremento anual de carbono humificado de 24 kg.ha⁻¹.año⁻¹. Este último valor, aplicado a las plantaciones de pino, daría cuenta de una ganancia de carbono en el suelo (si hubiera) del orden de 480 kg.ha⁻¹ en veinte años (que es aproximadamente la edad promedio de las forestaciones analizadas), es decir, alrededor del 0,5% de incremento respecto de la situación inicial. De modo que si ocurriera este leve cambio, quedaría encubierto por el alto contenido de carbono actual de las estepas evaluadas.

Por otro lado, la historia de uso previo entre sitios de estepa con plantaciones actuales y aquellos que continuaron como tales, explicaría en parte las variaciones observadas entre usos. Algunas evidencias indican que en general en los campos de la región, se han plantado pinos en sitios de estepa más degradados y sobre suelos erosionados, conservándose los mejores pastizales para uso ganadero (observación personal). Por otra parte, no se ha considerado en el análisis de parcelas apareadas (aunque sí para plantaciones de pinos solamente, sección 12.3), otros reservorios de carbono del suelo, como la materia orgánica semi-incorporada, que corresponde a una fase de transición entre el mantillo y el suelo. En las forestaciones de pino, esta fracción alcanzó un contenido de CO promedio (de diez observaciones en tres sitios) superior a los 4 Mg.ha⁻¹ (Tabla 12.3-2). El mayor contenido de carbono del suelo en los bosques de ciprés es consistente con

la dinámica suelo-árbol, establecida durante períodos más prolongados que los de las forestaciones recientes de pino. Si bien la edad promedio (eap) de los árboles *más gruesos* en los bosques de ciprés fue de 56 años, en un rango de 18 a 148 años (Figura 12.1-1), resulta probable que muchos sitios hayan mantenido continuidad forestal durante varias generaciones, incorporando el carbono en la fracción lábil de recambio lento o estabilizándolo en complejos organo-minerales (Parte I, sección 2.2).

En las forestaciones raleadas, no se evidenciaron cambios significativos de carbono del suelo en relación con la situación pre-raleo (Tabla 12.3-3). Estas pérdidas por operaciones de cosecha, han sido caracterizadas como leves cuando se realiza un aprovechamiento cuidadoso (Waring y Running 1998, Cooper 1982). Knoepp y Swank (1997) encontraron aumentos significativos de carbono inmediatamente después de la cosecha en plantaciones de *Pinus strobus* L., presumiblemente por aportes de la descomposición de raíces, los residuos del suelo y por el incremento de la actividad microbiológica. Sin embargo, se encontraron diferencias de densidad aparente del suelo por compactación, observándose evidencias en algunos sitios, de procesos de erosión incipiente por operaciones en sitios con pendiente. Esto podría acusar una pérdida de carbono varios años después. Waring y Running (1998) destacan que la erosión vinculada a la cosecha forestal suele ser una importante fuente de pérdida de nutrientes. Gómez *et al.* (2002), encontraron que la compactación de suelos en bosques de pino ponderosa en California, alteraba la disponibilidad de agua, en forma negativa en suelos arcillosos, y positiva en arenosos. Es decir que la compactación asociada a la cosecha tendría otras implicancias indirectas en el secuestro de carbono, al modificar el régimen hidrológico del suelo. En el caso de las plantaciones aquí evaluadas, este efecto

podría ser favorable al crecimiento forestal, por tratarse de suelos de texturas medianas a gruesas. Por otro lado, los métodos aquí aplicados, pueden haber impedido detectar pequeñas diferencias en suelos con una alta dotación natural de carbono orgánico.

14. CONCLUSIONES

- La biomasa acumulada en forestaciones de edad intermedia o avanzada supera en un orden de magnitud al de las estepas. En las forestaciones más ralas o de menor desarrollo -cuyos valores de biomasa corresponden a los límites inferiores de la dispersión de datos-, estas diferencias en favor de las forestaciones (de pino o de ciprés) serían no menores a 5 veces la biomasa de las estepas.
- La hojarasca acumulada representa un compartimento de magnitud relevante tanto en bosques de ciprés como en plantaciones de pinos. Si se consideran además los detritos leñosos, en plantaciones recientemente raleadas de pino ponderosa, el mantillo total puede superar en más de un 50% a la situación pre-raleo. El mantillo de ambos tipos de bosque únicamente, excede entre dos y cuatro veces a la *biomasa total* de las estepas evaluadas, que incluye en su parte aérea a la mayor parte de la materia orgánica muerta presente (hojas y tallos secos en pie).
- En el suelo, las plantaciones no demostraron acumulación con respecto a la situación presumiblemente original, evaluada en estepas contiguas. La mayor cantidad de carbono acumulado en suelos de cipresales, podría estar indicando una predominancia de bosques autoreemplazándose o regenerando después de disturbios, acrecentando a largo plazo el carbono, a través de las relaciones suelo-árbol.
- El contenido de carbono orgánico de los suelos, no se vería afectado significativamente por raleos recientes, al menos en el corto plazo.
- La precipitación anual y la biomasa acumulada se correlacionan linealmente en las plantaciones de pinos en sitios entre 500 y 1.500 mm de precipitación anual aproximadamente. En los sitios más húmedos el error asociado a las

estimaciones aumenta, sugiriendo que otras variables ambientales o de uso actúan de manera diferencial.

- El coeficiente $r:t$ no demostró una relación clara con el nivel de precipitaciones. Algunas variables físicas de los sitios, como la pedregosidad, la pendiente, la altitud o la clase de drenaje, influirían más sobre la partición de biomasa, que la pluviometría.
- El carbono del suelo observado en las estepas, representó prácticamente el 95% del carbono total acumulado en el sistema suelo-planta.
- La restauración de estepas con alto deterioro por sustitución de gramíneas y pérdida de cobertura, no aumentaría significativamente el almacenaje de carbono, a menos que se las restituyera a la mejor condición de pastizal. En cambio, un manejo ganadero conservativo de las gramíneas sería compatible con objetivos de secuestro de carbono.

15. BIBLIOGRAFÍA

Aguiar, M.R., y O.E. Sala 1998. Interactions among grasses, shrubs and herbivores in Patagonian grass-shrub steppes. *Ecología Austral* 8: 201-210.

Andenmatten, E., Letourneau, F., y A. Ortega 1997. Vínculo entre los índices Densidad relativa y Factor de Espaciamiento y su relación con la Altura dominante. IUFRO Conference: Modelling growth of fast- grown trees species. Valdivia, Chile, Setiembre 1997.

Andenmatten, E., y F.Letourneau 1997. Curvas de índice de sitio *Pinus ponderosa* (Dougl) Laws de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina. *Bosque*, 18(2):13-18

Austin, A.T., y O.E. Sala 2002. Carbon and nitrogen dynamics across a natural precipitation gradient in Patagonia, Argentina. *Journal of Vegetation Science*, 13: 351-360.

Barrera, M.D., Frangi, J.L. Ferrando, J.J. y J.F. Goya 2004. Descomposición del mantillo y liberación foliar neta de nutrientes de *Austrocedrus chilensis* (D.Don) Pic. Serm. et Bizzarri en El Bolsón, Río Negro. *Ecología Austral*, 14:99-112.

Bava, J.O., y H.E. Gonda 1993. Propuesta silvícola preliminar de manejo para ciprés de la cordillera. Congreso Forestal Argentino y Latinoamericano, AFOA, Paraná.

Bremner J.M. 1996. Nitrogen-Total. (Chapter 37, pp. 1085-1121). In: Bigham, J.M (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA Book Series, Nr. 5.*

Bruce, J.P., Frome, M., Haites, E., Janzen, H., Lal, R., y K. Paustian 1999. Carbon sequestration in soils. *Journal of Soil and Water Conservation*, 54 (1):382-389.

Chauchard, L., Rey, M., y M. Peñalba 1991. Funciones de volumen de Ciprés de la Cordillera (*Austrocedrus chilensis* (Don) Flor. et Boutl. *Actas de las VI Jornadas Técnicas: Inventarios-Modelos de Producción y Crecimiento. Eldorado, Misiones: 40-48.*

Cooper C.F. 1982. Carbon storage in managed forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 13:155-166.

Cordon, V., Forquera, J.C., Gastiazoro, J., Barros, V., e I. Schmidt, 1993. Estudio microclimático del área cordillerana del Sudoeste de la Provincia de Río Negro. Cartas de precipitación. Facultad de Ciencias Agrarias. Cinco Saltos. Río Negro.

Defossé, G.E., y M.B. Bertiller 1991. Comparison of four methods of grassland productivity assessment based on *Festuca pallescens* phytomass data. *Journal of Range Management* 44(3): 199-203.

de Koning F., Olschewski R., Veldkamp E., Benítez P., Laclau P., López M., de Urquiza M. y T. Schlichter 2002. Evaluation of the CO₂ sequestration potential of afforestation projects and secondary forests in two different climate zones of South America. *GTZ / TOEB*. Eschborn, Alemania.

Drasckler D.N., Furlotti Wagner A., de Lasa L.I., Frassetto F.L. y T.E. Torres Teramo 1990. Inventario de los Recursos Hídricos Provinciales de Cuencas sin Información de Caudales. Segunda Etapa, Cuenca Activa del Río Limay. Administración Provincial del Agua, Subsecretaría de Obras y Servicios Públicos del Neuquén, 52 pp

Fernández, M.E., Gyenge, J.E., y T.M. Schlichter 2006. Growth of *Festuca pallescens* in silvopastoral systems in Patagonia, part I: positive balance between competition and facilitation. *Agroforestry Systems* 66 (3):259-269.

Fernández, R.J., Sala, O. E., y R.A. Golluscio 1991. Woody and herbaceous aboveground production of a Patagonian steppe. *Journal of Range Management*, 44(5): 434-437

Ferrer, J.A., Irisarri, J.A., y J.M. Mendía 1990. Estudio regional de suelos de la provincia de Neuquén. Consejo Federal de Inversiones, Argentina. Tomo I, 244 pgs.

Gómez, G.E., Singer, M.J., Powers, R.F., y W.R. Horwath 2002. Soil compaction effects on water status of ponderosa pine assessed through ¹³C/¹²C composition. *Tree Physiology* 23:459-467.

Gower, S.T., Isebrands, J.G., y D.W. Sheriff 1995. Carbon Allocation and Accumulation in Conifers. In: Smith, W.K., Hinckley, T.M. (Editors). *Resource Physiology of Conifers. Acquisition, Allocation and Utilization*. Academic Press. Chapter 7: 217-254

Hägglund B. 1981. Evaluation of forest site productivity. *Forestry Abstracts (CAB)*, 42(11): 515-527.

IPCC 1996. *Climate Change 1995. Economic and Social Dimensions of Climate Change*. Univ. Press, Cambridge.

Irisarri, J.A., y J.M. Mendía 1991. Reconocimiento de suelos y evaluación de la aptitud forestal de la región precorillerana de la provincia de Río Negro. Consejo Federal de Inversiones, Argentina. 61 pgs.

Jóbbagy, E.G., y O.E. Sala 2000. Control of grass and shrub aboveground production in the patagonian steppe. *Ecological Applications*, 10 (2):541-549.

Johnston, M.H., Homann, P.S., Engstrom, J.K., y D.F. Grigal 1996. Changes in ecosystem carbon storage over 40 years on an old-field/forest landscape in east-central Minnesota. *Forest Ecology and Management*, 83 (1-2): 17-26.

Knoepp, J.D., y W.T. Swank 1997. Forest Management Effects on Surface Soil Carbon and Nitrogen. *Soil Science Society of America Journal*, 61 (3):928-935.

Lauenroth, W.K. 1998. Guanacos, spiny shrubs and the evolutionary history of grazing in the Patagonian steppe. *Ecología austral.*, 8:211-215.

Lamlom, S.H., y R.A. Savidge 2003. A reassessment of carbon content in wood: variation within and between 41 North American species. *Biomass and Bioenergy* 25: 381-388.

Laclau P. 2003. Biomass and carbon sequestration of ponderosa pine plantations and native cypress forests in northwest Patagonia. *Forest Ecology and Management*, 180: 317-333

Loguercio, G.A., Rajchenberg, M., Rodríguez, N., y P. Pantaenius 1999. Curso-taller de actualización en silvicultura de los bosques de ciprés de la cordillera. CIEFAP/ GTZ, Esquel.

Medhurst, J.L., y C.L. Beadle 2001. Crown structure and leaf area index development in thinned and unthinned *Eucalyptus nitens* plantations. *Tree Physiology* 21:989-999.

Milchunas, D.G., y W.K. Lauenroth 1993. Quantitative Effects of Grazing on Vegetation and soils Over a global Range of Environments. *Ecological Monographs*, 63 (4):327-366.

Nelson, D.W, y L.E. Sommers 1996. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter (Chapter 34, pp. 961-1010). In: Bigham, J.M (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA Book Series N° 5.*

Paruelo, J.M., Bertiller, M.B., Schlichter, T.M. y F.R. Coronato, editores, 1993. Secuencias de deterioro en distintos ambientes patagónicos. Su caracterización mediante el modelo de estados y transiciones. Convenio Argentino-Aleman de Cooperación Técnica INTA-GTZ, LUDEPA/SME, 110 pgs.

Paruelo, J.M., Aguiar, M.R., y R.A. Golluscio 1992. Soil Water Availability in the Patagonian Arid Steppe: Gravel Content Effect. *Arid Soil Research and Rehabilitation*, Vol.2:67-74.

Schlichter, T., Taddeo, H., y B. Bonacalza 1994. Production Systems and desertification in Northern Patagonia, Argentina. En: Reunión "The International Society for Ecological Economics". Costa Rica, 24 al 28 de octubre, 8 pgs + fig.

Schlesinger W.H. 1990. Evidence from chronosequence studies for a low carbon-storage potential of soils. *Nature*, 348: 232-234.

Siffredi, G. L., y Becker, G.F. s/f. Guía de Recomendación de Carga Animal para las Pampas de Coirón Blanco. INTA/ Prodesar, Bariloche.

Thomas G.W. 1996. Soil pH and Soil Acidity (Chapter 16, pp. 475-490). *In*: Bigham, J.M (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA Book Series N° 5.*

Thrower J.S. 1989. Site Quality Evaluation Using Site Index. Presentación en Curso de Capacitación, Módulo III, en el Instituto de Silvicultura de British Columbia en Surrey, 8 de marzo de 1989, 10 pgs.

Woomer, P.L., y C.A. Palm 1998. An approach to estimating system carbon stocks in tropical forests and associated land uses. *Commonwealth Forestry Review* , 77(3):191-190.

PARTE IV - ADICIONALIDAD ECOLÓGICA Y ECONÓMICA DEL SECUESTRO DE CARBONO EN FORESTACIONES DE PINO PONDEROSA

16. MÉTODOS

16.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DINÁMICO

Para la construcción del modelo se siguió una serie de pasos sistemáticos tendientes a identificar las variables del sistema y sus interrelaciones, en términos conceptuales primero, y cuali-cuantitativos después (Haraldsson 2000, Penning de Vries y van Laar, Eds., 1982). Estos pasos fueron: (1) planteo conceptual del "problema", contexto y límites del sistema de análisis, (2) selección de variables de flujo y estado, y establecimiento de relaciones de causalidad, (3) Inicialización, evaluación del comportamiento y ajustes (Penning de Vries y van Laar, Eds., 1982).

El problema del secuestro de carbono

La situación problema objeto de análisis es la siguiente: dado que la remoción y secuestro de carbono atmosférico por las forestaciones es un servicio ambiental reconocido y valorado a nivel global, interesa conocer en qué medida se vería incrementado el carbono actualmente secuestrado en el ecotono, al reemplazarse las estepas por plantaciones forestales con pino ponderosa. Si bien es evidente que la adicionalidad de biomasa y de carbono es positiva, y relativamente más alta en sistemas forestales que en las estepas, es necesario determinar la cuantía de este secuestro y su dinámica en función del crecimiento y el manejo forestal.

Los ecosistemas analizados son las estepas ecotonales y las plantaciones forestales, creciendo sobre suelos derivados de cenizas volcánicas, localizadas

entre las isohietas de 500 y 1500 mm aproximadamente en el noroeste de la Región Andino Patagónica (Parte III, sección 11.1). Las forestaciones consideradas son las de pino ponderosa plantada en macizo con fines maderables, cuyo diámetro promedio de individuos se encuentra en el rango de las funciones de biomasa ajustadas (Parte II, sección 7.2). Las estepas son aquellas en que los coirones blanco y amargo, el neneo y el abrojo en conjunto, dominan su composición específica, bajo un amplio rango de cobertura y condición de pastizal (Parte III, sección 12.1). Cada uno de estos ambientes contiene distintos compartimentos o reservorios de carbono dinámicamente relacionados: la biomasa, los detritos y el suelo. Como se determinó en esta investigación (Parte III, sección 12.2) el carbono del suelo no se modificó dentro del período de la rotación forestal, por lo que la dinámica de este componente se excluyó del modelo.

Los estudios de biomasa forestal y de las estepas conjuntamente con el modelo de crecimiento desarrollado por Andenmatten (1999) permitirían simular su dinámica, aunque la información aquí reunida sobre contenidos de mantillo en plantaciones manejadas no arroja luz en cuanto a su descomposición o incorporación al suelo (o salida del sistema).

Componentes del modelo

Para estimar la producción de madera, la acumulación de biomasa en las plantas y en el mantillo, y la adición de carbono, se desarrolló un modelo de simulación basado en las ecuaciones alométricas ajustadas en este trabajo (Parte III, sección 12.1), y en un algoritmo de proyección de crecimiento del rodal (Andenmatten 1999). Este modelo -ajustado empíricamente para forestaciones coetáneas de pino de

densidad completa-, se basa en que el volumen del rodal puede determinarse en función de su altura dominante y su densidad relativa, según el modelo de Mitchell y Cameron (1985), cuya expresión es:

$$V=a \times H^b \times DR^c \quad (1)$$

donde,

V: volumen bruto, con corteza ($m^3 \cdot ha^{-1}$),

H: altura dominante del rodal (m),

DR: densidad relativa de Curtis (adimensional), $DR=G \cdot dg^{-0.5}$ (2)

a, b, c: parámetros de la ecuación,

G: área basal del rodal ($m^2 \cdot ha^{-1}$),

dg: diámetro medio cuadrático (cm)¹⁸.

Como variables explicativas de H utiliza el IS y la edad, en tanto que el número de plantas por hectárea (N) y el diámetro medio cuadrático (dg) son las variables explicativas de la DR. Proyectando la altura dominante en función de la edad, y la densidad relativa del rodal, es posible estimar el rendimiento volumétrico [ecuación (1)] y simular la evolución del rodal dentro de un amplio rango de *calidades de sitio* y *densidades* de plantación, arrojando salidas numéricas de volumen acumulado de madera durante la rotación y hasta la corta final, cuyo turno está determinado por las variables objetivo del modelo.

Por otro lado, la dinámica de la biomasa forestal y el carbono se vinculó con el cambio en la DR, utilizando las ecuaciones aquí elaboradas a nivel de rodal (Parte III, sección 12.1). De modo que esta variable (DR) constituye el vínculo entre el

modelo de Andenmatten (1999) y el peso seco de los diversos compartimentos de la biomasa forestal. Finalmente, la simulación de los aportes y salidas de mantillo se estableció en base a supuestos sobre su dinámica, apoyados en información secundaria.

Los componentes indicados fueron organizados utilizando el programa Stella® (High Performance Systems Inc.), *software* que permite la formulación del modelo en tres niveles simultáneamente: un “mapa” de sectores o sub-modelos (primer nivel del modelo), un diagrama de flujos, estados y variables auxiliares interrelacionados (segundo nivel), y una forma ecuacional (tercer nivel).

En el nivel superior, se definieron cinco sub-modelos (Figura 16.1-1): (1) productividad y crecimiento forestal, (2) biomasa forestal, (3) manejo forestal, (4) cobertura y biomasa de estepas, y (5) balance de biomasa y carbono. En la Figura 16.1-1 se muestran estos sectores, y dentro de cada uno de ellos, las variables de interés para el análisis. En el primer sector se estima la dinámica de la producción de madera de fuste, expresada en volumen; en el segundo se analiza la dinámica de la biomasa aérea y subterránea, y del mantillo forestal. El sector 3 representa las intervenciones de manejo: podas, raleos y cosecha. La producción de biomasa de las estepas se estima en el sector 4, y en el sector 5, el balance de biomasa y de carbono a partir de las salidas de los sectores 2 y 4.

¹⁸ El diámetro medio cuadrático es una estimación del diámetro promedio de los individuos del rodal, que deriva del área basal, según la expresión: $dg = \sqrt{\frac{4 \cdot G}{\pi \cdot N}}$, donde G= área basal, m².ha⁻¹ y N= plantas.ha⁻¹. (Prodan *et al.* 1997, Assmann 1970).

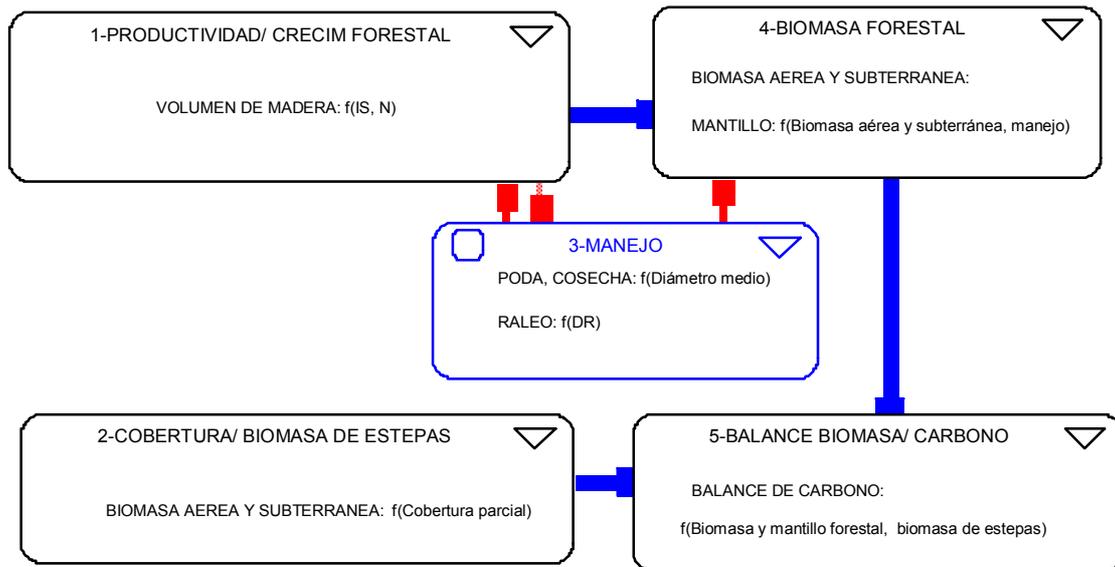


Figura 16.1-1. Mapa de sectores de simulación de la producción de madera y del balance de biomasa y carbono de rodales de pino ponderosa. Las cajas representan los sectores, las flechas gruesas los flujos materiales entre sectores, y las flechas más finas, los flujos de información. IS= índice de sitio, N= número de plantas, DR= densidad relativa (explicación en el texto).

Relaciones de causalidad

Las variables de estado y de control del modelo dinámico incluidas en los sectores 1, 3 y 4 de la Figura 16.1-1 se detallan en la Figura 16.1-2. Las flechas indican las relaciones de causalidad o dependencia entre variables, y el signo que las acompaña, si la relación es directa (+) o inversa (-) (Haraldsson 2000).

El primer sector corresponde al algoritmo de predicción de volumen del rodal (Andenmatten 1999), y sus variables impulsoras son el *índice de sitio* (asimilado a la productividad), y el número de plantas logradas al inicio de la plantación. Las curvas de calidad de sitio ajustadas en la región (Andenmatten *et al.* 1999, Andenmatten y Letourneau 1997) permiten -con el *índice de sitio*- proyectar la *altura dominante* del rodal, que junto con la *densidad de plantas* definen el *factor de altura* (FH), que es la relación entre la altura dominante y el espaciamiento promedio de la plantación.

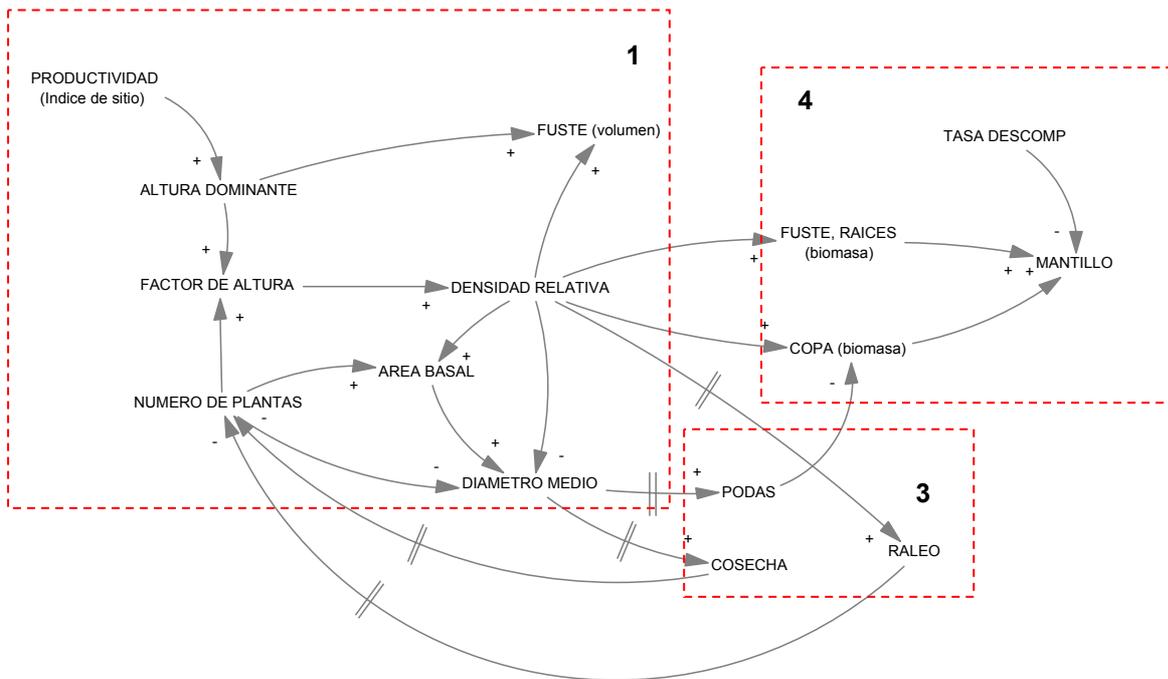


Figura 16.1-2. Relaciones de causalidad entre las variables de los sectores 1, 3 y 4 del modelo de la Figura 16.1-1. Las cajas de línea punteada representan cada sector, en los cuales se indican las variables analizadas. Las flechas muestran las relaciones de causalidad, con un signo (+) si es directa, o (-) si es inversa. Las flechas cruzadas indican la ocurrencia de pulsos.

Con este factor puede estimarse la *densidad relativa*, que junto con la *altura dominante* predicen el *volumen total de fuste*. Como la *densidad relativa* está relacionada con el área basal [ecuación (2), página previa], junto con el *número de plantas* puede calcularse el *diámetro promedio cuadrático*. En el sector 4, la magnitud de cada componente de la biomasa forestal (*fuste, raíces, hojas y ramas*) se calcula en función de la densidad relativa. El pasaje de la biomasa de cada fracción al *mantillo*, es función de la caída periódica de acículas, y los aportes de hojas, ramas, raíces y troncos en oportunidad de las podas, raleos y cosecha. La disminución del *mantillo* depende de las *tasas de descomposición* de la hojarasca y el mantillo leñoso que se asumen como supuestos del modelo.

Finalmente, en el sector 3 aparecen las prescripciones de manejo: *podas*, *raleos* y *cosecha*. Las podas disminuyen la biomasa de copas, cuyas hojas y ramas pasan en consecuencia al *mantillo*, en tanto que el *raleo* reduce el *número de plantas*, afectando a todas las variables relacionadas. La oportunidad de cada alternativa de manejo está definida por umbrales de *diámetro medio* máximo para cada *poda* y para la *cosecha*, y por un rango de *densidad relativa* (máxima y mínima) para los *raleos*, es decir, que esas variables de estado emiten las señales que abren las "válvulas" correspondientes a cada intervención. Los sectores restantes mantienen relaciones simples de causalidad, no representados en la figura. La biomasa de las estepas -que se asume estable en el tiempo- se estima como una función de la cobertura parcial de los pastos y arbustos estudiados, en tanto que el balance de carbono y biomasa se establece por diferencia entre la biomasa y mantillo forestal con la biomasa de la estepa.

Como puede observarse en la Figura 16.1-2, la retro-alimentación (*loops*) del sistema está determinada en el modelo únicamente por los *raleos* y la *cosecha*, que pulsan el sistema en dirección opuesta a su tendencia. Sin este manejo, el crecimiento de todas las variables del crecimiento y biomasa tienden a aumentar indefinidamente, con excepción del diámetro medio, que disminuye en forma progresiva. A diferencia de los *raleos*, que estabilizan el sistema dentro de un rango predefinido de *densidad relativa*, la *cosecha* -que se asume como la corta de la totalidad de las plantas-, anula una de las variables de estado -la presencia de plantas, deteniendo el sistema.

16.2 EL MODELO DE SIMULACIÓN

Basado en el mapa de componentes (Figura 16.1-1) y las relaciones de causalidad entre sus elementos internos (Figura 16.1-2), se elaboró el modelo de simulación (segundo nivel), que se presenta en la Figura 16.2-1. La forma ecuacional se muestra en el Anexo 3, donde también se indican los rangos de valor que cada variable puede tomar para operar el modelo.

Figura 16.2-1. (página siguiente). Modelo de simulación de producción de madera y balance de biomasa y de carbono de la forestación con pino ponderosa. Los elementos del diagrama representan flujos (flechas con válvulas), estados (cajas y algunos círculos) y otras variables auxiliares (círculos). Las flechas representan flujos de información. Los elementos con línea de puntos son réplicas de aquellos de igual nombre con líneas enteras, repetidos solamente para facilitar la visualización del modelo. Los símbolos con elementos gráficos son aquellas variables que pueden modificar sus umbrales para simulaciones alternativas sin afectar la estructura del modelo.

Supuestos del análisis

El modelo desarrollado asume los siguientes supuestos:

- La proyección del crecimiento de las variables de estado depende exclusivamente de la calidad de sitio y del número de plantas al inicio de la plantación (Laclau *et al.* 2002). Por defecto, el modelo asume una plantación de 1.100 pl.ha^{-1} y $IS_{20} = 15$. Ambas variables son modificables para simulaciones alternativas.
- La altura inicial de las plantas es de 0,30 m, y tardan cinco años en alcanzar la altura del pecho (1,30 m), momento en que empieza a operar en el modelo, el crecimiento de la altura dominante en función de las variables mencionadas (Laclau *et al.* 2002). En esos primeros cinco años el crecimiento se asume lineal ($0,20 \text{ m.año}^{-1}$).
- No se consideran pérdidas iniciales de plantas, asumiéndose que las reposiciones tempranas (implícitas en el modelo) no modifican el crecimiento del rodal. Tampoco hay mortalidad de plantas en todo el ciclo forestal -ya que las plantaciones suelen manejarse deliberadamente para prevenir mortalidad por competencia-, y las únicas salidas de individuos son debidas a los raleos o a la cosecha final. Esto implica que no se alcanzan densidades críticas de autorraleo (del Río *et al.* 2001, Daniel *et al.* 1979).
- El crecimiento compensatorio posterior al raleo no modifica la tasa de crecimiento del rodal. Este supuesto es aceptable en tanto se asume que: (1) se realizan raleos *por lo bajo*, es decir, extrayendo en cada vez las plantas con menor dominancia, que no afectan al crecimiento de los árboles dominantes (Vanclay 1994), y (2) las plantas remanentes co-dominantes o intermedias -que

reaccionan positivamente al raleo-, compensan proporcionalmente el crecimiento de las plantas removidas.

- Las acículas, cuya longevidad media estimada es de 4-5 años (Smith y Hinckley, Eds. 1995), comienzan a incorporarse al mantillo a partir del quinto año de plantación, a una tasa anual del 20% (aplicada al follaje existente 5 años antes). Otras transferencias de hojas de la copa al mantillo son las *podas*, contabilizando 3.250 g.pl⁻¹, y 7.315 g.pl⁻¹, para una primera y segunda poda respectivamente (estimaciones de peso seco sobre una simulación de podas; G. Cortés, datos sin publicar), y también los *raleos*, cuya cuantía es proporcional al cambio de densidad relativa del rodal.
- La primera poda comprende la totalidad de las plantas del rodal; la segunda, solamente el 60%. La primera poda opera en el modelo cuando las plantas alcanzan 9 cm de dap promedio (diámetro medio cuadrático), en tanto que la segunda ocurre a los 17 cm de dap.
- Las podas no modifican la tasa de crecimiento del rodal, ya que la intensidad de intervención por individuo es siempre menor al 50% de la copa viva. Por debajo de este umbral, los efectos sobre el crecimiento suelen considerarse leves (Davel y Salvador 2004, Pérez Truffello y Peters Nario 1997, Gonda y Cortés 1995, Waring 1991, Daniel *et al.* 1979, Barret 1968).
- La hojarasca acumulada se descompone a una tasa del 20% anual. A esta tasa se descuenta la hojarasca acumulada durante sucesivos períodos anuales, generando una función exponencial, de decaimiento de esta fracción [$Y=Y_0 \cdot e^{-kt}$, donde, Y= estado de acumulación de hojarasca en un momento determinado (g); Y₀= estado inicial (g); k= coeficiente de decaimiento (años⁻¹), y t= tiempo (años)], usualmente utilizada para evaluar la descomposición del mantillo (Barrera *et al.*

2004, Landsberg y Gower 1997). Ajustando esta función generada con el algoritmo del modelo Stella, se obtiene un valor $k=0,223$, similar al mencionado en bibliografía para este tipo de material (Landsberg y Gower 1997), y cuya inversa es el tiempo de residencia de la hojarasca, en este caso de 4,48 años.

- La oportunidad de *raleo* se establece en función de umbrales de ocupación del sitio, expresados a través de la *densidad relativa de Curtis* (DR). Cuando el crecimiento acumulado alcanza una $DR=9$, se simula un pulso de raleo, que quita árboles hasta descender a una $DR=6$. Posteriormente, la plantación retoma su crecimiento hasta alcanzar nuevamente el umbral máximo. En tanto no se alcance el diámetro de corta final, esta sucesión de raleos se prolonga en la rotación. El umbral superior de DR equivale a un 45% de la ocupación máxima del sitio en tanto que el inferior, al 30%. En este rango de densidades se sostiene la cobertura total de copas del rodal sin alcanzar valores críticos de inicio de mortalidad por autorraleo (Long 1985).
- La corta final ocurre cuando el diámetro medio cuadrático de la forestación alcanza los 40 cm, independientemente de la densidad relativa en que se encuentre la plantación.
- Las ramas se incorporan al mantillo solamente en ocasión de las *podas* y los *raleos*. El peso seco de las ramas caídas, estimado a partir del estudio mencionado (G.Cortés, datos sin publicar), es de 2.783 g.pl^{-1} y 9.815 g.pl^{-1} para la primera y segunda poda respectivamente. Los aportes de ramas desde la copa por raleos, son proporcionales al cambio de densidad relativa.
- Los despuntes, troncos y tocones (residuos de cosecha) que se incorporan al mantillo en los raleos, equivalen al 50% de la biomasa de fuste total cosechada, y esta remoción es proporcional al cambio de densidad relativa. Este coeficiente,

que en la práctica es altamente fluctuante, depende del destino industrial de la producción y de la calidad de operación. Así por ejemplo, Fischlin (1996) cita eficiencias de cosecha del 40% para bosques templados centro-europeos (es decir, un 60% de residuos de fuste). En bosques tropicales estas proporciones pueden ser mucho más altas. Basado en numerosos datos de inventarios forestales en Centroamérica y Sudamérica, Brown *et al.* (1989), encontraron relaciones entre la biomasa total aérea y la biomasa comercial (cosechada) de 1,75:1 en un rango de 1,6:1 a 2,0:1.

- Las raíces (raigones y raíces laterales) -cuya incorporación como detritos ocurre bajo la superficie- se suman al mantillo leñoso en ocasión de los raleos, también en forma proporcional al cambio de densidad relativa.
- El mantillo leñoso se descompone a una tasa del 5% anual. Caben aquí las mismas consideraciones que las mencionadas para la descomposición de hojarasca. En este caso, la función exponencial ajustada, arrojó un coeficiente $k=0,051$ (tiempo de residencia=19,49 años), valor que se encuentra en el rango de los reportados por Barrera *et al.* (2004) para material leñoso grueso de pinos templados en el Hemisferio Norte (k entre 0,042 y 0,055)

16.3 ANÁLISIS ECONÓMICO

Para analizar el potencial beneficio económico del secuestro de carbono bajo escenarios MDL (Mecanismo de Desarrollo Limpio), se evaluó la producción de este servicio ambiental en combinación con la producción de madera, que es el propósito principal del establecimiento de plantaciones en la región. En este contexto, desde la perspectiva de la empresa, el secuestro de carbono aparece como una opción para mejorar la rentabilidad actual de las forestaciones. Para este análisis es necesario disponer de *funciones de producción temporales*, a las que se puedan asignar costos e ingresos periódicos. Considerando ambos objetivos de producción, madera y carbono, el modelo de análisis debe cuantificar su acumulación y determinar la oportunidad, tipo y cantidad de aprovechamiento en la rotación. En la Figura 16.3-1 se indican los flujos de información que el modelo de simulación dinámica propuesto provee para el análisis de inversiones forestales.

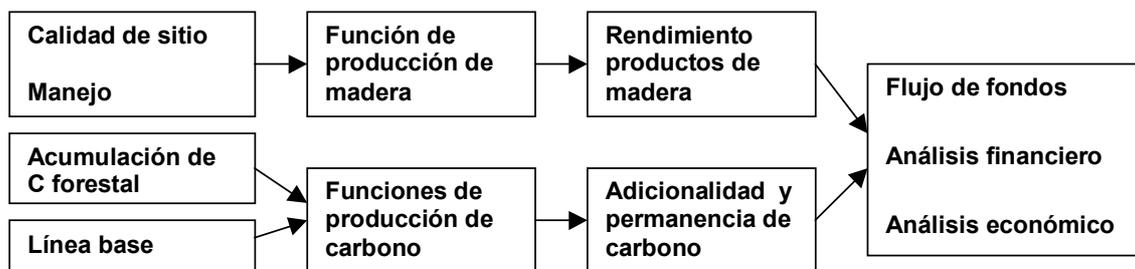


Figura 16.3-1. Diagrama de flujo de información para la evaluación económico-financiera del secuestro de carbono combinado con la producción de madera.

Siguiendo el esquema de la Figura 16.3-1, los rendimientos maderables y la adición de carbono en la rotación de diferentes salidas del modelo de simulación, permitieron formular los flujos de fondos, mediante la asignación de costos de producción e ingresos por ventas, y calcular índices económico-financieros. Para

este análisis se elaboró un sistema de planillas de cálculo (Anexo 5) con el que se evaluaron rotaciones de pino ponderosa en un rango de índice de sitio de 10 a 20, con el manejo de poda y raleo propuesto en el modelo de simulación (sección 16.2), calculándose el *valor actual neto*, *la relación beneficio/costo*, y *la tasa interna de retorno*. Para comparar el efecto de los beneficios del carbono en la renta forestal, se calcularon estos índices para rotaciones similares (es decir, de la misma calidad de sitio, e igual manejo) *con ingresos por ventas de madera únicamente*, y *con ingresos por ventas de madera y CERs* (certificados de reducción de emisiones). Adicionalmente se analizó la posibilidad de la producción forestal en rotaciones sin manejo de poda y raleo, con la misma densidad inicial y cuyo destino principal es el secuestro de carbono, con venta subsidiaria de madera únicamente al final de la rotación. Es decir que se evaluaron:

- (1) Rotaciones con manejo de poda y raleo, con producción de madera únicamente, en diferentes clases de sitio (rango de IS_{20} evaluado: 10-20).
- (2) Rotaciones con manejo de poda y raleo, con producción de madera y venta de CERs, en diferentes clases de sitio (similar rango de IS_{20}).
- (3) Rotaciones sin poda ni raleo, con destino principal de generación de CERs¹⁹, en diferentes clases de sitio (similar rango de IS_{20}).

¹⁹ En este caso se modificó el criterio de manejo asumido en los supuestos del análisis (sección 16.2). Se eliminaron las intervenciones de poda y raleos, y se asumió la corta final cuando la forestación alcanzó un área basal de $80 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$, que se corresponde con un $DR=15$ y un diámetro medio cuadrático $dg=27 \text{ cm}$ a la densidad de plantas considerada ($1.100 \text{ pl} \cdot \text{ha}^{-1}$). Este criterio acorta la rotación con respecto al manejo propuesto originalmente, aunque en el umbral de corta posiblemente se hayan iniciado procesos de autorraleo (Del Río *et al.* 2001).

Supuestos de análisis económico

Los supuestos asumidos para la evaluación económica fueron:

- Los costos de manejo corresponden a la realización de labores de plantación y reposición temprana, podas, raleos, protección anual y corta final. Los ingresos por ventas de madera corresponden a rollizos puestos en planta, en sus distintos tipos: madera selecta o estructural (ambos tipos aserrables) y redonda (no aserrable, para postes o leña) a precios corrientes.
- Para calcular el volumen de cada tipo de producto comercializable en cada cosecha, se aplicaron funciones específicas de forma de fuste, basadas en el diámetro medio de los fustes extraídos.
- La evaluación financiera no contempló la compra de tierra.
- Los costos de manejo y los precios de madera rolliza corresponden a febrero de 2006, basados en información de plaza en el sur de Neuquén (Aserradero Antulemu S.A., M. Mazzuchelli, com. pers.). Los costos y precios de generación de CERs fueron informados por expertos en el Mecanismo de Desarrollo Limpio (W.Oyhantçabal, com. pers., A. Newenschwander, com. pers.)
- Las ventas de certificados de carbono (CERs) bajo las reglas del Mecanismo de Desarrollo Limpio, pueden realizarse bajo dos modalidades: certificados de corto plazo, que acreditan un secuestro temporario de 5 años (*tCERs*) o certificados de largo plazo (*lCERs*), que prevén una duración de 20 o 30 años. La venta del carbono secuestrado según una u otra forma, es una alternativa de cada proyecto, y los precios de uno u otro certificado no varían sustancialmente en la actualidad. Sin embargo, como tienen diferentes impactos en la durabilidad del secuestro de carbono y en el cumplimiento de los compromisos de los países con obligaciones de reducción, se espera que se diferencien a futuro

(W.Oyhantçabal, com. pers.). En el análisis, se consideró la venta de tCERs, cada cinco años, valorizados a un precio relativamente conservador (2,50 U\$S.Mg⁻¹ de CO₂ *equivalente*²⁰).

- La venta de CERs genera costos asociados a su acreditación formal y transacción, que son los siguientes: (1) el registro ante la Junta Ejecutiva del Mecanismo de Desarrollo Limpio, (2) la formulación del proyecto forestal incluyendo los estudios de línea base y plan de monitoreo, (3) la validación del proyecto por una *Entidad Operacional Designada* (EOD); (4) la verificación y certificación, en cada período pre-establecido en el proyecto aprobado, (5) el pago proporcional a los CERs generados al *Fondo de Adaptación al Cambio Climático* (ONU) y (6) las comisiones sobre ventas. Todos estos costos fueron aplicados a las rotaciones evaluadas.
- Los beneficios de promoción forestal, que incluyen pagos subsidiarios de costos de plantación, poda y raleo, no son incompatibles con la venta de CERs (este aspecto, que requiere modificaciones reglamentarias a la Ley N° 25.080 de promoción a la forestación, aún se encuentra en discusión).
- Los valores monetarios aplicados y las funciones de producción de madera y carbono, se incluyen en el Anexo 4.

Herramientas de cálculo

Los índices financieros estimados fueron el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR) y la relación beneficio-costos (B/C), indicadores usuales en el análisis

²⁰ La reducción de emisiones o el secuestro de carbono atmosférico utilizada en el marco del Protocolo de Kyoto se expresan en unidades de CO₂ *equivalente*. Un CER (=una tonelada de CO₂ equivalente) representa la remoción de aproximadamente 0,27 Mg de carbono, dado que el peso de una molécula de CO₂ es igual a 44 (pesos atómicos: C= 12; O= 16). Inversamente, un Mg de carbono equivale a 3,67 Mg de CO₂.

de proyectos. Para su obtención se utilizaron las siguientes fórmulas de cálculo (Frank 1998, Duerr 1993, Nautiyal 1988):

$$VAN = \sum_{i=0}^n \frac{(I_i + C_i)}{(1+r)^n} \quad (3)$$

$$TIR = r, \quad \text{sólo si } VAN = 0 \quad (4)$$

$$B/C = VAN_I / VAN_C = \sum_{i=0}^n \frac{(I_i)}{(1+r)^n} / \sum_{i=0}^n \frac{(C_i)}{(1+r)^n} \quad (5)$$

donde,

I_i = ingresos año i

C_i = egresos al año i

r = tasa de descuento de referencia o calculatoria

n = período (años) de descuento

La TIR, que se resuelve por iteraciones sucesivas del VAN [ecuación (3)] a partir de una tasa de referencia, variando la tasa hasta que su valor se iguala a cero, no puede calcularse apropiadamente en el caso de flujo de fondos correspondientes a una inversión *no simple* (Mao 1986). Las inversiones *no simples* son aquellas donde se intercalan saldos negativos y positivos a lo largo de la vida del proyecto. Esto puede arrojar más de un valor de TIR, resultando el mismo un indicador inadecuado de la inversión (Frank 1998). Tampoco es posible calcular la TIR cuando todos los saldos anuales son del mismo signo. Por ello, no todas las salidas del modelo económico arrojan valores de TIR, y ello depende del arreglo de saldos en el flujo de fondos. Los tres indicadores elegidos se complementan entre sí, y tienen significancias diferentes; el VAN indica el beneficio (positivo o negativo) monetario que se obtiene de actualizar cada egreso o ingreso del proyecto, descontando -a una *tasa calculatoria o de referencia*- estos valores desde el año en que se

producen, al momento presente. La suma de estos valores descontados, representa la ganancia o pérdida que se obtendría del proyecto, expresada en dinero actual. La relación *beneficio/costo*, que relaciona ingresos actualizados con costos actualizados [ecuación (5)], indica cuánto dinero se gana por cada peso invertido. Por último, la TIR es la rentabilidad intrínseca de la inversión, expresada como una tasa retribución al capital (=interés); su valor indica el rendimiento económico del proyecto cuando todos los egresos se igualan a los ingresos, ambos actualizados [ecuación (6)].

17. RESULTADOS

17.1 PRODUCCIÓN DE MADERA Y SECUESTRO DE CARBONO

Simulación de una rotación en un sitio de calidad media

En la Tabla 17.1-1 se presentan los principales resultados de la simulación de la rotación forestal para un sitio de calidad media ($IS_{20} = 15$). Se detallan el dap medio, las existencias anuales en términos de área basal, volumen de fuste, biomasa y detritos de las distintas fracciones, y el carbono total secuestrado. El nivel de carbono *promedio* secuestrado durante toda la rotación fue de $58,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$), y se alcanzó a los 18 años de edad de la plantación (Tabla 17.1-1).

En la misma Tabla también puede observarse que al alcanzarse el dap objetivo de 40 cm -umbral para la corta final-, la forestación acumuló un área basal de $49,1 \text{ m}^2\cdot\text{ha}^{-1}$, y una biomasa de $127,6 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$, distribuidos en su parte aérea ($111,9 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y las raíces ($15,7 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$). El mantillo acumulado (hojarasca y material leñoso) alcanzó a $45,0 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}$. La producción total de madera de fuste fue de $260 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, distribuida en dos raleos (aproximadamente $30 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ en cada uno, a los 21 y a los 30 años de edad) y la corta final ($200 \text{ m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$). Luego de la corta final, la biomasa de hojas, ramas, raíces y despuntes de los troncos acrecentaron el mantillo en una proporción que depende del manejo de residuos practicado, no evaluado en esta simulación.

Tabla 17.1-1. Resultados de la simulación de una rotación de pino ponderosa en un sitio de calidad media ($IS_{20}=15$). Los unidades son las siguientes: dapo medio (cuadrático), en cm, área basal en $m^2 \cdot ha^{-1}$, volumen de fuste en $m^3 \cdot ha^{-1}$, biomasa y carbono, en $Mg \cdot ha^{-1}$. Los valores al final corresponden al promedio del período. El crecimiento medio se calculó como el crecimiento promedio entre el inicio de la plantación y el momento del máximo valor alcanzado por cada variable.

EDAD	DIAM. MED	AREA BASAL	VOLUMEN	BIOMASA FORESTACION DE PINOS									BIOMASA ESTEPA			CARBONO TOTAL		
				FUSTE	RAMAS	HOJAS	AEREA TOTAL	RAICES	HOJARASC	MANT LENOSO	MANTILLO TOTAL	AEREA	SUBTERR	TOTAL ESTEPA	C TOTAL FORESTAL	C TOTAL ESTEPA	CARBONO ADICIONAL	
0	1,4	0,2	1	1,2	0,4	0,6	2,2	0,1	0,03	0,00	0,03	10,5	2,29	12,79	1,16	6,39	-5,23	
1	2,2	0,4	2	2,4	0,7	1,0	4,1	0,2	0,04	0,00	0,04	10,5	2,29	12,79	2,17	6,39	-4,22	
2	2,9	0,7	2	3,7	1,1	1,3	6,1	0,4	0,05	0,00	0,05	10,5	2,29	12,79	3,27	6,39	-3,12	
3	3,5	1,1	2	5,0	1,4	1,6	8,0	0,5	0,07	0,00	0,07	10,5	2,29	12,79	4,28	6,39	-2,11	
4	4,1	1,4	3	6,3	1,7	1,9	9,9	0,7	0,08	0,00	0,08	10,5	2,29	12,79	5,34	6,39	-1,05	
5	4,5	1,7	3	7,3	2,0	2,2	11,5	0,8	0,14	0,00	0,14	10,5	2,29	12,79	6,22	6,39	-0,17	
6	5,9	3,0	5	11,4	3,0	2,9	17,3	1,4	0,28	0,00	0,28	10,5	2,29	12,79	9,49	6,39	3,09	
7	7,4	4,7	8	16,6	4,2	3,8	24,6	2,3	0,49	0,00	0,49	10,5	2,29	12,79	13,69	6,39	7,30	
8	8,9	6,9	13	22,3	5,6	4,7	32,6	3,2	0,75	0,00	0,75	10,5	2,29	12,79	18,27	6,39	11,88	
9	10,3	9,2	19	28,1	6,9	5,5	40,5	4,3	1,94	3,02	4,96	10,5	2,29	12,79	24,88	6,39	18,48	
10	11,6	11,7	26	34,1	8,3	6,3	48,7	5,4	2,23	2,87	5,10	10,5	2,29	12,79	29,60	6,39	23,20	
11	12,8	14,3	34	40,1	9,6	7,0	56,7	6,6	2,60	2,73	5,33	10,5	2,29	12,79	34,31	6,39	27,92	
12	14	16,9	44	46,0	10,9	7,7	64,6	7,8	3,11	2,60	5,71	10,5	2,29	12,79	39,05	6,39	32,66	
13	15,1	19,7	54	51,9	12,2	8,4	72,5	9,0	3,77	2,47	6,24	10,5	2,29	12,79	43,87	6,39	37,47	
14	16,1	22,4	65	57,6	13,4	9,0	80,0	10,2	4,38	2,35	6,73	10,5	2,29	12,79	48,46	6,39	42,07	
15	17,1	25,2	77	63,3	14,6	4,8	82,7	11,5	5,30	2,24	7,54	10,5	2,29	12,79	50,87	6,39	44,47	
16	18	28,0	90	68,9	15,8	10,2	94,9	12,7	7,49	12,52	20,01	10,5	2,29	12,79	63,80	6,39	57,41	
17	18,9	30,8	103	74,4	17,0	10,8	102,2	14,0	8,55	11,91	20,46	10,5	2,29	12,79	68,33	6,39	61,93	
18	19,7	33,7	117	79,8	18,1	11,3	109,2	15,2	9,69	11,32	21,01	10,5	2,29	12,79	72,70	6,39	66,31	
19	20,5	36,5	132	85,1	19,3	11,8	116,2	16,4	10,91	10,77	21,68	10,5	2,29	12,79	77,14	6,39	70,74	

Tabla 17.1-1 (cont)

EDAD	DIAM. MED	AREA BASAL	VOLUMEN	BIOMASA FORESTACION DE PINOS								BIOMASA ESTEPA			CARBONO TOTAL		
				FUSTE	RAMAS	HOJAS	AEREA TOTAL	RAICES	HOJAR	MANT LENOSO	MANTILLO TOTAL	AEREA	SUBTERR	TOTAL ESTEPA	C TOTAL FORESTAL	C TOTAL ESTEPA	CARBONO ADICIONAL
20	21,3	39,3	147	90,3	20,4	12,3	123,0	17,7	12,19	10,24	22,43	10,5	2,29	12,79	81,56	6,39	75,17
21	22	42,1	163	95,5	21,4	12,8	129,7	18,9	13,29	9,74	23,03	10,5	2,29	12,79	85,81	6,39	79,42
22	25,6	32,1	93	66,1	15,2	9,9	91,2	12,1	15,72	16,44	32,16	10,5	2,29	12,79	67,73	6,39	61,33
23	26,5	34,4	105	69,7	16	10,3	96,0	12,9	17,10	15,63	32,73	10,5	2,29	12,79	70,81	6,39	64,42
24	27,3	36,6	119	73,3	16,8	10,6	100,7	13,7	18,51	14,87	33,38	10,5	2,29	12,79	73,89	6,39	67,49
25	28,1	38,8	132	76,8	17,5	11,0	105,3	14,5	19,96	14,14	34,10	10,5	2,29	12,79	76,95	6,39	70,55
26	28,9	41,0	146	80,3	18,2	11,3	109,8	15,3	21,43	13,44	34,87	10,5	2,29	12,79	79,98	6,39	73,59
27	29,6	43,1	160	83,7	19,0	11,7	114,4	16,1	22,59	12,78	35,37	10,5	2,29	12,79	82,93	6,39	76,54
28	30,4	45,3	174	87,0	19,7	12,0	118,7	16,9	23,46	12,16	35,62	10,5	2,29	12,79	85,61	6,39	79,21
29	31,1	47,4	188	90,3	20,4	12,3	123,0	17,7	24,35	11,56	35,91	10,5	2,29	12,79	88,30	6,39	81,91
30	31,8	49,6	203	93,6	21,0	12,6	127,2	18,4	25,27	10,99	36,26	10,5	2,29	12,79	90,93	6,39	84,53
31	34,1	35,7	100	63,3	14,6	9,6	87,5	11,5	27,27	17,76	45,03	10,5	2,29	12,79	72,01	6,39	65,62
32	34,9	37,4	112	65,7	15,2	9,9	90,8	12,0	28,18	16,89	45,07	10,5	2,29	12,79	73,93	6,39	67,54
33	35,7	39,1	124	68,1	15,7	10,1	93,9	12,5	29,11	16,06	45,17	10,5	2,29	12,79	75,78	6,39	69,39
34	36,5	40,8	136	70,5	16,2	10,4	97,1	13,1	30,06	15,27	45,33	10,5	2,29	12,79	77,76	6,39	71,37
35	37,2	42,4	149	72,8	16,7	10,6	100,1	13,6	31,02	14,52	45,54	10,5	2,29	12,79	79,62	6,39	73,22
36	38	44,1	162	75,1	17,2	10,8	103,1	14,1	32,0	13,81	45,81	10,5	2,29	12,79	81,50	6,39	75,11
37	38,7	45,8	174	77,4	17,6	11,0	106,0	14,6	32,3	13,13	45,46	10,5	2,29	12,79	83,03	6,39	76,63
38	39,4	47,4	187	79,6	18,1	11,3	109,0	15,2	32,7	12,49	45,19	10,5	2,29	12,79	84,69	6,39	78,30
39	40,0	49,1	200	81,8	18,6	11,5	111,9	15,7	33,1	11,87	44,97	10,5	2,29	12,79	86,28	6,39	79,89
MEDIA	21,3	27,5	94,4	56,7	13,0	8,4	78,1	10,5	13,8	8,5	22,3	10,5	2,3	12,8	55,4	6,4	49,0
CREC MEDIO	1,03	1,65	6,77	3,18	0,71	0,43	4,32	0,63	0,85	0,57	1,27	0,27	0,06	0,33	3,03	0,16	2,82

En la Figura 17.1-1 se muestra la evolución de la biomasa forestal y del secuestro de carbono de la rotación simulada.

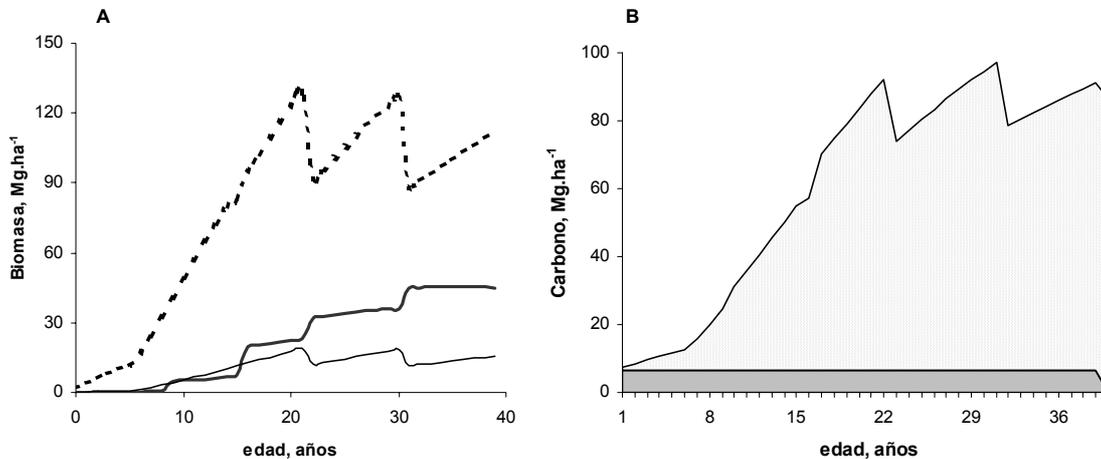


Figura 17.1-1. Evolución del contenido de biomasa y de carbono en la rotación forestal, basada en la simulación de una plantación de pino ponderosa manejada creciendo en un sitio de calidad media (IS=15). En A, se muestran las curvas de biomasa aérea acumulada (línea de puntos superior), el mantillo (línea oscura gruesa) y las raíces gruesas (línea inferior fina). Las fluctuaciones observadas son consecuencia de las podas y los raleos. En el gráfico B, se indica la acumulación de carbono agrupando los mismos componentes de la forestación (área punteada) y también la de las estepas (franja horizontal gris), cuya biomasa se asume estable y constante.

En 17.1-1A, las curvas muestran el acrecentamiento de la biomasa aérea, subterránea y el mantillo. Puede observarse que en oportunidad de los raleos, la biomasa arbórea decrece abruptamente, con el consecuente salto incremental del mantillo. También las podas producen el mismo efecto, aunque en las curvas resultan más evidentes los cambios inducidos por la segunda poda, debido a la escala gráfica.

En la Figura 17.1-1B, en un gráfico de áreas, se puede observar la evolución del carbono de la forestación (área punteada) que incluye los componentes de biomasa y mantillo, y el de la estepa (franja inferior grisada), que se asume estable y constante en el modelo. El secuestro adicional de carbono de la forestación respecto de la

estepa es la diferencia entre ambas áreas, que en el caso de la forestación simulada alcanzó al turno un valor de casi 80 Mg.ha⁻¹ (Tabla 17.1-1), lo cual representa una remoción neta de 294 Mg.ha⁻¹ de CO₂ equivalente. Sin embargo, en el *promedio de la rotación* el carbono adicionado fue de 49 Mg.ha⁻¹ (=180 Mg.ha⁻¹ CO₂eq), cifra que representa la contribución *efectiva* de la plantación de pinos a la mitigación del cambio climático en todo el período (valor promedio de adicionalidad de la Tabla 17.1-1).

Rotación y calidad de sitio

En situaciones de diferente calidad de sitio, *pero con las mismas prescripciones de manejo*, los valores simulados de volumen, área basal, y biomasa al final de la rotación son similares, ya que el cambio de calidad de sitio modifica la tasa anual de crecimiento, afectando la oportunidad de intervenciones, pero no su intensidad. Es decir, con una menor calidad de sitio, solamente se desplaza el horizonte temporal de la rotación, ya que los parámetros del manejo asumidos (diámetros de poda, umbrales de DR para raleo, diámetro objetivo de corta final), no se modifican. Como resultado de ello, las curvas mantienen la misma forma, desplazándose hacia la derecha sobre el eje de abcisas (Figura 17.1-2).

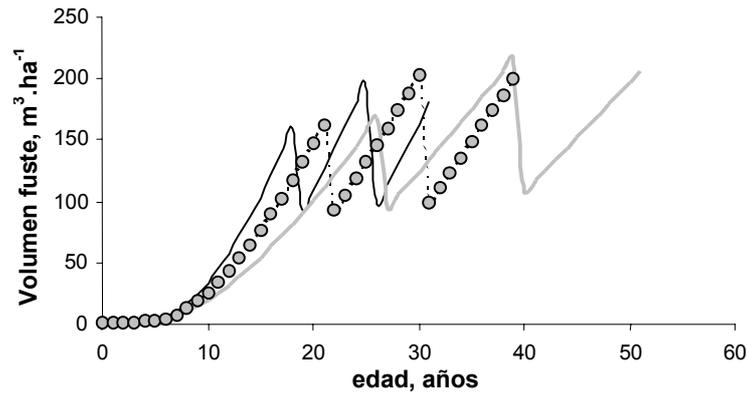


Figura 17.1-2. Curvas de volumen acumulado de una rotación forestal de pino ponderosa en sitios de diferente productividad: $IS_{20}=18$ (línea oscura fina), $IS_{20}=15$ (línea con círculos llenos) e $IS_{20}=12$ (línea gruesa, clara). A medida que decrece el índice de sitio, la rotación se extiende, desde algo más de 30 años ($IS_{20}=18$) a unos 55 años ($IS_{20}=12$), aunque el rendimiento se mantiene.

Forestaciones sin raleo

En sucesivas simulaciones variando el índice de sitio, se analizaron también los valores máximos de producción de biomasa y madera que podrían alcanzarse si no se realizan raleos. Considerando una densidad constante de 1.100 plantas durante la rotación, y un crecimiento del rodal hasta un umbral máximo de $60 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ de área basal y una $DR=12$, los valores de producción alcanzados fueron de casi $300 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ de madera de fuste, y unos $400 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de CO_2eq . En la Figura 17.1-3 se indica la duración de la rotación en función del índice de sitio, para alcanzar los valores mencionados.

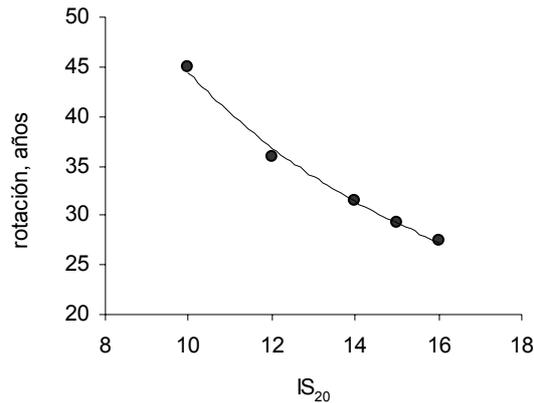


Figura 17.1-3. Duración de una rotación forestal en función del índice de sitio (IS_{20}), en una plantación de $1.100 \text{ plantas} \cdot \text{ha}^{-1}$, *sin raleo*, hasta alcanzar un área basal de $80 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ y una $DR=15$.

Síntesis de resultados

Según las simulaciones realizadas, las forestaciones de pino ponderosa manejadas secuestrarían en todo el ciclo unas 300 toneladas de CO_2eq en el caso de las plantaciones sometidas a poda y raleo (Tabla 7.1-1), que se acrecentarían a casi 400 en rotaciones sin poda ni raleo con los mismos objetivos y en la misma calidad de sitio. En términos anuales y según el sitio, este potencial, alcanzaría hasta un valor máximo de secuestro de carbono de 10 a 14 toneladas de CO_2eq *anuales* para turnos de aproximadamente 30 años, hasta menos de 6 toneladas anuales en sitios de baja productividad que deparen turnos largos (Figura 17.1-4). Para cada una de las curvas, los resultados de simulación (círculos) alcanzaron la misma biomasa y mantillo acumulados, por lo que la diferencia de edades (que afecta la tasa media de secuestro) se debe únicamente a las diferentes calidades de sitio.

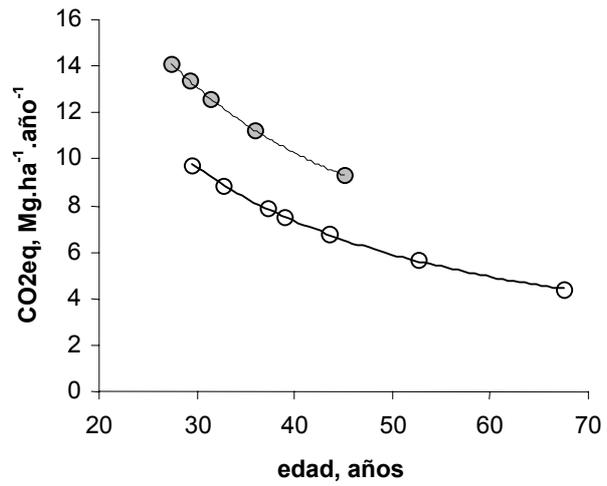


Figura 17.1-4. Tasa anual media de simulaciones de plantaciones con manejo de poda y raleo (línea con círculos vacíos), y sin estas prescripciones (línea con círculos grisados).

17.2 DINÁMICA DEL MANTILLO

En la Figura 17.2-1 se observa la dinámica de la hojarasca y del mantillo leñoso. En el caso de la hojarasca (gráfico superior), se indica la acumulación de hojarasca (curva 1), los aportes anuales por caída de hojas (curva 2) y la descomposición a una tasa propuesta del 20% anual (curva 3). Los aportes de intervenciones de manejo -que ocurren en pulsos instantáneos-, se indican con flechas; las dos primeras correspondientes a podas (P), y las siguientes, a raleos (R).

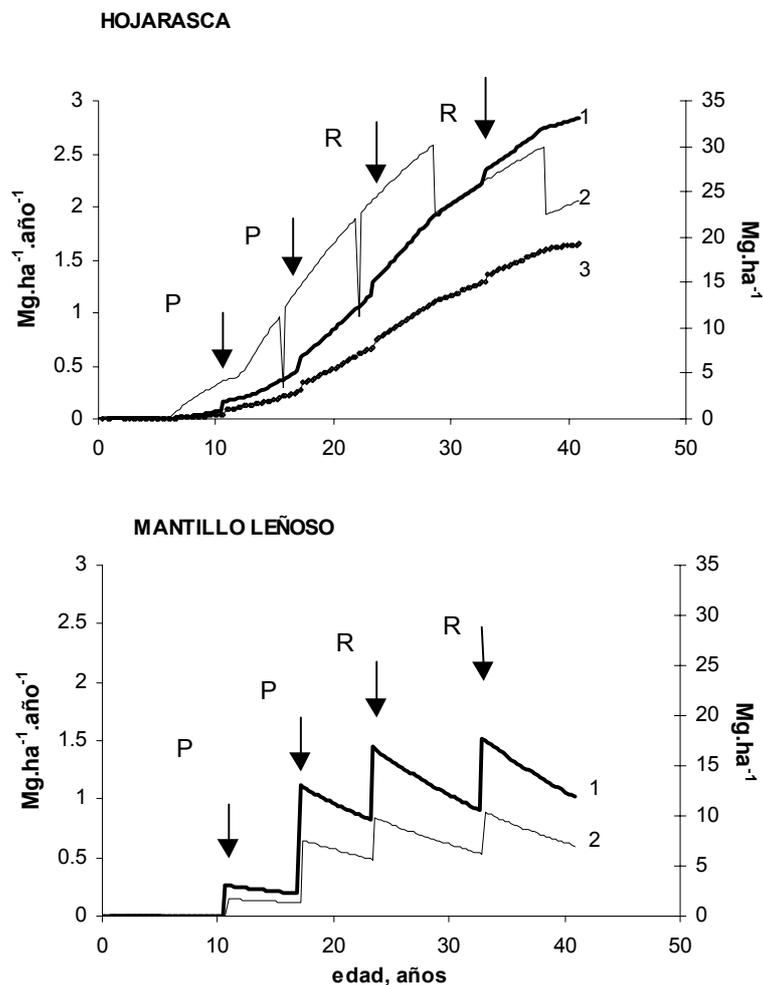


Figura 17.2-1. Dinámica de la hojarasca y el mantillo leñoso en la rotación. El incremento del mantillo por poda (P) y raleo (R) se indica con flechas verticales. La hojarasca (Mg.ha^{-1}) y su incremento anual y descomposición ($\text{Mg.ha}\cdot\text{año}^{-1}$), se representan en las curvas 1, 2 y 3, respectivamente, del gráfico superior. En el gráfico inferior se indica la tendencia del mantillo leñoso (curva 1, Mg.ha^{-1}) y del nivel de descomposición anual (curva 2, $\text{Mg.ha}\cdot\text{año}^{-1}$).

El incremento por caída anual de acículas (curva 2) se asemeja a la acumulación de la biomasa de hojas (curva 1), ya que se estableció como una proporción de la misma, pero con un retardo de 5 años, que se estima como la longevidad media del follaje verde. Por ello experimenta dos picos de caída cinco años después de cada poda, debido a la reducción de biomasa de copas en ese momento. Con los raleos ocurriría algo similar. Puede observarse que al momento de estas intervenciones, la hojarasca acumulada (curva 1) experimenta fuertes incrementos, arrojando una forma escalonada. La tasa de descomposición (curva 3), por asumirse una proporción constante de la acumulación de hojas, mantiene una forma similar.

Por otro lado, el mantillo leñoso (gráfico inferior), reconoce dos aportes solamente (podas y raleo), ya que el modelo excluye la caída de ramas por mortalidad natural. Estos aportes (indicados con flechas y las letras correspondientes) están conformados por ramas de podas y raleos, y también raíces, tocones y despuntes de plantas cosechadas en cada raleo, que levantan abruptamente el mantillo (curva 1). Estos incrementos son parcialmente contrarrestados por la descomposición anual (curva 2), asumida en el modelo a una tasa del 5%. Como resultado de la acumulación de ambos tipos de mantillo, se obtiene una curva de mantillo (total) de la forma graficada en la Figura 17.1-1A.

Análisis de sensibilidad de la descomposición del mantillo

Como las tasas de descomposición reales de la hojarasca y el mantillo leñoso en la rotación se desconocen, se realizaron análisis de sensibilidad de los coeficientes de descomposición asumidos, para evaluar cómo incide su variación en la producción total de mantillo. Para ello se varió cada coeficiente de descomposición en forma

independiente, con una dispersión del 50% hacia ambos lados de los valores de referencia utilizados, recalculándose el modelo en cada variación. El coeficiente de descomposición de hojarasca (0,20), fue entonces sustituido por los valores: 0,10; 0,14; 0,18; 0,22; 0,26 y 0,30; y el de material leñoso (0,05) por los valores: 0,025; 0,035; 0,045; 0,055; 0,065 y 0,075. En este último caso, las tasas inferiores se encuentran en el rango de descomposición leñosa en bosques de coníferas templados europeos (Fischlin 1996).

Con los resultados respectivos se construyó una curva de variación en la cantidad de hojarasca (o mantillo leñoso) en función de la variación del coeficiente de descomposición. Relacionando ambas variables entre dos valores sucesivos de la curva, se obtuvo el valor de *elasticidad* de la cantidad producida de hojarasca (o mantillo leñoso), que es el coeficiente en valor absoluto del *cambio relativo en la magnitud de hojarasca (o mantillo leñoso): cambio relativo en el coeficiente de descomposición*. La *elasticidad* es una medida ampliamente utilizada en el análisis económico, para estimar el comportamiento del cambio de una variable en función del cambio en otra de la cual depende (Koutsoyiannis 1985, Due 1976). Un valor (absoluto) inferior a la unidad caracteriza a una respuesta *inelástica*, es decir aquella en la cual un cambio relativo de la variable independiente resulta en un cambio menos que proporcional en la variable de respuesta, es decir un cambio poco sensible. Análogamente, un valor superior a la unidad indica una respuesta *elástica*, es decir un cambio más que proporcional en la variable de respuesta, ante el cambio de la variable independiente.

En la Figura 17.2-2 se representan los cambios en valor absoluto de los componentes del mantillo, y las curvas de elasticidad correspondientes (Figura 17.2-2A y B). También se graficaron los valores de mantillo total (hojarasca más mantillo leñoso) ante cada variación introducida en el modelo.

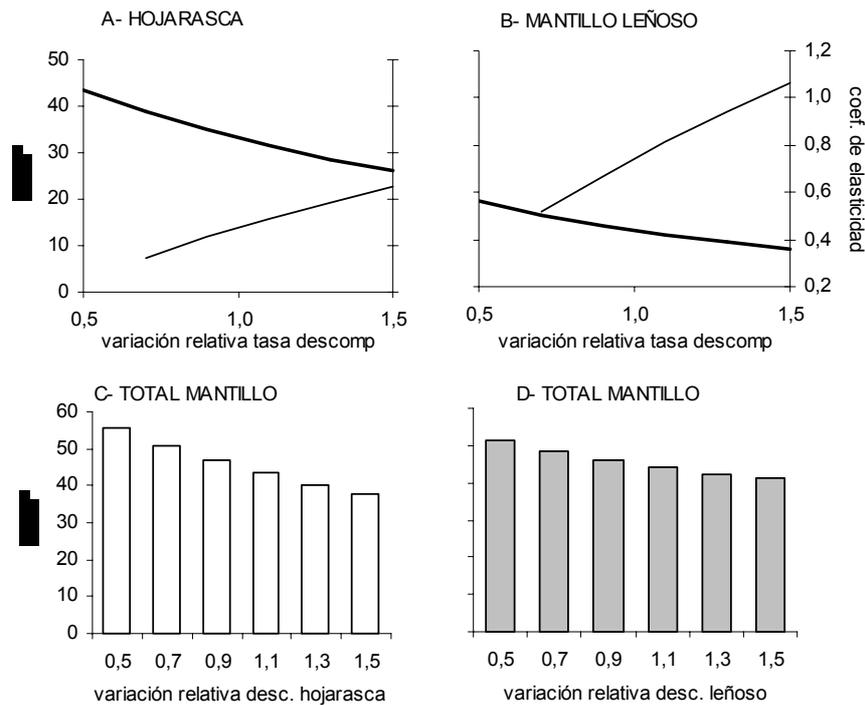


Figura 17.2-2. Análisis de sensibilidad de las tasas de descomposición de mantillo. En los gráficos superiores se indican con líneas gruesas, los cambios en el nivel de hojarasca (A) y mantillo leñoso (B), en función de la variación relativa de las tasas de descomposición respectivas asumidas por el modelo. Las curvas de los coeficientes de elasticidad respectivos se muestran con líneas finas. En los gráficos inferiores se indica el nivel de mantillo total de cada simulación variando las tasas de descomposición de hojarasca (C) o de mantillo leñoso (D).

En la Figura 17.2-2A se observa la variación la hojarasca total (de 26 a 44 Mg.ha⁻¹) en función del cambio relativo en la tasa de descomposición. El efecto de estos cambios de tasa de descomposición sobre el total del mantillo (hojarasca+leñoso), puede observarse en la Figura 17.2-2C. Por otra parte, en la Figura 17.2-2B se muestra la curva de cambio de mantillo leñoso (aproximadamente de 9 a 19 Mg.ha⁻¹)

cuando su tasa de descomposición varió entre 0,025 y 0,075 (50% en más y en menos respecto del valor 0,05 del modelo de referencia). Por tratarse de un componente menor en relación con la hojarasca, la magnitud total del mantillo no varió apreciablemente (Figura 17.2-2D).

17.3 EVALUACIÓN DEL MODELO

En la Tabla 17.3-1 se indican los datos medidos o estimados en la evaluación a campo de esos rodales, y los datos de simulación correspondientes, estos últimos asumiendo supuestos de densidad inicial de plantación y DR objetivo de manejo.

Tabla 17.3-1. Datos observados en rodales *con-sin raleo* y resultados de simulación del modelo con esas observaciones asumiendo número inicial de plantas (N_0) y DR objetivo (DR MAX) consistentes con los valores observados. Se indican además: rodal, edad (años), número de plantas actual (N) e inicial, índice de sitio (IS_{20}), y densidad relativa (DR).

RODAL	DATOS OBSERVADOS				DATOS DEL MODELO					
					ENTRADA		RESULTADOS			
	EDAD	N	IS_{20}	DR	N_0	DR MAX	EDAD	N	IS_{20}	DR
L5A. 1978 (inv 2000)	23	1.267	17,0	9,9	1.267		19	1.267	17,0	9,7
L5A. 1978 (rec 2001)	25	1.156	17,0	12,9	1.200		26	1.200	17,0	13,0
L5A. 1978. Total	25	640	17,0	6,8	1200	10,0	21	646	17,0	7,0
L5B. 1978	25	1.076	17,2	10,9	1100		22	1.100	17,2	10,7
L23. 1982	15	1.444	15,0	11,3	1.450		23	1.450	15,0	11,3
LS1. 1984	25	517	16,8	5,6	700	7,7	21	481	17,2	5,9
C11. 1978	25	1.168	15,8	9,5	1.200		20	1.200	15,8	9,3
C10. 1978	19	460	16,4	4,7	1200	8,0	19	440	16,4	5,2
C6. 1982 (inv 2000)	21	760	17,2	5,5	850	8,5	21	307	17,2	5,4
C6. 1982	19	420	17,2	4,1	900	7,3	18	330	17,2	4,7
AAR, 1976 (pre-raleo 1995)	19	1.524	16,5	10,3	1.500		19	1.500	16,5	10,3
AAR, 1976(post-raleo 1995)	28	537	16,4	4,7	1400	6,9	27	350	16,4	4,8
AAR. 1976	28	296	18,0	5,2	1400	7,1	25	349	18,0	4,9
AAT. 1976	26	1.236	18,5	11,3	1.250		20	1.250	18,0	10,7
PROMEDIO	23	893	17,0	8	1.187	8,0	22	848	17	8,0
DESVIO ESTÁNDAR	3,9	416,5	0,9	3,1	233,6	1,1	2,8	467,1	0,8	2,9
COEF. VARIACION	16,8%	46,6%	5,1%	38,3%	19,7%	13,5%	13,0%	55,1%	4,7%	36,1%

En la Figura 17.3-1 se grafican los valores de biomasa y mantillo calculados por el modelo (eje y) contrastados con los valores observados (eje x).

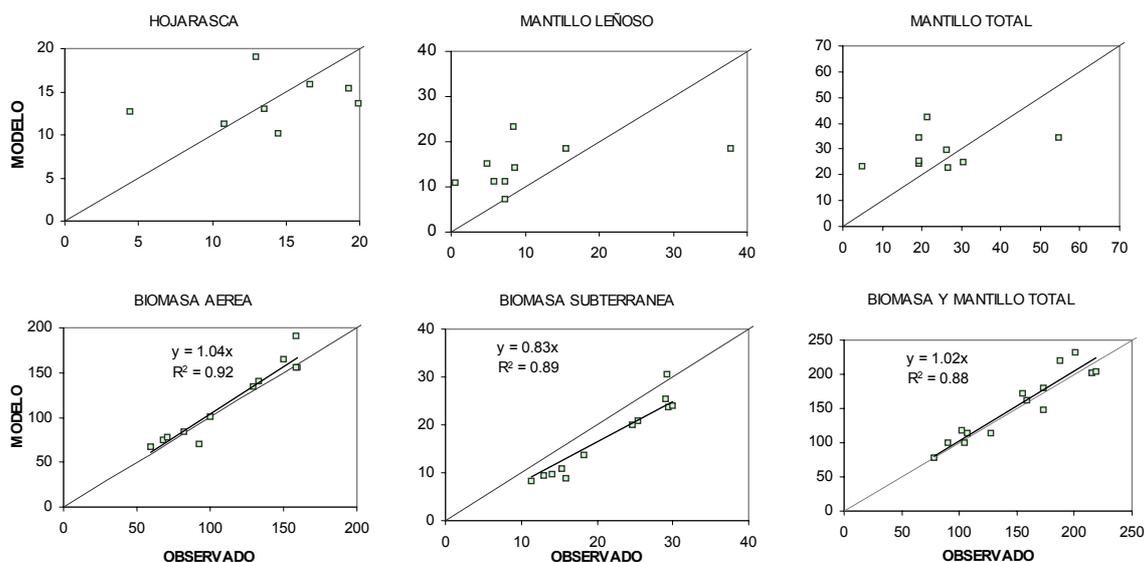


Figura 17.3-1. Comparación entre estimaciones de hojarasca, mantillo leñoso, mantillo total, biomasa aérea, biomasa subterránea y biomasa y mantillo totales. Los símbolos representan los datos, cuyos valores observados se encuentran en el eje x, en tanto que los calculados por el modelo se verifican sobre el eje y. La diagonal de cada gráfico indica una correspondencia perfecta entre las observaciones y las estimaciones del modelo. En los gráficos de biomasa (n=12), y en el de biomasa más mantillo total (n=14), se ajustaron las rectas de regresión (al origen), indicándose los coeficientes de determinación r^2 y las pendientes respectivas ($p < 0,001$).

De la observación de los gráficos de la Figura 17.3-1, se desprende que:

- No hubo una alta correspondencia entre los datos observados y esperados del mantillo de hojarasca o leñoso. La hojarasca habría sido sobre-estimada en dos observaciones, subestimada en tres y correctamente ajustada en otras tres. Con el mantillo leñoso, salvo en un caso extremo, el modelo sobre-estimaría los valores observados²¹. El mantillo total, que suma los valores de hojarasca y material leñoso, sería levemente sobreestimado por el modelo, aunque no mantiene una correspondencia clara con los datos observados. Sin embargo, los valores observados y esperados son consistentes en magnitud y también en

²¹ Esta posible que esta sobreestimación no ocurra realmente, habida cuenta que en varios de los sitios raleados (parcelas C10, C6 y AAR de la Tabla 17.3-1), fue común retirar la mayor parte de los residuos gruesos de la plantación luego del raleo, apilando los menores.

grado de dispersión. Para la hojarasca los valores medios observados fueron de $15 \pm 5,5 \text{ Mg.ha}^{-1}$ vs $15 \pm 3,2 \text{ Mg.ha}^{-1}$ estimados por el modelo, y para el mantillo leñoso, los observados fueron $11 \pm 10,9 \text{ Mg.ha}^{-1}$ vs $14 \pm 5 \text{ Mg.ha}^{-1}$ estimados por el modelo. La suma total de ambos componentes mantuvo una precisión similar ($25 \pm 13,3 \text{ Mg.ha}^{-1}$ de mantillo total observado vs $29 \pm 6,7 \text{ Mg.ha}^{-1}$ simulado).

17.4 RESULTADOS ECONÓMICOS

El análisis económico de una rotación forestal con los supuestos y las prescripciones de manejo asumidas, en un sitio de calidad media (IS=15) arrojó un VAN de 787 \$.ha⁻¹, una TIR de 15,1% y una relación B/C de 1,19 para la venta combinada de madera y CERs. Los valores correspondientes para la misma simulación con venta de madera únicamente fueron de 131 \$.ha⁻¹, 7,6% y 1,03. La diferencia entre estas medidas, representa la adicionalidad financiera del servicio de secuestro de carbono por la plantación forestal, bajo escenarios de precios medios. Es decir que al incorporar la venta de certificados de carbono, todos los indicadores calculados aumentan sensiblemente.

En los extremos del análisis se observaron valores máximos y mínimos de TIR de 22,9 % (IS=20 y altos precios relativos) y -0,12 % (IS=10 y bajos precios relativos), para la misma rotación. Los valores de VAN correspondientes a esas situaciones fueron de 1.220 y -441 \$.ha⁻¹. Un detalle de los indicadores obtenidos a partir del análisis financiero de los modelos de simulación de una rotación forestal variando la calidad de sitio (IS analizados: 10, 12, 14, 15, 16, 18 y 20), el manejo (*con/sin* poda y raleo), y los beneficios (*con/sin* venta de CERs) se incluye en el Anexo 4.

En la Figura 17.4-1 se muestran los valores en diferentes gráficos, definiendo curvas en función del índice de sitio. Los gráficos A, B, y C de la Figura, representan los valores de VAN, B/C y TIR calculados para rotaciones con venta de madera únicamente (líneas finas con círculos llenos), y para las mismas rotaciones con beneficios de venta de madera y CERs, según calidad de sitio.

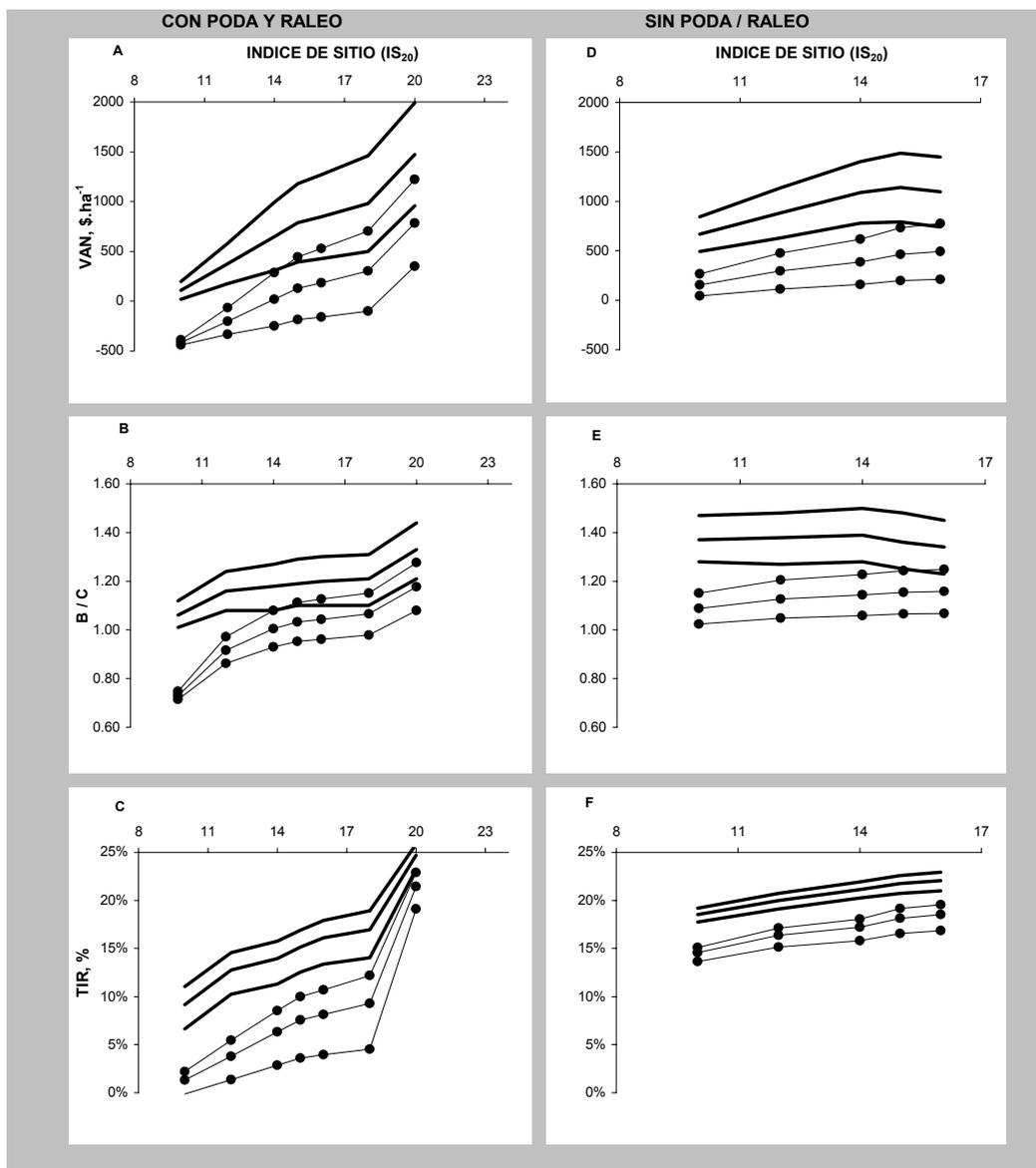


Figura 17.4-1. VAN, B/C y TIR de diferentes simulaciones de una rotación de pino ponderosa, en varias calidades de sitio, caracterizados por la altura dominante a los 20 años de eap (IS₂₀). En todos los gráficos, con línea fina y círculos llenos se presentan curvas de estimación de estos indicadores para modelos de venta de madera únicamente, y con líneas gruesas, las de modelos con venta de madera y CERs. En cada conjunto de (3) líneas, la línea media representa los resultados con precios actuales de madera+carbono (líneas gruesas), o de madera solamente (líneas finas con círculos llenos), y las líneas superior e inferior, los resultados calculados con precios 10% superiores o inferiores, respectivamente. En los gráficos de la izquierda (Figura 17.3-1A, B y C) se representan las salidas de simulación de modelos forestales con manejo de poda y raleo, y en los de la derecha (Figura 17.3-1D, E y F) las de rotaciones sin poda ni raleo.

En los gráficos D, E y F se muestran los mismos índices para un manejo que excluye poda y raleo. En la Figura se muestran grupos de tres líneas en cada gráfico, que

representan la salida de simulación con precios de carbono y madera *altos, medios y bajos* (los extremos con un desvío del 10% del valor medio), para evaluar la sensibilidad a cambios de una de las variables más importantes del análisis económico.

En la Figura 17.4-1A, puede observarse un incremento importante del VAN con la calidad de sitio, desde valores cercanos a 0, hasta casi 1.500 \$.ha⁻¹.año⁻¹ (curva de valores medios) para madera y carbono, y desde -500 hasta aproximadamente 750 \$.ha⁻¹.año⁻¹ para ventas de madera únicamente. Tanto en la alternativa de venta de madera únicamente o de madera y CERs las curvas presentan una tendencia sigmoidea, con importante cambio en la rentabilidad en sitios de índices bajos (IS₂₀= 10 a 14), una tendencia a la estabilización en sitios de calidad media (IS₂₀= 15 a 18), y un fuerte incremento en los sitios de IS>18. La venta de madera y CERs desplazaría las curvas de ingresos por madera únicamente hacia arriba. Por otro lado, en ambos grupos de curvas, con escenarios de precios bajos, el impacto de la clase de sitio sería menor que con medianos o altos precios. En la Figura 17.4-1B también puede observarse que el índice B/C es marcadamente superior en todos los proyectos forestales que incluyen la venta de carbono, superando el valor 1, y alcanzando hasta 1,50 en los mejores sitios y condición de precios.

En aquellos sin poda ni raleo, es decir, diseñados principalmente para la venta de CERs, los retornos por peso invertido son máximos y relativamente independientes de la calidad de sitio, manteniendo similares diferencias de valor entre curvas con precios relativos altos, medios y bajos. Por otra parte la TIR (Figura 17.4-1C), arroja valores crecientes a una tasa relativamente constante entre los índices de sitio 10 a

18 (a precios promedio: entre 2 y 22% para ventas de madera únicamente, y entre 9 y 25% para ventas de madera y carbono), con un abrupto crecimiento cuando la plantación crece en sitios de $IS_{20}=20$. En los mejores sitios, la rentabilidad de cada alternativa producto-precio considerada, tiende a confluir en valores cercanos y mayores al 20% anual. En el extremo inferior, los proyectos con venta de madera en sitios de baja calidad, aproximan su rentabilidad 0, tomando valor negativo en la combinación sitio-precio más desfavorable. En las rotaciones con mantenimiento de la densidad inicial, cuyo objetivo era maximizar el secuestro de carbono (Figura 17.4-1D, E y F), los tres indicadores calculados son relativamente más independientes de la calidad de sitio.

Si se observan las curvas de producción y venta de madera únicamente en los tres gráficos (líneas finas con círculos), se destaca la mayor rentabilidad en términos de VAN, B/C y TIR de las rotaciones *sin poda y raleo*, en sitios de baja productividad, respecto de las rotaciones *con poda y raleo*. Para precios intermedios, estas diferencias alcanzan a unos 600 \$.ha⁻¹.año⁻¹ en el VAN, 0,10-0,20 para la relación B/C, y unos 3-4 puntos en la TIR (resultados en Anexo 4). También se observa una tendencia decreciente de estos índices cuando se analiza la venta de madera y CERs conjuntamente en los sitios de mayor aptitud ($IS_{20}=20$), aunque este descenso en la rentabilidad no se debe al sitio sino que es consecuencia de la duración de la rotación y el arreglo temporal de ventas de carbono asumido (períodos quinquenales, que pueden dejar fuera de comercialización al carbono acumulado en los últimos cuatro años de rotación).

18. DISCUSIÓN

Evaluación del modelo

El modelo de dinámica propuesto se sustenta en: (a) un conjunto de ecuaciones empíricas de rendimiento del rodal, basados en las relaciones entre la altura dominante y la edad, y entre la altura dominante, la densidad relativa y el volumen del rodal (Andenmatten 1999), y (b) las relaciones alométricas a nivel de rodal ajustadas en esta tesis (Parte III, sección 12.1), basadas en datos de inventarios forestales realizados en varios sitios del noroeste de la Patagonia y en mediciones de biomasa individual en dos sitios sobre rodales de 10 y 20 años de edad. Por esto, sólo puede considerarse un modelo preliminar, cuya validación resulta necesaria para su aplicación generalizada. El contraste con evaluaciones independientes permitiría probar su calidad predictiva.

Para evaluar esto, se compararon gráficamente algunas salidas del modelo con datos de producción de madera y biomasa de los rodales evaluados *con y sin raleo* (algunos mencionados en la Parte II, sección 12.3, Tabla 12.3-1), asumiendo en el modelo diferentes valores iniciales de plantas y una densidad relativa objetivo (Tabla 17.3-1 y Figura 17.3-1). Aunque la biomasa forestal de esos rodales se había calculado con ecuaciones dap-biomasa (individual), los datos de su estructura no fueron utilizados en la construcción de las ecuaciones alométricas DR-biomasa utilizadas en el modelo, por lo que pueden considerarse como una muestra relativamente independiente de *datos observados*, cuya dinámica se pretende simular con el modelo (*datos esperados*).

Como se desconocía el número de plantas inicialmente logradas, y el manejo previo de poda o raleo, en el modelo se probó con distintas densidades relativas (DR) objetivo y número inicial de plantas, hasta alcanzar un valor de ambas variables que fuera comparable (similar) a los datos observados. Por ello este análisis debe considerarse como un ejercicio de evaluación especulativo.

Comparando entre datos observados y simulados (Tabla 17.3-1 y Figura 17.3-1), la biomasa aérea y la biomasa total más el mantillo forestal mostraron una alta correspondencia entre la muestra observada y lo modelado, sin sesgos de estimación y con una pendiente cercana a la unidad. La biomasa subterránea en cambio, si bien mantuvo un alto ajuste entre los valores observados y los calculados, tendería a ser consistentemente subestimada por el modelo. Estas diferencias se deberían al mayor error asociado a los diferentes estimadores de biomasa subterránea utilizados en cada caso.

Esta evaluación abonaría parcialmente la capacidad del modelo para estimar biomasa y carbono en rodales manejados. No obstante, debido a la correlación evidente entre las funciones de estimación de biomasa individual y de biomasa del rodal, y dado el nivel de especulación aplicado en las simulaciones acerca de la densidad inicial y los tratamientos previos de las forestaciones observadas, estas pruebas requieren otras formas de validación, con mayor grado de independencia de datos.

Secuestro de carbono

Las diferencias de carbono secuestrado entre rotaciones *con y sin* poda y raleo, estarían dadas por una menor ocupación espacial de las plantaciones con manejo, y las extracciones tempranas de biomasa viva, o su transferencia al mantillo. Sin embargo, las múltiples combinaciones posibles de sitio, manejo de copas, densidad y tratamiento del mantillo, podrían afectar fuertemente los valores mencionados. En las simulaciones, en todos los casos se consideraron plantaciones con 1.100 plantas logradas a su inicio. Esta densidad coincide con modalidades actuales de forestación (SAGPyA 1999, SAGyP 1992), aunque en el pasado se utilizaron densidades mucho mayores (IFONA 1986), con la consiguiente acumulación temprana de biomasa y mantillo (Parte I, sección 3.2).

Muchas de las forestaciones muy densas de los años '70 y '80, actualmente se encuentran en etapas de aprovechamiento temprano, arrojando altos rendimientos volumétricos que se reflejan en todos los componentes de la biomasa (Parte III, sección 12.3, Tabla 12.3-2). Por otro lado, las mayores tasas de secuestro en plantaciones no intervenidas, combinado con sus relativamente altos retornos económicos por venta de CERs (Figura 17.4-1 y Anexo 4.3), sugieren la posibilidad de priorizar el secuestro de carbono en los sitios menos productivos, donde la producción maderable tendría menores retornos por el mayor tiempo de espera hasta la corta final.

En la medida que se afiance el mercado de carbono y dentro de umbrales de densidad de plantas (apropiados para la prevención de plagas), deberían considerarse manejos alternativos a los fines de maximizar este beneficio ambiental,

objetivo que se opone, al menos parcialmente, al de maximización de la producción industrial (Fischlin 1996). Normalmente las rotaciones con objetivos de producción de biomasa tienen turno más largo que el que determina el máximo retorno financiero (Cooper 1982). Particularmente cuando la tasa de descuento es alta, resulta financieramente conveniente anticipar cortas, en tanto que tasas bajas -es decir, de menor costo del capital en función del tiempo de inmovilización-, permiten sostener turnos más largos (Cooper 1982).

En las simulaciones *sin poda y raleo*, se adoptó arbitrariamente un umbral máximo de DR=12 (equivalente a unos 60 m².ha⁻¹ de área basal, con plantas de 27 cm de dap medio). Este índice acortaría sensiblemente el turno de una plantación en un sitio de calidad similar manejado con objetivos maderables, que requiere alcanzar diámetros de corta mínimos de 35-40 cm de dap. El acortamiento de turno, además de la mejora financiera (Laclau *et al.* 2002), contribuiría a reducir el riesgo ambiental, particularmente de incendios y ataque de plagas. Sin embargo, en el caso de plantaciones muy densas que alcancen a niveles críticos de autorraleo (del Río 2001), los riesgos ambientales podrían mantenerse altos.

Dinámica del mantillo

En general, el conocimiento de la dinámica del mantillo y del contenido de carbono del suelo, no está muy avanzado, y tampoco los efectos de las actividades de manejo forestal sobre estos aspectos (Arneth *et al.* 1998, Jonson 1992). Johnson (1992), destaca que la cosechas tendrían efectos levemente positivos o negativos (<10%), -en términos de acumulación de mantillo-, con una recuperación subsecuente rápida a niveles de pre-cosecha. Generalmente las cosechas aceleran

la descomposición del mantillo al liberar recursos (agua y nutrientes) y modificar el ambiente físico (Waring y Running 1998, Cooper 1982). Sin embargo, falta información sobre efectos de poda y raleo, fertilización y otros tratamientos.

Si bien relacionado estrechamente con la biomasa arbórea, el mantillo mantiene una dinámica distinta en la rotación, definida por: (a) los aportes periódicos por senescencia foliar, (b) los de hojarasca y material leñoso de las intervenciones sobre las copas y la densidad y (c) la tasa de descomposición de estos componentes. El primer factor depende de variables ecofisiológicas y también ontogénicas, aunque se han establecido rangos de longevidades medias de hojas específicas (Smith y Hinckley Eds. 1995).

Es común observar en la región un pico de caída de hojas al promediar el verano, cuando los pinos están expuestos a un marcado stress hídrico (Parte I, sección 2.1), lo que es consistente con lo señalado por Schulze y Chapin (1987, en: Mooney y Winner 1991) acerca de que las plantas tienden a mantener constante la relación carbono:nutrientes. La variabilidad climática anual contribuye a la variación de la tasa anual de senescencia de hojas. Por otra parte, también se ha observado la caída de hojas verdes en períodos ventosos. Estos aspectos de la dinámica foliar dificultan su modelado. En cambio, los aportes por intervenciones de manejo serían más fácilmente estimables a partir de la cuantificación de la biomasa removida en cada oportunidad. Los altos valores de hojarasca y mantillo leñoso al cabo de la rotación (Tabla 17.1-1) se relacionan con los importantes aportes que recibe el sistema de estos materiales en oportunidad poda, raleo y cosecha final (Figura 17.2-1). En cuanto a la descomposición del mantillo, aspectos tales como la disposición

de los residuos de poda y raleo en el terreno, y las condiciones micro-climáticas en relación con la actividad de los descomponedores, tendrían fuerte incidencia en la duración de este componente (Perry 1994). En algunas de estas pilas de antiguas podas (como en las de las parcelas C11 y L5B de la Tabla 12.3-2) se encontraron ramas cortadas más de diez años antes, conservando acículas adheridas. En otros casos, también se hallaron trozas gruesas de raleos de mayor antigüedad, con variable grado de descomposición.

Con respecto a la disposición de residuos, en las plantaciones aún no se acuerdan formas de manejo comunes entre forestadores. Algunos de ellos, para disminuir la combustibilidad, reducen todo el material triturándolo (*chipeado*) dejando un residuo uniformemente esparcido y de fácil descomposición. Esta tarea es lenta y altamente costosa, por lo que mayormente el material es dejado *in situ*, más o menos regularmente distribuido, o apilado en hileras separadas por dos o tres filas de plantas, o en parvas, que a veces son quemadas durante el invierno (pérdida que no fue verificada en los casos aquí observados). Estas prácticas suelen ser altamente desaconsejables por las pérdidas y redistribución de nutrientes que acarrear (Waring y Running 1998, Perry 1994)²².

Según el modelo, a las tasas de caída y descomposición asumidas la hojarasca tiende al equilibrio (Figura 17.2-1); esto no ocurriría bajo los mismos supuestos en plantaciones sin podas ni raleos. Algunos modelos basados en mínimos o nulos tratamientos intermedios para mantener la ocupación plena del sitio propuestos para sitios de baja productividad (por ejemplo, en: Laclau *et al.* 2002), podrían acumular

grandes cantidades de mantillo hasta el final de la rotación, rebasando la capacidad de reciclado de este material.

El análisis de sensibilidad de la descomposición del mantillo (Figura 17.2-2) indica que la producción de hojarasca tiene una respuesta relativamente rígida ante cambios en el ritmo de descomposición de esta fracción con índices de elasticidad (hojarasca/descomposición) entre 0,3 y 0,7. En cambio la elasticidad del mantillo leñoso fue mayor (entre 0,5 y 1,1), indicando que esta fracción respondería con cambios más pronunciados al cambio de la tasa de descomposición específica. Considerando ambas fracciones conjuntamente (mantillo total), en rangos de variación de hasta un 50% de los valores asumidos, las respuestas en la producción total de mantillo serían relativamente poco sensibles, arrojando un diferencial por exceso de aproximadamente 6 a 10 Mg.ha⁻¹, o por defecto, de 4 a 7 Mg.ha⁻¹, respecto del valor alcanzado por el modelo de la Tabla 17.1-1 (mantillo total al año de corta= 44,97 Mg.ha⁻¹).

Aspectos económicos

Los resultados del análisis económico corresponden a las salidas del modelo de rotación forestal, basadas en los supuestos de manejo asumidos, a los que se agregan una serie de nuevos supuestos referentes a costos y precios (secciones 16.2 y 16.3). Por lo tanto, la gran cantidad de variables que intervienen y el nivel de generalización asumido (por ejemplo para los costos operativos, que varían con la escala del proyecto, las condiciones de trabajo y las distancias relativas), describen sólo algunos *escenarios*, sin agotar el espectro de resultados posibles. Para

²² Perry (1994) señala que las generalizadas prácticas de manejo que incluyen. (1) la cosecha de árboles enteros, (2) el apilado de residuos y (3) su quema, aceleran la pérdida de nutrientes del

sensibilizar y robustecer los resultados, se analizaron múltiples posibilidades de renta, variando la calidad de sitio, el manejo y los precios de productos. Estas variables han demostrado ser fuertemente determinantes de los resultados económicos de la forestación en estudios previos, particularmente la calidad de sitio (Laclau *et al.* 2002).

Los resultados presentados (sección 17.4) demuestran evidentes ventajas económicas para los proyectos que generan certificados de carbono simultáneamente con la producción de madera. Es de destacar la mayor rentabilidad observada en modelos propuestos sin manejo de podas y raleos respecto de los análisis con estas intervenciones, en los sitios de calidad intermedia a baja (Figura 17.4-1). En los sitios de menor productividad, la alta carga financiera de tareas de manejo que deben realizarse mucho tiempo antes de que arrojen ingresos, no es compensada por los ingresos futuros. Sin embargo, en los sitios de mayor calidad, esto no ocurriría, y los beneficios serían relativamente similares en ambos casos.

No obstante, y de acuerdo con los criterios de implementación del MDL, aquellas forestaciones que demuestren niveles de rentabilidad aceptables únicamente produciendo madera, no calificarían para la venta de certificados de carbono. La presunción que los proyectos forestales basados prioritariamente en la generación de certificados de carbono podrían mejorar sustancialmente los beneficios económicos en sitios de menores crecimientos relativos (de bajo IS), debería evaluarse también en función de la factibilidad técnica de manejar plantaciones con un bajo o nulo nivel de intervención. En ese sentido, deben considerarse contingencias sanitarias y ambientales, entre ellas, la avispa sierra (*Syrex noctilio*),

sistema o promueven su redistribución, concentrándolos en algunos sectores en detrimento de otros.

que ataca la madera viva de pinos en plantaciones con plantas oprimidas o estresadas. También el riesgo de incendios, potenciado por la acumulación y continuidad espacial del combustible leñoso, y presumiblemente también por el cambio climático, requiere los sistemas de manejo sean cuidadosamente diseñados en función de estos impactos.

Como se ha mostrado en la simulación de la dinámica del mantillo, la ausencia de intervenciones de poda o raleo durante la rotación, posiblemente implique una producción considerable de hojarasca. Por ello, estos manejos con alta densidad de plantas solamente podrían sustentarse en rotaciones cortas, aunque aún falta investigación al respecto.

19. CONCLUSIONES

- Los modelos de rendimiento disponibles para la proyección de volumen de plantaciones de pino ponderosa en la región, y las relaciones alométricas elaboradas en este estudio, permiten la simulación de una rotación forestal, de los reservorios de carbono de la biomasa, y del mantillo forestal, así también como la estimación del carbono de la línea base, esta última asumida como estable durante el término de una rotación.
- El modelo de simulación propuesto con estas funciones para la estimación de sus variables de flujo y de estado, constituye una herramienta útil para la evaluación del secuestro de carbono a nivel de rodal, y para el análisis económico de proyectos que generan beneficios comercializables de este servicio ambiental.
- Los resultados de simulaciones realizadas con el modelo, comparados con evaluaciones parcialmente independientes, sugieren que el mismo alcanza un valor predictivo razonable de la dinámica del carbono en una rotación forestal.
- Asimismo, el modelo permite destacar la importancia de variables aún insuficientemente conocidas para la evaluación de la biomasa y el mantillo, como las tasas de descomposición de detritos o la periodicidad de caída de hojarasca. Otros aspectos de la dinámica poblacional, excluidos del análisis, tales como la competencia y mortalidad, el crecimiento compensatorio post-raleo, o la caída natural de ramas, constituyen aún temas pendientes de estudio para las forestaciones locales, cuyo conocimiento contribuiría a fortalecer el modelo desarrollado.
- Por otra parte, la evaluación económica, para la que se utilizaron datos productivos del modelo asignándoles valores de mercado, sujetos a los criterios y

modalidades establecidas para la comercialización de CERs en el MDL, demuestra una adicionalidad económica significativa, que podría complementar proyectos forestales de producción de madera únicamente, particularmente en sitios de relativamente baja aptitud . Sin embargo, para la puesta en valor de este servicio ambiental, deberían ajustarse sistemas de manejo que contemplen una alta tasa de acumulación de biomasa, compatible con la producción de madera de calidad comercial. Como esta calidad está fuertemente relacionada con el diámetro, forma y presencia de nudos en el fuste -aspectos parcialmente contrapuestos con objetivos de acumulación de biomasa- , deberían diseñarse alternativas de manejo que maximicen los beneficios de una producción combinada de madera y carbono. No obstante ello, a los precios considerados de insumos y productos, las forestaciones destinadas al secuestro de carbono como destino principal, con venta subsidiaria de madera, serían económicamente viables.

20. BIBLIOGRAFÍA

Andenmatten E. 1999. Proyección de Tablas de Rodal para Pino Oregón en la región Andino Patagónica de las Provincias de Chubut y Río Negro, Argentina. Tesis de postgrado M. Cs. Universidad Austral de Chile, 62 pgs.

Andenmatten, E., y F.Letourneau 1997. Curvas de índice de sitio *Pinus ponderosa* (Dougl) Laws de aplicación en la región Andino Patagónica de Chubut y Río Negro, Argentina. Revista Bosque 18 (2):13-18.

Barrett, J.W. 1968. Pruning of ponderosa pine...effect on growth. Res. Pap. PNW 68. Portland, OR: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Forest and Range Experiment Station, 9 pgs.

Brown, S., Gillespie, A.J.R. y A.E. Lugo 1989. Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data. Forest Science, 35 (44): 881-902.

Daniel, T.W., Helms, J.A. y F.S. Baker 1979. Principles of Silviculture. 2nd Edition. Mc Graw Hill Inc., New York, 500 pgs.

Davel, M.M., y G. Salvador 2004. Evaluación de esquemas de poda en plantaciones de "Pino Oregón" (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) en la Patagonia Andina. CIEFAP/ Proyecto Forestal de Desarrollo (SAGPyA), PIA 51/98, 37 pgs.

Del Río, M., Montero. G., y F. Bravo 2001. Analysis of diameter-density relationships and self-thinning in non-thinned even-aged Scots pine stands. Forest Ecology and Management, 142:79-87.

Due J.F. 1976. Análisis Económico. EUDEBA, Buenos Aires, 654 pgs.

Duerr W. A. 1993. Introduction to Forest Resource Economics. McGraw-Hill Inc., Cap 19:129-137.

Fischlin A. 1996. Conflicting objectives while maximising carbon sequestration by forests. En: Apps M.J. and D.T. Price, Eds. Forest Ecosystems, Forest Management and the Global Carbon Cycle. NATO ASI Series, Vol I, 40, chapter 13: 163-172.

Flemmer, A.C., Busso, C.A., Fernández, O.A., y T. Montani 2003. Effects of Defoliation at Varying Soil Water Regimes on Aboveground Biomass of Perennial Grasses. Arid Land Research and Management 17:139-152.

Frank R. G. 1998. Evaluación de inversiones en la empresa agraria. Ed. El Ateneo, Bs.As., 95 pgs.

Haraldsson H.V. 2000. Introduction to Systems and Causal Loop Diagrams. System Dynamic course, LUMES, Lund University, 31 pgs.

IFONA 1986. Normas complementarias para la implementación de la Ley Nº 21695 de Crédito Fiscal. Disposición 461/86, 61 pgs.

Koutsoyiannis, A. 1985. Microeconomía moderna. Amorrortu editores, Bs. As. 655 pgs.

Laclau, P., Pozo, L.M., Huerta, G., Mazuchelli, M., Andenmatten, E., y F. Letourneau 2002. Rentabilidad de la forestación con *Pinus ponderosa* (Dougl.) Laws en el noroeste de la Patagonia, Argentina. Bosque, 23(1): 21-35.

Landsberg, J.J. y S.T. Gower 1997. Applications of Physiological Ecology to Forest Management. Academic Press. San Diego, CA, 354 pgs.

Long, J.N. 1985. A Practical Approach to Density Management. The Forest Chronicle, febr. 1985:23-27.

Mao J.C.T. 1986. Análisis Financiero (Quantitative Analysis of Financial Decisions). Ed. El Ateneo. Bs.As., 558 pgs.

Mooney, H.A., y W.E. Winner 1991. Partitioning Response of Plants to Stress. In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). Response of Plants to Multiple Stresses. Academic Press. Chapter 6:129-141.

Nautiyal J.C. 1988. Forest Economics. Principles and Applications. Canadian Scholar Press Inc. Toronto, 581 pgs.

Penning de Vries F.W.T. y H.H. van Laar, Eds. 1982. Simulation of plant growth and crop production. Simulation monographs, Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Wageningen, 308 pgs.

Pérez Truffello, G., y R. Peters Nario 1997. Pérdidas de crecimiento en altura y área basal por efecto de la poda en rodales de *Pinus radiata* (D.Don). Actas de la Conferencia: 'Modelling Growth of Fast-Grown Tree Species', IUFRO, 3-5 de Septiembre de 1997, Valdivia (Ch): 220-231.

SAGPyA 1999. Ley 25080 de inversiones para bosques cultivados y decreto reglamentario. Separata del estudio: Argentina, oportunidades de inversión en bosques cultivados, Buenos Aires, 23 pgs.

SAGyP 1992. Pautas para la implementación del Régimen de Promoción de Plantaciones Forestales. Resolución 845/92, 12 pgs.

Smith W.K. y T.M. Hinckley, Eds. 1995. Resource Physiology of Conifers. Acquisition. Allocation and Utilization. Academic Press.

Vanclay J.K. 1994. Modelling Forest Growth and Yield. Applications to Mixed Tropical Forests. CAB International, UK, 311 pgs.

Waring, R.H. 1991. Responses of Evergreen Trees to Multiple Stresses. In: Mooney H.A., Winner W.E. y E. Pell (Editores). Response of Plants to Multiple Stresses. Academic Press. Chapter 17: 1317-390.

CONCLUSIONES, NUEVOS CONOCIMIENTOS E INTERROGANTES

La fijación de carbono en bosques nativos, pinares y estepas del ecotono al noroeste de la Patagonia y su contribución a la mitigación del cambio climático constituye un tema complejo de estudio, que abarca distintas escalas y dimensiones de análisis. Para una comprensión integrada y sistémica de los procesos involucrados y la magnitud del secuestro de carbono, resulta necesario conocer los estados y dinámica de los reservorios de carbono a nivel de planta, de *stand* o rodal, y también a nivel de paisaje. Por otro lado, las respuestas ecológicas de estos sistemas naturales o implantados, se inscriben en un proceso global de dimensiones ambientales con importante repercusión para la sociedad, cuyas consecuencias sociales y económicas son aún difíciles de comprender.

En este contexto, en esta tesis se investigó a nivel de planta y de rodal, la magnitud del secuestro de carbono de bosques o estepas que pueden reemplazarse dinámicamente, en función de las condiciones ambientales naturales o de decisiones orientadas al uso del suelo, analizando las implicancias ecológicas y económicas de estos cambios. Para ello se postularon diversas hipótesis, cuya aceptación o rechazo se fundamenta a continuación.

Primera hipótesis

La primera hipótesis planteada sostenía que las forestaciones acumulan más carbono que las estepas en biomasa, el mantillo y suelos. Los resultados apoyan la hipótesis de una mayor acumulación de carbono en los compartimentos de biomasa y mantillo de ambos sistemas forestales sobre las estepas. El contenido de biomasa

y mantillo de los sistemas forestales superó en un orden de magnitud al de las estepas.

El carbono orgánico del suelo en los cipresales fue significativamente mayor que en las estepas. De acuerdo a ello, el avance del cipresal sobre sitios de estepa añadiría carbono en el suelo.

La ausencia de diferencias significativas de carbono en el suelo entre plantaciones de pinos y estepas resulta llamativa, habida cuenta del tiempo de ocupación de las plantaciones y que se trata de forestaciones densas, con importante desarrollo subterráneo y formación de mantillo. Por ello, sería necesario dilucidar en investigaciones futuras lo siguiente:

- (1) si la acumulación de mantillo se debe a su baja descomposición intrínseca (calidad del sustrato), o a situaciones de manejo que determinan una baja penetración de radiación al sotobosque, limitando procesos químicos de descomposición y por lo tanto, el incremento del CO del suelo.
- (2) si ocurren incrementos del carbono del suelo por aportes desde el mantillo y la biomasa subterránea, pero en una tasa reducida, de modo que al cuantificar el CO total del suelo, estos aportes no son detectados.
- (3) si la historia de uso previo de los sitios que actualmente soportan estos sistemas ha tenido mayor influencia en el contenido de carbono edáfico que el uso presente.

Segunda hipótesis

Esta hipótesis proponía que el suelo es el principal reservorio de carbono de la estepa, de mucha mayor importancia que la biomasa y el mantillo, pero de menor magnitud que en los sistemas forestales.

Los resultados encontrados avalan dicha hipótesis, habiéndose encontrado que el 95% del CO en este tipo de ambientes se encuentra en el suelo. En ese sentido, habría que dilucidar el efecto del pastoreo histórico sobre esta distribución diferencial del carbono en las estepas.

En cuanto a la vegetación, si bien se observó un cambio en la composición específica según la condición del pastizal, la biomasa total estimada y su partición aéreo-subterránea no evidenció una tendencia clara respecto a esta variable, salvo entre los extremos de máximo deterioro y mejor condición. Por ello, la restauración de pastizales degradados, que tendría fuertes implicancias en su composición y en otros aspectos de la estructura, no modificaría significativamente la cantidad de carbono total en estos sistemas. Es decir que, salvo en el caso de pastizales extremadamente degradados, este servicio ambiental no se incrementaría con el cambio de condición.

Tercera hipótesis

La tercera hipótesis postulaba una partición diferente de carbono en ambos sistemas forestales, asignando comparativamente mayor importancia al mantillo y a la biomasa en las plantaciones de pinos, y al suelo en los cipresales.

Los valores medios determinados de biomasa y mantillo no arrojaron diferencias significativas entre pinares y cipresales aunque sí en el contenido de CO del suelo. Esto indicaría que en el estado de desarrollo actual de las plantaciones evaluadas, solamente se cumple lo postulado para el suelo. Es de destacar que, a pesar de la aparentemente alta acumulación de hojarasca de las plantaciones, el peso seco del mantillo no fue distinto del de los cipresales.

Como el crecimiento de los pinos supera al del ciprés, cabe esperar sin embargo, una mayor acumulación de biomasa y de mantillo en las plantaciones de pino en situaciones comparables de edad de ambos tipos de bosque.

Cuarta hipótesis

Otra hipótesis postulada fue que las tareas realizadas en los raleos provocan pérdidas de carbono en el suelo. Las observaciones realizadas en parcelas de pinos recientemente raleadas, y su comparación con rodales testigo, no avalan esta hipótesis. Sin embargo, la observación de procesos erosivos incipientes por tránsito y arrastre, ameritan investigar las consecuencias de estas tareas transcurrido un mayor lapso de tiempo.

Quinta hipótesis

La última hipótesis proponía una partición diferencial de la biomasa aérea y subterránea en los ecosistemas forestales, en función de aspectos fisiográficos y de la precipitación anual, postulando la disminución de la relación raíz:tallo con el incremento de las precipitaciones y de condiciones edáficas y fisiográficas favorables para el crecimiento.

Con respecto a la precipitación, para las forestaciones de pino se verificó una relación estrecha y directa entre la biomasa total y la precipitación anual, aunque no se encontró tal tendencia en los bosques de ciprés. En ambos casos se observó una relación débil entre la relación raíz:tallo y la precipitación. Sin embargo, con pinos, a nivel de planta, se observó una mayor relación raíz: tallo en sitios secos que en húmedos.

Por otra parte, ambos tipos forestales mostraron una tendencia al incremento de la relación raíz:tallo con el aumento de la *pendiente*, la presencia de material grueso en superficie (*gravas, piedras, rocas*) y el empobrecimiento del *drenaje*. La *altitud* también fue un factor de incremento de la relación raíz: tallo en cipresales.

Todo ello conduce a aceptar la hipótesis planteada en el nivel de individuo con respecto a la pluviometría, y a nivel de rodal con respecto a las condiciones fisiográficas y edáficas favorables para el crecimiento. Las variables físicas mencionadas, contrarrestarían la contribución de la precipitación a una baja relación raíz:tallo.

Resulta también importante señalar que el contenido de carbono orgánico del suelo se correlacionó más fuertemente con la clase de drenaje que con la biomasa forestal. Es decir, los suelos de drenaje impedido, posiblemente más ricos en arcillas, contienen más carbono, aunque esto no ha implicado una mayor acumulación de biomasa forestal. Por todo esto, es necesario que para el diseño de proyectos forestales y la evaluación de su potencial de secuestro de carbono, se

estratifique el muestreo de los sitios no sólo en función del gradiente pluviométrico, sino también de las variables físicas y fisiográficas señaladas.

Modelo dinámico de secuestro de carbono

La simulación para la estimación del secuestro de carbono por plantaciones de pino se basó en un modelo de estimación del rendimiento volumétrico del rodal, ajustado empíricamente para las forestaciones de la región, al cual se incorporaron ecuaciones alométricas de biomasa.

Los estimadores generados en esta tesis permiten calcular la producción de biomasa y mantillo dentro de una rotación forestal utilizando datos usuales de inventarios forestales. Además, el modelo desarrollado permite apreciar algunas cuestiones no muy evidentes acerca del comportamiento de la forestación en ausencia de este tipo de enfoques, como por ejemplo, la tendencia a la estabilización del mantillo en sistemas manejados, o los cambios en la captura de carbono según el manejo practicado.

Como también se ha demostrado, la simulación desarrollada constituye un insumo de utilidad para el análisis económico, facilitando la evaluación de escenarios alternativos de manejo, calidad de sitio, densidad de plantas, etc., cuya evaluación es necesaria para la toma de decisiones públicas y privadas sobre el uso del suelo en la región.

Para simular la dinámica de rodales de ciprés -de estructura más compleja-, es necesario generar una mayor información aún no desarrollada o sólo parcialmente,

como por ejemplo: la dinámica de la diseminación y establecimiento, el ajuste de curvas altura-edad y calidad de sitio, o las consecuencias de la competencia intra-específica en la estructura del rodal.

La forestación y el Mecanismo de Desarrollo Limpio

El análisis discriminante entre los beneficios por secuestro de carbono y la producción industrial resulta de suma importancia *ex ante*. Esto sucede porque las reglas del MDL limitan la comercialización de CERs sólo a forestaciones que, además de generar beneficios adicionales -ecológicos y económicos-, demuestren que (1) no serían rentables *a menos que* vendieran carbono, o (2) pese a su rentabilidad favorable, no puedan superar *barreras* de otro tipo por las cuales no se desarrollan proyectos forestales en una zona.

Estas condiciones, que deben ser presentadas en el marco del *diseño de propuesta de proyecto* (PPD) a consideración de la Junta Ejecutiva del MDL, requieren de un análisis de proyecto complejo, fundamentado, y también especulativo en alto grado, para lo cual es indispensable contar con modelos como el desarrollado. Adicionalmente, también requieren de estudios de impacto ambiental, lo que hace necesario estimar y analizar prospectivamente el secuestro de carbono a un nivel superior, de cuenca o paisaje.

Debe señalarse que actualmente el MDL no reconoce a la regeneración natural o al manejo de los bosques nativos, por lo que estas actividades no generan beneficios de secuestro de carbono transables en el mercado. No obstante, resulta esperable que este criterio se modifique a futuro, ya que no es posible desconocer la existencia

de la importante contribución al secuestro de CO₂ de los bosques nativos, bajo escenarios que incluyen efectos de cambio climático como los aquí mencionados (Parte I). Los resultados sobre la incorporación de carbono en la biomasa aérea y en los suelos de bosques nativos en comparación con las estepas aquí encontrados, justifican plenamente su inclusión dentro de mecanismos apropiados de reducción de emisiones de carbono, como el MDL.

Nuevos conocimientos, nuevas hipótesis

Como síntesis de la investigación realizada pueden destacarse los siguientes logros:

- Un avance cuali-cuantitativo en el conocimiento de la magnitud del secuestro de carbono bajo tres formas de uso del suelo, y su partición entre los componentes principales de la vegetación, entre la vegetación y el suelo, y en función de variables ambientales.
- La generación de información preliminar acerca de la permanencia de carbono en plantaciones manejadas extractivamente, y del cambio en su distribución en el sistema suelo-planta.
- El desarrollo de un modelo analítico de la dinámica de la biomasa y el mantillo en una rotación forestal, aumentando la potencialidad de uso de modelos actuales de la silvicultura regional, y utilizando estimadores desarrollados en este trabajo.
- La aplicación directa de estos desarrollos en la evaluación financiera del secuestro de carbono en el marco de mecanismos del Protocolo de Kyoto.

Finalmente, se propone avanzar en búsqueda de nuevas respuestas, tendientes a:

- Verificar la validez de las funciones elaboradas mediante pruebas independientes en sistemas comparables de la región.

- Profundizar la investigación relativa a la producción de biomasa forestal y su partición, y de producción de mantillo, bajo diferentes condiciones climáticas y fisiográficas, y al almacenamiento de carbono en suelos de forestaciones, basado en las siguientes hipótesis:

1) Los efectos favorables de la precipitación sobre el crecimiento y la partición de la biomasa forestal en las forestaciones, en áreas del ecotono entre los 500 y 1500 mm de precipitación anual, son controlados por la pendiente del terreno, el grado de pedregosidad, la altitud y otros factores sitio-dependientes. Como estos factores se asocian al gradiente topográfico regional, hay una relación directa entre la biomasa total o la relación raíz:tallo, y el gradiente pluviométrico solamente cuando las forestaciones se estratifican con respecto a estas variables.

2) Las forestaciones de pino ponderosa incrementan el nivel de carbono lábil de los suelos en una pequeña proporción del CO total, a través de la descomposición del mantillo, de modo que este incremento sólo es evidente a través de los cambios en la calidad de la MO del suelo.

3) El estado de los sitios de estepa previo a su reemplazo por forestación con pinos o recolonización de cipreses, relacionado con el uso histórico, tiene una mayor influencia en el contenido de carbono del suelo que los cambios que puede aparejar el uso presente

San Martín de los Andes, Neuquén, 16 de octubre de 2006

ANEXOS

ANEXO 1. BIOMASA INDIVIDUAL: ECUACIONES ALOMÉTRICAS Y TABLAS DE ANOVA

1.1 ECUACIONES DE BIOMASA INDIVIDUAL DE PINO PONDEROSA Y CIPRÉS

Tabla 1.1-1. Ecuaciones alométricas para la estimación de biomasa de árboles, pastos y arbustos [$y=f(x)$]. En los árboles las variables explicativas x , son el diámetro al pecho (DAP, cm) o el volumen (VOL, m^3). El rango diamétrico constituye el intervalo de aplicación de las ecuaciones, N es el tamaño muestral, y R^2 el coeficiente de determinación. En el pasto (coirón blanco) la variable explicativa x es el diámetro basal (DB), y en el neneo y el abrojo, es el promedio de los diámetros mayor y menor de la proyección de su canopeo (DP). (Las ecuaciones alométricas de árboles fueron publicadas en Laclau 2003b). Las pendientes de las regresiones resultaron altamente significativas ($p < 0,001$) en todos los casos.

ESTIMADOR (Y)	VAR. EXPL(X)	RANGO DIAM	FUNCION DE REGRESION	N	R ²
ARBOLES					
Ciprés de la cordillera					
Biomasa total	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 2,090 + 2,524 \log x (cm)$	35	0,97
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 5,7829 + 0,870 \log x (cm)$	35	0,99
Biomasa aérea total	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 2,3950 + 2,154 \log x (cm)$	35	0,97
	VOL	2.5-35	$\log y(g) = 5,7543 + 20,897 \log x (cm)$	35	0,98
Biomasa subterránea total	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,9245 + 1,772 \log x (cm)$	35	0,96
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 4,6809 + 0,732 \log x (m^3)$	35	0,96
Biomasa de fuste	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,9061 + 2,451 \log x (cm)$	35	0,99
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 5,7242 + 1,017 \log x (m^3)$	35	0,99
Biomasa de ramas	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,7541 + 2,014 \log x (cm)$	35	0,90
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 4,8895 + 0,834 \log x (m^3)$	35	0,90
Biomasa de follaje	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 2,0615 + 1,375 \log x (cm)$	35	0,71
	VOL	2.5-35	$\log y(g) = 4,1992 + 0,567 \log x (m^3)$	35	0,71
Biomasa de raigón	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,4147 + 1,911 \log x (cm)$	35	0,96
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 4,3880 + 0,790 \log x(m^3)$	35	0,96
Biomasa de raíces lat	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,6953 + 1,730 \log x (cm)$	35	0,93
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 4,3854 + 0,714 \log x(m^3)$	35	0,93
Pino ponderosa					
Biomasa total	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,836 + 2,640 \log x (cm)$	29	0,97
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 5,774 + 0,853 \log x (cm)$	29	0,98
Biomasa aérea total	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,8362 + 2,640 \log x (cm)$	29	0,95
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 5,6621 + 0,846 \log x (m^3)$	30	0,98
Biomasa subterránea total	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,9424 + 1,774 \log x (cm)$	60	0,84
	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 4,8767 + 0,780 \log x (m^3)$	60	0,82
Fuste	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,9688 + 2,192 \log x (cm)$	60	0,99

ESTIMADOR (Y)	VAR. EXPL(X)	RANGO DIAM	FUNCION DE REGRESION	N	R ²
Ramas	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 5,6304 + 0,989 \log x (m^3)$	34	0,99
	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,7765 + 1,11 \log x (cm)$	30	0,90
Follaje	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 4,8728 + 0,845 \log x (m^3)$	30	0,93
	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 2,6827 + 1,002 \log x (cm)$	34	0,66
Raigón	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 4,3737 + 0,455 \log x (m^3)$	34	0,66
	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,8059 + 1,759 \log x (cm)$	60	0,84
Raíces Laterales	VOL	2.5-35	$\log y (g) = 4,7154 + 0,773 \log x (m^3)$	60	0,81
	DAP	2.5-35	$\log y (g) = 1,3985 + 1,752 \log x (cm)$	60	0,75
<u>PASTOS Y ARBUSTOS</u>					
Coirón blanco					
Biomasa total	DB	2.5-28	$\log y (g) = 0,1316 + 1,777 \log x (cm)$	37	0,78
Biomasa aérea	DB	2.5-28	$\log y (g) = -0,0306 + 1,839 \log x (cm)$	37	0,78
Biomasa frac. verde	DB	2.5-28	$\log y (g) = -0,0491 + 1,212 \log x (cm)$	37	0,45
Biomasa frac. amarilla	DB	2.5-28	$\log y (g) = -0,4773 + 1,520 \log x (cm)$	37	0,59
Biomasa frac. seca	DB	2.5-28	$\log y (g) = -0,7293 + 2,239 \log x (cm)$	37	0,78
Biomasa raíces	DB	2.5-28	$\log y (g) = -0,3644 + 1,546 \log x (cm)$	37	0,75
Neneo					
Biomasa total	DP	10-125	$\log y (g) = -1,8074 + 2,01 \log x (cm)$	29	0,92
Biomasa aérea	DP	10-125	$\log y (g) = -2,4104 + 2,716 \log x (cm)$	29	0,94
Biomasa frac. Verde	DP	10-125	$\log y (g) = -2,1614 + 2,258 \log x (cm)$	28	0,82
Biomasa frac. seca	DP	10-125	$\log y (g) = -2,9861 + 2,945 \log x (cm)$	29	0,91
Biomasa raíces	DP	10-125	$\log y (g) = -1,6512 + 2,154 \log x (cm)$	29	0,79
Abrojo					
Biomasa total	DP	14-49	$\log y (g) = -0,5197 + 1,891 \log x (cm)$	22	0,85
Biomasa aérea	DP	14-49	$\log y (g) = -0,8202 + 2,042 \log x (cm)$	22	0,83
Biomasa frac. Verde	DP	14-49	$\log y (g) = -1,2336 + 2,068 \log x (cm)$	22	0,58
Biomasa frac. Seca	DP	14-49	$\log y (g) = -0,8997 + 1,866 \log x (cm)$	22	0,58
Biomasa raíces	DP	14-49	$\log y (g) = -0,7714 + 1,496 \log x (cm)$	22	0,58

1.2 MODELOS DE REGRESIÓN, ANÁLISIS DE VARIANZA, LÍMITES DE CONFIANZA Y CONTRASTE ENTRE REGRESIONES DE PINO Y CIPRÉS

1.2.1 Ecuaciones diámetro/ biomasa individual

Ciprés de la cordillera y pino ponderosa: dap/biomasa individual

ANÁLISIS DE REGRESION LINEAL

CIPRES

cipres FUSTE EN FUNCION DE log dap

ESTADÍSTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.9061
Coefficiente de regresion b	2.451
Coefficiente de correlacion	0.99484
Coefficiente de determinación r^2	0.9897
Error standard	0.16
Observaciones (N)	35

ANÁLISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	29.19	29.1944	3171.6	0.0000
Residuos	33	0.30	0.0092		
Total	34	29.50			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	56.32	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.044			
Intervalo		0.089	0.119	0.157
Lím. Inferior, LC1		2.363	2.332	2.294
Lím. Superior, LC2		2.540	2.570	2.609
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		2.006	2.040	2.083
Lím. Superior, LC2		1.807	1.773	1.730

ANÁLISIS DE REGRESION LINEAL

PINO

log ps FUSTE EN FUNCION DE log dap

ESTADÍSTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.9688
Coefficiente de regresion b	2.192
Coefficiente de correlacion	0.98905
Coefficiente de determinación r^2	0.97822
Error standard	0.0768
Observaciones (N)	60

ANÁLISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	20.41	20.4054	2605.3	0.0000
Residuos	58	0.5	0.0078		
Total	59	20.86			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	51.04	2.00	2.66	3.47
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.043			
Intervalo		0.086	0.114	0.149
Lím. Inferior, LC ₁		2.107	2.078	2.044
Lím. Superior, LC ₂		2.278	2.307	2.341
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		2.061	2.091	2.128
Lím. Superior, LC ₂		1.877	1.846	1.810

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: FUSTE CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES (Ho= $b_1-b_2=0$; Ho= $a_1-a_2=0$)

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b: estadístico t	0.051	1.99	2.63	3.40
b es significativo al	NS			
ordenada a: estadístico t	10.339			
a es significativo al	99,9% ***			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

CIPRES

cipres RAMAS EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.7541
Coefficiente de regresion b	2.014
Coefficiente de correlacion	0.949
Coefficiente de determinación r^2	0.900
Error standard	0.14
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	19.70	19.7031	297.0	0.0000
Residuos	33	2.19	0.0663		
Total	34	21.89			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	17.23	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.117			
Intervalo		0.238	0.319	0.422
Lím. Inferior, LC1		1.776	1.694	1.592
Lím. Superior, LC2		2.252	2.333	2.436
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		2.021	2.113	2.228
Lím. Superior, LC2		1.487	1.396	1.280

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

PINO

log ps RAMAS EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.7765
Coefficiente de regresion b	1.811
Coefficiente de correlacion	0.94696
Coefficiente de determinación r^2	0.89674
Error standard	0.1016
Observaciones (N)	30

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	8.05	8.04613	243.2	0.0000
Residuos	28	0.9	0.0331		
Total	29	8.97			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	15.59	2.05	2.76	3.67
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.116			
Intervalo		0.238	0.321	0.427
Lím. Inferior, LC ₁		1.574	1.490	1.385
Lím. Superior, LC ₂		2.049	2.132	2.238
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		1.992	2.067	2.163
Lím. Superior, LC ₂		1.561	1.485	1.390

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: RAMAS CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES (Ho= $b_1 - b_2 = 0$; Ho= $a_1 - a_2 = 0$)

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b: estadístico t	0.050	2.00	2.66	3.46
b es significativo al				NS
ordenada a: estadístico t	2.945			
a es significativo al				99% **

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

CIPRES

cipres HOJAS EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	2.0615
Coefficiente de regresion b	1.375
Coefficiente de correlacion	0.841
Coefficiente de determinación r^2	0.708
Error standard	0.10
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	9.18	9.17811	80.0	0.0000
Residuos	33	3.79	0.1148		
Total	34	12.97			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	8.94	2.03	2.73	3.61
b es significativo al				99,9% ***
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.154			
Intervalo		0.313	0.420	0.555
Lím. Inferior, LC1		1.062	0.954	0.819
Lím. Superior, LC2		1.687	1.795	1.930
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		2.413	2.533	2.685
Lím. Superior, LC2		1.710	1.590	1.438

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

PINO

log ps HOJAS EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	2.6827
Coefficiente de regresion b	1.002
Coefficiente de correlacion	0.80999
Coefficiente de determinación r^2	0.65609
Error standard	0.0686
Observaciones (N)	34

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	3.46	3.46071	61.0	0.0000
Residuos	32	1.8	0.0567		
Total	33	5.27			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	7.81	2.04	2.74	3.62
b es significativo al				99,9% ***
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.128			
Intervalo		0.261	0.351	0.465
Lím. Inferior, LC ₁		0.741	0.651	0.538
Lím. Superior, LC ₂		1.263	1.353	1.467
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		2.936	3.023	3.132
Lím. Superior, LC ₂		2.430	2.343	2.233

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: HOJAS CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES (Ho= $b_1 - b_2 = 0$; Ho= $a_1 - a_2 = 0$)

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b: estadístico t	0.096	2.00	2.65	3.45
b es significativo al				NS
ordenada a: estadístico t	-3.193			
a es significativo al				99%

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

CIPRES

cipres RAIGON EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.4147
Coefficiente de regresion b	1.911
Coefficiente de correlacion	0.98213
Coefficiente de determinación r^2	0.96457
Error standard	0.12
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	17.75	17.7482	898.4	0.0000
Residuos	33	0.65	0.0198		
Total	34	18.40			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	29.97	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.064			
Intervalo		0.130	0.174	0.230
Lím. Inferior, LC1		1.782	1.737	1.681
Lím. Superior, LC2		2.041	2.086	2.142
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		1.560	1.610	1.673
Lím. Superior, LC2		1.269	1.219	1.156

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

PINO

log ps RAIGON EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.8059
Coefficiente de regresion b	1.759
Coefficiente de correlacion	0.91504
Coefficiente de determinación r^2	0.8373
Error standard	0.0666
Observaciones (N)	60

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	13.16	13.1575	298.5	0.0000
Residuos	58	2.6	0.0441		
Total	59	15.71			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	17.28	2.00	2.66	3.47
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.102			
Intervalo		0.204	0.271	0.353
Lím. Inferior, LC ₁		1.556	1.488	1.406
Lím. Superior, LC ₂		1.963	2.031	2.112
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		2.024	2.096	2.183
Lím. Superior, LC ₂		1.588	1.516	1.429

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: RAIGON CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES (Ho= $b_1 - b_2 = 0$; Ho= $a_1 - a_2 = 0$)

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b: estadístico t	0.030	1.99	2.63	3.40
b es significativo al	NS			
ordenada a: estadístico t	-5.567			
a es significativo al	99,9%			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL
CIPRES

cipres RAICES GRUESAS EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.6953
Coefficiente de regresion b	1.730
Coefficiente de correlacion	0.96421
Coefficiente de determinación r^2	0.92971
Error standard	0.11
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	14.53	14.5342	436.5	0.0000
Residuos	33	1.10	0.0333		
Total	34	15.63			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	20.89	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.083			
Intervalo		0.168	0.226	0.299
Lím. Inferior, LC1		1.561	1.503	1.431
Lím. Superior, LC2		1.898	1.956	2.029
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		1.884	1.949	2.031
Lím. Superior, LC2		1.506	1.441	1.360

ANALISIS DE REGRESION LINEAL
PINO

log ps RAICES GRUESAS EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.3985
Coefficiente de regresion b	1.752
Coefficiente de correlacion	0.86582
Coefficiente de determinación r^2	0.74964
Error standard	0.0701
Observaciones (N)	60

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	13.05	13.0452	173.7	0.0000
Residuos	58	4.4	0.0751		
Total	59	17.40			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	13.18	2.00	2.66	3.47
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.133			
Intervalo		0.266	0.354	0.461
Lím. Inferior, LC ₁		1.486	1.398	1.291
Lím. Superior, LC ₂		2.018	2.106	2.213
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		1.683	1.777	1.891
Lím. Superior, LC ₂		1.114	1.020	0.906

ANALISIS DE REGRESION LINEAL:RAICES GR. CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES (Ho= $b_1 - b_2 = 0$; Ho= $a_1 - a_2 = 0$)

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b: estadístico t	-0.004	1.99	2.63	3.40
b es significativo al	NS			
ordenada a: estadístico t	5.216			
a es significativo al	99,9% ***			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

CIPRES

cipres BIOMASA AEREA EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	2.3950
Coefficiente de regresion b	2.154
Coefficiente de correlacion	0.98531
Coefficiente de determinación r^2	0.97084
Error standard	0.14
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	22.55	22.5502	1098.6	0.0000
Residuos	33	0.68	0.0205		
Total	34	23.23			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	33.15	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.065			
Intervalo		0.132	0.178	0.235
Lím. Inferior, LC1		2.022	1.977	1.920
Lím. Superior, LC2		2.287	2.332	2.389
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		2.543	2.594	2.659
Lím. Superior, LC2		2.247	2.196	2.132

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

PINO

log ps BIOMASA AEREA EN FUNCION DE log dap

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	2.5544
Coefficiente de regresion b	1.823
Coefficiente de correlacion	0.97786
Coefficiente de determinación r^2	0.95622
Error standard	0.0957
Observaciones (N)	31

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	8.15	8.1528	633.4	0.0000
Residuos	29	0.4	0.0129		
Total	30	8.53			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	25.17	2.05	2.76	3.66
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.072			
Intervalo		0.148	0.200	0.265
Lím. Inferior, LC ₁		1.675	1.624	1.558
Lím. Superior, LC ₂		1.972	2.023	2.089
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		2.689	2.736	2.795
Lím. Superior, LC ₂		2.420	2.373	2.314

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: B.AEREA CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES (Ho= $b_1 - b_2 = 0$; Ho= $a_1 - a_2 = 0$)

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b: estadístico t	0.080	2.00	2.66	3.45
b es significativo al	NS			
ordenada a: estadístico t	4.516			
a es significativo al	99,9% ***			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

CIPRES

cipres BIOMASA SUBTERRANEA EN FUNCION DE log vol

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.9245
Coefficiente de regresion b	1.772
Coefficiente de correlacion	0.97982
Coefficiente de determinación r^2	0.96004
Error standard	0.12
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	15.25	15.249	792.9	0.0000
Residuos	33	0.63	0.0192		
Total	34	15.88			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	28.16	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.063			
Intervalo		0.128	0.172	0.227
Lím. Inferior, LC1		1.644	1.600	1.545
Lím. Superior, LC2		1.900	1.944	1.999
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		2.068	2.118	2.179
Lím. Superior, LC2		1.781	1.731	1.669

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

PINO

log ps BIOMASA SUBTERRANEA EN FUNCION DE log vol

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	1.9424
Coefficiente de regresion b	1.774
Coefficiente de correlacion	0.91601
Coefficiente de determinación r^2	0.83907
Error standard	0.0671
Observaciones (N)	60

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	13.38	13.3783	302.4	0.0000
Residuos	58	2.6	0.0442		
Total	59	15.94			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	17.39	2.00	2.66	3.47
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.102			
Intervalo		0.204	0.272	0.354
Lím. Inferior, LC ₁		1.570	1.502	1.420
Lím. Superior, LC ₂		1.978	2.046	2.128
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		2.161	2.233	2.320
Lím. Superior, LC ₂		1.724	1.652	1.564

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: BIOM.SUBT. CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES (Ho= $b_1 - b_2 = 0$; Ho= $a_1 - a_2 = 0$)

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b: estadístico t	0.000	1.99	2.63	3.40
b es significativo al	NS			
ordenada a: estadístico t	-0.512			
a es significativo al	NS			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL
CIPRES

cipres BIOMASA TOTAL EN FUNCION DE log vol

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	2.5243
Coefficiente de regresion b	2.090
Coefficiente de correlacion	0.98624
Coefficiente de determinación r^2	0.97267
Error standard	0.14
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	21.23	21.228	1174.4	0.0000
Residuos	33	0.60	0.0181		
Total	34	21.82			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	34.27	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.061			
Intervalo		0.124	0.167	0.220
Lím. Inferior, LC1		1.966	1.924	1.870
Lím. Superior, LC2		2.214	2.257	2.311

ordenada al origen a

Lím inferior, LC1		2.664	2.711	2.771
Lím. Superior, LC2		2.385	2.337	2.277

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

PINO

log ps BIOMASA TOTAL EN FUNCION DE log vol

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	2.6401
Coefficiente de regresion b	1.836
Coefficiente de correlacion	0.9757
Coefficiente de determinación r^2	0.952
Error standard	0.0978
Observaciones (N)	29

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	7.39	7.39404	535.5	0.0000
Residuos	27	0.4	0.0138		
Total	28	7.77			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	23.14	2.05	2.77	3.69
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.079			
Intervalo		0.163	0.220	0.293
Lím. Inferior, LC ₁		1.673	1.616	1.543
Lím. Superior, LC ₂		1.999	2.056	2.129

ordenada al origen a

Lím inferior, LC ₁		2.785	2.836	2.900
Lím. Superior, LC ₂		2.495	2.445	2.380

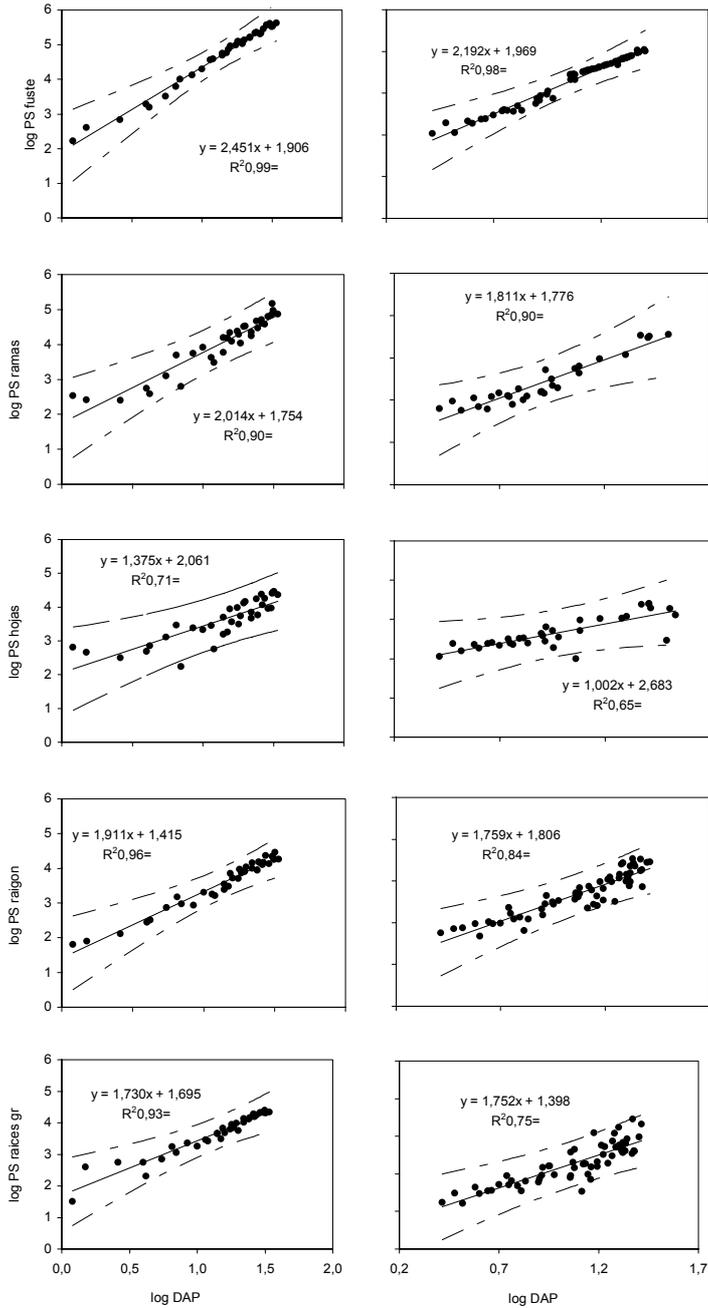
ANALISIS DE REGRESION LINEAL:BIOM.TOTAL CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES (Ho= $b_1 - b_2 = 0$; Ho= $a_1 - a_2 = 0$)

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b: estadístico t	0.061	2.00	2.66	3.46
b es significativo al	NS			
ordenada a: estadístico t	3.630			
a es significativo al	99,9% ***			

REGRESIONES Y LIMITES DE CONFIANZA

CIPRES DE LA CORDILLERA

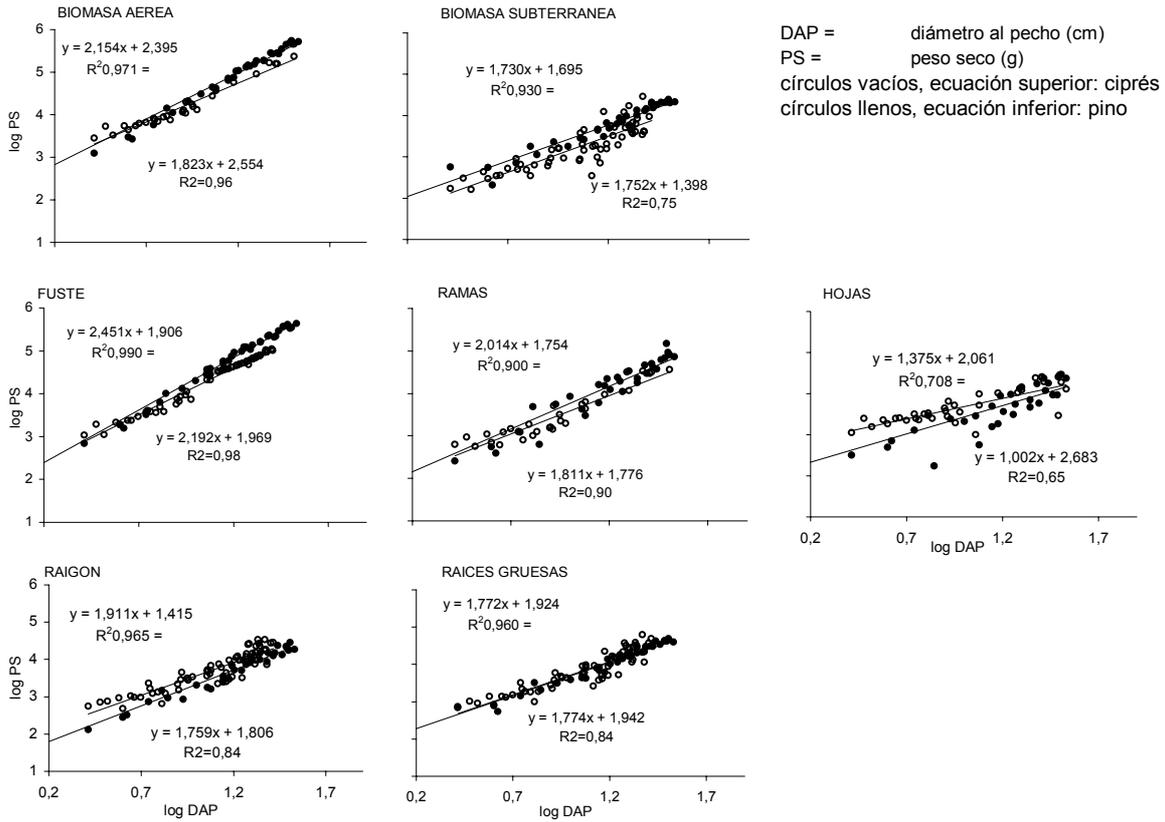
PINO PONDEROSA



DAP= diámetro a la altura del pecho (cm)

PS= peso seco

CONTRASTE ENTRE REGRESIONES DE CIPRÉS Y PINO



Neneo, abrojo (diámetro de canopeo/biomasa individual) y coirón blanco (diámetro basal/biomasa individual).

ANALISIS DE REGRESION LINEAL

ABROJO

log BIOM.TOTAL EN FUNCION DE log diam

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	-0.5197
Coefficiente de regresion b	1.891
Coefficiente de correlacion	0.92057
Coefficiente de determinación r^2	0.84744
Error standard	0.07
Observaciones (N)	22

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	2.10	2.09613	111.1	0.0000
Residuos	20	0.38	0.0189		
Total	21	2.47			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t		10.54	2.09	2.85
b es significativo al		99,9% ***		
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
<u>pendiente b</u>				
S_b		0.179		
Intervalo		0.374	0.511	0.691
Lím. Inferior, LC1		1.517	1.381	1.201
Lím. Superior, LC2		2.266	2.402	2.582
<u>ordenada al origen a</u>				
Lím inferior, LC1		0.019	0.215	0.474
Lím. Superior, LC2		-1.058	-1.254	-1.514

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**ABROJO****log BIOM.AEREA EN FUNCION DE log diam****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.8202
Coefficiente de regresion b	2.042
Coefficiente de correlacion	0.90888
Coefficiente de determinación r^2	0.82607
Error standard	0.0800
Observaciones (N)	22

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	2.44	2.44281	95.0	0.0000
Residuos	20	0.5	0.0257		
Total	21	2.96			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	9.75	2.09	2.85	3.85
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b **pendiente b**

S_b	0.209			
Intervalo		0.437	0.596	0.806
Lím. Inferior, LC_1		1.605	1.446	1.235
Lím. Superior, LC_2		2.479	2.638	2.848
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		-0.191	0.038	0.340
Lím. Superior, LC_2		-1.449	-1.678	-1.981

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**ABROJO****log B.FRACCION SECA EN FUNCION DE log diam****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.8997
Coefficiente de regresion b	1.866
Coefficiente de correlacion	0.76229
Coefficiente de determinación r^2	0.58109
Error standard	0.0872
Observaciones (N)	22

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	2.04	2.04031	27.7	0.0000
Residuos	20	1.5	0.0735		
Total	21	3.51			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	5.27	2.09	2.85	3.85
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b **pendiente b**

S_b	0.354			
Intervalo		0.739	1.008	1.364
Lím. Inferior, LC_1		1.127	0.858	0.502
Lím. Superior, LC_2		2.605	2.874	3.230
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		0.164	0.551	1.063
Lím. Superior, LC_2		-1.963	-2.350	-2.862

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**ABROJO****log B.FRACCION VERDE EN FUNCION DE log diam****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-1.2336
Coefficiente de regresion b	2.069
Coefficiente de correlacion	0.75998
Coefficiente de determinación r^2	0.57758
Error standard	0.10
Observaciones (N)	22

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	2.51	2.50754	27.3	0.0000
Residuos	20	1.83	0.0917		
Total	21	4.34			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	5.23	2.09	2.85	3.85
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.396			
Intervalo		0.825	1.126	1.523
Lím. Inferior, LC1		1.243	0.943	0.546
Lím. Superior, LC2		2.894	3.194	3.591
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		-0.046	0.386	0.958
Lím. Superior, LC2		-2.421	-2.853	-3.425

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**ABROJO****log BIOM.RAIZ EN FUNCION DE log diam****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.7714
Coefficiente de regresion b	1.496
Coefficiente de correlacion	0.76394
Coefficiente de determinación r^2	0.5836
Error standard	0.0698
Observaciones (N)	22

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	1.31	1.31199	28.0	0.0000
Residuos	20	0.9	0.0468		
Total	21	2.25			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	5.29	2.09	2.85	3.85
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.283			
Intervalo		0.590	0.804	1.088
Lím. Inferior, LC ₁		0.907	0.692	0.408
Lím. Superior, LC ₂		2.086	2.300	2.584
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		0.077	0.386	0.794
Lím. Superior, LC ₂		-1.620	-1.929	-2.337

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**NENEO****log ps total EN FUNCION DE log diam****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen <i>a</i>	-1.8074
Coefficiente de regresion <i>b</i>	2.501
Coefficiente de correlacion	0.95876
Coefficiente de determinación r^2	0.91923
Error standard	0.13
Observaciones (N)	29

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	11.76	11.7583	307.3	0.0000
Residuos	27	1.03	0.0383		
Total	28	12.79			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE <i>b</i> (prueba t)				
Estadístico t	17.53	2.05	2.77	3.69
<i>b</i> es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE <i>a</i> y <i>b</i>				
pendiente <i>b</i>				
S_b	0.143			
Intervalo		0.293	0.395	0.526
Lím. Inferior, LC1		2.209	2.106	1.975
Lím. Superior, LC2		2.794	2.897	3.028
ordenada al origen <i>a</i>				
Lím inferior, LC1		-1.303	-1.126	-0.901
Lím. Superior, LC2		-2.312	-2.488	-2.714

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**NENEO****log ps biom aerea EN FUNCION DE log diametro****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen <i>a</i>	-2.4104
Coefficiente de regresion <i>b</i>	2.716
Coefficiente de correlacion	0.96873
Coefficiente de determinación r^2	0.93843
Error standard	0.1349
Observaciones (N)	29

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	13.86	13.8635	411.5	0.0000
Residuos	27	0.9	0.0337		
Total	28	14.77			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE <i>b</i> (prueba t)				
Estadístico t	20.29	2.05	2.77	3.69
<i>b</i> es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE <i>a</i> y <i>b</i>				
pendiente <i>b</i>				
S_b	0.134			
Intervalo		0.275	0.371	0.494
Lím. Inferior, LC ₁		2.441	2.345	2.222
Lím. Superior, LC ₂		2.991	3.087	3.210
ordenada al origen <i>a</i>				
Lím inferior, LC ₁		-1.937	-1.772	-1.560
Lím. Superior, LC ₂		-2.884	-3.049	-3.261

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**NENEO****log BIOM.RAIZ EN FUNCION DE log diam****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-1.6512
Coefficiente de regresion b	2.154
Coefficiente de correlacion	0.88758
Coefficiente de determinación r^2	0.78781
Error standard	0.1168
Observaciones (N)	29

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	8.72	8.72212	100.2	0.0000
Residuos	27	2.3	0.0870		
Total	28	11.07			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	10.01	2.05	2.77	3.69
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.215			
Intervalo		0.442	0.596	0.794
Lím. Inferior, LC_1		1.713	1.558	1.361
Lím. Superior, LC_2		2.596	2.751	2.948
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		-0.891	-0.624	-0.284
Lím. Superior, LC_2		-2.412	-2.678	-3.018

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**NENEO****log B.RAMAS/FR.SECA EN FUNCION DE log diam****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-2.9861
Coefficiente de regresion b	2.945
Coefficiente de correlacion	0.95671
Coefficiente de determinación r^2	0.9153
Error standard	0.1481
Observaciones (N)	29

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	16.29	16.2928	291.8	0.0000
Residuos	27	1.5	0.0558		
Total	28	17.80			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	17.08	2.05	2.77	3.69
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.172			
Intervalo		0.354	0.478	0.636
Lím. Inferior, LC_1		2.591	2.467	2.309
Lím. Superior, LC_2		3.298	3.422	3.581
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		-2.377	-2.164	-1.891
Lím. Superior, LC_2		-3.595	-3.809	-4.081

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**COIRON BLANCO****log ps total EN FUNCION DE log diametro****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.1316
Coefficiente de regresion b	1.777
Coefficiente de correlacion	0.886158608
Coefficiente de determinación r^2	0.785277079
Error standard	0.08
Observaciones (N)	37

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	6.11	6.1068	128.0	0.0000
Residuos	35	1.67	0.0477		
Total	36	7.78			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	11.31	2.03	2.72	3.59
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.157			
Intervalo		0.319	0.428	0.564
Lím. Inferior, LC1		1.458	1.349	1.213
Lím. Superior, LC2		2.096	2.205	2.341
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		0.493	0.616	0.770
Lím. Superior, LC2		-0.229	-0.353	-0.507

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**COIRON BLANCO****log ps biom aerea EN FUNCION DE log diametro****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.0306
Coefficiente de regresion b	1.839
Coefficiente de correlacion	0.878094545
Coefficiente de determinación r^2	0.77105003
Error standard	0.0798
Observaciones (N)	37

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	6.54	6.5434	117.9	0.0000
Residuos	35	1.9	0.0555		
Total	36	8.49			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	10.86	2.03	2.72	3.59
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.169			
Intervalo		0.344	0.461	0.608
Lím. Inferior, LC ₁		1.495	1.378	1.231
Lím. Superior, LC ₂		2.183	2.301	2.448
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		0.359	0.492	0.658
Lím. Superior, LC ₂		-0.420	-0.553	-0.719

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**COIRON BLANCO****log ps fr.amarilla EN FUNCION DE log diametro****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.4773
Coefficiente de regresion b	1.520
Coefficiente de correlacion	0.76841
Coefficiente de determinación r^2	0.59046
Error standard	0.08
Observaciones (N)	37

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	4.47	4.46597	50.5	0.0000
Residuos	35	3.10	0.0885		
Total	36	7.56			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	7.10	2.03	2.72	3.59
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
<u>pendiente b</u>				
S_b	0.214			
Intervalo		0.434	0.583	0.768
Lím. Inferior, LC1		1.085	0.937	0.751
Lím. Superior, LC2		1.954	2.102	2.288
<u>ordenada al origen a</u>				
Lím inferior, LC1		0.014	0.182	0.392
Lím. Superior, LC2		-0.969	-1.137	-1.347

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINOS****log BIOM FUSTE EN FUNCION DE log DR****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.9608
Coefficiente de regresion b	1.070
Coefficiente de correlacion	0.96762
Coefficiente de determinación r^2	0.93629
Error standard	0.06
Observaciones (N)	52

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	10.01	10.0123	734.8	0.0000
Residuos	50	0.68	0.0136		
Total	51	10.69			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	27.11	2.01	2.68	3.50
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
<u>pendiente b</u>				
S_b	0.039			
Intervalo		0.079	0.106	0.138
Lím. Inferior, LC1		0.991	0.964	0.932
Lím. Superior, LC2		1.149	1.176	1.208
<u>ordenada al origen a</u>				
Lím inferior, LC1		1.017	1.036	1.059
Lím. Superior, LC2		0.904	0.885	0.862

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**COIRON BLANCO****log B.FRACCION SECA EN FUNCION DE log diametro****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.7294
Coefficiente de regresion b	2.239
Coefficiente de correlacion	0.8837
Coefficiente de determinación r^2	0.78092
Error standard	0.0965
Observaciones (N)	37

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	9.69	9.69426	124.8	0.0000
Residuos	35	2.7	0.0777		
Total	36	12.41			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	11.17	2.03	2.72	3.59
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.200			
Intervalo		0.407	0.546	0.720
Lím. Inferior, LC_1		1.832	1.693	1.519
Lím. Superior, LC_2		2.646	2.785	2.959
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		-0.269	-0.111	0.085
Lím. Superior, LC_2		-1.190	-1.347	-1.544

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**COIRON BLANCO****log ps frac.verde EN FUNCION DE log diametro****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.0491
Coefficiente de regresion b	1.212
Coefficiente de correlacion	0.67178
Coefficiente de determinación r^2	0.45128
Error standard	0.07
Observaciones (N)	37

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	2.84	2.83931	28.8	0.0000
Residuos	35	3.45	0.0986		
Total	36	6.29			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	5.37	2.03	2.72	3.59
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.226			
Intervalo		0.458	0.615	0.811
Lím. Inferior, LC_1		0.753	0.597	0.401
Lím. Superior, LC_2		1.670	1.827	2.023
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		0.470	0.647	0.869
Lím. Superior, LC_2		-0.568	-0.745	-0.967

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**COIRON BLANCO****log raices EN FUNCION DE log diametro****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.3644
Coefficiente de regresion b	1.546
Coefficiente de correlacion	0.86466
Coefficiente de determinación r^2	0.74763
Error standard	0.0681
Observaciones (N)	37

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	4.62	4.62303	103.7	0.0000
Residuos	35	1.6	0.0446		
Total	36	6.18			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	10.18	2.03	2.72	3.59
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.152			
Intervalo		0.308	0.414	0.545
Lím. Inferior, LC_1		1.238	1.133	1.001
Lím. Superior, LC_2		1.854	1.960	2.091
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		-0.015	0.104	0.253
Lím. Superior, LC_2		-0.713	-0.832	-0.982

1.2.2 Ecuaciones volumen de fuste/biomasa individual (árboles)

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log ps FUSTE EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	5.7242
Coefficiente de regresion b	1.017
Coefficiente de correlacion	0.99952
Coefficiente de determinación r^2	0.99905
Error standard	0.16
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	29.47	29.4701	34668.3	0.0000
Residuos	33	0.03	0.0009		
Total	34	29.50			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	186.19	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.005			
Intervalo		0.011	0.015	0.020
Lím. Inferior, LC_1		1.006	1.002	0.997
Lím. Superior, LC_2		1.028	1.032	1.037
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		5.713	5.709	5.704
Lím. Superior, LC_2		5.736	5.740	5.745

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINO****log ps FUSTE EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	5.6304
Coefficiente de regresion b	0.989
Coefficiente de correlacion	0.99965
Coefficiente de determinación r^2	0.9993
Error standard	0.1208
Observaciones (N)	34

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	16.37	16.3665	45977.6	0.0000
Residuos	32	0.0	0.0004		
Total	33	16.38			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	214.42	2.04	2.74	3.62
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.005			
Intervalo		0.009	0.013	0.017
Lím. Inferior, LC_1		0.980	0.976	0.972
Lím. Superior, LC_2		0.998	1.002	1.006
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		5.616	5.610	5.604
Lím. Superior, LC_2		5.645	5.650	5.657

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: FUSTE CIPRES vs PINO**CONTRASTE ENTRE REGRESIONES ($H_0 = b_1 - b_2 = 0$; $H_0 = a_1 - a_2 = 0$)**

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b : estadístico t	0.016	2.00	2.65	3.45
b es significativo al	NS			
ordenada a : estadístico t	7.952			
a es significativo al	99,9% ***			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log ps RAMAS EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.8895
Coefficiente de regresion b	0.834
Coefficiente de correlacion	0.95188
Coefficiente de determinación r^2	0.90607
Error standard	0.14
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	19.84	19.8361	318.336	0.0000
Residuos	33	2.06	0.0623		
Total	34	21.89			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	17.84	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.047			
Intervalo		0.095	0.128	0.169
Lím. Inferior, LC_1		0.739	0.707	0.666
Lím. Superior, LC_2		0.930	0.962	1.003
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		4.790	4.756	4.712
Lím. Superior, LC_2		4.989	5.024	5.067

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINO****log ps RAMAS EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.8728
Coefficiente de regresion b	0.845
Coefficiente de correlacion	0.9656
Coefficiente de determinación r^2	0.93239
Error standard	0.1016
Observaciones (N)	30

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	8.37	8.36599	386.1	0.0000
Residuos	28	0.6	0.0217		
Total	29	8.97			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	19.65	2.05	2.76	3.67
b es significativo al	99,9% ***			

LÍMITES DE CONFIANZA DE a y b **pendiente b**

S_b	0.043			
Intervalo		0.088	0.119	0.158
Lím. Inferior, LC_1		0.757	0.726	0.687
Lím. Superior, LC_2		0.933	0.963	1.003

ordenada al origen a

Lím inferior, LC_1	4.721	4.668	4.601
Lím. Superior, LC_2	5.024	5.077	5.145

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: RAMAS CIPRES vs PINO**CONTRASTE ENTRE REGRESIONES ($H_0 = b_1 - b_2 = 0$; $H_0 = a_1 - a_2 = 0$)**

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

Pendiente b : estadístico t	-0.006	2.00	2.66	3.46
b es significativo al	NS			

ordenada a : estadístico t	0.573			
a es significativo al	NS			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log ps HOJAS EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.1992
Coefficiente de regresion b	0.567
Coefficiente de correlacion	0.84098
Coefficiente de determinación r^2	0.70725
Error standard	0.10
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	9.17	9.17028	79.724	0.0000
Residuos	33	3.80	0.1150		
Total	34	12.97			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	8.93	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			

LÍMITES DE CONFIANZA DE a y b **pendiente b**

S_b	0.064			
Intervalo		0.129	0.174	0.229
Lím. Inferior, LC_1		0.438	0.394	0.338
Lím. Superior, LC_2		0.697	0.741	0.797

ordenada al origen a

Lím inferior, LC_1	4.064	4.017	3.959
Lím. Superior, LC_2	4.335	4.381	4.440

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINO****log ps HOJAS EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.3737
Coefficiente de regresion b	0.455
Coefficiente de correlacion	0.81007
Coefficiente de determinación r^2	0.65621
Error standard	0.0686
Observaciones (N)	34

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	3.46	3.46136	61.1	0.0000
Residuos	32	1.8	0.0567		
Total	33	5.27			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	7.82	2.04	2.74	3.62
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA**pendiente b**

S_b	0.058			
Intervalo		0.119	0.159	0.211
Lím. Inferior, LC_1		0.336	0.295	0.244
Lím. Superior, LC_2		0.573	0.614	0.666

ordenada al origen a

Lím inferior, LC_1		4.186	4.121	4.040
Lím. Superior, LC_2		4.562	4.626	4.708

**ANALISIS DE REGRESION LINEAL: HOJAS CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES ($H_0 = b_1 - b_2 = 0$; $H_0 = a_1 - a_2 = 0$)**

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

Pendiente b : estadístico t	0.066	2.00	2.65	3.45
b es significativo al	NS			

ordenada a : estadístico t	-4.385			
a es significativo al	99,9%			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log ps raigon EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.3880
Coefficiente de regresion b	0.790
Coefficiente de correlacion	0.98251
Coefficiente de determinación r^2	0.96532
Error standard	0.12
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	17.76	17.762	918.577	0.0000
Residuos	33	0.64	0.0193		
Total	34	18.40			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	30.31	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b **pendiente b**

S_b	0.026			
Intervalo		0.053	0.071	0.094
Lím. Inferior, LC_1		0.737	0.718	0.696
Lím. Superior, LC_2		0.843	0.861	0.884

ordenada al origen a

Lím inferior, LC_1		4.332	4.313	4.289
Lím. Superior, LC_2		4.444	4.463	4.487

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINO****log ps raigon EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.7154
Coefficiente de regresion b	0.773
Coefficiente de correlacion	0.90275
Coefficiente de determinación r^2	0.81496
Error standard	0.0666
Observaciones (N)	60

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	12.81	12.8064	255.4	0.0000
Residuos	58	2.9	0.0501		
Total	59	15.71			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	15.98	2.00	2.66	3.47
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.048			
Intervalo		0.097	0.129	0.168
Lím. Inferior, LC_1		0.676	0.644	0.605
Lím. Superior, LC_2		0.870	0.902	0.941
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		4.587	4.544	4.492
Lím. Superior, LC_2		4.844	4.887	4.938

**ANALISIS DE REGRESION LINEAL: RAIGON CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES ($H_0 = b_1 - b_2 = 0$; $H_0 = a_1 - a_2 = 0$)**

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b : estadístico t	0.008	1.99	2.63	3.40
b es significativo al	NS			
ordenada a : estadístico t	-8.130			
a es significativo al	99,9%			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log ps RAICES GR. EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.3854
Coefficiente de regresion b	0.714
Coefficiente de correlacion	0.9638
Coefficiente de determinación r^2	0.92891
Error standard	0.11
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	14.52	14.5216	431.169	0.0000
Residuos	33	1.11	0.0337		
Total	34	15.63			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	20.76	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.034			
Intervalo		0.070	0.094	0.124
Lím. Inferior, LC_1		0.644	0.620	0.590
Lím. Superior, LC_2		0.784	0.808	0.838
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		4.312	4.287	4.255
Lím. Superior, LC_2		4.459	4.484	4.516

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINO****log ps RAICES GR. EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.2940
Coefficiente de regresion b	0.769
Coefficiente de correlacion	0.85293
Coefficiente de determinación r^2	0.72749
Error standard	0.0701
Observaciones (N)	60

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	12.66	12.6599	154.8	0.0000
Residuos	58	4.7	0.0818		
Total	59	17.40			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	12.44	2.00	2.66	3.47
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.062			
Intervalo		0.124	0.164	0.214
Lím. Inferior, LC_1		0.645	0.604	0.554
Lím. Superior, LC_2		0.892	0.933	0.983
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		4.130	4.075	4.009
Lím. Superior, LC_2		4.458	4.513	4.579

**ANALISIS DE REGRESION LINEAL: RAICES GR. CIPRES vs PINO
CONTRASTE ENTRE REGRESIONES ($H_0 = b_1 - b_2 = 0$; $H_0 = a_1 - a_2 = 0$)**

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b : estadístico t	-0.025	1.99	2.63	3.40
b es significativo al	NS			
ordenada a : estadístico t	2.859			
a es significativo al	99% **			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log ps BIOM.AEREA EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	5.7543
Coefficiente de regresion b	0.897
Coefficiente de correlacion	0.99385
Coefficiente de determinación r^2	0.98773
Error standard	0.14
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	22.94	22.9427	2657.357	0.0000
Residuos	33	0.28	0.0086		
Total	34	23.23			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	51.55	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.017			
Intervalo		0.035	0.048	0.063
Lím. Inferior, LC_1		0.862	0.850	0.835
Lím. Superior, LC_2		0.933	0.945	0.960
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		5.717	5.704	5.688
Lím. Superior, LC_2		5.791	5.804	5.820

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINO****log ps BIOM. AEREA EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	5.6621
Coefficiente de regresion b	0.846
Coefficiente de correlacion	0.99316
Coefficiente de determinación r^2	0.98637
Error standard	0.0989
Observaciones (N)	30

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	8.40	8.40062	2026.8	0.0000
Residuos	28	0.1	0.0041		
Total	29	8.52			

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	45.02	2.05	2.76	3.67
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.019			
Intervalo		0.039	0.052	0.069
Lím. Inferior, LC_1		0.808	0.794	0.777
Lím. Superior, LC_2		0.885	0.898	0.916
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		5.596	5.573	5.543
Lím. Superior, LC_2		5.728	5.752	5.781

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: B.AEREA CIPRES vs PINO**CONTRASTE ENTRE REGRESIONES ($H_0 = b_1 - b_2 = 0$; $H_0 = a_1 - a_2 = 0$)**

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b : estadístico t	0.028	2.00	2.66	3.46
b es significativo al	NS			
ordenada a : estadístico t	0.642			
a es significativo al	NS			

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log ps BIOM. SUBT. EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.6809
Coefficiente de regresion b	0.732
Coefficiente de correlacion	0.98061
Coefficiente de determinación r^2	0.96159
Error standard	0.12
Observaciones (N)	35

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	15.27	15.2737	826.233	0.0000
Residuos	33	0.61	0.0185		
Total	34	15.88			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	28.74	2.03	2.73	3.61
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.025			
Intervalo		0.052	0.070	0.092
Lím. Inferior, LC_1		0.680	0.663	0.640
Lím. Superior, LC_2		0.784	0.802	0.824
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		4.627	4.608	4.584
Lím. Superior, LC_2		4.735	4.754	4.777

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINO****log ps BIOM. SUBT. EN FUNCION DE log vol****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	4.8767
Coefficiente de regresion b	0.780
Coefficiente de correlacion	0.90416
Coefficiente de determinación r^2	0.8175
Error standard	0.0671
Observaciones (N)	60

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	13.03	13.0343	259.8	0.0000
Residuos	58	2.9	0.0502		
Total	59	15.94			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESIÓN Y LÍMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	16.12	2.00	2.66	3.47
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.048			
Intervalo		0.097	0.129	0.168
Lím. Inferior, LC_1		0.683	0.651	0.612
Lím. Superior, LC_2		0.877	0.909	0.948
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC_1		4.748	4.705	4.654
Lím. Superior, LC_2		5.006	5.048	5.100

ANALISIS DE REGRESION LINEAL: B. SUBT. CIPRES vs PINO**CONTRASTE ENTRE REGRESIONES ($H_0 = b_1 - b_2 = 0$; $H_0 = a_1 - a_2 = 0$)**

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
Pendiente b : estadístico t	-0.022	1.99	2.63	3.40
b es significativo al	NS			
ordenada a : estadístico t	-3.235			
a es significativo al	99%			

1.3 PRUEBA DE INFERENCIA DE LA RELACIÓN RAÍZ:TALLO ENTRE DOS MUESTRAS INDEPENDIENTES

Ciprés vs pino ponderosa

Prueba de Wilcoxon para muestras independientes

Clasific	Variable	Grupo1	Grupo2	n(1)	n(2)	Media(1)	Media(2)	DS(1)	DS(2)	W	p(2 colas)
raiz:tallo	CIPRES PINO	35	30	0.14	0.27	0.10	0.07	1402.0			<0.0001

Pino ponderosa, sitios húmedos vs sitios secos

Prueba de Wilcoxon para muestras independientes

Clasific	Variable	Grupo1	Grupo2	n(1)	n(2)	Media(1)	Media(2)	DS(1)	DS(2)	W	p(2 colas)
SITIO	raiz:tallo	HUMEDO	SECO	25	9	0.26	0.39	0.07	0.10	242.0	0.001

ANEXO 2. BIOMASA DEL RODAL. ANALISIS DE VARIANCA, REGRESION Y CORRELACION
2.1. ANÁLISIS DE VARIANZA. BIOMASA POR ESPECIE, COMPARTIMENTO Y CLASE DE DAP

CIPRES BIOFUSTE

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	5,3348E+11	3	1,7783E+11	66,41	<0,0001
CATdap	5,3348E+11	3	1,7783E+11	66,41	<0,0001
Error	8,3012E+10	31	2677796847		
Total	6,1649E+11	34			

Test: Tukey Alfa:=0,05 DMS:=60709,82451

CATdap	Medias	n			
C0-5	945,6	5	5 A		
C5-15	26034,56	9	9 A		
C15-25	131143	12		B	
C25-35	328401,33	9			C

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0,05)

CIPRES BIORAMAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2,649E+10	3	8830039175	26,5	<0,0001
CATdap	2,649E+10	3	8830039175	26,5	<0,0001
Error	1,0331E+10	31	333266146		
Total	3,6821E+10	34			

Test: Tukey Alfa:=0,05 DMS:=21417,35150

CATdap	Medias	n			
C0-5	358,4	5	5 A		
C5-15	5530,67	9	9 A	B	
C15-25	23767,33	12		B	
C25-35	72614,44	9			C

CIPRES BIOHOJAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1822402783	3	607467594	23,95	<0,0001
CATdap	1822402783	3	607467594	23,95	<0,0001
Error	786206254	31	25361492,1		
Total	2608609037	34			

Test: Tukey Alfa:=0,05 DMS:=5908,23233

CATdap	Medias	n			
C0-5	518,8	5	5 A		
C5-15	2090,11	9	9 A	B	
C15-25	7854	12		B	
C25-35	19703,67	9			C

CIPRES BIORAIGON

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1769348119	3	589782706	50,02	<0,0001
CATdap	1769348119	3	589782706	50,02	<0,0001
Error	365544731	31	11791765,5		
Total	2134892850	34			

Test: Tukey Alfa:=0,05 DMS:=4028,65040

CATdap	Medias	n			
C0-5	175,4	5	5 A		
C5-15	1713,11	9	9 A		
C15-25	8672,08	12		B	
C25-35	19087	9			C

CIPRES BIORAICGR

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1888605071	3	629535024	90,71	<0,0001
CATdap	1888605071	3	629535024	90,71	<0,0001
Error	215146450	31	6940208,05		
Total	2103751520	34			

Test: Tukey Alfa:=0,05 DMS:=3090,69685

CATdap	Medias	n			
C0-5	349,8	5	5 A		
C5-15	2468,56	9	9 A		
C15-25	8573,33	12		B	
C25-35	20202,67	9			C

PINO BIOFUSTE

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1,1314E+11	3	3,7714E+10	61,81	<0,0001
CATdap	1,1314E+11	3	3,7714E+10	61,81	<0,0001
Error	3,7221E+10	61	610172524		
Total	1,5036E+11	64			

Test:Tukey Alfa:=0,05 DMS:=25249,01914

CATdap	Medias	n			
C0-5	1841,57	7	A		
C5-15	17238,62	26	A		
C15-25	65399,88	25		B	
C25-35	145141,71	7			C

PINO BIORAMAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2931763719	3	977254573	59,42	<0,0001
CATdap	2931763719	3	977254573	59,42	<0,0001
Error	427646118	26	16447927,6		
Total	3359409837	29			

Test:Tukey Alfa:=0,05 DMS:=6300,97294

CATdap	Medias	n			
C0-5	820,71	7	A		
C5-15	2470,76	17	A		
C15-25	18238	3		B	
C25-35	32432	3			C

PINO BIOHOJAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1199345263	3	399781754	22,1	<0,0001
CATdap	1199345263	3	399781754	22,1	<0,0001
Error	542757870	30	18091929		
Total	1742103133	33			

Test:Tukey Alfa:=0,05 DMS:=5262,21737

CATdap	Medias	n			
C0-5	2036,57	7	A		
C5-15	3695,53	17	A		
C15-25	14196,5	4		B	
C25-35	17280,33	6		B	

PINO BIORAIGON

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4606929795	3	1535643265	42,9	<0,0001
CATdap	4606929795	3	1535643265	42,9	<0,0001
Error	2076037108	58	35793743,2		
Total	6682966904	61			

Test:Tukey Alfa:=0,05 DMS:=6568,98725

CATdap	Medias	n			
C0-5	777,71	7	A		
C5-15	3248,92	26	A		
C15-25	15405,92	25		B	
C25-35	32906,5	4			C

PINO BIORAICGR

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2510000602	3	836666867	27,07	<0,0001
CATdap	2510000602	3	836666867	27,07	<0,0001
Error	1792456814	58	30904427,8		
Total	4302457416	61			

Test:Tukey Alfa:=0,05 DMS:=6103,86913

CATdap	Medias	n			
C0-5	296,71	7	A		
C5-15	1246,15	26	A	B	
C15-25	6621,52	25		B	
C25-35	26926,75	4			C

2.2 ANALISIS DE VARIANZA. BIOMASA POR COMPARTIMENTO Y CLASE DE DAP, ENTRE CIPRES Y PINO

DAP 0-5 - BIOM FUSTE

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2341397.34	1	2341397.34	5.76	0.0373
Especie	2341397.34	1	2341397.34	5.76	0.0373
Error	4066420.91	10	406642.09		
Total	6407818.25	11			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
CIPRES	945.6	5 A
PINO	1841.57	7 B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

DAP 0-5 - BIOM RAICGR

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	8219.44	1	8219.44	0.31	0.592
Especie	8219.44	1	8219.44	0.31	0.592
Error	268164.23	10	26816.42		
Total	276383.67	11			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
PINO	296.71	7 A
CIPRES	349.8	5 A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

DAP 0-5 -BIOHOJAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	6718921.15	1	6718921.15	36.31	0.0001
Especie	6718921.15	1	6718921.15	36.31	0.0001
Error	1850530.51	10	185053.05		
Total	8569451.67	11			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
CIPRES	518.8	5 A
PINO	2036.57	7 B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

DAP 0-5 - BIOM RAMAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	623392.29	1	623392.29	13.13	0.0047
Especie	623392.29	1	623392.29	13.13	0.0047
Error	474656.63	10	47465.66		
Total	1098048.92	11			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n	
CIPRES	358.4	5	A
PINO	820.71	7	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 0-5 - BIOM RAIGON

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1058115.62	1	1058115.62	32.22	0.0002
Especie	1058115.62	1	1058115.62	32.22	0.0002
Error	328444.63	10	32844.46		
Total	1386560.25	11			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n	
CIPRES	175.4	5	A
PINO	777.71	7	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 15-25- BIOM FUSTE

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	35044522924	1	35044522924	31.23	<0.0001
Especie	35044522924	1	35044522924	31.23	<0.0001
Error	39272782287	35	1122079494		
Total	74317305211	36			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n	
PINO	65399.88	25	A
CIPRES	131143	12	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 15-25- BIOM RAICGR

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	30888448.28	1	30888448.28	1.12	0.2968
Especie	30888448.28	1	30888448.28	1.12	0.2968
Error	963615802.9	35	27531880.08		
Total	994504251.2	36			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n	
PINO	6621.52	25	A
CIPRES	8573.33	12	A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 15-25 - BIOM HOJAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	120681918.8	1	120681918.8	4.38	0.0551
Especie	120681918.8	1	120681918.8	4.38	0.0551
Error	385969867	14	27569276.21		

Total	506651785.8	15
-------	-------------	----

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
CIPRES	7854	12 A
PINO	14196.5	4 B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 15-25 - BIOM RAMAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	73376465.07	1	73376465.07	0.64	0.4397
Especie	73376465.07	1	73376465.07	0.64	0.4397
Error	1501349457	13	115488419.7		
Total	1574725922	14			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
PINO	18238	3 A
CIPRES	23767.33	12 A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 15-25 - BIOM RAIGON

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	367658564.2	1	367658564.2	6.56	0.0149
Especie	367658564.2	1	367658564.2	6.56	0.0149
Error	1962473311	35	56070666.02		
Total	2330131875	36			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
CIPRES	8672.08	12 A
PINO	15405.92	25 B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 25-35 - BIOM FUSTE

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1.32237E+11	1	1.32237E+11	25.2	0.0002
Especie	1.32237E+11	1	1.32237E+11	25.2	0.0002
Error	7347751709	14	5248394078		
		3			
Total	2.05715E+11	15			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
PINO	145141.71	7 A
CIPRES	328401.33	9 B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 25-35 - BIOM RAICGR

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	125206052.3	1	125206052.3	1.37	0.2665
Especie	125206052.3	1	125206052.3	1.37	0.2665
Error	1005229131	11	91384466.43		
Total	1130435183	12			

Test: Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
CIPRES	20202.67	9 A
PINO	26926.75	4 A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

DAP 25-35 - BIOM HOJAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	21141160	1	21141160	0.32	0.581
Especie	21141160	1	21141160	0.32	0.581
Error	857729815.3	13	65979216.56		
Total	878870975.3	14			

Test: Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
PINO	17280.33	6 A
CIPRES	19703.67	9 A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

DAP 25-35 - BIOM RAMAS

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	3632914893	1	3632914893	4.02	0.0729
Especie	3632914893	1	3632914893	4.02	0.0729
Error	9044230514	10	904423051.4		
Total	12677145408	11			

Test: Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
PINO	32432	3 A
CIPRES	72614.44	9 A

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

DAP 25-35 - BIOM RAIGON

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	528863760.7	1	528863760.7	15.02	0.0026
Especie	528863760.7	1	528863760.7	15.02	0.0026
Error	387260687	11	35205517		
Total	916124447.7	12			

Test: Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
CIPRES	19087	9 A

PINO 32906.5 4 B
 Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 5-15 - BIOM FUSTE
 Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	517264110.2	1	517264110.2	2.28	0.1403
Especie	517264110.2	1	517264110.2	2.28	0.1403
Error	7477860412	33	226601830.7		
Total	7995124523	34			

Test: Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
PINO	17238.62	26 A
CIPRES	26034.56	9 A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 5-15 - BIOM RAICGR
 Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9990235.14	1	9990235.14	8.57	0.0062
Especie	9990235.14	1	9990235.14	8.57	0.0062
Error	38490165.61	33	1166368.65		
Total	48480400.74	34			

Test: Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
PINO	1246.15	26 A
CIPRES	2468.56	9 B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 5-15 - BIOM HOJAS
 Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15166818.91	1	15166818.91	4.36	0.0475
Especie	15166818.91	1	15166818.91	4.36	0.0475
Error	83413911.12	24	3475579.63		
Total	98580730.04	25			

Test: Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n
CIPRES	2090.11	9 A
PINO	3695.53	17 B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 5-15 - BIOM RAMAS
 Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	55097653.9	1	55097653.9	6.21	0.02
Especie	55097653.9	1	55097653.9	6.21	0.02
Error	212842027.1	24	8868417.79		
Total	267939681	25			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n	
PINO	2470.76	17	A
CIPRES	5530.67	9	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

DAP 5-15 - BIOM RAIGON

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	15769717.26	1	15769717.26	5.69	0.023
Especie	15769717.26	1	15769717.26	5.69	0.023
Error	91519396.74	33	2773315.05		
Total	107289114	34			

Test:Tukey Alfa:=0.05

Especie	Medias	n	
CIPRES	1713.11	9	A
PINO	3248.92	26	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

2.3 ANÁLISIS DE VARIANZA DE LA DISTRIBUCION PORCENTUAL DE BIOMASA DE PINO Y CIPRES, POR COMPARTIMENTO Y POR CLASE DIAMÉTRICA

CIPRES- %fuste

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo		0.55	3	0.18	14.94 <0.0001
categ		0.55	3	0.18	14.94 <0.0001
Error		0.38	31	0.01	
Total		0.94	34		

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C0-5	0.35	5 A
C5-15	0.64	9 B
C25-35	0.71	9 B
C15-25	0.72	12 B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

CIPRES %ramas

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	4.30E-03	3	1.40E-03	0.4	0.7547
categ	4.30E-03	3	1.40E-03	0.4	0.7547
Error	0.11	31	3.60E-03		
Total	0.12	34			

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C15-25	0.14	12 A
C25-35	0.15	9 A
C5-15	0.16	9 A
C0-5	0.17	5 A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

CIPRES %hojas 35 0.58 0.54 80.15

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.19	3	0.06	14.28	<0.0001
categ	0.19	3	0.06	14.28	<0.0001
Error	0.14	31	4.50E-03		
Total	0.33	34			

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C15-25	0.04	12 A
C25-35	0.05	9 A
C5-15	0.07	9 A
C0-5	0.26	5 B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

CIPRES %raices gr

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo		0.05	3	0.02	8.53 0.0003
Categ		0.05	3	0.02	8.53 0.0003
Error		0.06	31	1.80E-03	
Total		0.1	34		

Test:Tukey Alfa:=0.05

Categ	Medias	n
C25-35	0.05	9 A
C15-25	0.05	12 A
C5-15	0.07	9 A
C0-5	0.15	5 B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

CIPRES %raigon

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		2.20E-03	3	7.50E-04	2.53 0.0753
Categ		2.20E-03	3	7.50E-04	2.53 0.0753
Error		0.01	31	3.00E-04	
Total		0.01	34		

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C25-35	0.04	9 A
C15-25	0.05	12 A B
C5-15	0.06	9 A B
C0-5	0.07	5 B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

PINO %fuste

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		0.15	3	0.05	9.56 0.0002
categ		0.15	3	0.05	9.56 0.0002
Error		0.13	25	0.01	
Total		0.28	28		

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C0-5	0.32	7 A
C5-15	0.44	17 B
C15-25	0.51	3 B C
C25-35	0.57	2 C

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

PINO %ramas

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo		1.60E-03	3	5.40E-04	0.56 0.6477
categ		1.60E-03	3	5.40E-04	0.56 0.6477
Error		0.02	25	9.70E-04	
Total		0.03	28		

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C15-25	0.12	3 A
C5-15	0.13	17 A
C25-35	0.14	2 A
C0-5	0.14	7 A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

PINO %hojas

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.19	3	0.06	14.98	<0.0001
categ	0.19	3	0.06	14.98	<0.0001
Error	0.11	25	4.30E-03		
Total	0.3	28			

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C25-35	0.08	2 A
C15-25	0.11	3 A
C5-15	0.23	17 B
C0-5	0.35	7 C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

PINO %raices gr

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	0.02	3	0.01	23.44	<0.0001
categ	0.02	3	0.01	23.44	<0.0001
Error	0.01	25	3.00E-04		
Total	0.03	28			

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C0-5	0.05	7 A
C5-15	0.06	17 A
C25-35	0.1	2 B
C15-25	0.14	3 C

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

PINO %raigon

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	2.20E-03	3	7.40E-04	0.63	0.6022
categ	2.20E-03	3	7.40E-04	0.63	0.6022
Error	0.03	25	1.20E-03		
Total	0.03	28			

Test:Tukey Alfa:=0.05

categ	Medias	n
C15-25	0.12	3 A
C25-35	0.13	2 A
C0-5	0.14	7 A
C5-15	0.14	17 A

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0.05$)

2.4 ANÁLISIS DE VARIANZA Y TEST t PARA OBSERVACIONES APAREADAS. DIFERENCIAS EN CONTENIDO DE CARBONO DEL SUELO ENTRE USOS Y PROFUNDIDADES DE CADA USO

CTotal tn/ha

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	21616.4	2	10808.2	4.36	0.0151
ESPECIE	21616.4	2	10808.2	4.36	0.0151
Error	272900.12	110	2480.91		
Total	294516.52	112			

Test:Tukey Alfa:=0,05 DMS:=27,47597

ESPECIE	Medias	n	
PINO	80.95	43	A
ESTEPA	101.72	39	A B
CIPRES	114.67	31	B

Letras distintas indican diferencias significativas($p \leq 0,05$)

Prueba T (muestras apareadas)

ESPECIE	Obs(1)	Obs(2)	N	media(dif)	DE(dif)	T	p(Unilateral D)
CIPRES	C0-25 tn/ha	C25-50 tn/ha	31	29.98	14.41	11.59	<0,0001
ESTEPA	C0-25 tn/ha	C25-50 tn/ha	39	19.09	21.15	5.64	<0,0001
PINO	C0-25 tn/ha	C25-50 tn/ha	43	12.44	13.12	6.22	<0,0001

2.5 ANÁLISIS DE VARIANZA ENTRE PARCELAS DE PINO CON Y SIN RALEO

1- COMPARACION INDICE DE SITIO

Tabla de ANOVA

SITIOS

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	2	7.58	3.79		9.30 *	5.14	10.92
Intragrupos	6	2.45	0.41				
Total	8	10.03	1.25				

Componentes de la varianza

SITIOS

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	3.47	2.62	0.85
	100.0%	75.6%	24.4%

Test de Tukey

Comparaciones	diferencias	SE	q	q critico	significancia diferencias
ABRAANCHA vs JUNIN	2.02	0.41	4.89	4.34	Diferencias *
ABRAANCHA vs LCUYEN	1.95	0.39	4.99	4.34	Diferencias *
LCUYEN vs JUNIN	0.07	0.34	0.19	4.34	ns

2- COMPARACION DENSIDAD APARENTE

Tabla de ANOVA

DENSIDAD APARENTE ENTRE SITIOS

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	2	0.04	0.02		2.33 ns	5.14	10.92
Intragrupos	6	0.05	0.01				
Total	8	0.08	0.01				

Componentes de la varianza

DENSIDAD APARENTE ENTRE SITIOS

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	0.03	0.01	0.02
	100.0%	43.7%	56.3%

3- COMPARACION C% SUELOS 0-25 cm

Tabla de ANOVA

C% EN SUELOS 0-25 cm

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	2	2.52	1.26		5.27 *	3.34	5.45
Intragrupos	28	6.70	0.24				
Total	30	9.22	0.31				

Componentes de la varianza

C% EN SUELOS 0-25 cm

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	0.97	0.27	0.71
	100.0%	27.4%	72.6%

Test de Tukey

Comparaciones	diferencias	SE	q	q critico	significancia diferencias
LEMU CUYEN vs JUNIN	0.71	0.14	4.93	3.50	Diferencias *
LEMU CUYEN vs ABRA AN	0.21	0.17	1.27	3.50	ns
ABRA ANCHA vs JUNIN	0.50	0.18	2.74	3.50	ns

4- BIOMASA DE TODOS LOS PARES DE PARCELAS (LCUYEN, JUNIN, AANCHI)

Tabla de ANOVA

BIOMASA

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	10188.86	10188.86		8.84 *	5.32	11.26
Intragrupos	8	9222.73	1152.84				
Total	9	19411.60	2156.84				

Componentes de la varianza

BIOMASA

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	3882.32	2037.77	1844.55
	100.0%	52.5%	47.5%

5- BIOMASA PARES L5A-B, C10-11, AAT-AAR

Tabla de ANOVA

BIOMASA

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	8295.60	8295.60		21.47 **	7.71	21.20
Intragrupos	4	1545.53	386.38				
Total	5	9841.13	1968.23				

Componentes de la varianza

BIOMASA

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	3280.38	2765.20	515.18
	100.0%	84.3%	15.7%

6- CARBONO EN DETRITOS, TODAS LAS PARCELAS

Tabla de ANOVA

CARBONO EN DETRITOS, TODAS LAS PARCELAS

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.1	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	552.78	552.78		5.84 *	3.78	13.75
Intragrupos	6	568.11	94.68				
Total	7	1120.89	160.13				

SIGNIFICATIVO CON alfa=0.10

Componentes de la varianza

CARBONO EN DETRITOS, TODAS LAS PARCELAS

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	280.22	138.20	142.03
	100.0%	49.3%	50.7%

7- CARBONO EN DETRITOS, PARES SELECCIONADOS

Tabla de ANOVA

CARBONO EN DETRITOS, TODAS LAS PARCELAS

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	558.74	558.74		20.76 *	4.54	21.20
Intragrupos	4	107.67	26.92				
Total	5	666.41	133.28				

Componentes de la varianza

CARBONO EN DETRITOS, TODAS LAS PARCELAS

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	222.14	186.25	35.89
	100.0%	83.8%	16.2%

8- C SUELOS. TODAS LAS PARCELAS SELECCIONADAS (= NO HAY DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS)

9- C SUELOS. PARCELAS SELECCIONADAS (igual resultado con todas)

Tabla de ANOVA

C SUELOS. PARCELAS SELECCIONADAS (igual resultado con todas)

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	41.61	41.61		0.05 ns	7.71	21.20
Intragrupos	4	3415.35	853.84				
Total	5	3456.95	691.39				

Componentes de la varianza

C SUELOS. PARCELAS SELECCIONADAS (igual resultado con todas)

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	1152.32	13.87	1138.45
	100.0%	1.2%	98.8%

10- DENSIDAD APARENTE. PARCELAS SELECCIONADAS

Tabla de ANOVA

DENSIDAD APARENTE. PARCELAS SELECCIONADAS

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	0.01	0.01		0.58 ns	7.71	21.20
Intragrupos	4	0.04	0.01				
Total	5	0.05	0.01				

Componentes de la varianza

DENSIDAD APARENTE. PARCELAS SELECCIONADAS

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	0.02	0.00	0.01
	100.0%	12.7%	87.3%

11- C EN MANTILLO. PARCELAS SELECCIONADAS

Tabla de ANOVA

C EN MANTILLO. PARCELAS SELECCIONADAS

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	0.26	0.26		0.04 ns	7.71	21.20
Intragrupos	4	24.25	6.06				
Total	5	24.50	4.90				

Componentes de la varianza

C EN MANTILLO. PARCELAS SELECCIONADAS

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	8.17	0.09	8.08
	100.0%	1.0%	99.0%

12- C 0-25. Parcelas seleccionadas

Tabla de ANOVA

C 0-25. Parcelas seleccionadas

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	71.42	71.42		0.20 ns	7.71	21.20
Intragrupos	4	1427.81	356.95				
Total	5	1499.22	299.84				

Componentes de la varianza

C 0-25. Parcelas seleccionadas

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	499.74	23.81	475.94
	100.0%	4.8%	95.2%

13- C 25-50. Parcelas seleccionadas

Tabla de ANOVA

C 25-50. Parcelas seleccionadas

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	81.99	81.99		0.73 ns	7.71	21.20
Intragrupos	4	446.63	111.66				
Total	5	528.62	105.72				

Componentes de la varianza

C 25-50. Parcelas seleccionadas

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	176.21	27.33	148.88
	100.0%	15.5%	84.5%

14- C% entre disturbios (sin compactar vs caminos) pares seleccionados

Tabla de ANOVA

C% entre disturbios (sin compactar vs caminos) pares seleccionados

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	0.07	0.07		0.20 ns	7.71	21.20
Intragrupos	4	1.40	0.35				
Total	5	1.47	0.29				

Componentes de la varianza

C% entre disturbios (sin compactar vs caminos) pares seleccionados

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	0.49	0.02	0.47
	100.0%	4.7%	95.3%

15- Densidad aparente entre disturbios (sin compactar vs caminos) pares seleccionados

Tabla de ANOVA

Densidad aparente entre disturbios (sin compactar vs caminos) pares seleccionados

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.1	F critico a = 0.05
Entre grupos	1	0.03	0.03		7.25 *	4.54	7.71
Intragrupos	4	0.02	0.00				
Total	5	0.04	0.01				

significativo alfa=0.10

Componentes de la varianza

Densidad aparente entre disturbios (sin compactar vs caminos) pares seleccionados

S2total =	S2entre grupos + S2intragrupos		
	0.01	0.01	0.01
	100.0%	64.4%	35.6%

16- Tabla de ANOVA

BIOMASA EN HOJARASCA. PARES SELECC.

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F critico a = 0.05	F critico a = 0.01
Entre grupos	1	54,60	54,60		3,09 ns	7,71	21,20
Intragrupos	4	70,65	17,66				
Total	5	125,25	25,05				

17- BIOMASA EN RAMAS. PARES SELECC.

Tabla de ANOVA

CARBONO EN RAMAS. PARES SELECC.

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F crítico a = 0.05	F crítico a = 0.01
Entre grupos	1	983,04	983,04		74,85 **	7,71	21,20
Intragrupos	4	52,53	13,13				
Total	5	1035,57	207,11				

Componentes de la varianza

BIOMASA EN RAMAS. PARES SELECC.S²total = S²entre grupos + S²intragrupos

345,19	327,68	17,51
100,0%	94,9%	5,1%

18- Tabla de ANOVA

BIOMASA EN TOCONES Y DESPUNTES. PARES SELECC.

Origen de la Variación	Grados de Libertad	Sumas de Cuadrados	Cuadrado Medio	F	Signif	F crítico a = 0.05	F crítico a = 0.01
Entre grupos	1	276,08	276,08		3,67 ns	7,71	21,20
Intragrupos	4	301,23	75,31				
Total	5	577,32	115,46				

2.6 ANÁLISIS DE VARIANZA DE BIOMASA AEREA, SUBTERRANEA Y TOTAL DE ABROJO, COIRON BLANCO Y NENEO

Análisis de la varianza

ABROJO BIOMASA

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	781520.5		3	260506.83	53.93 <0.0001
BIOMAEREA	383873.58		2	191936.79	39.73 <0.0001
DIAMETRO	397646.92		1	397646.92	82.32 <0.0001
Error	299507.44		62	4830.77	
Total	1081027.94		65		

Test:Tukey Alfa:=0.05

BIOMAEREA Medias	n		
BIOMSUBT	30.64	22	A
BIOMAEREA	174.91	22	B
BIOMTOTAL	205.55	22	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

COIRON BIOMASA

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	1648098.8		3	549366.27	57.95 <0.0001
BIOMAEREA	651212.05		2	325606.03	34.34 <0.0001
DIAMETRO	996886.75		1	996886.75	105.15 <0.0001
Error	1014446.73		107	9480.81	
Total	2662545.53		110		

Test:Tukey Alfa:=0.05

BIOMAEREA Medias	n		
BIOMSUBT	33.79	37	A
BIOMAEREA	176.72	37	B
BIOMTOTAL	210.52	37	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

NENEO BIOMASA

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	18436395		3	6145465	67.89 <0.0001
BIOMAEREA	3171999.83		2	1585999.92	17.52 <0.0001
DIAMETRO	15264395.2		1	15264395.2	168.64 <0.0001
Error	7512714.38		83	90514.63	
Total	25949109.4		86		

Test:Tukey Alfa:=0.05

BIOMAEREA Medias	n		
BIOMSUBT	209.74	29	A
BIOMAEREA	466.91	29	B
BIOMTOTAL	676.65	29	C

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

2.7 ANÁLISIS DE VARIANZA DE BIOMASA TOTAL SEGUN EPOCAS DEL AÑO, ENTRE COIRON, ABROJO Y NENEO (DIAMETRO COMO COVARIABLE)

Abr-02 BIOM TOTAL

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor
Modelo	6907756.38		3	2302585.46	67.01 <0.0001
ESPECIE	1762567.29		2	881283.65	25.65 <0.0001
DIAM	5145189.09		1	5145189.09	149.74 <0.0001
Error	1236955.6		36	34359.88	
Total	8144711.98		39		

Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=176.40054

ESPECIE	Medias	n	
NENEO	182.44	14	A
ABROJO	282.71	11	A
COIRON	527.43	15	B

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

Nov-02 BIOM TOTAL

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo I)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor
Modelo	9216365.69		3	3072121.9	93.31 <0.0001
ESPECIE	2406759.47		2	1203379.74	36.55 <0.0001
DIAM	6809606.22		1	6809606.22	206.84 <0.0001
Error	1086444.68		33	32922.57	
Total	10302810.4		36		

Test: Tukey Alfa:=0.05 DMS:=180.42866

ESPECIE	Medias	n	
NENEO	102.7	15	A
ABROJO	376.44	11	B
COIRON	682.84	11	C

Letras distintas indican diferencias significativas(p<= 0.05)

2.8 ANÁLISIS DE VARIANZA. ESTRUCTURA DE RODALES Y BIOMASA DE CIPRESALES Y FORESTACIONES DE PINOS

N

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	Gl	CM	F	p-valor	
Modelo	83956.06		1	83956.06	0.26	0.6105
USO	83956.06		1	83956.06	0.26	0.6105
Error	26328221.53		82	321075.87		
Total	26412177.58		83			

DAP

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	78.24		1	78.24	1.88	0.174
USO	78.24		1	78.24	1.88	0.174
Error	3411.37		82	41.6		
Total	3489.61		83			

Hd

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	239.83		1	239.83	10.6	0.0016
USO	239.83		1	239.83	10.6	0.0016
Error	1832.08		81	22.62		
Total	2071.91		82			

AREA BASAL

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	419.75		1	419.75	0.96	0.3311
USO	419.75		1	419.75	0.96	0.3311
Error	36001.47		82	439.04		
Total	36421.22		83			

EAP

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	16806.92		1	16806.92	103.82	<0,0001
USO	16806.92		1	16806.92	103.82	<0,0001
Error	12789.33		79	161.89		
Total	29596.25		80			

DR

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	3.18		1	3.18	0.22	0.6368
USO	3.18		1	3.18	0.22	0.6368
Error	1159.38		82	14.14		
Total	1162.56		83			

VOL FUSTE

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	8149.58		1	8149.58	0.5	0.4827

USO	8149.58	1	8149.58	0.5	0.4827
Error	1343718.01	82	16386.8		
Total	1351867.59	83			

BFUSTE

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	32991.81	1	32991.81	3.52	0.064	
USO	32991.81	1	32991.81	3.52	0.064	
Error	767479.4	82	9359.5			
Total	800471.21	83				

BCOPA

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	5.7	1	5.7	0.02	0.8823	
USO	5.7	1	5.7	0.02	0.8823	
Error	21174.11	82	258.22			
Total	21179.81	83				

BSUBT

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	369.39	1	369.39	3.83	0.0536	
USO	369.39	1	369.39	3.83	0.0536	
Error	7898.78	82	96.33			
Total	8268.16	83				

BT

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	46870.46	1	46870.46	3.29	0.0731	
USO	46870.46	1	46870.46	3.29	0.0731	
Error	1253781.38	88	14247.52			
Total	1300651.84	89				

BT/G

Cuadro de Análisis de la Varianza (SC tipo III)

F.V.	SC	gl	CM	F	p-valor	
Modelo	0.08	1	0.08	0.21	0.6475	
USO	0.08	1	0.08	0.21	0.6475	
Error	32.66	81	0.4			
Total	32.75	82				

2.9 CORRELACION ENTRE VARIABLES FÍSIOGRÁFICAS, FÍSICO-QUÍMICAS, Y DE BIOMASA FORESTAL

2.9-1 Coeficientes de Correlación de Spearman, plantaciones de pino ponderosa (coeficientes/probabilidades)

VARIABLE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	EXPOSIC	PEND %	GRAVA %	PIEDRAS %	ROCAS %	DRENAJE	PRECIPIIT	FUSTE	RAMAS	ACICULAS	RAICES GR	RAIGON	BAEREA DAP	BSUBT DAP	RS DAP	BIOMT DAP	BD 1 SP	BD1 CP	C1%
LATITUD	1	0.080	0.001	0.690	0.110	0.030	0.010	0.010	0.004	0.500	0.960	0.870	0.300	0.950	0.490	0.520	0.430	0.630	0.940	0.670	0.530	0.500
LONGITUD	0.23	1	0.730	0.360	0.040	0.800	0.080	0.010	0.020	0.000	0.010	0.003	0.001	0.001	0.000	0.004	0.010	0.120	0.005	0.000	0.000	0.000
ALT	-0.43	-0.05	1	0.002	0.050	0.820	0.080	0.010	0.130	0.160	0.450	0.540	0.620	0.520	0.780	0.600	0.550	0.580	0.490	0.660	0.650	0.850
EXP	0.05	0.12	0.43	1	0.000	0.420	0.010	0.002	0.010	0.220	0.100	0.160	0.610	0.170	0.470	0.150	0.180	0.720	0.130	0.600	0.540	0.030
PEND %	-0.23	-0.29	0.30	0.60	1	0.120	0.010	0.002	0.040	0.490	0.990	0.870	0.290	0.780	0.180	0.380	0.430	0.140	0.950	0.700	0.360	0.660
GRAVA %	0.35	-0.04	-0.04	0.14	0.25	1	0.000	0.000	0.000	0.200	0.230	0.340	0.510	0.310	0.310	0.410	0.430	0.010	0.310	0.160	0.030	0.630
PIEDRAS %	0.44	0.28	0.29	0.48	0.42	0.83	1	0.000	0.000	0.200	0.450	0.410	0.380	0.400	0.510	0.280	0.280	0.010	0.430	0.004	0.001	0.090
ROCAS %	0.4	0.43	0.42	0.52	0.47	0.59	0.81	1	0.000	0.002	0.010	0.010	0.020	0.010	0.020	0.003	0.004	0.040	0.010	0.060	0.060	0.003
DRENAJE	0.45	0.36	0.24	0.42	0.31	0.67	0.78	0.72	1	0.070	0.160	0.140	0.120	0.150	0.140	0.180	0.180	0.002	0.150	0.030	0.050	0.004
PRECIPIIT	-0.09	0.82	0.18	0.17	-0.10	-0.20	0.21	0.47	0.28	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.001	0.000	0.000
FUSTE	-0.01	0.38	0.10	0.22	0.00	-0.20	0.13	0.45	0.23	0.54	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.260	0.220	0.060
RAMAS	0.02	0.41	0.08	0.19	-0.02	-0.16	0.14	0.44	0.24	0.56	0.98	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.350	0.270	0.080
ACICULAS	0.14	0.43	-0.07	0.07	-0.16	-0.11	0.15	0.40	0.26	0.52	0.75	0.84	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.000	0.930	0.840	0.300
RAICES GR	0.01	0.44	0.09	0.19	-0.04	-0.17	0.15	0.45	0.24	0.59	0.97	0.99	0.86	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.310	0.260	0.070
RAIGON	0.09	0.48	-0.04	0.10	-0.21	-0.17	0.11	0.40	0.25	0.61	0.86	0.91	0.95	0.92	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.480	0.470	0.150
BAEREA	0.10	0.47	0.09	0.23	-0.15	-0.14	0.20	0.51	0.23	0.62	0.99	1.00	0.93	1.00	1.00	1	0.000	0.000	0.000	0.310	0.350	0.100
BSUBT	0.13	0.46	0.10	0.22	-0.13	-0.14	0.20	0.50	0.23	0.62	0.98	1.00	0.95	1.00	1.00	1.00	1	0.000	0.000	0.380	0.370	0.130
RS	0.08	-0.26	0.09	0.06	0.25	0.49	0.49	0.36	0.53	-0.42	-0.72	-0.65	-0.45	-0.66	-0.64	-0.67	-0.64	1	0.000	0.170	0.190	0.170
BIOMT	0.01	0.38	0.09	0.21	-0.01	-0.17	0.14	0.44	0.24	0.53	0.99	0.99	0.79	0.98	0.88	1.00	1.00	-0.67	1	0.330	0.300	0.070
BD 1 SP	-0.07	-0.68	0.07	-0.09	-0.06	0.22	0.47	0.30	0.34	-0.51	-0.19	-0.16	-0.01	-0.17	-0.12	-0.17	-0.15	0.24	-0.16	1	0.000	0.000
BD1 CP	0.10	-0.63	-0.07	-0.10	-0.14	0.34	0.51	0.30	0.31	-0.59	-0.20	-0.18	-0.03	-0.18	-0.12	-0.16	-0.15	0.22	-0.17	0.93	1	0.000
C1%	0.10	0.72	-0.03	0.36	0.07	0.07	0.27	0.46	0.45	0.59	0.31	0.29	0.17	0.30	0.23	0.28	0.26	-0.23	0.30	-0.83	-0.81	1

OBSERVACIONES: biomasa (fuste, ramas, acículas, raíces, raigón, biomasa aérea, subterránea, total) estimada con funciones de dap individual en parcelas de inventario; R:S= relación tallo: raíz; BD1= densidad aparente del suelo de 0-25 cm (con piedras: CP, sin piedras: SP), pH1, C1%, N1%= valores referidos a la profundidad 0-25 cm. Clases de drenaje= 1: bien drenado, 2: moderad., 3: imperfecto, 4: pobremente, 5: muy pobremente drenado.

2.9-2. Coeficientes de Correlación de Spearman, bosques de ciprés de la cordillera (coeficientes/probabilidades)

VARIABLE	LATITUD	LONGITUD	ALTITUD	EXPOSIC	PEND %	GRAVA %	PIEDRAS %	ROCAS %	DRENAJE	PRECIPIT	FUSTE	RAMAS	ACICULAS	RAICES GR	RAIGON	BAEREA	BSUBT	BIOM TOT	RS	HOJARASC	BD 1 SP	BD1 CP	C1%
LATITUD	1	0.010	0.000	0.060	0.060	0.860	0.070	0.290	0.010	0.250	0.010	0.020	0.130	0.040	0.020	0.010	0.030	0.010	0.010	0.210	0.120	0.250	0.001
LONGITUD	0.38	1	0.050	0.890	0.840	0.250	0.040	0.040	0.010	0.000	0.050	0.020	0.004	0.010	0.020	0.040	0.020	0.030	0.720	0.070	0.004	0.010	0.000
ALTITUD	-0.72	-0.30	1	0.360	0.030	0.070	0.200	0.390	0.010	0.350	0.130	0.160	0.550	0.250	0.170	0.150	0.190	0.160	0.030	0.690	0.050	0.100	0.010
EXPOSIC	0.28	-0.02	-0.14	1	0.060	0.820	0.050	0.120	0.010	0.720	0.950	0.940	0.950	0.860	0.980	0.880	0.890	0.860	0.740	0.420	0.120	0.100	0.190
PEND %	-0.29	-0.03	0.33	0.29	1	0.210	0.120	0.210	0.010	0.040	0.030	0.040	0.420	0.100	0.060	0.030	0.070	0.030	0.005	0.120	0.090	0.060	0.700
GRAVA %	0.04	-0.24	0.37	0.05	0.26	1	0.010	0.310	0.003	0.480	0.360	0.150	0.140	0.120	0.240	0.280	0.150	0.290	0.140	0.880	0.010	0.004	0.150
PIEDRAS %	0.35	0.39	0.25	0.39	0.31	0.55	1	0.000	0.000	0.040	0.360	0.330	0.120	0.280	0.270	0.350	0.260	0.350	0.020	0.180	0.200	0.090	0.150
ROCAS %	0.21	0.41	0.17	0.31	0.25	0.21	0.81	1	0.000	0.020	0.670	0.980	0.350	0.800	0.880	0.700	0.980	0.700	0.003	0.290	0.430	0.380	0.080
DRENAJE	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.61	0.74	0.71	1	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010	0.010
PPDRACK	-0.17	0.65	0.14	0.05	0.32	-0.14	0.39	0.45	0.50	1	0.770	0.840	0.150	0.420	0.810	0.840	0.700	0.910	0.050	0.310	0.320	0.220	0.210
FUSTE	0.40	0.30	-0.23	-0.01	-0.33	-0.19	0.18	-0.09	0.50	-0.05	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.480	0.030	0.060	0.070
RAMAS	0.37	0.36	-0.22	-0.01	-0.31	-0.30	0.19	0.00	0.50	0.03	0.98	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.360	0.030	0.040	0.050
ACICULAS	0.23	0.44	-0.09	0.01	-0.12	-0.31	0.30	0.19	0.50	0.22	0.79	0.87	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.040	0.090	0.140	0.160	0.240
RAICES GR	0.31	0.42	-0.18	-0.03	-0.25	-0.32	0.21	0.05	0.50	0.12	0.93	0.98	0.94	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.240	0.030	0.040	0.060
RAIGON	0.36	0.35	-0.21	0.00	-0.29	-0.25	0.21	-0.03	0.50	0.04	0.98	0.99	0.87	0.97	1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.310	0.030	0.050	0.060
BAEREA	0.39	0.31	-0.22	-0.02	-0.33	-0.23	0.18	-0.08	0.50	-0.03	1.00	0.98	0.81	0.94	0.99	1	0.000	0.000	0.000	0.480	0.030	0.050	0.060
BSUBT	0.34	0.37	-0.20	-0.02	-0.28	-0.30	0.22	0.00	0.50	0.06	0.96	0.99	0.90	0.99	0.99	0.97	1	0.000	0.000	0.310	0.030	0.050	0.080
BIOM TOT	0.38	0.32	-0.21	-0.03	-0.33	-0.22	0.18	-0.08	0.50	-0.02	1.00	0.99	0.82	0.95	0.99	1.00	0.98	1	0.000	0.450	0.020	0.040	0.060
RS	-0.39	-0.05	0.33	0.05	0.43	0.31	0.44	0.59	0.50	0.29	-0.80	-0.72	-0.32	-0.59	-0.70	-0.79	-0.67	-0.78	1	0.390	0.130	0.140	0.240
HOJARASC	0.24	0.34	-0.08	0.16	0.30	0.03	0.26	0.21	0.50	0.19	0.14	0.18	0.33	0.23	0.20	0.13	0.20	0.14	0.16	1	0.560	0.550	0.070
BD 1 SP	-0.29	-0.53	0.37	0.29	0.32	0.51	0.25	0.16	0.50	-0.18	-0.42	-0.42	-0.28	-0.41	-0.40	-0.42	-0.40	-0.44	0.29	-0.11	1	0.000	0.000
BD1 CP	-0.21	-0.51	0.31	0.30	0.35	0.59	0.33	0.17	0.50	-0.22	-0.36	-0.39	-0.26	-0.38	-0.37	-0.37	-0.37	-0.39	0.27	-0.11	0.98	1	0.001
C1%	0.62	0.77	-0.49	0.24	-0.07	-0.29	0.28	0.34	0.50	0.23	0.34	0.37	0.22	0.35	0.35	0.34	0.33	0.34	-0.22	0.34	-0.66	-0.63	1

OBSERVACIONES: biomasa (fuste, ramas, acículas, raíces, raigón, biomasa aérea, subterránea, total) estimada con funciones de volumen individual en parcelas de inventario; R:S= relación tallo: raíz; BD1= densidad aparente del suelo de 0-25 cm (con piedras: CP, sin piedras: SP), pH1, C1%, N1%= valores referidos a la profundidad 0-25 cm. Clases de drenaje= 1: bien drenado, 2: moderad., 3: imperfecto, 4: pobremente, 5: muy pobremente drenado.

2.10 REGRESION LINEAL DE BIOMASA DEL RODAL EN FUNCION DE LA DENSIDAD RELATIVA

ANALISIS DE REGRESION LINEAL PINOS

log baerea EN FUNCION DE log DR

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	0.6899
Coefficiente de regresion b	1.367
Coefficiente de correlacion	0.95179
Coefficiente de determinación r^2	0.9059
Error standard	0.07
Observaciones (N)	48

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	9.76	9.76431	442.8	0.0000
Residuos	46	1.01	0.0221		
Total	47	10.78			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	21.04	2.01	2.69	3.51
---------------	-------	------	------	------

b es significativo al 99,9% ***

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.065			
Intervalo		0.131	0.175	0.228
Lím. Inferior, LC1		1.236	1.193	1.139
Lím. Superior, LC2		1.498	1.542	1.596

ordenada al origen a

Lím inferior, LC1	0.783	0.814	0.852
Lím. Superior, LC2	0.597	0.566	0.528

ANALISIS DE REGRESION LINEAL PINO

log bsibt EN FUNCION DE log DR

ESTADISTICAS DE REGRESION

Ordenada al origen a	0.0403
Coefficiente de regresion b	1.298
Coefficiente de correlacion	0.95173
Coefficiente de determinación r^2	0.90578
Error standard	0.0656
Observaciones (N)	48

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	8.80	8.79959	442.2	0.0000
Residuos	46	0.9	0.0199		
Total	47	9.71			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
--	------------	------	------	-------

SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)

Estadístico t	21.03	2.01	2.69	3.51
---------------	-------	------	------	------

b es significativo al 99,9% ***

LIMITES DE CONFIANZA DE a y b

pendiente b

S_b	0.062			
Intervalo		0.124	0.166	0.217
Lím. Inferior, LC ₁		1.174	1.132	1.081
Lím. Superior, LC ₂		1.422	1.464	1.515

ordenada al origen a

Lím inferior, LC ₁	0.129	0.158	0.194
Lím. Superior, LC ₂	-0.048	-0.077	-0.114

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINOS****log baciculas EN FUNCION DE log DR****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.4000
Coefficiente de regresion b	0.742
Coefficiente de correlacion	0.9603
Coefficiente de determinación r^2	0.92217
Error standard	0.04
Observaciones (N)	52

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	4.82	4.81727	592.4	0.0000
Residuos	50	0.41	0.0081		
Total	51	5.22			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	24.34	2.01	2.68	3.50
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.030			
Intervalo		0.061	0.082	0.107
Lím. Inferior, LC1		0.681	0.660	0.636
Lím. Superior, LC2		0.803	0.824	0.849
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		0.444	0.458	0.476
Lím. Superior, LC2		0.356	0.342	0.324

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**PINO****log bramas EN FUNCION DE log DR****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.3871
Coefficiente de regresion b	0.991
Coefficiente de correlacion	0.9691
Coefficiente de determinación r^2	0.93915
Error standard	0.0587
Observaciones (N)	52

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	8.59	8.58547	771.7	0.0000
Residuos	50	0.6	0.0111		
Total	51	9.14			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	27.78	2.01	2.68	3.50
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.036			
Intervalo		0.072	0.096	0.125
Lím. Inferior, LC ₁		0.919	0.895	0.866
Lím. Superior, LC ₂		1.062	1.086	1.115
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		0.438	0.455	0.476
Lím. Superior, LC ₂		0.336	0.319	0.298

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log BIOM.AEREA EN FUNCION DE log DR****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.8932
Coefficiente de regresion b	1.334
Coefficiente de correlacion	0.94248
Coefficiente de determinación r^2	0.88826
Error standard	0.07
Observaciones (N)	33

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	4.23	4.22653	246.4	0.0000
Residuos	31	0.53	0.0172		
Total	32	4.76			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	15.70	2.04	2.74	3.63
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.085			
Intervalo		0.173	0.233	0.309
Lím. Inferior, LC1		1.161	1.101	1.025
Lím. Superior, LC2		1.507	1.567	1.643
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		1.018	1.061	1.115
Lím. Superior, LC2		0.769	0.726	0.671

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**CIPRES****log BIOM.SUBT. EN FUNCION DE log DR****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.0829
Coefficiente de regresion b	1.142
Coefficiente de correlacion	0.97939
Coefficiente de determinación r^2	0.95921
Error standard	0.0553
Observaciones (N)	33

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	3.10	3.09706	729.0	0.0000
Residuos	31	0.1	0.0042		
Total	32	3.23			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	27.00	2.04	2.74	3.63
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.042			
Intervalo		0.086	0.116	0.154
Lím. Inferior, LC ₁		1.056	1.026	0.988
Lím. Superior, LC ₂		1.228	1.258	1.296
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		0.145	0.166	0.193
Lím. Superior, LC ₂		0.021	0.000	-0.027

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**FESTUCA****BIOM.TOTAL EN FUNCION DE COB. total %****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen <i>a</i>	1.5050
Coefficiente de regresion <i>b</i>	14.163
Coefficiente de correlacion	0.96509
Coefficiente de determinación r^2	0.9314
Error standard	1.12
Observaciones (N)	6

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	35.11	35.1057	54.3	0.0018
Residuos	4	2.59	0.6464		
Total	5	37.69			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	7.37	2.78	4.60	8.61
<i>b</i> es significativo al	99% **			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	1.922			
Intervalo		5.336	8.849	16.548
Lím. Inferior, LC1		8.827	5.315	-2.384
Lím. Superior, LC2		19.500	23.012	30.711
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		4.440	6.372	10.606
Lím. Superior, LC2		-1.430	-3.362	-7.596

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**FESTUCA****BIOM.TOTAL EN FUNCION DE COB. RELATIVA %****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen <i>a</i>	1.1083
Coefficiente de regresion <i>b</i>	17.470
Coefficiente de correlacion	0.9392
Coefficiente de determinación r^2	0.8821
Error standard	1.4207
Observaciones (N)	6

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F critico
Regresión	1	53.41	53.4119	29.9	0.0054
Residuos	4	7.1	1.7847		
Total	5	60.55			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	5.47	2.78	4.60	8.61
<i>b</i> es significativo al	99% **			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	3.193			
Intervalo		8.867	14.703	27.496
Lím. Inferior, LC ₁		8.604	2.767	-10.026
Lím. Superior, LC ₂		26.337	32.173	44.966
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		5.985	9.195	16.231
Lím. Superior, LC ₂		-3.768	-6.978	-14.015

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**FESTUCA****BIOM.AEREA EN FUNCION DE COB. RELATIVA %****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.0289
Coefficiente de regresion b	0.159
Coefficiente de correlacion	0.86472
Coefficiente de determinación r^2	0.74774
Error standard	1.18
Observaciones (N)	14

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	190.63	190.627	35.6	0.0001
Residuos	12	64.31	5.3592		
Total	13	254.94			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	5.96	2.18	3.05	4.32
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.027			
Intervalo		0.058	0.081	0.115
Lím. Inferior, LC1		0.101	0.077	0.044
Lím. Superior, LC2		0.217	0.240	0.273
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		2.230	3.115	4.391
Lím. Superior, LC2		-2.172	-3.057	-4.333

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**FESTUCA****BIOM.SUBT. EN FUNCION DE COB. RELATIVA %****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	-0.0146
Coefficiente de regresion b	0.029
Coefficiente de correlacion	0.91122
Coefficiente de determinación r^2	0.83031
Error standard	0.2021
Observaciones (N)	14

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	6.17	6.17142	58.7	0.0000
Residuos	12	1.3	0.1051		
Total	13	7.43			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	7.66	2.18	3.05	4.32
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.004			
Intervalo		0.008	0.011	0.016
Lím. Inferior, LC ₁		0.020	0.017	0.012
Lím. Superior, LC ₂		0.037	0.040	0.045
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		0.294	0.418	0.596
Lím. Superior, LC ₂		-0.323	-0.447	-0.625

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**NENEO****BIOM.AEREA EN FUNCION DE COB. RELATIVA %****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.1847
Coefficiente de regresion b	0.081
Coefficiente de correlacion	0.98414
Coefficiente de determinación r^2	0.96853
Error standard	0.29
Observaciones (N)	15

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	16.85	16.8544	400.1	0.0000
Residuos	13	0.55	0.0421		
Total	14	17.40			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	20.00	2.16	3.01	4.22
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.004			
Intervalo		0.009	0.012	0.017
Lím. Inferior, LC1		0.072	0.069	0.064
Lím. Superior, LC2		0.090	0.093	0.098
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		0.371	0.445	0.549
Lím. Superior, LC2		-0.002	-0.075	-0.179

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**NENEO****BIOM.SUBT. EN FUNCION DE COB. RELATIVA %****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.0923
Coefficiente de regresion b	0.074
Coefficiente de correlacion	0.95728
Coefficiente de determinación r^2	0.91639
Error standard	0.2698
Observaciones (N)	15

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	14.01	14.0104	142.5	0.0000
Residuos	13	1.3	0.0983		
Total	14	15.29			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	11.94	2.16	3.01	4.22
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.006			
Intervalo		0.013	0.019	0.026
Lím. Inferior, LC ₁		0.061	0.055	0.048
Lím. Superior, LC ₂		0.087	0.093	0.100
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		0.377	0.489	0.649
Lím. Superior, LC ₂		-0.192	-0.305	-0.464

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**ABROJO****BIOM.AEREA EN FUNCION DE COB. RELATIVA %****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.0923
Coefficiente de regresion b	0.248
Coefficiente de correlacion	0.95991
Coefficiente de determinación r^2	0.92142
Error standard	0.71
Observaciones (N)	14

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	84.32	84.324	140.7	0.0000
Residuos	12	7.19	0.5992		
Total	13	91.51			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	11.86	2.18	3.05	4.32
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.021			
Intervalo		0.046	0.064	0.090
Lím. Inferior, LC1		0.203	0.184	0.158
Lím. Superior, LC2		0.294	0.312	0.339
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC1		0.666	0.897	1.230
Lím. Superior, LC2		-0.482	-0.713	-1.045

ANALISIS DE REGRESION LINEAL**ABROJO****BIOM .SUBT. EN FUNCION DE COB. RELATIVA %****ESTADISTICAS DE REGRESION**

Ordenada al origen a	0.0753
Coefficiente de regresion b	0.024
Coefficiente de correlacion	0.97055
Coefficiente de determinación r^2	0.94196
Error standard	0.0692
Observaciones (N)	14

ANALISIS DE VARIANZA

	GL	SC	CM	F	F crítico
Regresión	1	0.82	0.82003	194.8	0.0000
Residuos	12	0.1	0.0042		
Total	13	0.87			

SIGNIFICANCIA DE LA REGRESION Y LIMITES DE CONFIANZA

	$\alpha =$	0.05	0.01	0.001
SIGNIFICANCIA DE b (prueba t)				
Estadístico t	13.96	2.18	3.05	4.32
b es significativo al	99,9% ***			
LIMITES DE CONFIANZA DE a y b				
pendiente b				
S_b	0.002			
Intervalo		0.004	0.005	0.008
Lím. Inferior, LC ₁		0.021	0.019	0.017
Lím. Superior, LC ₂		0.028	0.030	0.032
ordenada al origen a				
Lím inferior, LC ₁		0.123	0.143	0.171
Lím. Superior, LC ₂		0.027	0.008	-0.020

2.11 PRUEBA t PARA PARCELAS APAREADAS. %CO SUELO 0-25 cm (e: estepas, c:cipresales, p:pinares)

Prueba t (muestras apareadas)

Obs(1)	Obs(2)	N	media(dif)	DE(dif)	T	Bilateral
eC1%	cC1%	28	-0.78	1.83	-2.26	0.0322
eC1%	pC1%	35	0.56	2.04	1.62	0.1136
cC1%	pC1%	27	1.32	2.29	3.00	0.0059

C:\Mis documentos\Tesis\004 Parte III - Tablas y Figuras\infostat\sitios apareados, usos.IDB: 26/12/2005 - 06:39:13 p.m.

2.12 ANÁLISIS DE VARIANZA. BIOMASA DE ESTEPAS Y CONDICION DE PASTIZAL

Análisis de varianza no paramétrico- Prueba de Kruskal Wallis

Biomasa aérea

Variable	CP cat	N trat	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
BAEREAOT/HA	2.00	1	6	10.43	2.67	10.17	8.16	0.0428
BAEREAOT/HA	3.00	2	8	6.93	3.41	7.08		
BAEREAOT/HA	4.00	3	8	7.88	2.29	7.91		
BAEREAOT/HA	5.00	4	4	5.28	1.88	4.97		

Matriz de valores de p (diagonal superior) entre tratamientos

	1	2	3	4
1		0.04	0.12	0.01
2	sd		0.58	0.30
3	sd	sd		0.14
4	sd	sd	sd	

Biomasa subterránea

Variable	CP cat	N trat	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
BSUBTOT	2.00	1	6	1.85	0.47	1.96	1.83	0.6085
BSUBTOT	3.00	2	8	2.17	0.83	2.45		
BSUBTOT	4.00	3	8	2.30	0.84	2.37		
BSUBTOT	5.00	4	4	2.45	1.10	2.51		

Biomasa total

Variable	CP cat	N trat	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
BTOT	2.00	1	6	12.28	3.11	11.98	5.70	0.1270
BTOT	3.00	2	8	9.10	3.83	9.34		
BTOT	4.00	3	8	10.18	1.61	10.59		
BTOT	5.00	4	4	7.73	2.78	7.17		

Variable	CP cat	N trat	N	Medias	D.E.	Medianas	H	p
R/S	2.00	1	6	0.18	0.02	0.17	8.91	0.0306
R/S	3.00	2	8	0.36	0.19	0.29		
R/S	4.00	3	8	0.34	0.21	0.33		
R/S	5.00	4	4	0.47	0.16	0.50		

Matriz de valores de p (diagonal superior) entre tratamientos

	1	2	3	4
1		0.03	0.04	0.01
2	sd		0.84	0.32
3	sd	sd		0.25
4	sd	sd	sd	

ANEXO 3. MODELO DE SIMULACIÓN DE LA DINAMICA DE BIOMASA DE PINO PONDEROSA. FORMA ECUACIONAL

1- PRODUCTIVIDAD Y CRECIMIENTO FORESTAL

$$\text{ALTURA_DOM}(t) = \text{ALTURA_DOM}(t - dt) + (\text{crech}) * dt$$

$$\text{ESTADO INICIAL ALTURA_DOM} = 0.3 \text{ (1,30-50 m)}$$

ENTRADAS:

$$\text{crech} = \text{derivn}((\text{INDICE_DE_SITIO}) * \exp(-7.3122/(\text{eap})^{0.2503}) / \exp(-7.3122/21.9^{0.2503}), 1) + \text{crec_inic}$$

$$\text{DENSIDAD RELATIVA}(t) = \text{DENSIDAD RELATIVA}(t - dt) + (\text{crecdr} - \text{decdr}) * dt$$

$$\text{ESTADO INICIAL DENSIDAD RELATIVA} = 0.01 \text{ (0.01-20)}$$

ENTRADAS:

$$\text{crecdr} = 2.1 * \text{crecfh}$$

SALIDAS:

$$\text{decdr} = \text{pulse}(\text{DR_MAXIMA} * \text{DR} * \text{DR_}\% \text{_MINIMA})$$

$$\text{FH}(t) = \text{FH}(t - dt) + (\text{crecfh} - \text{decfh}) * dt$$

$$\text{ESTADO INICIAL FH} = 0.37$$

ENTRADAS:

$$\text{crecfh} = (\text{crech} / (10000 / \text{NUMERO_DE_PLANTAS})^{0.5})$$

SALIDAS:

$$\text{decfh} = \text{FH} - (\text{ALTURA_DOM} / (10000 / \text{NUMERO_DE_PLANTAS})^{0.5})$$

$$\text{NUMERO_DE_PLANTAS}(t) = \text{NUMERO_DE_PLANTAS}(t - dt) + (- \text{decN}) * dt$$

$$\text{ESTADO INICIAL NUMERO_DE_PLANTAS} = 1400 \text{ (250-3000 pl.ha}^{-1}\text{)}$$

SALIDAS:

$$\text{decN} = ((100 * \text{decdr}) / (2.06 * \text{ALTURA_DOM}))^2 + \text{pulse}(\text{CORTA} * \text{NUMERO_DE_PLANTAS})$$

$$\text{VOLUMEN}(t) = \text{VOLUMEN}(t - dt) + (\text{crecvol} - \text{decvol}) * dt$$

$$\text{ESTADO INICIAL VOLUMEN} = 1.25$$

ENTRADAS:

$$\text{crecvol} = (2.56116 * \text{ALTURA_DOM}^{1.00118} * \text{crecdr}^{0.92113})$$

SALIDAS:

$$\text{decvol} = (2.56116 * \text{ALTURA_DOM}^{1.00118} * \text{decdr}^{0.92113})$$

MODIFICADOR:

$$\text{eap} = \text{delay}(\text{time}, 5)$$

$$\text{INDICE_DE_SITIO} = 16.6 \quad (10-20)$$

$$\text{crec_inic} = \text{GRAPH}(\text{time})$$

$$(0.00, 0.2), (1.00, 0.2), (2.00, 0.2), (3.00, 0.2), (4.00, 0.2), (5.00, 0.00), (6.00, 0.00), (7.00, 0.00), (8.00, 0.00), (9.00, 0.00), (10.0, 0.00)$$

2- CRECIMIENTO DE ESTEPAS

$$\text{BA_ABROJO} = 0.0923 + 0.248 * \text{Cob}\% \text{_abrojo}$$

$$\text{BA_COIRON} = 0.0289 + 0.159 * \text{Cob}\% \text{_coiron}$$

$BA_NENEO = 0.1847 + 0.081 * Cob\%_neneo$
 $BS_ABROJO = 0.0753 + 0.024 * Cob\%_abrojo$
 $BS_COIRON = -0.0146 + 0.029 * Cob\%_coiron$
 $BS_NENEO = 0.0923 + 0.074 * Cob\%_neneo$

$Cob\%_abrojo = 1 \quad (0.01-20\%)$
 $Cob\%_coiron = 60 \quad (0.01-80\%)$
 $Cob\%_neneo = 50 \quad (0.01-50\%)$

$Cob_relativa = Cob\%_abrojo + Cob\%_coiron + Cob\%_neneo$

3- MANEJO FORESTAL

$AREA_BASAL = ((10 * DR) / (0.7854 * NUMERO_DE_PLANTAS))^{0.25} * 1.333$

$diam_cuadr = +(AREA_BASAL / DR)^2$

$DR_ \%_MINIMA = 0.35 \quad (0.40 - 0.0)$

$CORTA = GRAPH(diam_cuadr)$

(0.00, 0.00), (5.00, 0.00), (10.0, 0.00), (15.0, 0.00), (20.0, 0.00), (25.0, 0.00), (30.0, 0.00), (35.0, 0.00), (40.0, 1.00), (45.0, 1.00), (50.0, 1.00)

$DR_MAXIMA = GRAPH(DR)$

(0.00, 0.00), (2.00, 0.00), (4.00, 0.00), (6.00, 0.00), (8.00, 0.00), (10.0, 1.00), (12.0, 1.00), (14.0, 1.00), (16.0, 1.00), (18.0, 1.00), (20.0, 1.00)

4- FORESTACION

$HOJARASCA(t) = HOJARASCA(t - dt) + (inpoda + inhojarasca + inraleo - desc_hoj) * dt$

ESTADO INICIAL HOJARASCA = 0.01

ENTRADAS:

$inpoda = (PODA2 * 0.6 * 0.007315 + PODA1 * 0.00325) * NUMERO_DE_PLANTAS$

$inhojarasca = DELAY(BIOM_HOJAS * 0.2, 5)$

$inraleo = BIOM_HOJAS * DR_ \%_MINIMA * DR_MAXIMA$

SALIDAS:

$desc_hoj = HOJARASCA * 0.25 * tasa_hojarasca$

$MANT_LEÑOSO(t) = MANT_LEÑOSO(t - dt) + (inramas + inraices + introncos - desc_leñ) * dt$

ESTADO INICIAL MANT_LEÑOSO = 0

ENTRADAS:

Inramas =

$BIOM_RAMAS * DR_MAXIMA * DR_ \%_MINIMA + PULSE(PODA2 * 0.009815 * NUMERO_DE_PLANTAS) + PULSE(PODA1 * 0.00278 * 3 * NUMERO_DE_PLANTAS)$

$inraices = BS_FORESTAL * DR_MAXIMA * DR_ \%_MINIMA$

$introncos = BIOM_FUSTE * DR_MAXIMA * DR_ \%_MINIMA * 0.5$

SALIDAS:

$desc_leñ = MANT_LEÑOSO * tasa_leñ$

$BIOM_FUSTE = 10^{(0.9608 + 1.07 * LOG10(DR))}$

BIOM_HOJAS = $10^{(0.4+0.742*\text{LOG10}(\text{DR}))}$ -inpoda

BIOM_RAMAS = $10^{(0.3871+0.991*\text{LOG10}(\text{DR}))}$

BS_FORESTAL = $10^{(0.0403+1.298*\text{LOG10}(\text{DR}))}$

tasa_hojarasca = 0.20

tasa_leñ = 0.05

PODA1 = GRAPH(diam_cuadr)

(8.00, 0.00), (8.25, 0.00), (8.50, 0.00), (8.75, 0.00), (9.00, 0.00), (9.25, 0.00), (9.50, 1.00), (9.75, 0.00), (10.0, 0.00)

PODA2 = GRAPH(diam_cuadr)

(15.0, 0.00), (15.3, 0.00), (15.5, 0.00), (15.8, 0.00), (16.0, 0.00), (16.3, 0.00), (16.5, 0.00), (16.8, 0.00), (17.0, 1.00), (17.3, 0.00),
(17.5, 0.00), (17.8, 0.00), (18.0, 0.00), (18.3, 0.00), (18.5, 0.00), (18.8, 0.00), (19.0, 0.00), (19.3, 0.00), (19.5, 0.00), (19.8, 0.00),
(20.0, 0.00)

5- BALANCE DE CARBONO

BA_ESTEPA = BA_ABROJO+ BA_COIRON+ BA_NENEO

BA_FOREST = BIOM_FUSTE+ BIOM_HOJAS+ BIOM_RAMAS

BS_ESTEPA = BS_ABROJO+ BS_COIRON+ BS_NENEO

BT_ESTEPA = BA_ESTEPA+BS_ESTEPA

BT_FORESTAL = BA_FOREST+BS_FORESTAL

C_ADICIONAL = C_FORESTACION-C_ESTEPA

C_ESTEPA = BT_ESTEPA/2

C_FORESTACION = (BT_FORESTAL+MANTILLO_FOREST)/2

MANTILLO_FOREST = MANT_LEÑOSO + HOJARASCA

ANEXO 4. ANALISIS FINANCIERO DE UNA ROTACION DE PINO PONDEROSA. PLANILLAS DE DATOS Y RESULTADOS

4.1 PRECIOS E INSUMOS DE PRODUCCION

PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE UNA ROTACION DE PINO PONDEROSA VARIABLES DE ENTRADA

15/03/2006

1- PRODUCTIVIDAD

Indice de sitio (altura dominante a los 20 años de eap)

2- COSTOS DE MANEJO

Impuesto al Valor Agregado. Los costos y precios son IVA

Variable	unidad	Plantac	Poda 1	Poda 2	Raleo 1	Raleo 2	Raleo 3	Corta
Tarea por contratista (c) o por administración (a)		c	c	c	c	c	c	c
Costo contratista (plantación y podas, en \$/H) \$/M3		220	550	594	30	35	32	32
Numero de plantas intervenidas	PLT/HA	1100	1,100	660				
Precio plantas	\$/PLT	0.26						
Alimentación al personal	\$/jornal	8.0						
Otras bonificaciones y gastos de personal	\$/jornal	2.0						
Mecanización: poda con serrucho (s) o motosierra (m)								
Necesidades mano de obra calificada	JOR/HA	0.1						
Necesidades mano de obra auxiliar	JOR/HA	3.6						
Porcentaje de reposición	%	15%						
Costo de apeo y trozado (sin m.obra)	\$/M3							
Costos de extracción y acanchado (sin m.obr) \$/M3								
Administración y dirección técnica	%	10%	5%	5%	5%	5%	5%	5%

4- PROTECCION Y MANTENIMIENTO

Protección años 2 a 10	\$/HA-AÑO	10
Protección años 11 al turno	\$/HA-AÑO	10
Costos fijos anuales	\$/HA-AÑO	8

3- TRANSPORTE ROLLIZOS (madera industrial unicamente)

Venta en el campo (c) o puesto en aserradero (a)		a
Distancia	KM	30
Volumen transportado equipo	M3	25
Precio carga y descarga	\$/M3	
Precio transporte	\$/KM	15

4- VALOR DE LA TIERRA

Valor de compra	\$/HA	1500
Valor de venta (a moneda constante)	\$/HA	1500

5- PROMOCION FORESTAL / PROGRAMAS DE EMPLEO

Promoción a la plantación	\$/HA	957
Promoción a la primera poda	\$/HA	150
Promoción al primer raleo	\$/HA	120
Ahorro de jornales en plantación	JOR/HA	
Ahorro de jornales para reposición	JOR/HA	
Ahorro de jornales en primera poda	JOR/HA	
Ahorro de jornales en segunda poda	JOR/HA	
Ahorro de jornales en primer raleo	JOR/HA	
Ahorro de jornales en segundo raleo	JOR/HA	
Ahorro de jornales en tercer raleo	JOR/HA	
Ahorro de jornales en corta final	JOR/HA	

Nota: se considera como ahorro el costo de oportunidad del jornal no pagado por el forestador, incluyendo comida y bonificaciones

5- PRECIOS DE PRODUCTOS

	sin	IVA	10%<	P. Act.	>10%	% precio pond	
Madera industrial selecta	\$/M3	90.00	90	100	110	0.08	7.3
Madera industrial estructural	\$/M3	63.00	63	70	77	0.53	33.2
Madera redonda / pulpable	\$/M3	36.00	36	40	44	0.36	13.0
Leña, varillones y despuntes	\$/M3	0.00	0	0	0	0.03	0.0

Nota: precios de madera rolliza elaborada puesta en planta industrial

100% 53.5

6- TASA DE DESCUENTO	%	6.00%
----------------------	---	-------

7 - COSTOS E INGRESOS POR VENTA DE CERS

	sin	IVA	Periodicidad
Egresos de MDL			
total costo \$/HA	90	1	
total costo \$/HA	15	5	
Costos de registro	\$/HA	15	1 UNICA VEZ, INICIO AÑO 1
Diseño del proyecto, línea base y plan monitc \$/HA		40	1
Validación por EOP	\$/HA	35	1
Verificación y certificación	\$/HA	15	5 CADA 5 AÑOS, INICIO AÑO 5
Ingresos del MDL	precio Net \$/Mg CO2	5.60	10%< P. Act. >10%

4.2 MODELO DE PRODUCCION (IS₂₀=15, 1.100 pl.ha⁻¹)

PRODUCCION Y RENDIMIENTO DE UNA ROTACION DE PINO PONDEROSA

1- PRODUCCION

crecimiento promedio maximo 9.6 m³/ ha - año

crecimiento corriente maximo 14.6 m³/ ha - año

Indice de sitio (altura dominante a los 20 años de eap)

PRODUCCION DE MADERA											PRODUCCION DE CARBONO			
ACTIVIDAD	EDAD	DIAMETRO	ME	VOLUMEN	IMA	C.CORR.	RENDIMIENTO	VOLUMEN DE PRODUCTOS				EDAD	CO ₂	VENTAS
	años	cm		m ³ /ha	m ³ /ha-año	m ³ /ha-año	m ³ /ha	selecta	estruct	redonda	leña	años	ADICIONAL Ac	PERIOD 5
PLANTACION	1											0		
	1					0.0	0.0					5	-0.16	0.00
REPOSICION	2											10	23.19	23.35
	2					0.0						15	44.49	21.30
												20	75.15	30.66
	<i>pre</i>	8	8.9	13.0	1.6	1.6						25	70.56	0.00
1ra PODA	<i>post</i>	9	10.3	18.9								30	84.56	14.00
	<i>pre</i>	15	17.1	76.8	5.1	9.7						35	73.21	0.00
2da PODA	<i>post</i>	16	18.0	89.5								40	79.86	6.65
	<i>pre</i>	21	22.0	162.5	7.7	14.6								0.00
1er RALEC	<i>post</i>	22	25.6	92.7			70	0	28	37	5			0.00
	<i>pre</i>	30	31.8	203.1	6.8	13.8								0.00
2do RALEC	<i>post</i>	31	34.1	99.6			104	0	58	42	3			0.00
	<i>pre</i>	39	40.0	200.3	5.1	12.6								0.00
CORTA	<i>post</i>	39	40.0	0.0			200	30	111	55	3			0.00
		39			9.58		374	30	197	134	12		84.6	20.7
							100%	8%	53%	36%	3%			

4.3 RESULTADOS DEL ANALISIS ECONOMICO

ANALISIS DE RENTABILIDAD FORESTAL

IND.DE SITIO	10	12	14	15	16	18	20	10	12	14	15	16	18	20
--------------	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

VALOR ACTUAL NETO (sin tierra)

CON MANEJO DE PODAS Y RALEOS, produccion de madera unicamente								produccion de madera y venta de carbono							
precios bajos	-441	-334	-248	-184	-160	-99	350	18	174	307	394	426	499	958	
precios medios	-416	-201	18	131	184	303	785	108	377	649	787	848	980	1474	
precios altos	-390	-68	285	445	528	704	1220	199	580	991	1179	1271	1462	1990	
SIN MANEJO DE PODAS Y RALEOS, produccion de madera unicamente								produccion de madera y venta de carbono							
precios bajos	44	113	159	197	212			495	628	778	795	742			
precios medios	155	296	388	464	494			670	881	1089	1141	1096			
precios altos	267	478	616	732	776			845	1134	1399	1488	1450			

RELACION BENEFICIO /COSTO

CON MANEJO DE PODAS Y RALEOS, produccion de madera unicamente								produccion de madera y venta de carbono							
precios bajos	0.71	0.86	0.93	0.95	0.96	0.98	1.08	1.01	1.08	1.08	1.10	1.10	1.10	1.21	
precios medios	0.73	0.92	1.01	1.03	1.04	1.07	1.18	1.06	1.16	1.18	1.19	1.20	1.21	1.33	
precios altos	0.75	0.97	1.08	1.11	1.13	1.15	1.28	1.12	1.24	1.27	1.29	1.30	1.31	1.44	
SIN MANEJO DE PODAS Y RALEOS, produccion de madera unicamente								produccion de madera y venta de carbono							
precios bajos	1.02	1.05	1.06	1.07	1.07			1.28	1.27	1.28	1.25	1.23			
precios medios	1.09	1.13	1.14	1.15	1.16			1.37	1.38	1.39	1.36	1.34			
precios altos	1.15	1.21	1.23	1.24	1.25			1.47	1.48	1.50	1.48	1.45			

TASA INTERNA DE RETORNO

CON MANEJO DE PODAS Y RALEOS, produccion de madera unicamente								produccion de madera y venta de carbono							
precios bajos	-0.12%	1.38%	2.85%	3.59%	3.94%	4.54%	19.10%	6.67%	10.23%	11.32%	12.52%	13.39%	14.02%	23.23%	
precios medios	1.31%	3.79%	6.33%	7.56%	8.14%	9.29%	21.42%	9.16%	12.79%	13.97%	15.13%	16.09%	16.96%	24.68%	
precios altos	2.18%	5.44%	8.53%	10.00%	10.71%	12.19%	22.89%	11.04%	14.56%	15.77%	16.91%	17.92%	18.93%	25.85%	
SIN MANEJO DE PODAS Y RALEOS, produccion de madera unicamente								produccion de madera y venta de carbono							
precios bajos	13.66%	15.15%	15.82%	16.57%	16.86%			17.75%	19.09%	20.23%	20.74%	20.98%			
precios medios	14.57%	16.37%	17.19%	18.15%	18.51%			18.52%	19.96%	21.13%	21.74%	22.05%			
precios altos	15.11%	17.13%	18.05%	19.13%	19.55%			19.21%	20.71%	21.92%	22.59%	22.94%			

