



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales

Cuantificación y utilización de los residuos de cosecha forestal, específicamente de tocones de una plantación de *Eucalyptus nitens* (Dean et Maiden), para la producción de energía renovable, en la Región de Los Ríos.

Patrocinante: Sr. Patricio Carey B.

Trabajo de Titulación presentado como parte de los requisitos para optar al Título de **Ingeniero Forestal**.

ROXANA VALESKA GALLEGOS VIDAL

VALDIVIA
2009

CALIFICACIÓN DEL COMITÉ DE TITULACIÓN

		Nota
Patrocinante:	Sr. Patricio Carey B.	6,6
Informante 1:	Sr. Andrés Iroumé A.	6,1
Informante 2:	Sr. Víctor Sandoval V.	6,06

El Patrocinante acredita que el presente Trabajo de Titulación cumple con los requisitos de contenido y de forma contemplados en el reglamento de Titulación de la Escuela. Del mismo modo, acredita que en el presente documento han sido consideradas las sugerencias y modificaciones propuestas por los demás integrantes del Comité de Titulación.

Sr. Patricio Carey B.

A mis padres
A mi esposo

Agradecimientos:

A mi Universidad por haberme formado

A mis profesores por haberme guiado

A mis amigos: Ángela, Caro, Aarón, Naza y Chin-Chin por haberme acompañado en momentos tan importantes de mi vida

A Víctor, mi amado esposo por acompañarme y apoyarme siempre

A mis padres, por ser los pilares de mi vida

A Dios por ser mi guía

INDICE DE MATERIAS

		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	MARCO TEÓRICO	3
2.1	Problemática mundial	3
2.2	Energía renovable	6
2.2.1	<i>Biocombustibles</i>	6
2.2.2	<i>Biomasa</i>	7
2.3	Estudios de biomasa	9
2.3.1	<i>Modelos para estimar biomasa</i>	10
2.3.2	Modelos para determinar biomasa	12
2.3.3	<i>Modelos para determinar biomasa a partir de datos preexistentes</i>	13
2.4	Energía calórica de la biomasa	14
3	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	17
3.1	Área de estudio	17
3.1.1	<i>Antecedentes legales</i>	17
3.1.2	<i>Ubicación y accesibilidad</i>	17
3.1.3	<i>Clima</i>	17
3.1.4	<i>Tipos de suelos y consideraciones topográficas</i>	18
3.1.5	<i>Uso potencial del suelo</i>	18
3.2	Captura de información	18
3.2.1	<i>Selección de unidades de estudio</i>	18
3.2.2	<i>Mediciones realizadas</i>	20
3.2.3	<i>Elección de árboles a analizar</i>	20
3.2.4	<i>Extracción de la raíz</i>	23
3.2.5	<i>Medición y pesado de la raíz</i>	23
3.3	Análisis de información	25
3.3.1	<i>Determinación del contenido de humedad</i>	25
3.3.2	<i>Ajustes de modelos de biomasa de raíz</i>	26
3.3.3	<i>Selección de modelos. Validación</i>	27
3.3.4	<i>Poder calorífico utilizable en la biomasa</i>	29
4	RESULTADOS	30
4.1	Características dasométricas del rodal por sector	30
4.2	Cuantificación de peso de tocones	30

4.3	Contenido de humedad	31
4.4	Variación de peso según clase diamétrica	32
4.5	Ajustes de funciones de biomasa	33
4.6	Potencial de biomasa de desechos forestales en Chile	36
4.7	Determinación de energía calórica	37
4.7.1	<i>Energía calórica por tonelada</i>	37
4.7.2	<i>Energía calórica por hectárea</i>	38

5	CONCLUSIONES	40
----------	---------------------	-----------

6	BIBLIOGRAFÍA	42
----------	---------------------	-----------

ANEXOS

- 1 Abstract and keywords
- 2 Formulario de terreno
- 3 Tablas de rodal por sector
- 4 Volumen perdido por destronque

INDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1 Poder calorífico utilizable	16
Cuadro 2 Poder calorífico utilizable a modificar	29
Cuadro 3 Poder calorífico utilizable modificado.	29
Cuadro 4 Características dasométricas del rodal	30
Cuadro 5 Peso húmedo y seco por sector	30
Cuadro 6 Probabilidad (valor P). Diferencia de peso por sector	31
Cuadro 7 Probabilidad (valor P). Diferencia de peso en las raíces por sector	31
Cuadro 8 Probabilidades (valor P). Diferencias de humedad entre clase diamétrica	31
Cuadro 9 Ajuste de las funciones de biomasa	33
Cuadro 10 Validación de ecuaciones	34
Cuadro 11 Disponibilidad total de desechos forestales	37

INDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Países que ratificaron el protocolo de Kyoto	3
Figura 2	Matriz energética mundial	4
Figura 3	Astilladora de Biomasa Chile Ltda.	9
Figura 4	Ubicación del predio San Germán	17
Figura 5	Predio San Germán. Rodal n° 21	19
Figura 6	Forma. Distribución y coordenadas de las parcelas	20
Figura 7	Descubriendo la raíz	21
Figura 8	Área de remoción del suelo	22
Figura 9	Raíz descubierta	22
Figura 10	Remoción de raíz con tractor	23
Figura 11	Sector del tocón a cubicar	24
Figura 12	Medición de la raíz	24
Figura 13	Peso de raíz con romana	24
Figura 14	Muestras de tocón	25
Figura 15	Pesado de muestras	25
Figura 16	Peso húmedo (140%), según clase diamétrica	32
Figura 17	Peso seco según clase diamétrica	33
Figura 18	Relación entre la biomasa estimada y observada	34
Figura 19	Distribución de residuos de la ecuación ajustada Distribución de la biomasa seca para los datos de este estudio	35
Figura 20		35
Figura 21	Biomasa disponible según clase diamétrica	36
Figura 22	Disponibilidad de energía por tonelada de biomasa	38
Figura 23	Disponibilidad de energía por tonelada de biomasa	38

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo principal de este estudio fue responder a la necesidad de información respecto a la cuantificación y utilización de los residuos de una cosecha forestal, específicamente de tocones, de una plantación de *Eucalyptus nitens*, para la producción de energía renovable en la Región de Los Ríos, provincia de Valdivia.

Consecuente al desarrollo del objetivo general se plantearon los siguientes objetivos específicos i) cuantificar el peso de los tocones residuales de una cosecha de *Eucalyptus nitens* en unidades de (ton/ha); ii) ajustar una función de biomasa de tocones, en (ton/ha), relacionada a la categoría diamétrica de los árboles; y iii) determinar el potencial de energía calórica disponible en los tocones de *Eucalyptus nitens* (gigacaloría / tonelada).

El área de estudio correspondió al predio San Germán, el cual pertenece al Centro Experimental Forestal (CEFOR), dependiente de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile. El sector específico donde se realizó el análisis, corresponde al rodal nº 21 el cual fue plantado el año 1996.

Para la cuantificación de biomasa se obtuvo de forma destructiva la biomasa de tocones de 20 individuos de *Eucalyptus nitens*. Se estableció las diferencias entre clases diamétricas y se ajustaron funciones de biomasa general y funciones específicas para raíces. Para la determinación de bioenergía disponible se utilizó como referencia datos de la Unidad de Desarrollo Tecnológico de Chile (UDT).

Como resultado se obtuvo que el modelo que se ajustó de mejor forma a las condiciones de este estudio es $\ln B = B_0 + B_1 \ln DAP + B_2 \ln H$, el cual había sido utilizado anteriormente por Elliot y Clinton (2003). Este modelo mostró un alto índice de ajuste y validación ($R^2 > 0,73$; RMSE < 15%; DIFA = 10%).

La biomasa disponible de tocones estimada por hectárea es de 47 toneladas en promedio con un contenido de humedad en base seca de 140%, lo cual equivale a 20 toneladas de biomasa seca por hectárea.

En cuanto a la energía disponible por tonelada de biomasa con un contenido de humedad de 140% (biomasa recién extraída) solo alcanza los 0,6 gigacaloría, sin embargo en el caso de invertir en un proceso de secado el máximo potencial de energía por tonelada de biomasa seca alcanza los 3,5 gigacalorías.

Palabras claves: tocón, raíz, biomasa, bioenergía, *Eucalyptus nitens*

1. INTRODUCCIÓN

La actual preocupación medioambiental y la creciente necesidad de energía en las sociedades obligan cada vez más a la búsqueda de alternativas a las actuales fuentes energéticas cuyo futuro es incierto y limitado. La dependencia del petróleo y del gas está aumentando así como el precio de éstos combustibles fósiles.

De acuerdo al protocolo de Kyoto existe una necesidad urgente de disminuir las emisiones de dióxido de carbono en el mundo. Las dos estrategias principales son promover la utilización de la energía neutralizada del carbón y aumentar la capacidad de captura y almacenamiento de dióxido de carbono de la atmósfera.

El Programa Nacional de Bioenergía busca que el sector forestal del país se fortalezca en el conocimiento de las energías renovables y con ello, se prepare para participar en la búsqueda de alternativas que sustituyan la dependencia actual de los combustibles fósiles, que además sean alternativas más amigables para el medio ambiente y permitan sostener el país.

En esta materia la Empresa Nacional de Petróleo (ENAP) y el Consorcio Maderero S.A. se asociaron para crear ForEnergy, que es una empresa que se dedicará a la producción de biodiésel de segunda generación a partir de los desechos que dejan las cosechas y que hasta el momento no están siendo utilizados.

La utilización de los residuos generados en el bosque para obtener energía, supone un cambio respecto al tradicional tratamiento de los mismos, cambio que se refleja en el costo total de los aprovechamientos silvícolas, produciendo una gran incertidumbre a la hora de valorar este producto.

Por esto, y con el fin de ampliar los conocimientos sobre el manejo de la biomasa forestal en campo, se planteó la realización de una investigación de aprovechamiento de tocones de *Eucalyptus nitens*, teniendo como objetivo su utilización para la obtención de bioenergía.

En este proyecto se plantea la utilización específica de tocones y raíces forestales por sobre el resto de biomasa, ya que está comprobado que la capacidad carburante de la raíz es mayor al resto de biomasa del árbol. Esta característica carburante se debe al menor contenido de humedad.

Es así como nuestro país podría agregar valor a la explotación futura de los bosques si logra concretar proyectos como el que se plantea. Seguramente con el paso de los años, así como reconocemos que Chile es hoy una potencia forestal, agregaremos que nuestro país tendrá en sus bosques un gran potencial para generación de biocombustibles.

Objetivo General

Este estudio pretende responder a la necesidad de información respecto a la cuantificación y utilización de los residuos de una cosecha forestal, específicamente de tocones, de una plantación de *Eucalyptus nitens*, para la producción de energía renovable en la Región de Los Ríos, provincia de Valdivia.

Objetivos específicos

- Cuantificar el peso de los tocones residuales de una cosecha de *Eucalyptus nitens* en unidades de (toneladas /hectárea).
- Ajustar una función de biomasa de tocones, en (ton/ha), relacionada a la categoría diamétrica de los árboles.
- Determinar el potencial de energía calórica disponible en los tocones de *Eucalyptus nitens* (gigacaloría / tonelada).

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Problemática mundial

La contaminación medioambiental y el agotamiento de los combustibles no renovables, son una preocupación a nivel mundial. Para analizar estos problemas se han realizado diversas cumbres y reuniones entre países. El tratado más importante que ha surgido de estas reuniones es el Protocolo de Kyoto (1997), que nace con la finalidad de darle solución a los problemas globales de contaminación y agotamiento de combustibles. El objetivo de este protocolo es reducir en un 5,2% las emisiones de gases de efecto invernadero globales sobre los niveles de 1990 para el período 2008-2012.

Los países industrializados y que producen el mayor porcentaje de CO₂ deben reducir las emisiones de los 6 gases de efecto invernadero de origen humano: CO₂, metano CH₄, óxido nítrico N₂O, además de hidrocarburos HCF.

El Protocolo de Kyoto fue ratificado por la mayoría de los países industrializados, a excepción de Estados Unidos y Australia. En la figura 1 se destacan los países que ratificaron y los que no ratificaron el protocolo de Kyoto.

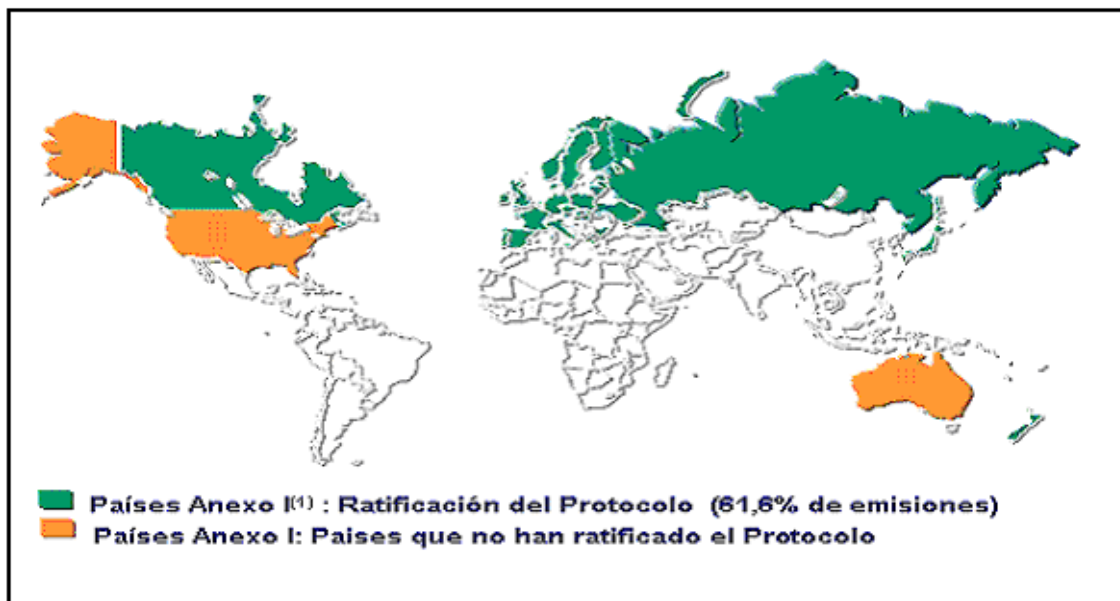


Figura 1. Países que ratificaron el protocolo de Kyoto

En la cumbre del clima realizada en Bali en diciembre 2007, Estados Unidos, que es el principal emisor de gases invernaderos del planeta y que nunca había ratificado Kyoto, al igual que Australia, firmaron un documento que permitirá la continuidad Post – Kyoto más allá del año 2009.

Es importante mencionar además que en los últimos años la demanda por energía primaria ha aumentado notablemente, y se espera que siga con este comportamiento. Estudios recientes¹ indican que el consumo global de energía aumentará en un 52% para el año 2030, considerando como base el consumo de 10723 Mtoep² del año 2003.

Por lo tanto la contaminación y el desabastecimiento de petróleo son problemas globales. Ante esta situación la producción de energía renovable se perfila como la mejor alternativa para los próximos años.

En Chile, Rodrigo Vega, Director Ejecutivo de la Fundación para la Innovación Agraria (FIA), señala que “frente a los altos precios del petróleo y la incertidumbre del abastecimiento del gas argentino, la necesidad de buscar alternativas energéticas se vuelve patente. Considerar otras fuentes de combustibles renovables, entre las que se destacan los biocombustibles, resulta prioritario para reducir nuestra vulnerabilidad energética como país”³.

Los biocombustibles son esencialmente fabricados para ser utilizados en el sector de transporte e industrial, ya que el 98% de la energía utilizada en este sector corresponde a productos derivados del petróleo y actualmente, solo el 1% de los combustibles han sido sustituidos por biocombustibles. Esto se debe principalmente a la gran demanda de petróleo actual y a la baja producción de biocombustibles en el mundo. La matriz energética mundial se muestra en la figura 2.

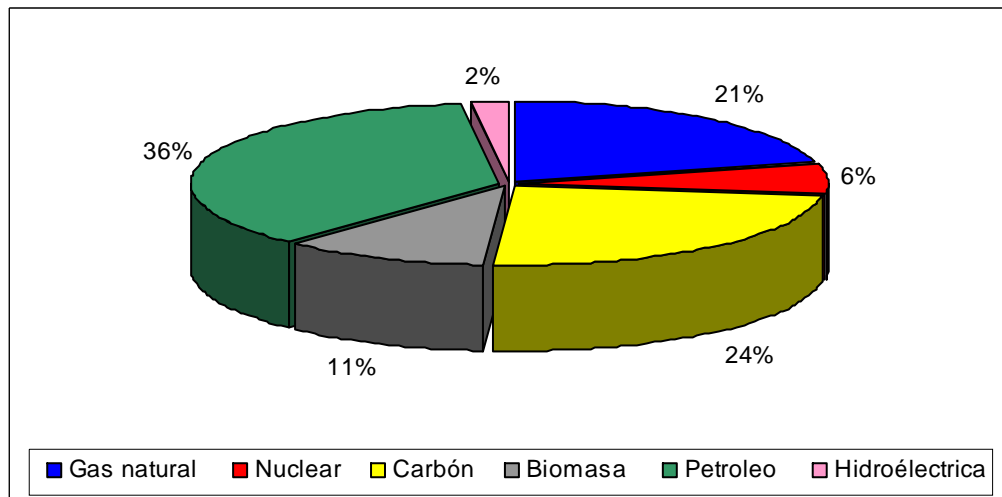


Figura 2. Matriz energética mundial.
Fuente: *World Energy*

¹ World Energy Outlook 2005, IEA (Internacional Energy Agency).

² Mtoep: millones de toneladas de equivalente de petróleo. (Mtoe = 2.52×10^{-8} MBtu).

³ Entrevista a Rodrigo Vega, director ejecutivo de FIA, publicada el 23 de agosto 2006. Revista Lignum.

En los últimos años la producción de biocombustibles en el mundo ha experimentado un fuerte crecimiento, siendo muchos los países y las organizaciones que promueven su fabricación y utilización. Esto es debido principalmente a:

- El aumento del precio del petróleo, producto del agotamiento del hidrocarburo, además de la inestabilidad que sufren los países donde se encuentran las mayores reservas⁴.
- La búsqueda de alternativas que permitan disminuir las emisiones de gases contaminantes especialmente el de CO₂ el cual es producido por la combustión de petróleo y por la deforestación⁵.
- Lograr expandir la matriz energética global y generar nuevas posibilidades de negocio, empleo y contribuir a la reactivación del sector agrícola.

Según el Departamento de Estado de Estados Unidos, actualmente el 90% de los biocombustibles que se producen corresponden a bioetanol, siendo Estados Unidos y Brasil los mayores productores (en conjunto producen más del 80%)⁶.

En cuanto al biodiésel, la producción en el año 2006 ascendió a los 4,4 millones de toneladas, siendo Alemania el mayor productor con una participación del 52% del total de biodiésel producido en la Unión Europea (Barba 2007).

En Sudamérica, Argentina y Colombia tampoco se han quedado atrás. Estos países han establecido un objetivo obligatorio de consumo de 5%, que en el caso de Argentina entrará en vigencia en 2010 y en Colombia el 2009.

En Chile actualmente se está trabajando en la “Ley de Biocarburantes y su reglamento”, que obliga el uso de los biocombustibles para motores vehiculares en mezclas de hasta 5%. Rodrigo Ortega, del Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura (CATA) de la Universidad Federico Santa María, indica que de los cultivos existentes, en el caso del bioetanol, la mejor opción para Chile, desde el punto de vista económico y agrícola, es el maíz; y para el biodiésel, el raps, dos productos que han seguido la tendencia internacional al alza.

Pero a lo anterior se suma que Chile posee pocas tierras disponibles; de hecho, con el alza de los granos se ha desatado una verdadera batalla por ganar los suelos. “Hay una escasez relativa de los terrenos agrícolas cultivables, pero hay que considerar que la gestión de la bioenergía es un proceso dinámico que se está desarrollando todos los días”, dice Guilherme Schuetz, coordinador del Grupo de Biocombustibles de la Oficina Regional de la FAO.

Estudios recientes elaborados por el Programa de Apoyo a la Gestión del Sector Energético del Banco Mundial (ESMAP), indica que a largo plazo la materia prima

⁴ En el sector del golfo Pérsico se encuentran dos tercios de las reservas mundiales

⁵ Problema del calentamiento global.

⁶ Departamento de Estado de Estados Unidos (www.america.gov)

que tiene mayor perspectiva en el tema de los biocombustibles, es la celulosa que proviene de los productos y desechos forestales.

La actividad forestal se encuentra fuertemente desarrollada en nuestro país, por lo tanto el raps, como materia prima para la fabricación de biocombustibles, podría ser reemplazado rápidamente por los productos forestales y específicamente los desechos forestales.

2.2 Energía Renovable

Se denomina energía renovable a la energía que se obtiene de fuentes naturales virtualmente inagotables, unas por la inmensa cantidad de energía que contienen, y otras porque son capaces de regenerarse por medios naturales.

La bioenergía es la energía generada a partir de materias primas de origen biológico y renovable como madera, carbón vegetal, residuos agrícolas, estiércol etc. Una rama de la bioenergía son los biocombustibles y otra es la biomasa que consiste en la producción de energía a partir de desechos agrícolas y forestales. Los principales biocombustibles son: etanol, biodiésel y metano.

2.2.1 Biocombustibles

Los principales biocombustibles son el etanol, biodiésel y metano. Estos biocombustibles se diferencian si provienen de materias primas lignocelulósicas o no.

Etanol: es un alcohol que se produce a través de la fermentación de tres productos principalmente:

- Los azúcares, procedente de vegetales ricos en este componente, como la caña de azúcar y la remolacha.
- Los cereales, de los cuales se extrae el almidón mediante procesos de fermentación.
- La biomasa, materia que se encuentra aun en fases de estudio, por la dificultad de extracción de la glucosa, cabe destacar, que este es el proceso que se observa, como el de mayor futuro para la elaboración de biocombustibles a gran escala, así lo señala la “Internacional Energy Agency”.

Biodiésel: corresponde a un combustible orgánico, el cual se elabora a partir de aceites vegetales o grasas animales, en general se puede realizar a partir de cualquier materia que contenga triglicéridos. Las materias primas de mayor utilización para la fabricación de biodiésel han sido los aceites de semillas oleaginosas, como el raps, la colza, la soja, el aceite de coco y el de palma.

Metano: es un gas que se produce de la descomposición de materia orgánica, fundamentalmente estiércol.

Los combustibles obtenidos de biomasa lignocelulósica, llamados biocombustibles de segunda generación son bioetanol sintético, biodiésel sintético y metano.

En el caso del bioetanol la principal limitación para producirlo a partir de material leñoso es que los azúcares no son viables para la fermentación con bacterias u otros microbios. Sin embargo, existen enzimas celulósicas que pueden descomponer la celulosa en sus unidades de azúcar, por lo tanto, esta puede ser fermentada por microbios y convertida en etanol. Las enzimas para destruir la celulosa se obtienen de hongos (*Trichoderma Reesei*) y de bacterias (*Actiothermus Cellulocyticus*).

El biodiésel de segunda generación corresponde a un diesel que se obtiene a partir de la gasificación de biomasa, proceso en el cual se oxida la madera y se obtiene un gas denominado "gasdesíntesis" (correspondiente a monóxido de carbono e hidrógeno). Éste se transforma en una corriente de hidrocarburos sintéticos en un proceso catalítico denominado Fischer-Tropsch (para la producción de hidrocarburos líquidos). Las características de este combustible son incluso superiores a las del diésel fósil, ya que, además de corresponder a un hidrocarburo, presenta mayoritariamente cadenas lineales y no aromáticas, es decir, es un hidrocarburo parafínico. Entre las propiedades se destaca un alto número de cetano (capacidad de autoignición), lo que mejora su combustión al interior del motor, por lo que se esperan menores emisiones y un potencial aumento del rendimiento⁷.

Según el Director de la Unidad de Energías Renovables de ENAP y Gerente General de ForEnergy, Pedro Barría, el biodiésel de segunda generación, es decir, que proviene de productos lignocelulósicos, presenta notables ventajas frente al biodiésel de primera generación, ya que permite mezclarse sin restricciones con el diésel fósil, tanto en su uso particular como industrial, generando menores emisiones y mayor rendimiento⁸.

Para la utilización de los biocombustibles, el bioetanol puede ser utilizado en mezclas con gasolina (E5% y E10%). Con estos niveles de etanol no se requiere realizar cambios en el motor, pero para mezclas sobre el 10% de etanol se requiere hacerlo. Esta tecnología se encuentra fuertemente desarrollada en Brasil.

El biodiésel puede ser utilizado en mezclas con el diésel o utilizarse directamente sin realizar ningún cambio en el motor (B100, 100% de biodiésel). Este es el caso de países pertenecientes a la Unión Europea, como Alemania y Austria quienes utilizan el biodiésel en forma pura, mientras que países como Francia prefieren utilizarlo como aditivo en mezclas B5.

⁷Cristina Pérez.. 2008. Biocarburantes de 1ª y 2ª generación. El punto de vista de ACCIONA. Publicado el 1 de Octubre 2008. Disponible en www.accionna.es/líneas-de-negocio/energía.

⁸ Entrevista a Pedro Barría, gerente general de ForEnergy, publicada el 22 de Noviembre 2007, en revista Impacto Ambiental.

2.2.2 Biomasa

La biomasa es el producto procedente de la naturaleza que seco tienen un alto poder calorífico y que por tanto puede quemarse. Hay un gran abanico de productos con estas características: las virutas de madera, astillas, huesos de frutas, cáscara de almendra piñón, residuos de poda, etc.

El uso de la biomasa como combustible ha tenido un gran crecimiento a nivel mundial y lentamente se ha ido posicionando en nuestro país. La biomasa significa una gran posibilidad de reemplazo para los combustibles fósiles, sobre todo en el área de calefacción y combustión a nivel industrial.

La biomasa puede ser utilizada directamente como astillas o procesada y convertida en briquetas o pellets. Las briquetas y pellets le dan un valor agregado al producto ya que liberan una mayor cantidad de energía en el proceso de combustión debido a la mayor densidad que presentan, en comparación con las astillas⁹.

Alex Berg, Director de la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción,¹⁰ explica que en la actualidad el sector forestal industrial de Chile es el principal usuario de biomasa como fuente de energía. En particular la industria de celulosa, la cual no sólo cubre sus requerimientos térmicos a través de la combustión del licor negro y desechos madereros, sino que además produce energía eléctrica por medio de centrales de cogeneración para su consumo interno, enviando el excedente al Sistema Interconectado Central (SIC).

Otro ejemplo de la utilización de biomasa como combustibles es la industria de tableros, la cual se abastece de energía a través de calderas alimentadas con biomasa de desechos forestales.

Carlos Bonifetti, Gerente de MFT Ltda., empresa chilena que fabrica calderas de agua caliente para calefacción central a leña y ante-hogares a aserrín, comenta que “la bionergía tiene un nicho potencial en la calefacción central doméstica y distrital, así como en la producción de agua caliente sanitaria, en condominios habitacionales, escuelas rurales e industrias pequeñas y medianas”¹¹.

En cuanto a la disponibilidad actual de biomasa para la combustión Ariel Rojas, Jefe de Proyecto de Ecopellets S.A. comenta que se observa una menor disponibilidad de biomasa para la combustión básicamente aserrín y despuntes de madera provenientes de los procesos de remanufactura. Según Rojas, “esto puede deberse principalmente al aumento de la utilización de subproductos en calderas y secadores de propiedad de los mismos productores de las grandes empresas madereras, producto del aumento en el precio del gas”.

⁹ La Biomasa, el combustible limpio, económico y ecológico. Revisado el 8 de Noviembre 2008. Disponible en <http://www.totsolar.com/biomasa%20web.PDF>

¹⁰ Entrevista a Alex Berg, director de la Unidad de Desarrollo Tecnológico de la Universidad de Concepción, publicado en Marzo 2006, Revista Lignum.

¹¹ Entrevista a Carlos Bonifetti, gerente de MFT Ltda. Publicado en Marzo 2006, Revista Lignum industriales.

Por lo tanto, las empresas forestales muestran un mayor interés por los equipos destinados a la trituración de biomasa, tales como astilladores y chipeadores móviles, principalmente con la idea de poder procesar los restos de las faenas forestales en terreno. Un ejemplo de esto es lo que sucede con la empresa prestadora de servicios forestales “Biomasa Chile Ltda” que a mediados del año 2008 importó los primeros equipos en Sudamérica para la transformación de desechos forestales en pdm (pedazos de madera) susceptibles de ser consumidos eficientemente por calderas industriales (ver figura 3). Actualmente esta empresa está enfocada a desarrollar y masificar la industria nacional y sudamericana de biomasa tendiente al aprovechamiento eficiente y sustentable de recursos dendroenergéticos. Estas astilladoras se abastecen de los residuos forestales incluidos los tocones.



Figura 3. Astilladora de Biomasa Chile Ltda.

2.3 Estudios de biomasa

La biomasa se define como la suma total de la materia viva que se encuentra en un ecosistema en un momento determinado y se expresa en términos de peso seco, masa o volumen (Newbould, 1967 citado por Gayoso *et al.*, 2002).

Según Schlegel *et al.*, (2000) la biomasa forestal se define como el peso (o estimación equivalente) de materia orgánica que existe en un determinado ecosistema forestal por encima y por debajo del suelo. Normalmente es cuantificada en toneladas por hectárea de peso verde o seco. Es frecuente separarla en componentes, donde los más típicos corresponden a la masa del fuste, ramas, hojas, corteza, raíces, hojarasca y madera muerta.

Las mediciones de biomasa surgen de la necesidad de determinar qué porcentaje de un árbol corresponde a biomasa o carbono. Si bien existen métodos que permiten medir directamente los flujos en cortos periodos de tiempo, ello requiere de grandes inversiones y recursos.

La biomasa de la mayoría de los componentes de los árboles aumenta con la edad del rodal. No así la biomasa foliar, la cual según Satoo (1970), sería independiente de la densidad del rodal. Esta se estabiliza con el tiempo y su monto varía más bien con la calidad del sitio y con la especie. Además, los bosques perennifolios presentan mayores valores que los caducifolios.

Los estudios de biomasa a nivel mundial son recurrentes, y utilizan variadas metodologías. Sin embargo, el empleo de funciones de biomasa externas presenta limitaciones, dado que la influencia de las distintas condiciones de suelo, microclima y sitio en general son determinantes en la respuesta de crecimiento de la biomasa. De aquí, la importancia de la realización de estudios locales para conocer la tasa de incremento y cantidad de biomasa que un bosque es capaz de acumular.

En Chile, aunque existen datos relevantes en cuanto a inventarios nacionales, el nivel de información respecto de los montos, funciones de biomasa y contenidos de carbono de las distintas especies y tipos de bosques es escaso o existe sólo para unas pocas especies.

Para conocer la biomasa acumulada en un árbol completo y, como ecosistema bosque, se puede seguir varios métodos. Uno sencillo pero con menor grado de confiabilidad, corresponde a una estimación a partir de información previa, como son por ejemplo las funciones de volumen de fustes a las cuales se le asocia la densidad básica de la madera; información que sólo existe para un número limitado de especies y que además no considera comúnmente la copa y las raíces. Otro, es la utilización de funciones de biomasa asociadas a tablas de rodal que entregan directamente el peso total o de cada componente del árbol. En Chile, especialmente para especies nativas, estas funciones son a veces poco desarrolladas, corresponden a estudios con pocos individuos, presentan insuficiente información de las condiciones y variables de estado, o no cuentan con los estadígrafos mínimos, no siendo aplicables al objeto de la cuantificación del carbono, Gayoso (2002).

Prado y Alarcón (1991) estudiaron la biomasa de *Eucalyptus globulus* en la Región Costera Central. Para la determinación de funciones de biomasa utilizaron una muestra de 41 árboles extraídos de tres parcelas ubicadas en la zona costera de la V Región, en las localidades de Peñuelas, Longotoma y Santa Marta. Estas parcelas no presentaban ningún tipo de manejo y la muestra se distribuyó al azar en las distintas clases diamétricas, pero con una probabilidad proporcional prefijada, de modo de favorecer la selección de árboles de mayor volumen.

Sin embargo, y a pesar de estos estudios de biomasa, aún se carece de información de plantaciones exóticas en otras áreas de Chile, principalmente de la VII región al sur, donde éstas tienen su mayor desarrollo.

2.3.1 Modelos para estimación de la biomasa

Para la estimación de biomasa se utilizan modelos alométricos o regresionales, los cuales consisten en relacionar mediante una ecuación matemática el peso seco de los componentes arbóreos (variable dependiente) con el DAP u otra variable independiente del árbol.

Esta relación se logra a través de un muestreo destructivo de los árboles seleccionados en el rodal o parcela, a quienes se les extraen submuestras que son pesadas y proyectadas a los individuos volteados. Con esta información se ajustan regresiones, las que se aplican a cada uno de los árboles del rodal, obteniéndose la biomasa total como la suma de los pesos secos de los árboles individuales (Teller, 1988).

Para determinar la biomasa, se pueden usar funciones alométricas, siempre y cuando se haya obtenido el peso por componente o total del árbol el cual se relaciona con algunas variables dasométricas. Las variables más usadas son el diámetro a la altura del pecho (DAP), diámetro a la altura del tocón (DAT) y altura total (HT).

Uno de los modelos más sencillos y por lo mismo más utilizados es el siguiente:

$$Y = a * X^b \quad (1)$$

Donde:

- Y = Peso seco
- X = Variable independiente (DAP. Altura del árbol, etc.)
- a, b = Coeficientes regresionales

Esta ecuación se lineariza aplicando logaritmo natural (Ln), resultando:

$$\text{Ln } Y = \text{Ln } a + b * \text{Ln } X \quad (2)$$

La razón de esta preferencia se debe a que este tipo de función:

- expresa una proporcionalidad de los incrementos relativos entre dos partes del árbol;
- en la ecuación 2 una gran variedad de relaciones dimensionales son reducidas a una línea recta ajustada por la ecuación doble logarítmica;
- además, son ampliamente consistentes para distintas formas de crecimiento.

Un estudio realizado por Wang (1999) en el cual ajustó un modelo similar para estimar el peso seco de la biomasa de raíces a partir del DAP. El estudio arrojó como resultado que este tipo de ecuaciones provee un buen balance de precisión en la predicción y se requieren pocos datos al utilizar el DAP. En general este método es más preciso en la estimación de la biomasa total del rodal, debido a que existe una menor sobreestimación respecto a otros métodos. Además otorga mayor facilidad en la utilización de las regresiones y en el análisis de los resultados (Apleggate *et al.*, 1988).

Según Gayoso (2002) “en general las funciones del tipo doble logarítmicas utilizan el DAP como única variable predictora. De acuerdo a Pardé (1980), numerosos autores han logrado el mejor ajuste de puntos experimentales sobre la base de este modelo. Esta ecuación también ha sido utilizada en el género *Nothofagus* en Chile: Pedrasa (1989) en ruil (*N. Alessandrii*); Gómez (1976) en hualo (*N. Glauca*); y en Nueva Zelanda por Schönenberger (1984) en *N. alesandrii*. Los resultados de estos coinciden en que el DAP es la variable independiente que mejor describe la biomasa de fustes y raíces”.

Los modelos alométricos utilizados comúnmente corresponden a las siguientes ecuaciones de regresión, cuya expresión básica es:

Funciones lineales:

$$\begin{aligned}
 Y &= b_0 + b_1 * X_1 \\
 Y &= b_0 + b_1 * X_1 + b_2 * X_2 \\
 Y &= b_0 + b_1 * X_1^2 \\
 Y &= b_0 + b_1 * X_1^2 + b_2 * X_2 \\
 Y &= b_0 + b_1 * X_1^2 + b_2 * X_2^2
 \end{aligned}$$

Funciones logarítmicas:

$$\begin{aligned}
 \text{Log } Y &= b_0 + b_1 * \text{Log } X_1 \\
 \text{Log } Y &= b_0 + b_1 * \text{Log } X_1^2 \\
 \text{Log } Y &= b_0 + b_1 * \text{Log } X_1 + b_2 * \text{Log } X_2^2 \\
 \text{Log } Y &= b_0 + b_1 * \text{Log } (X_1^2 * X_2) \\
 \text{Log } Y &= b_0 + b_1 * \text{Log } X_1 + b_2 * \text{Log } X_2
 \end{aligned}$$

Donde:

Y = Peso seco (madera, corteza, ramas, hojas, biomasa total)
 X_1, X_2 = Variables predictoras
 b_0, b_1, b_2 = Constantes de regresión

2.3.2 Modelos para la determinación de biomasa

La determinación de biomasa en forma directa, es un proceso más complejo y más costoso, pero al mismo tiempo mucho más exacto.

Garcinuño (1995) describe dos técnicas para la medición de biomasa. La primera es la “técnica directa” que consiste en cosechar el total del material vegetal y posteriormente evaluar su peso o volumen, esta técnica proporciona una determinación más exacta de la cantidad de biomasa ya que consiste en voltear y pesar árboles en cada una de las parcelas de muestreo, determinándose posteriormente su peso seco. Adicionalmente, el método permite formular relaciones funcionales entre la biomasa y variables del rodal de fácil medición como edad, área basal, alturas dominantes y otras. La segunda es la “técnica indirecta” que consiste en utilizar el árbol medio del rodal. Con esta técnica los resultados son extrapolados al rodal completo, multiplicando dicho peso el número total de árboles. Este método presenta su mayor aplicabilidad en plantaciones ya que los árboles poseen una misma edad y un tamaño relativamente uniforme. Para ésta técnica es necesario voltear un cierto número de árboles del rodal de área basal media, midiendo su biomasa. La biomasa del rodal se determina multiplicando el número de árboles por hectárea por el valor promedio de biomasa obtenido de la muestra de árboles medios.

Según Satoo (1982), un procedimiento alternativo al del árbol medio, cuando en la parcela no existe el árbol de área basal media, consiste en ubicar individuos de dimensiones cercanas, estimando el peso de la parcela a través de la relación de área basal siguiente:

$$W = w * G/g \quad (3)$$

Donde:

W = Peso de la biomasa en la parcela (t)

w = Suma de los pesos de los árboles muestra (t)

G = Área basal de la parcela (m²)

g = Suma del área basal de los árboles muestra (m²)

2.3.3 Métodos para determinar biomasa a partir de datos preexistentes

Para estimar la biomasa a partir de datos preexistentes existen dos métodos:

- Biomasa a partir de volúmenes preexistentes: se basa en el uso de estimaciones existentes de volumen (vol/ha) que se convierten a densidad de biomasa (ton/ha) a través de diferentes herramientas.

- Biomasa a partir de tablas de rodal: estima directamente la densidad de biomasa utilizando ecuaciones de regresión de biomasa. Estas ecuaciones de regresión son funciones matemáticas que relacionan biomasa seca del árbol (como una función de una dimensión o una combinación de dimensiones de este). Estas ecuaciones de regresión se aplican a tablas de rodal o a árboles individuales.

La estimación de biomasa a partir de tablas de rodal es el método más frecuentemente utilizado en la estimación de la biomasa de rodales.

Otra forma de estimar la biomasa es a través de la aplicación de funciones de regresión a las tablas de rodal. Este método consiste en estimar la biomasa por árbol promedio de cada clase diamétrica (Diámetro altura al pecho, DAP) de la tabla de rodal, multiplicarla por el número de árboles en cada clase diamétrica y finalmente sumarla para obtener la biomasa aérea total por hectárea.

Un factor clave es la elección del árbol del diámetro medio que representa a cada clase diamétrica. Para clases diamétricas bajas (\leq a 10 cm), se utiliza la marca de clase (Brown *et al.*, 1989). El diámetro medio cuadrático de cada clase diamétrica (DMC) es la mejor opción, especialmente para clases diamétricas más amplias.

Si se conoce el área basal por clase diamétrica, se debe usar el DMC de los árboles en cada clase o el DAP de un árbol con el área basal promedio dentro de cada clase diamétrica. Para calcular el DMC, primero se divide el área basal de la cada clase diamétrica por el número de árboles por clase.

Luego:

$$DAP = 2 * \sqrt{\left(\frac{g}{\pi}\right)}$$

(4)

Donde:

DAP = Diámetro a la altura del pecho
 g = Área basal de la clase diamétrica

2.4 Energía calorífica de la biomasa

El poder calorífico es la cantidad de energía que la unidad de masa de materia puede desprender al producirse una reacción química de oxidación. Expresa la energía máxima que puede liberar la unión química entre un combustible y el comburente y es igual a la energía que mantenía unidos los átomos en las moléculas de combustible, menos la energía utilizada en la formación de nuevas moléculas en las materias (generalmente gases) formadas en la combustión.

La magnitud del poder calorífico puede variar según como se mida. Según la forma de medir se utiliza la expresión Poder Calorífico Superior (abreviadamente, PCS) y Poder Calorífico Inferior (abreviadamente, PCI). Se denomina PCI al calor producido sin aprovechar la energía de condensación del agua, y PCS cuando se tiene en cuenta el calor de la condensación.

El poder calorífico de la biomasa depende de la densidad de la madera y de su contenido de humedad. Mientras más densa o dura sea la especie, mayor será la energía que aporte. En tanto, mientras más seco esté el combustible, más calor se obtiene; por el contrario, a mayor humedad, como ocurre con la leña verde o "hualán" se producirá menos energía, menos calor y un mayor nivel de contaminación¹²

EL porcentaje de humedad que posee la biomasa se puede calcular en base seca y en base húmeda, según los requerimientos. Convencionalmente, el contenido de humedad (CH) se define como la relación porcentual del peso del agua contenida en la madera, respecto al peso seco (libre de humedad) de la madera.

El contenido de humedad en base húmeda se puede expresar tanto en decimal como en porcentaje (parte de los componentes del material en relación con el total). En cambio, el contenido de humedad en base seca se utiliza en su mayoría en decimal, puesto que se trata de una relación entre componentes del material. En el comercio y la industria se emplea mayormente el contenido de humedad con base húmeda, mientras que en estudios científicos el contenido de humedad con base seca resulta más adecuado¹³.

Uno de los métodos más utilizados para determinar el porcentaje de CH es el método gravimétrico o por diferencia de peso, que consiste en cortar una muestra de una pieza y pesarla inmediatamente para obtener el peso inicial (Pi) la que luego se coloca en un horno a una temperatura máxima de 105 grados Celsius hasta que se obtiene un peso constante de la muestra, el que corresponde al peso final (Po).

El cuadro 1 presenta los contenidos de humedad de la madera (en base seca y en base húmeda) y el correspondiente poder calorífico que es posible liberar en la etapa de combustión. Además muestra la disminución de la eficiencia térmica de los artefactos de combustión, a medida que la humedad aumenta.

¹² Gobierno de Chile. Comisión Nacional del Medio Ambiente. 2008. Noticias; Llamen a consumidores a informarse sobre la calidad de la leña. Revisado el 3 de Noviembre de 2008. Disponible en http://www.pdatemucopadrelascasas.cl/_web/n_Febrero_08.htm

¹³ Depósitos de Documentos de la FAO. Año no especificado. Principio de secados de grano psicometría higroscopia. Revisado el 8 de Enero 2008. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/X5057S/x5057S03.htm>

Cuadro 1. Poder calorífico utilizable

Humedad de la madera				
% en base seca	% en base húmeda	Poder calorífico inferior (Kcal/Kg)	Eficiencia térmica Base anual (%)	Poder calorífico utilizable (Kcal/Kg)
0	0	4700	77	3619
20	16,7	3810	79	3010
40	28,6	3172	75	2379
60	37,5	2697	71	1915
80	44,4	2329	66	1537
100	50	2029	63	1278

Fuente: Unidad Desarrollo Tecnológico (UDT), Chile

El cuadro anterior expresa los valores para biomasa que ha permanecido al aire libre, ha perdido agua y por lo tanto posee un contenido de humedad menor que el contenido de humedad existente al momento del volteo del árbol, él cual fácilmente puede sobrepasar el 100 % de humedad en base seca.

3. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

3.1 Área de estudio

3.1.1 Antecedentes legales

Este estudio se realizó en el predio San Germán, pertenece al Centro Experimental Forestal (CEFOR), depende de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad Austral de Chile, el rol de esta propiedad es 337-11.

3.1.2 Ubicación y accesibilidad

El predio San Germán se encuentra ubicado en la provincia y comuna de Valdivia, Región de los Ríos, sector Cayumapu, a 15 km de la ciudad de Valdivia, y se localiza entre los 39° 45` 13`` de latitud sur y los 73° 10` 30`` de longitud oeste, (ver figura 4).



Figura 4. Ubicación del Predio San Germán

3.1.3 *Clima*

El clima de la región corresponde a un clima mediterráneo húmedo, caracterizado por precipitaciones que alcanzan promedios anuales de 2.500 mm que fluctúan entre 1.800 y 3.100 mm, y donde el 75% se concentra entre los meses de abril y septiembre (Di Castri y Hajek, 1976).

Los vientos que predominan en la zona son los del norte y oeste. Estos son generalmente los causantes de las precipitaciones, como también daños de volteo y desecamiento a vegetales (Huber, 1970).

Según la clasificación climática de Koeppen el área se encuentra dentro del clima de costa occidental, donde se presentan precipitaciones durante todo el año existiendo un descenso de ellas en los meses estivales. La temperatura media anual es de 11,9°C siendo enero el mes más cálido con 17°C y julio el mes más frío con 7,7°C (Fuenzalida, 1965).

3.1.4 *Tipo de suelo y consideraciones topográficas*

Los suelos del predio pertenecen a la serie los Ulmos, la que se caracteriza por presentar suelos profundos, rojos arcillosos, originados a partir de cenizas volcánicas antiguas depositadas sobre el complejo metamórfico de la costa. Son suelos bien drenados, que se encuentran ubicados en la Cordillera de la Costa de textura superficial franco arcillosa y color pardo rojizo oscuro en matiz 5YR, y textura arcillosa y color rojo amarillento en el matiz 5YR en profundidad, bien estructurado (IREN-CORFO-UACH, 1978).

La topografía se caracteriza por la presencia de cerros y lomajes cortados por quebradas que en algunos casos poseen fuertes pendientes entre 30 y 50%, que limitan la accesibilidad. Se sitúa dentro de la unidad de relieve denominada Cordillera de la Costa, que topográficamente es una cadena montañosa baja de alturas entre 100 y 280 m s.n.m.

3.1.5 *Uso potencial del suelo*

El uso actual del suelo se encuentra entre las categorías IV y VII, donde el IV corresponde a cultivos con limitaciones pronunciadas a forestal intensivo y el uso VII corresponde a forestal con limitaciones. Excepcionalmente se encuentra el uso VIII que corresponde a un suelo sin uso agrícola o forestal de protección.

3.2 Captura de información

3.2.1 *Selección de unidades de estudio.*

El área de estudio o sector específico donde se realizó el análisis, corresponde al rodal nº 21 del predio San Germán, ver figura 5. Plantado el año 1996, con

Eucalyptus nitens a una densidad de 1666 arb/ ha. Este rodal posee una superficie de 18,49 hectáreas, y no presenta podas ni raleos.

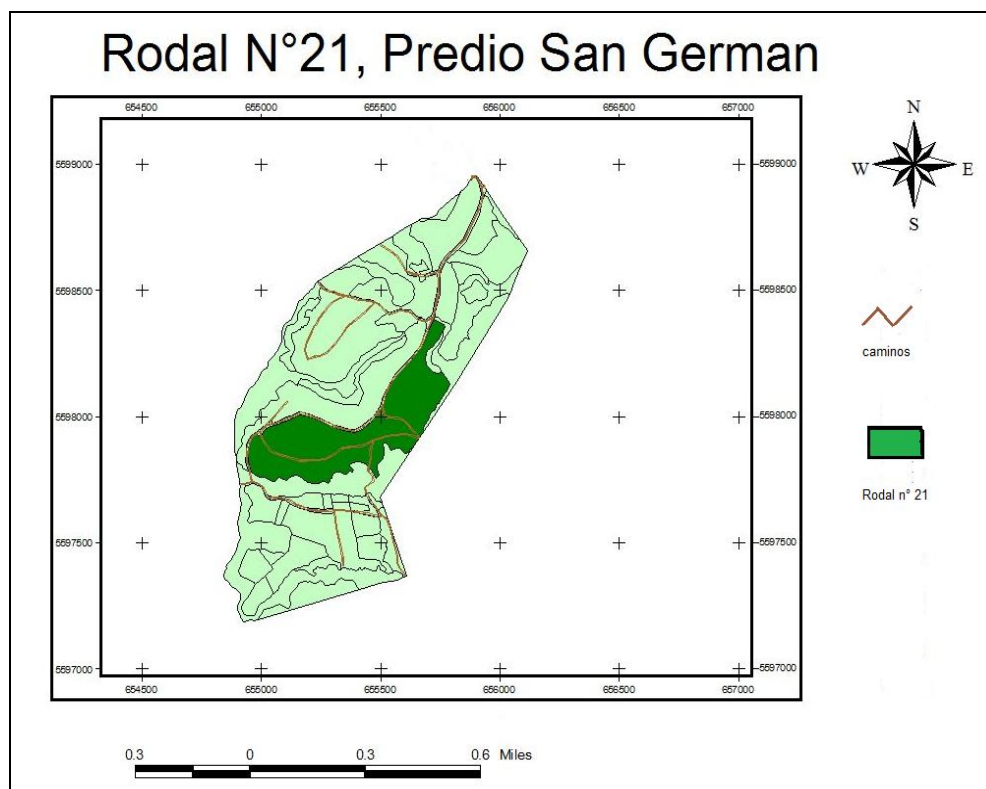


Figura 5. Predio San German, Rodal N° 21

Dentro de este rodal se ubicaron dos sectores con diferentes grados de pendiente, en los cuales se realizaron las mediciones.

El Sector 1 presenta un 12,6% de pendiente en promedio, lo que es considerablemente menor comparado con el 30% de pendiente en promedio que presenta el sector 2. En estos sectores se marcaron 6 parcelas en total, las cuales se distribuyeron en tres parcelas por sector (ver figura 6). La forma de las parcelas es circular y con una superficie de 200 m².

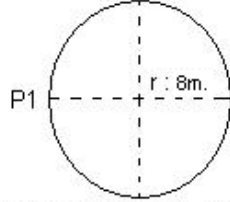
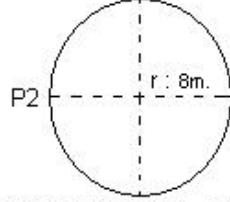
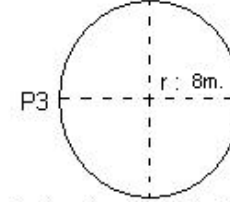
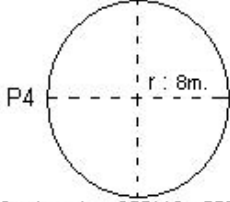
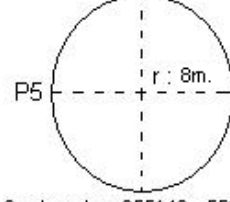
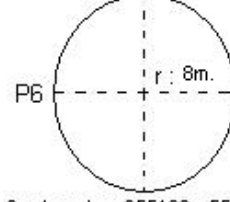
Sector: 1	 <p>P1</p> <p>Cordenadas: 655738 - 5598044 Pendiente: 15%</p>	 <p>P2</p> <p>Cordenadas: 655804 - 5598139 Pendiente: 8%</p>	 <p>P3</p> <p>Cordenadas: 655763 - 5598077 Pendiente: 15%</p>
Sector: 2	 <p>P4</p> <p>Cordenadas: 655118 - 5597853 Pendiente: 25%</p>	 <p>P5</p> <p>Cordenadas: 655142 - 5597817 Pendiente: 30%</p>	 <p>P6</p> <p>Cordenadas: 655139 - 5597844 Pendiente: 35%</p>

Figura 6. Forma, distribución y coordenadas de las parcelas

3.2.2 Mediciones realizadas

Para conocer las características dasométricas de la plantación y del sector en el cual se trabajó se realizaron y registraron las siguientes mediciones (ver anexo 2).

Altura total (m): Se midió con un hipsómetro sunnto la altura de 10 árboles por parcela distribuidos homogéneamente entre el rango total de diámetros que presentan los árboles. Con está información fue posible estimar las alturas de los árboles restantes a través de una regresión lineal.

Altura comienzo de copa (m): Al igual que la altura total, la altura al comienzo de copa se midió con un hipsómetro Sunnto, a los mismos 10 árboles a los cuales se les midió la altura total.

Diámetro a la altura del pecho (cm): El DAP se midió con una forcípula a todos los árboles de la parcela.

Diámetro a la altura de tocón (cm). El DAC se midió a los 10 cm desde la base del tocón a todos los árboles de las parcelas.

Se enumeró y marcó cada árbol con pintura. La marcación se realizó a la altura del DAP, en la zona del árbol que da al centro de la parcela, y en la base del árbol, esto para que cuando el árbol sea volteado, su número de identificación quede en el tocón.

3.2.3 Elección de árboles a analizar

Con los datos obtenidos se realizó una tabla de rodal y existencias para cada sector. Se eligieron y se voltearon 10 árboles de cada sector, estos árboles fueron elegidos tomando las tres clases diamétricas más representativas en cuanto a número de árboles por hectárea, estas clases diamétricas corresponden a la clase de 15, 20 y 25 cm de DAP (ver anexo 3).

Se voltearon 3 árboles de de las dos primeras clases diamétricas. De la clase diamétrica de 25 cm de se voltearon 4 árboles debido a que el mayor porcentaje de individuos del rodal se encuentran en este rango de diámetro.

3.2.4 Extracción de raíz

Para resolver la dificultad operativa y económica que conlleva la extracción de las raíces de los árboles, se utilizó un método de cosecha semi-mecanizado que consiste en la utilización de un tractor agrícola, al cual se acondicionó con una cadena amarrada en su parte trasera.

Para extraer la raíz se trabajó con una cuadrilla de 5 personas, de las cuales 3 realizaron el trabajo de remoción de raíz (ver figura 7), se destinó un trabajador para el limpiado del sector del próximo tocón a extraer y finalmente el conductor del tractor.



Figura 7. Descubriendo la raíz.

Para la extracción de las raíces fue necesario identificar la zona de influencia de raíces. La zona de influencia radicular es variable dependiendo principalmente del tamaño del árbol y concentra más del 90% de la biomasa de raíces. (Schlegel *et al.*, 2000).

Se delimitó el área de trabajo, marcando una circunferencia desde el centro del tocón con un radio de 50 cm lo que permitió la extracción de gran parte de las raíces medias y grandes que son las que interesan para este estudio. El radio de 50 cm varió según el diámetro del árbol y las condiciones del terreno, específicamente la pendiente, ver figura 8.

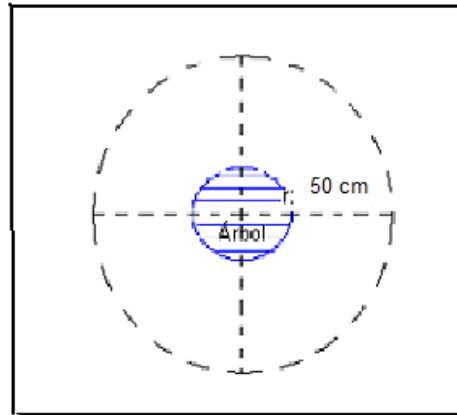


Figura 8. Área de remoción del suelo

Utilizando herramientas como hacha, chuzo y pala, se procedió a cavar un hoyo en la periferia de la zona de trabajo demarcada. Este hoyo se realizó en el sector más bajo de la pendiente para respetar y resguardar todas las raíces medianas y grandes. La profundidad del hoyo fue variable dependiendo de la profundidad de las raíces (ver figura 9). Una vez que la raíz se encontró parcialmente suelta, se procedió a removerla con el tractor.



Figura 9. Raíz descubierta.

La raíz se enganchó por medio de una cadena al tractor (ver figura 10), el cual tiró la raíz hasta soltarla y luego extraerla totalmente del suelo. El tractor tiró en sentido de la pendiente, con el objetivo de facilitar el trabajo de fuerza.



Figura 10. Remoción de raíz con tractor.

En varias oportunidades se desprendió la corteza del borde superior del tocón, lugar donde se enganchó la cadena, por lo que fue necesario enganchar la cadena directamente a las raíces, para así remover completamente el tocón.

Las raíces se dejaron en forma ordenada a orilla del camino para facilitar el limpiado, medición y pesado de ellas. Se limpiaron las raíces sacando el suelo adherido en forma manual, utilizando barretillas.

3.2.5 Medición y pesado de la raíz

Estando la raíz limpia se realizaron las siguientes mediciones:

- Diámetro altura de volteo con y sin corteza.
- Diámetro a los 10 cm de tocón con y sin corteza.
- Largo desde los 10 cm de tocón hasta la altura de volteo, con el fin de cubicar el área que se pierde en caso de destronque, (ver figura 11), (ver anexo 4).
- Largo de la raíz desde los 10 cm de tocón hasta el final de la raíz mayor (ver figura 12)

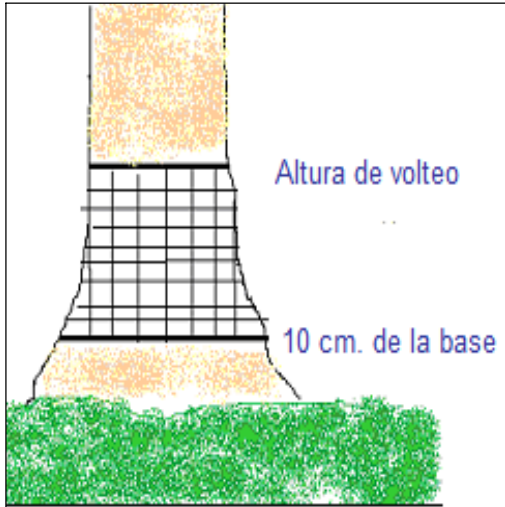


Figura 11. Sector del tocón a cubicar

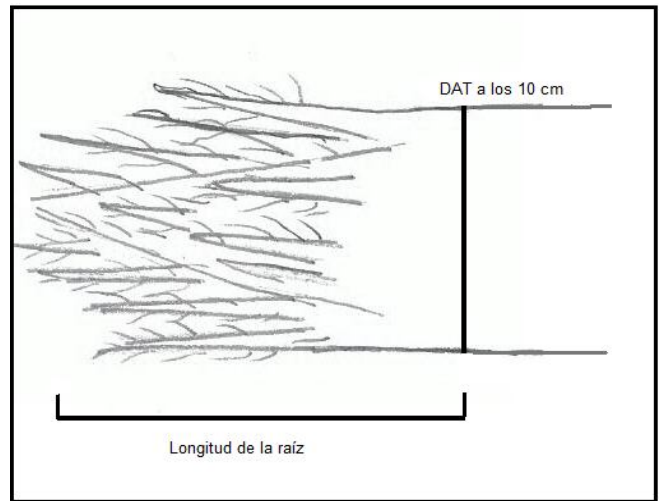


Figura 12. Medición de la raíz

Una vez realizadas las mediciones se cortó el tocón a los 10 cm, para proceder al pesado.

La raíz completa se pesó en terreno para lo cual se utilizó una pesa “romana” electrónica, (ver figura 13)



Figura 13. Peso de raíz con romana

Posteriormente de cada raíz se extrajeron tres tipos de muestras.

- 1^{era}. Muestra: rodela de tocón a los 10 cm.
- 2^{da}. Muestra: submuestra de la raíz Principal.
- 3^{era}. Muestra: submuestra de la raíz secundaria.

Se rotularon las muestras en terreno y se llevaron al Laboratorio de Geotecnia, de la Facultad de Ciencias Forestales, de la Universidad Austral de Chile para ser procesadas y secadas.

3.3 Análisis de información

3.3.1 Determinación del contenido de humedad (%)

Para la determinación del contenido de humedad se utilizó, como referencia la norma chilena NCH176/1-Of1984, utilizando el procedimiento de secado en estufa. Para realizar el ensayo se pesaron todas las muestras, en su estado húmedo (ver figura 14 y 15) y posteriormente fueron secadas a $103 \pm 2^\circ \text{C}$. Pesándolas cada 24 horas hasta que su peso fue constante y alcanzaron el estado anhidro.



Figura 14. Muestras de tocón



Figura 15. Pesado de muestras

Las muestras fueron pesadas nuevamente, para hacer la comparación entre pesos, (peso húmedo y peso seco).

Para la determinación del contenido de humedad en base seca, se utilizó la siguiente ecuación:

$$CH = \frac{(P_{hs} - P_{ss})}{P_s} * 100 \quad (5)$$

Donde:

CH = Contenido de humedad (%)

Phs = Peso humedo de la submuestra (gr)

Pss = Peso seco de la submuestra (gr)

Luego con el contenido de humedad se calculó la proporción del peso total que corresponde a biomasa:

$$B = \frac{Phbt}{1+(CH/100)} \quad (6)$$

Donde:

B = Biomasa

Phbt = Peso humedo de la biomasa total (gr)

CH = contenido de humedad (%)

Con estos datos se determinó el total de biomasa existente y se extrapoló para obtener los datos por hectárea.

3.3.2 Ajuste de modelos de biomasa para raíz

Dado que hay escasa información de funciones para determinar biomasa de tocones, para este estudio se utilizaron tres modelos que han sido utilizadas anteriormente para cálculos de biomasa de *Eucalyptus* sp.

Estos modelos han sido utilizadas para determinar biomasa en general, no específicamente de tocones, a excepción de la Ecuación 8, que fue utilizada por Sierra 2001, para determinar la biomasa de madera y corteza como componente de un árbol y posteriormente fue utilizada por Guerra *et al.*, (2005) para determinar la biomasa de tocones.

Se ajustaron estas tres ecuaciones para tener modelos de comparación y según la validación correspondiente se determinó cual es la que mejor se adapta a los datos que presenta este trabajo. De estas tres ecuaciones, dos son en base a logaritmo natural, que según los estudios realizados anteriormente son las más indicadas en estudio de biomasa.

La ecuación 7 ha sido utilizada por diversos autores entre los que destacan Balboa (2005) y Solla – Gullon *et al.* (2007).

$$B = -8,9995 + 0,036 * D^2 * H \quad (7)$$

Donde B es la biomasa seca en kg, D es el DAP en cm y H la altura total del árbol en metros.

La ecuación 8 fue utilizada por Sierra *et al.* (2001), para la determinación específica de biomasa de tocones (raíces gruesas).

$$\ln BRg = -4,273 + 2,633 * \ln D \quad (8)$$

Donde BRg es la biomasa de raíces gruesas de los árboles en Kg, D es el diámetro a la altura del pecho en cm.

La ecuación 9 ha sido utilizada por Elliot y Clinton (1993), para la determinación de biomasa leñosa.

$$\ln B = B_0 + B_1 \ln DAP + B_2 \ln H \quad (9)$$

Donde B corresponde a biomasa seca en Kg, DAP en cm y H a la altura total del árbol en metros.

3.3.3 Selección de modelos. Validación

Para la validación de los modelos, se siguió la metodología utilizada por Salas (2002). Las variables se seleccionaron en los modelos por regresión y la evaluación de los modelos consideró el coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) que mide el porcentaje de variación total explicado por el modelo de regresión y el error estándar de la estimación ($S_{y,x}$) que indica el tamaño de los residuales. Además se utilizaron las medidas de bondad de predicción que corresponden al error cuadrático medio (RMSE, %) y la sumatoria de las diferencias de los residuales (DIFA, %).

Fueron evaluadas para la totalidad de muestra de ajuste (auto validación) y así como también para rangos de clases de DAP las capacidades predictivas, con el fin de comparar los tres modelos descritos anteriormente. Los estadísticos empleados son los siguientes:

$$R^2 = \frac{\sum (Y_i - \bar{Y})^2}{\sum (Y_i - F)^2} \quad (10)$$

Donde:

Y_i = Variable dependiente observada

\hat{Y}_i = Variable dependiente estimada

\bar{y} = Media aritmética de la variable dependiente observada

$$S_{y,x} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}} \quad (11)$$

Donde:

Y_i = Variable dependiente observada

\hat{Y}_i = Variable dependiente estimada

n = Número de observaciones

p = Número de parámetros

Las medidas de bondad de predicción permitieron evaluar el error y el sesgo probable de los modelos. A través de las medidas de error tal como la raíz del error medio cuadrático (*RMSE*) y la medida de sesgo probable, diferencia agregada (*DIFA*), se logra analizar la predicción de los modelos (Prodan *et al.*, 1997). El valor esperado para *RMSE* es aquel de menor magnitud posible, mientras menor sea el valor, mejor predicción. Un valor negativo de *DIFA* indica sobrestimación y un valor positivo indica subestimación del modelo.

$$RMSE = \sqrt{\sum (o - e)^2 / n}$$

$$RMSE\% = (RMSE * 100) / \hat{O} \quad (12)$$

Donde:

RMSE = raíz del error cuadrático medio

o = observado

e = estimado

n = número de observaciones

\hat{O} = media de valores observados

$$DIFA = \sum (o - e) / n$$

$$DIFA\% = (|DIFA| * 100) / \hat{O} \quad (13)$$

Donde:

DIFA = diferencia agregada

o = observado

e = estimado

n = número de observaciones

\hat{O} = media de valores observados

La elección de la mejor ecuación estimadora de biomasa se efectuó a través de la asignación de puntajes a cada uno de los estadísticos probados. En el caso del DIFA, el mejor ranking (1) fue asignado a la ecuación que presentó el valor más cercano a cero. Posteriormente, se obtuvo la sumatoria de estos puntajes para cada modelo, donde los menores puntajes finales indican ecuaciones más exactas. En caso de que hubiera ecuaciones con el mismo puntaje se optó por la expresión matemática más sencilla.

3.3.4 Poder calorífico utilizable en la biomasa

Para determinar el poder calorífico que es posible liberar en el proceso de combustión con biomasa de tocones en estado húmedo, fue necesario modificar el cuadro original (cuadro 2) y estimar a través de una regresión lineal los valores para un contenido de humedad mayor (140%).

Cuadro 2. Poder calorífico utilizable a modificar

Humedad de la madera		Poder calorífico inferior (Kcal/Kg)	Eficiencia térmica Base anual (%)	Poder calorífico utilizable (Kcal/Kg)
% en base seca	% en base húmeda			
0	0	4700	77	3619
20	16,7	3810	79	3010
40	28,6	3172	75	2379
60	37,5	2697	71	1915
80	44,4	2329	66	1537
100	50	2029	63	1278

Fuente: Unidad de desarrollo Tecnológico (UDT), Chile.

A continuación se presenta el cuadro de poder calorífico modificado, Ver cuadro 3.

Cuadro 3. Poder calorífico utilizable modificado

Humedad de la madera	Poder calorífico inferior (Kcal/Kg)	Eficiencia térmica Base anual (%)	Poder calorífico utilizable (Kcal/Kg)
% en base seca			
0	4700	77	3619
20	3810	79	3010
40	3172	75	2379
60	2697	71	1915
80	2329	66	1537
100	2029	63	1278
120	1296	61	831
140	773	57	657

Fuente: Unidad de desarrollo Tecnológico (UDT), Chile. Modificado

Es importante aclarar que la utilización de la biomasa generalmente se hace posterior a un tiempo de secado al aire libre, para que la madera pierda humedad y aumente la eficiencia en combustión. En ese caso el contenido de humedad será inferior al 100%.

4. RESULTADOS

4.1 Características dasométricas del rodal por sector

Los sectores analizados presentaron diferentes características dasométricas, el sector 1 presentó una mayor cantidad de árboles por hectárea, sin embargo son árboles de diámetros menores, mientras que el sector 2 presenta una menor cantidad de árboles por hectárea pero de un diámetro mayor. Estas características se pueden analizar en el cuadro 4.

Cuadro 4. Características dasométricas del rodal

	Sector 1	Sector 2
N° árboles / ha	1533	1052
G/ha	57,3	45,9
Volumen (m ³ /ha)	599,3	411,2
DMC	21,8	23,6

Estas diferencias dasométricas son importantes para los resultados de cuantificación de peso que se indica más adelante.

4.2 Cuantificación de peso de tocones (ton/ha)

El peso total húmedo y seco de los 2 sectores se presenta en el cuadro 5.

Cuadro 5. Peso húmedo y seco por sector

	Sector 1	Sector 2
Peso húmedo (ton/ha)	51,1	43,8
Peso seco (ton/ha)	21,1	18,7

El sector 1 presenta un mayor peso en toneladas por hectárea debido principalmente al mayor número de árboles por hectárea. El sector 2 presenta una menor cantidad de biomasa de raíces por hectárea, esto se debe a que a pesar de poseer individuos de mayor tamaño presenta un bajo número de árboles por hectárea, que seguramente se debe a un raleo natural que presentó el sector al estar topográficamente en condiciones menos favorables, debido a la mayor pendiente.

Para analizar estadísticamente posibles diferencias significativas de peso de biomasa de raíces por sector, se realizó la prueba t de Student, que arrojó los siguientes resultados, cuadro 6.

Cuadro 6. Probabilidad. Diferencia de peso por sector

	Media peso seco	Probabilidad
Sector 1	7219,2	0,679
Sector 2	6612,5	

Los resultados entregados por esta prueba indican que no existen diferencias significativas de peso seco entre los sectores. Esto se debe seguramente a que, a pesar de que existen diferencias dasométricas entre sectores, el menor diámetro medio cuadrático presentado por los árboles en el sector 1 se compensa con el mayor número de árboles por hectárea que presenta éste mismo sector.

4.3 Contenido de humedad

El contenido de humedad promedio de las raíces de ambos sectores se analizó a través de una comparación de medias con la prueba estadística t de Student. Este análisis se presenta en el cuadro 7.

Cuadro 7. Probabilidad. Diferencia de humedad en las raíces por sector

	Media. CH%	Probabilidad
Sector 1	142,7	0,395
Sector 2	134,3	

La prueba estadística realizada indica que no existen diferencias significativas en el contenido de humedad que presentan las raíces en cada sector.

Debido a que no existen diferencias entre el peso total de biomasa en toneladas por hectárea entre sectores y tampoco en contenido de humedad de las raíces, se analizará de aquí en adelante los sectores como un conglomerado. Es importante destacar que además de no existir diferencias en el peso ni en el contenido de humedad, los sectores pertenecen al mismo rodal, con el mismo año de plantación, especie, manejo silvícola y suelo, por lo tanto estas características reafirman la decisión de analizar de aquí en adelante los datos sin distinción de sectores.

El contenido de humedad de las raíces varió según la clase diamétrica. La menor clase diamétrica analizada correspondiente a 15 cm de DAP presenta el mayor contenido de humedad, el cual disminuye a mediada que se aumenta en la marca de clase, cuadro 8.

Cuadro 8. Probabilidad. Diferencia de humedad entre clases diamétricas

	Clase 15	Clase 20	Clase 25
Clase 15	-	0,051	0
Clase 20	0,051	-	0,261
Clase 25	0	0,261	-

Las mayores diferencias en contenido de humedad se presentan entre las clases diamétricas de 15 y 25 cm, existiendo diferencias significativas entre los contenidos de humedad.

4.4 Variación del peso según la clase diamétrica

Para lograr una estimación de la tendencia que presenta el peso total de la biomasa y el peso seco respecto el diámetro del árbol, se realizó una regresión lineal para estimar los pesos de las clases diamétricas faltantes, que no fueron analizadas con el método destructivo.

La regresión arrojó que el peso de raíces varía según la clase diamétrica, a mayor clase diamétrica mayor cantidad de biomasa de raíces, considerando que la humedad es relativamente constante, ver figura 16.

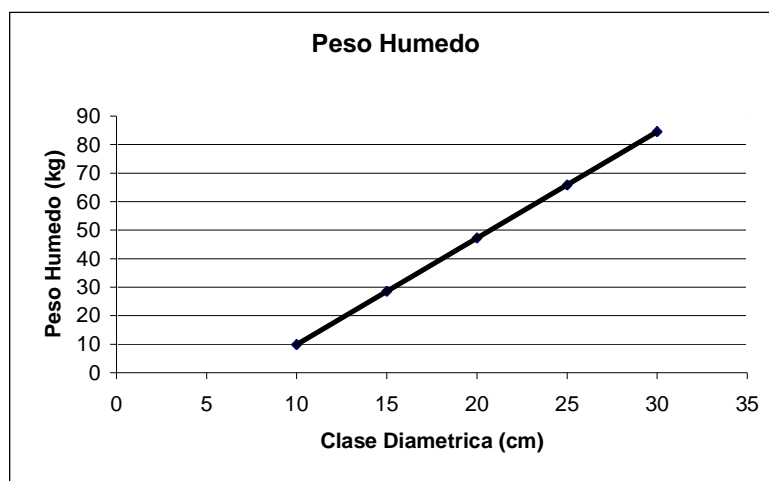


Figura 16. Peso húmedo (140%), según clase diamétrica

La figura 16 indica que la biomasa húmeda, 140% de humedad, tiene relación directa con el diámetro del árbol. Se observa que existen grandes diferencias en la biomasa disponible entre un árbol de 10 cm y uno de 30 cm de DAP. La diferencia en peso que tienen estos tocones varía en más de 70 kg, lo que llevado a hectárea hace una gran diferencia en productividad.

Este dato es muy importante a la hora de decidir y planificar una extracción de biomasa. Es necesario analizar productivamente la extracción de los árboles que pertenecen a las clases diamétricas menores, ya que quizás por su pequeño aporte en biomasa, hace inviable la extracción.

La relación existente entre biomasa seca y la clase diamétrica se observa en la figura 17.

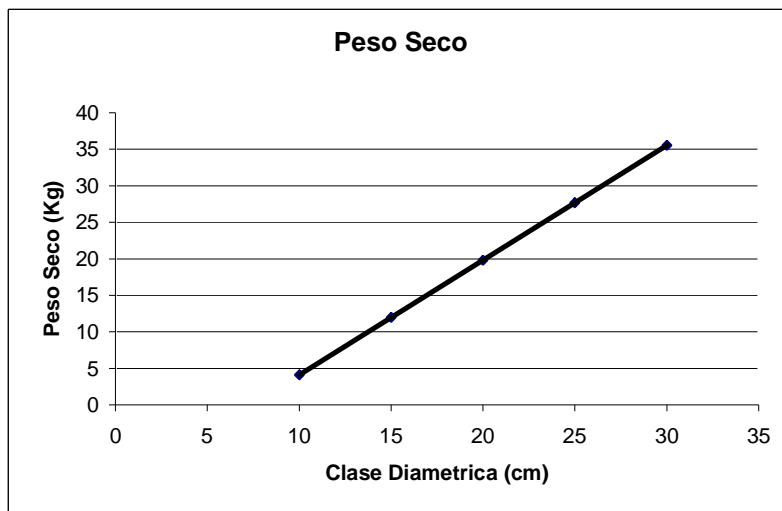


Figura 17. Peso seco según clase diamétrica

En este gráfico se observa una tendencia similar al de biomasa húmeda (figura 16), presentando un mayor peso seco a medida que aumenta la clase diamétrica. También se puede observar la gran diferencia en biomasa de tocones que presentan las clases diamétricas de 10 y 30 cm. Esto ratifica la necesidad de analizar económica y productivamente la viabilidad de extraer tocones pequeños.

La relación biomasa – DAP no debiera variar entre rodales con similares características. Lo que si es un factor importante en la variación de biomasa es el manejo que se le da al rodal, principalmente la densidad de plantación.

4.5 Ajuste de funciones de biomasa de tocones

Los resultados obtenidos al ajustar las funciones de biomasa se presentan el cuadro 9:

Ecuación	Parámetros ajustados		
$B = b_0 + b_1 * DAP^2 * H$	$B_0 = 6,778;$	$b_1 = 0,001$	
$\ln B = b_1 + b_1 * \ln DAP$	$B_0 = - 1,084;$	$b_1 = 1,801$	
$\ln B = b_0 + b_1 * \ln DAP + b_2 * \ln H$	$B_0 = -0,912;$	$b_1 = 1,959;$	$b_2 = - 0,266$

Para optar por el mejor modelo se considerará el coeficiente de correlación, el error cuadrático medio, la diferencia agregada y un análisis de residuos. Según estos es coeficientes el ranking de ecuaciones se observa en el cuadro 10.

Cuadro 10. Validación de ecuaciones

Ecuación	R ² %	RMSE%	DIFA %
(1) $\ln B = -0,912 + 1,959 * \ln \text{DAP} - 0,266 * \ln H$	73	12,4	10
(2) $\ln B = -1,084 + 1,801 * \ln \text{DAP}$	58	12,4	10,2
(3) $B = 6,778 + 0,001 \text{DAP}^2 * H$	49	32,2	26,2

En el cuadro 10 se puede visualizar que las relaciones ajustadas presentan un error cuadrático medio porcentual entre 12 y 32%, que puede considerarse aceptable por las características propias del muestreo y a la estimación de biomasa. Además, un coeficiente de determinación superior a 73% en la ecuación 1. Lo que indica que existe una buena relación lineal entre las variables.

La diferencia agregada porcentual es positiva para todos los componentes, lo que significa una tendencia a subestimar la biomasa total, lo que es preferible en las funciones utilizadas en el área forestal, esto se observa en la figura 18.

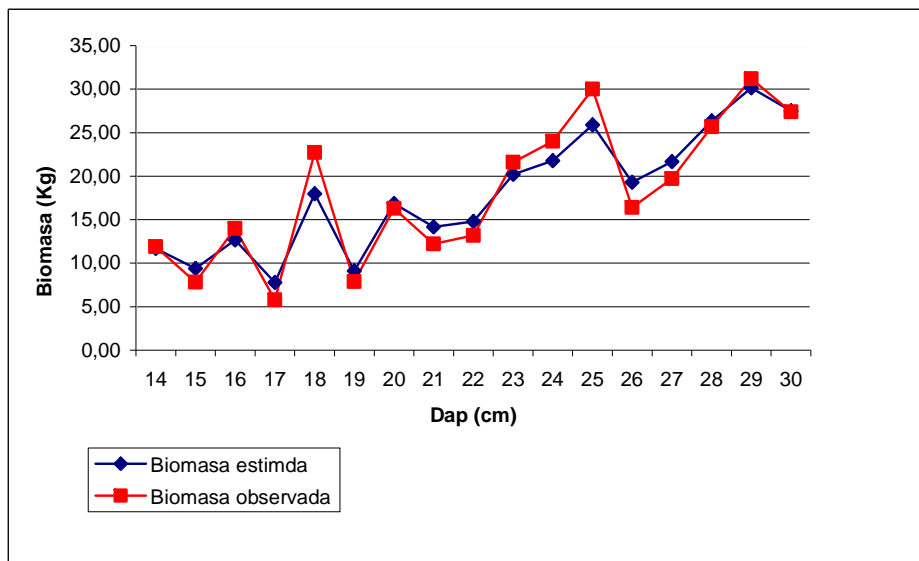


Figura 18. Relación entre la biomasa estimada y observada, por Dap.

Los criterios de validación de los modelo permitieron comprobar la diferencia entre la salida del núcleo estimador (biomasa estimada) y los datos de salida reales (biomasa medida).

El análisis de residuales (diferencia entre el valor estimado y el observado) es considerado como un error aleatorio observado. Con el análisis de residuales se cotejó que las suposiciones del modelo se cumplen.

Se observa que la distribución de residuos de los componentes de peso seco se distribuye homogéneamente entregándole consistencia al modelo, ver figura 19.

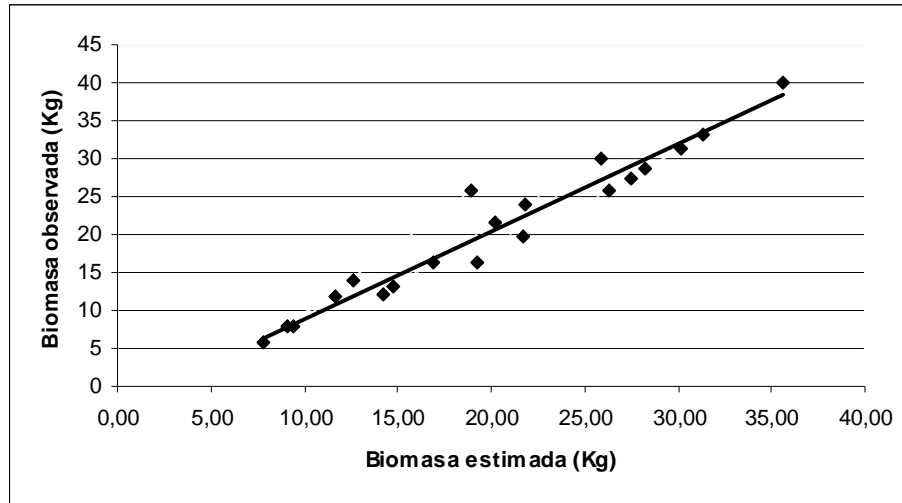


Figura 19. Distribución de residuos de la ecuación ajustada.

Según la distribución de residuos de la ecuación seleccionada, es posible afirmar con un 95% de confianza que no existen diferencias significativas entre los valores reales y los estimados entre los pesos secos totales por los ajustes correspondientes.

Al analizar el conjunto de datos obtenidos en este estudio con la función de biomasa seleccionada, la distribución resultante entre el DAP y la biomasa seca (ton/ha) resulta ser una distribución normal, concentrándose la mayor disponibilidad de biomasa en la clase diamétrica de 25 cm (ver figura 20).

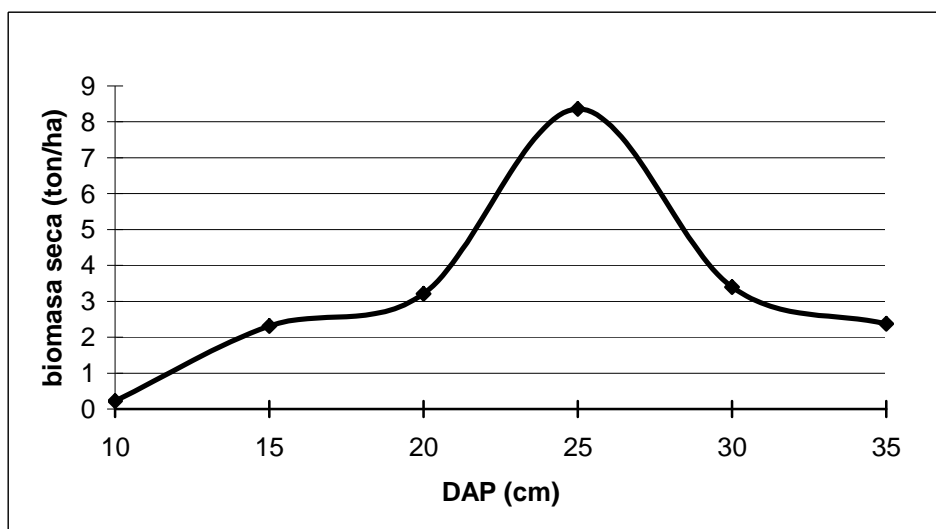


Figura 20. Distribución de la biomasa seca para los datos de éste estudio

Esta distribución se explica principalmente por el número de árboles por hectárea que posee cada clase diamétrica ya que si bien, en las clases diamétricas de 30 y 35 cm se concentran las raíces de mayor tamaño, la frecuencia de participación de estas clases es menor en el rodal. Esta figura además reitera la poca disponibilidad de biomasa en las clases diamétricas menores.

La figura 21, a modo de ejemplo, muestra una aproximación del total de biomasa de tocones en un rodal de *Eucalyptus nitens* con 1300 arb/ha según el diámetro medio cuadrático que el rodal presente.

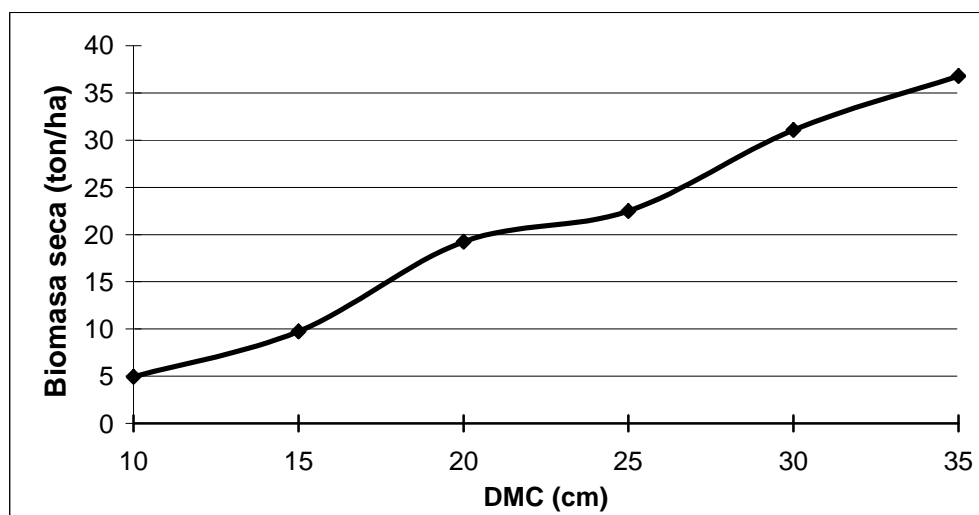


Figura 21. Biomasa disponible por hectárea según DMC.

En esta figura se observa que un rodal con un DMC de 22 cm, como es el caso del rodal en el que se realizó este estudio presenta una disponibilidad de biomasa de tocones de 20 toneladas por hectárea. Se observa también una relación directa entre DMC del rodal y la biomasa de tocón que el rodal posee.

Es necesario tener presente que la disponibilidad de biomasa seca va a depender del número de árboles por hectárea que posee el rodal además de el DMC del mismo.

4.6 Potencial de biomasa de desechos forestales en Chile

El potencial de biomasa en Chile para *Eucalyptus* sp sin considerar la biomasa de tocones, es de aproximadamente 36 toneladas por hectárea, para una plantación de 11 años de edad¹⁴. Esto puede variar según la tecnología de aprovechamiento, el tipo de manejo de la plantación, y la edad de corta.

Los desechos aéreos de cosecha forestal se subdividen en:

- Fuste (2-5%): 2,9 ton/ha
- Ramas (12-15%): 17,4 ton/ha.
- Corteza (11-12%): 15,95 ton/ha

Los datos anteriores están calculados con un 60% de humedad en base seca, por lo tanto la biomasa aérea seca disponible es de 22,5 toneladas por hectárea. Si a estos

¹⁴ Rafael Campino. 2006. Disponibilidad de biomasa en Chile. Seminario de generación de energía con biomasa. Concepción, Chile.

valores de Campino (2006) se le agregan los datos obtenidos en éste estudio en el cual se estimó un total de biomasa seca (subterránea) de desechos forestales de 20 toneladas por hectárea, la disponibilidad total de desechos forestales corresponde a 42,5 toneladas por hectárea. Estos valores se pueden observar en el cuadro 11.

Cuadro 11. Disponibilidad total de desechos forestales

Desechos forestales Subdivisión	Biomasa seca (ton/há)
<i>Aereo</i>	
Fuste	1,8
Ramas	10,8
Corteza	9,9
<i>Subterraneo</i>	
Tocón	20
Total	42,5

4.7 Determinación de energía calórica

4.7.1 Energía calórica por tonelada

La estimación de la disponibilidad de energía renovable por tonelada, calculada según el cuadro de poder calorífico utilizable (cuadro 2), es determinante. La relación que existe entre el contenido de humedad y la disponibilidad de energía es inversamente proporcional, ver figura 22.

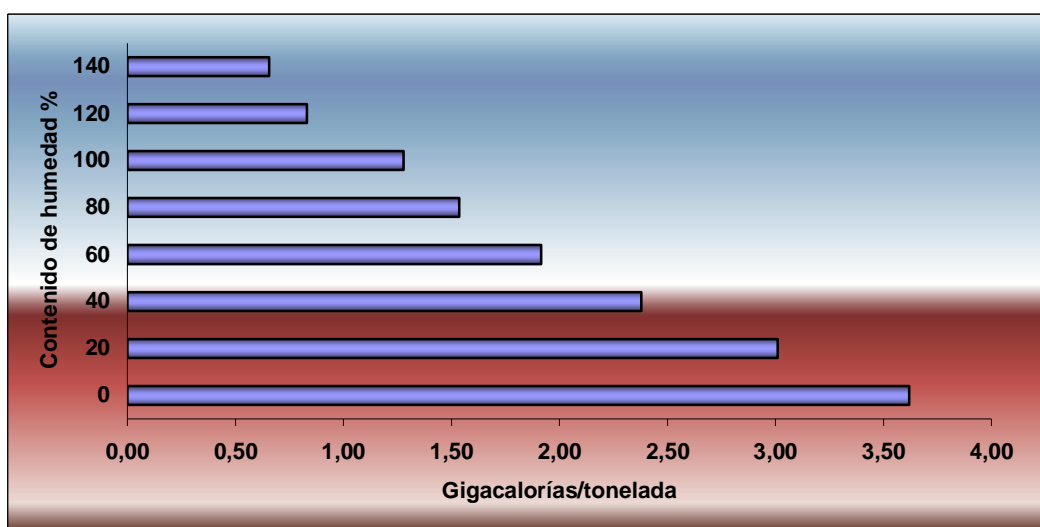


Figura 22. Disponibilidad de energía por tonelada de biomasa. Contenido de humedad en base seca

Si la biomasa se utiliza para combustión en su estado verde, sin esperar un tiempo de secado, la energía que libera este proceso no alcanza a una gigacaloría, lo que es

un valor muy bajo considerando el potencial que se puede lograr, además del esfuerzo que significa extraer los tocones.

Una buena opción en el caso de que la cosecha se realiza en época estival, es dejar secar los tocones al aire libre durante estos meses. De este modo el contenido de humedad descenderá y por defecto la energía liberada en el proceso de combustión aumentará.

Al dejar secar al aire libre los tocones durante un mes, el contenido de humedad de la biomasa disminuirá bajo el 100 % (Insunza 2008)¹⁵, lo que significa un aumento importante en la disponibilidad de energía, pudiendo llegar hasta 1,5 gigacaloría por tonelada de biomasa.

4.7.2 Energía calórica por hectárea

Una aproximación de la energía de biomasa de tocones disponible por hectárea¹⁶ se presenta en la figura 23. Al analizar la disponibilidad de energía por hectárea, la diferencia según el contenido de humedad se ve mayormente reflejada.

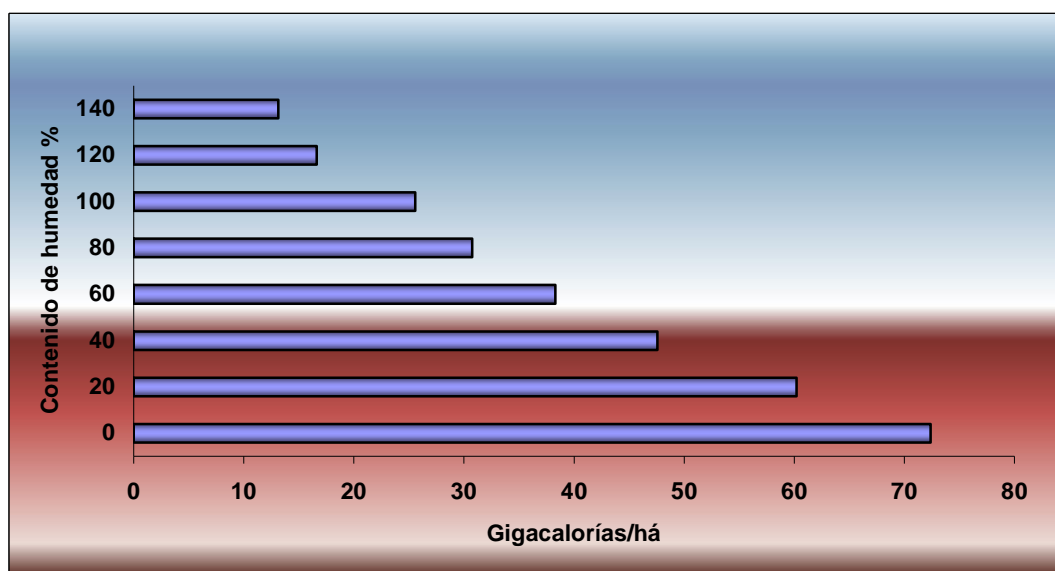


Figura 23. Disponibilidad de energía por hectárea de biomasa. Contenido de humedad en base seca

Eucalyptus nitens al ser una especie de baja densidad, logra reducir su contenido de humedad en base seca al 50% en 90 días al aire libre (Morales *et al.*, 1999). Esta espera de 3 meses de secado al aire libre significa aumentar de 15 a 45 gigacalorías

¹⁵ Luis Insunza, Noviembre 2008. Profesor del Instituto de Tecnología de Productos Forestales. Comunicación personal

¹⁶ Cálculo realizado con el total de biomasa de tocones disponible según éste estudio (20 toneladas de biomasa /hectárea).

por hectárea, lo que significa triplicar el aprovechamiento energético. En el caso de que se invierta en un proceso de secado, la disponibilidad máxima de bioenergía ascenderá a más de 70 gigacalorías por hectárea. Si a lo anterior se le agrega que en Chile actualmente existe un total de 30.000¹⁷ hectáreas plantadas con Eucalyptus sp, el dato de obtener 70 gigacalorías por hectárea toma un valor muy relevante para la matriz energética de nuestro país.

Alcanzar el máximo potencial energético de la biomasa, es un gran desafío, considerando las condiciones climáticas que posee esta región, en la cual es difícil dejar secar por más de tres meses los tocones al aire libre ya que las lluvias sin duda afectan el proceso de secado. Una solución a este problema es almacenar la biomasa en partículas pequeñas (astillas) de este modo se disminuirá el tiempo de almacenaje y secado.

¹⁷ INFOR, 2006.

5. CONCLUSIONES

- En lo referido a la cuantificación de biomasa (ton/ha) por sector, se ha podido identificar que no existen diferencias significativas entre los sectores, descartando la posibilidad de una variación importante en la acumulación de biomasa de raíces, según el grado de pendiente.
- En cuanto al contenido de humedad que presentan las raíces, se puede concluir que existen diferencias significativas entre las clases de 15 y 25 cm de DAP. Las raíces presentan un menor contenido de humedad a medida que se aumenta en el diámetro del árbol.
- Existe una relación directa entre la biomasa de raíz disponible y el DAP del árbol, existiendo una diferencia de 70 Kg en promedio entre un árbol con un DAP de 10 cm y uno de 30 cm.
- Para la estimación de biomasa de tocones, el mejor modelo seleccionado es $\ln B = B_0 + B_1 \ln DAP + B_2 \ln H$ el cual mostró un alto índice de ajustes y validación ($R^2 > 0,73$; RMSE < 15%, DIFA = 10%).
- El total de biomasa húmeda disponible de tocones residuales es de 47 toneladas por hectárea (140% de contenido de humedad), lo que corresponde a 20 toneladas de biomasa anhidra.
- El volumen maderable que se pierde por la actividad de destronque alcanza a 31m³/hectárea. Este es un valor que va a depender de la técnica que se emplee para extraer los tocones.
- La variación existente en la disponibilidad de energía calórica (gigacaloría/tonelada) en la biomasa de tocones es concluyente. Existe una relación inversamente proporcional entre el contenido de humedad y la disponibilidad de energía. Esta diferencia se acentúa aún más cuando se extrapolan los datos (toneladas) a una hectárea.
- Si Chile logra aplicar una logística para recuperación de desechos de plantaciones a valores razonables, se incrementa la posibilidad de utilizar estos desechos forestales para generación de energía eléctrica dentro del país y para exportar, ya sea en forma de astillas o pellets, como combustible para plantas de generación eléctrica en países que necesitan cumplir con el Protocolo de Kyoto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Applegate, G.; D. Gilmour; B. Mohns. 1988. The use of biomass estimations in the management of forests for fuelwood and fodder production. Commonwealth Forestry Association. 67(2): 141-148
- Balboa, M. 2005. Biomasa arbórea y estabilidad nutricional de los sistemas forestales de *Pinus pinaster* Ait., *Eucalyptus globulus* Labill. y *Quercus robur* L. en Galicia. Tesis Doctoral. Universidad de Santiago de Compostela. 244 p.
- Barba, M. 2007. Producción de biodiésel; Una oportunidad para Bolivia. In: Bolivia y la producción de biodiésel. La Paz, Bolivia. Mayo 18 de 2007.
- Brown, S.; A. Gillespie; A. Lugo. 1989. Biomass Estimation Methods for Tropical Forests with Applications to Forest Inventory Data. *Forest Science*. 35(4): 881-902
- Garcinuño, J. L. 1995. Biomasa aérea de plantaciones jóvenes de *Eucalyptus globulus* (Lab.) en la comuna de Corral, Décima Región. Tesis Ing. Forestal. Valdivia. Universidad Austral de Chile. Fac. Sc. Forestales. 76 p.
- Gayoso, J.; J. Gerra; D. Alarcón. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas; Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 157 p.
- Gomez, H. 1976. Estimación de algunos componentes de la biomasa vegetal en *Nothofagus glauca* (Phil) Krasser. Tesis Ing. For. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales. Santiago, Chile. 50 p.
- Morales, F.; M. Pérez; C. Rivera. 1999. Influencia del secado natural sobre los parámetros de eficiencia en la madera para combustible. INTERNET: <http://www.cubasolar.cu/biblioteca/ecosolar/Ecosolar01/HTML/Articulo04.htm> (Diciembre 20, 2008)
- Satoo, T. 1970. Primary production in a plantation of Japanese Larch, *Larix Leptolepis*; A summarized report of JPTF-66 Koiwaii. *Journal of the Japanese Forestry Society*. Pp.154-158
- Satoo, T.; H. Madgwick. 1982. Forest Biomass. *Forestry science*. Mertinus Nijhoff/Junk publishers. London, Boston, The Hague. 152 p.
- Schlegel, B.; J. Gayoso; J. Guerra. 2000. Manual de Procedimientos, muestreo de biomasa forestal; Medición de la capacidad de captura de carbono en bosques de Chile y promoción en el mercado mundial. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile. 26 p.

- Shönenberger, W. 1984. Above ground biomass of Mountain beach *Nothofagus solandri* (Hook.F) Oerst. Var *clifirttioides* (Hook.f) Poole in different stand types near timberline in New Zeland. *Forestry*. 57(1): 59-73
- Sierra, C.; J. del Valle; S. Orrego. 2001. Ecuaciones de biomasa de raíces y sus tasas de acumulación en bosques sucesionales y maduros tropicales de Colombia. In: Simposio Internacional de Medición y Monitoreo de la Captura de Carbono en Ecosistemas Forestales. Valdivia-Chile, 18 al 20 de Octubre del 2001. 16 p.
- Solla – Gullón, F.; P. Mancilla; C. Pérez; P. Álvarez; R. Rodríguez; A. Merino. 2007. Secuestro de carbono en plantaciones de *Eucalyptus* sp establecidas en terrenos agrícolas en el norte de España. Unidad de Gestión Forestal. Escola Politecnica Superior. Luego, España. Pp. 49-57
- Pedrasa, M. 1989. Producción de biomasa y circulación de nutrientes en un rodal de *Nothofagus alessandrii* Espinoza (Ruíl) en la zona de Constitución. Tesis Ing. For. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Santiago, Chile. 112 p.
- Prado, J.; C. Alarcón. 1991. Funciones de biomasa de *Eucalyptus globulus* en la región costera central. *Ciencia e Investigación Forestal*. Infor- Corfo. Santiago, Chile. 5(1): 59-70
- Prodan, M.; R. Peters; F. Cox; P. Real. 1997. *Mensura Forestal*. Deutsche Gesellschaft für technische Zusammenarbeit (GTZ) GmbH, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA). Serie Investigación y Educación en Desarrollo Sostenible. 586 p.
- Teller, A. 1988. Biomass, productivity and wood waste evaluation in a spruce (*Picea abies*) forest (Streinchamps, 1983). *Commonw For. Rev.* 67(2): 129-147
- Wang, J.; H. Dai; N. Yousaf; M. Moussaif; Y. Deng; A. Boufellinga; O. Swamy; M. Leone; H. Riedel. 1999. Above and below -ground biomass and nutrient distribution of a paper birch and subalpine fir mixed species stand in the Sub-Boreal Spruce zone of British Columbia. *Forest Ecology and Management* 130: 17-26

ANEXO

Anexo 1
Abstract and keywords

ABSTRACT

The main objective of this study is to fulfil the need for information regarding the quantification and utilization of the remnants of forestry harvesting, specifically of stumps of a *Eucalyptus nitens* plantation, for the production of renewable energy in Los Ríos Region, Valdivia.

Consistent with the general objective, the specific objectives are as follows, i) to quantify the weight of the remaining stumps after the harvesting of *Eucalyptus nitens* in units of (ton/ha); ii) to adjust the function of biomass of stumps, in (ton/ha), associated to the diametric category of the trees; and iii) to determine the potential of the caloric energy available in the stumps of *Eucalyptus nitens* (gigacalory/ton).

The area of study is in the San German property, which belongs to the Centre for Experimental Forestry (CEFOR), attached to the Faculty of Forestry Sciences of the Universidad Austral de Chile. The specific sector where the analysis was carried out is in the stand of trees # 21 planted in 1966.

For the quantification of biomass, the biomass of 20 *Eucalyptus nitens* stumps was obtained in a destructive way. The difference in diametric classes was established and the functions of general biomass and specific functions for the roots were adjusted. For the determination of available bioenergy, data from the Unit of Technological Development of Chile was used as reference.

As a result. It was concluded that the model that was best adjusted to the conditions of this study is $\ln B = B_0 + B_1 \ln \text{DAP} + B_2 \ln H$, which had been utilized previously by Elliot and Clinton (2003). This model showed a high ratio of adjustment and validation ($R^2 > 0,73$; RMSE < 15%; DIFA = 10%).

The available stumps biomass per hectare is 47 tons average with a humidity content with a dry base of 140%, which is equivalent to 20 tons of dry biomass per hectare.

Regarding the available energy per ton of biomass with a humidity content of 140% (recently extracted biomass) only reaches 0,6 gigacalories. However, in the case of investing in a process of seasoning, the maximum potential of energy per ton of dry biomass reaches 3,5 gigacalories.

Key words: stumps, root, biomass, bioenergy, *Eucalyptus nitens*

Anexo 2
Formulario de terreno

FORMULARIO DE TERRENO

Nombre.....

Fecha.....

Sector.....

Árbol	M.C.(cm)	Diámetro altura de volteo c/corteza (cm)	Diámetro altura de volteo s/corteza (cm)	DAT c/corteza (cm)	DAT s/corteza (cm)	Altura corte de volteo (cm)
1	15					
2	15					
3	15					
4	20					
5	20					
6	20					
7	25					
8	25					
9	25					
10	25					

Registro de peso y longitud de la clase diamétrica de 15 cm.

Raíz	M.C. (cm)	1	Peso total (kg)
	15	2	
	15		
3	15		

Registros de raíz 1

	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 1		
Tocón 1		

Registros raíz 2

	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 2		
Tocón 2		

Registros raíz 3

	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 3		
Tocón 3		

Registro de peso y longitud de la clase diamétrica de 20 cm.

Raíz	M.C. (cm)	Longitud de raíz (cm)	Peso total (kg)
4	20		
5	20		
6	20		

Registros de raíz 4

	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 4		
Tocón 4		

Registros raíz 5

	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 5		
Tocón 5		

Registros raíz 6

	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 6		
Tocón 6		

Registro de peso y longitud de la clase diamétrica de 25 cm

Raíz	M.C. (cm)	Longitud de raíz (cm)	Peso total (kg)
7	25		
8	25		
9	25		
10	25		

Registro raíz 7

7	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 7		
Tocón7		

Registro raíz 8

8	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 8		
Tocón8		

Registro raíz 9

9	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 9		
Tocón9		

Registro raíz 10

10	Muestra 1 (gr)	Muestra 2 (gr)
Raíz 10		
Tocón10		

Anexo 3
Tablas de rodal por sector

Tabla de rodal Sector 1

Rango	M. Clase	N° arb/ parcela	N/ha	Vol. (m3)	Vol.(m3)/ha	Área Basal	G/ha	H prom.	Dat prom.
[08 - 12[	10	5	83	0,28	4,63	0,74	12,32	18,3	13,6
[12 - 18[	15	26	433	3,75	62,57	7,56	125,93	23,7	17,8
[18 - 22[	20	14	233	3,97	66,12	6,84	113,98	28,1	22,7
[22 - 28[	25	35	583	17,41	290,12	26,78	446,30	31,3	28,9
[28 - 32[	30	5	83	3,90	65,02	5,68	94,63	33,1	34,4
[32 - 38]	35	7	117	6,65	110,83	9,70	161,72	33,2	35,5
Totales		92	1533	35,96	599,28	57,29	954,88		

DMC	21,81
------------	--------------

Tabla de rodal Sector 2

Rango	M. Clase	N° arb/ parcela	N/ha	Vol. (m3)	Vol.(m3)/ha	Área Basal	G/ha	H prom.	Dat prom.
[08 - 12[	10	2	34	0,13	2,17	0,301	5,017	21,9	13,5
[12 - 18[	15	11	184	1,8	30,06	3,591	59,85	24,4	18,9
[18 - 22[	20	12	200	2,7	45,01	6,04	100,7	25,9	23,9
[22 - 28[	25	23	384	10,4	173,68	18,54	309	27,2	29,5
[28 - 32[	30	12	200	7,1	118,57	13,18	219,7	27,9	34,3
[32 - 38]	35	3	50	2,5	41,75	4,2	70	28	33,6
Totales		63	1052	24,63	411,24	45,86	764,2		

DMC	23,56
------------	--------------

Anexo 4
Volumen perdido por destronque

Volumen perdido por destronque, sector 1

M.C.	D. Altura volteo c/corteza (cm)	D. Altura volteo s/corteza (cm)	DAT c/corteza (cm)	DAT s/corteza (cm)	Altura corte de volteo (cm)	Diametro jas	altura para regla jas	volumen perdido por arbol
15	18,2	15	21	18	70	18	0,6	0,019
15	16,5	14	18	16	48	16	0,4	0,01
15	18	15,5	21	18	55	16	0,4	0,01
20	21	18	23,5	19,5	43	20	0,4	0,016
20	22,3	19,5	27	25	50	22	0,4	0,019
20	22	20	22	18,5	42	20	0,4	0,016
25	28,9	26,3	33,5	30,5	50	28	0,4	0,031
25	27	25	30	26,5	42	26	0,4	0,027
25	28	26	28	25,3	47	26	0,4	0,027
25	30,5	27	33	29,2	45	30	0,4	0,036

Volumen perdido por destronque, sector 2

M.C.	D. Altura volteo c/corteza (cm)	D. Altura volteo s/corteza (cm)	DAT c/corteza (cm)	DAT s/corteza (cm)	Altura corte de volteo (cm)	Diametro jas	altura para regla jas	volumen perdido por arbol
15	16,1	14,5	19,5	17	62	16	0,6	0,015
15	20,5	15,5	22	18,3	45	20	0,4	0,016
15	15,5	13,8	16,5	14,9	50	14	0,4	0,008
20	20	17,8	25,6	23,5	55	18	0,4	0,013
20	23	21,5	28,3	25	54	22	0,4	0,019
20	22,5	19	25,5	22,5	55	22	0,4	0,019
25	28	23,5	30,5	27,4	45	26	0,4	0,027
25	26,5	22,5	29,2	24,5	46	26	0,4	0,027
25	27,5	23,5	31,5	28,5	48	26	0,4	0,027
25	27	23,5	31,8	28,5	62	26	0,6	0,041

Volumen perdido total (m³/há)

Clase diamétrica	Volumen perdido (m3)/árbol	Número árboles/ha	Vol. perdido (m3/há)
10	0,0097	59	0,57
15	0,0132	308	4,06
20	0,0172	217	3,73
25	0,0304	483	14,68
30	0,0393	142	5,58
35	0,0418	84	3,51
Totales		1293	32,13