



Universidad Austral de Chile

Facultad de Ciencias Forestales y Recursos Naturales

## **Análisis de la situación actual y futura del consumo de biomasa forestal para generación en Chile**

Profesor Patrocinante: Sr. Jorge Gayoso Aguilar

Profesor Copatrocinante: Sr. Víctor Sandoval Vásquez

Tesis de Grado presentada como parte de los requisitos para optar al Título de **Ingeniero Forestal**.

**DAYAN LIZZETT GUTIÉRREZ ARCE**

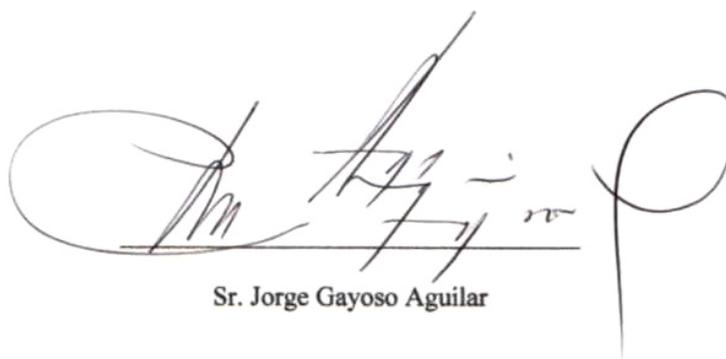
VALDIVIA

2014

## Calificación del Comité de Titulación

	<b>Nota</b>
Patrocinante: Sr. Jorge Gayoso Aguilar	6,2
Copatrocinante: Sr. Víctor Sandoval Vásquez	6,4
Informante: Sr. Francisco Burgos Olavarría	6,9
Informante: Srta. Rayen Catrileo Herrera	7,0

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. Jorge Gayoso Aguilar

## *Agradecimientos*

Es difícil agradecer a las personas que me han apoyado, porque de forma directa o indirecta han estado presentes en esta maratónica tarea de ser mamá, trabajadora y estudiante. Muchas veces sentí que sería imposible, pero aquí estoy, esperando mi ansiado título, que viene a sellar una etapa y reafirmar mi valor como profesional.

Mi mayor gratitud es para con mis hijas, Gabriela y Victoria, que llegaron a darle sentido a mi vida y que transformaron completamente mi mundo. Es por ustedes que día a día intento mejorar, es por ustedes que amo la naturaleza y las cosas simples de la vida. En esta carrera de vida he tenido apoyo de mi familia y amigos, y agradezco sobre todo a aquellos que nos han brindado afecto puro e incondicional, y que me han ayudado con mis hijas. Aquellas personas que les han dado afecto a ellas tienen mi más profundo agradecimiento, cariño y respeto.

Tía María y familia Borneck, para ustedes que son como mi madre y hermanos, me han recibido como una más, me han querido a su modo especial. A mis hermanos de sangre y alma, con los cuales me vine a entender a la perfección en esta hermosa ciudad que es Valdivia: Joaquín y Rose y sus respectivas familias. A mis hermanos Mony, Cheo y José (y familia) en las buenas o las malas. A mis amigos, que se han transformado en mis partners incondicionales y que han estado sobre todo en las malas: Pamela Acevedo, Daniel Antileo, Roxana Ceballos, Catherine Bruce, Paola Gayoso (Q.E.P.D.), Víctor Morales, Patricia Vera, Eugenia Carrasco, Loren Aguilar, Nancy Almonacid (además de sus familias respectivas). A mis vecinos Karina y Haxel, por todo. Si omito a alguno mil disculpas!

Tías y tíos, primos, colegas, amigos animalistas y compañeros todos, sigamos trabajando para ser personas íntegras, trabajemos en pos del desarrollo, en pos de la sustentabilidad y jamás olvidemos de donde vinimos; porque este conocimiento forjará nuestros rumbos y nuestro paso por este planeta.

A mis profesores que se transformaron en colegas y todos aquellos que me apoyaron en mi segunda casa, la Facultad, Francisco Burgos, Felipe Leiva, Verito, Alejandra, María Eugenia, don Carlitos. A todos ellos un cariñoso afecto por todos los momentos gratificantes y ayuda.

Agradezco eternamente la confianza entregada en cada proyecto que trabajé en mi querida Universidad, profesores: Jorge Gayoso, Víctor Sandoval y a mi estimada Rayen. Además agradezco a los profesores y profesionales que me ayudaron a sacar adelante esta ansiada tesis.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS, MEDIDAS Y ACRÓNIMOS

### Términos y Abreviaturas

<b>CER</b>	: Centro de Energías Renovables, Chile
<b>CH%</b>	: Contenido de Humedad
<b>CONAF</b>	: Corporación Nacional Forestal, Chile
<b>CNE</b>	: Comisión Nacional de Energía, Chile
<b>DIA</b>	: Declaración de Impacto Ambiental
<b>EFor</b>	: Empresas Forestales
<b>ERNC</b>	: Energías Renovables no Convencionales.
<b>Eucalipto</b>	: Variedad de <i>Eucalyptus spp.</i> ( <i>E. camaldulensis</i> , <i>E. delegatensis</i> , <i>E. globulus</i> , <i>E. nitens</i> ).
<b>GEI</b>	: Gases Efecto Invernadero
<b>GTZ</b>	: Sociedad Alemana de Cooperación Técnica, hoy GIZ
<b>IM</b>	: Industrias de la Madera
<b>IPCC</b>	: Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático
<b>KE</b>	: (Kilómetros Equivalentes) Distancia por tipo de camino. Se asignan factores por condición del camino; los caminos asfaltados, tienen un factor igual a 1, caminos interiores de tierra o ripiados tienen un factor 1,2 y caminos “de cerro” un factor 1,7. Ponderando estos factores se realiza el cálculo del KE.
<b>MINENERGIA</b>	: Ministerio de Energía, Chile
<b>MP</b>	: Medianos Propietarios
<b>PCI</b>	: Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
<b>PCS</b>	: Poder Calorífico Superior (kcal/kg)
<b>Pino</b>	: <i>Pinus radiata</i>
<b>PP</b>	: Pequeños Propietarios
<b>PPyMP</b>	: Pequeños y Medianos Propietarios
<b>RCA</b>	: Resolución de Calificación Ambiental.
<b>SEIA</b>	: Servicio de Evaluación de Impacto Ambiental, Chile
<b>UACH</b>	: Universidad Austral de Chile
<b>UdeC</b>	: Universidad de Concepción, Chile

## **UNIDADES DE MEDIDA**

<b>BDT</b>	: (Bonne DryTonne) Traducidas al español significa Toneladas Secas de Biomasa.
<b>m<sup>3</sup>s.s.c.</b>	: Metros cúbicos sólidos sin corteza.
<b>m<sup>3</sup>st</b>	: Metros cúbicos estéreos
<b>Ha</b>	: Hectáreas
<b>ha/año</b>	: Hectáreas anuales
<b>MBDT</b>	: Millones de Toneladas Secas
<b>Mha</b>	: Millones de hectáreas
<b>Mm<sup>3</sup>st</b>	: Millones de metros cúbicos estéreos
<b>MWhe</b>	Mega Watt hora eléctrico
<b>MWe</b>	Mega Watt eléctrico
<b>Ton</b>	Peso de biomasa a cierto contenido de humedad

## **Regiones de Chile, área de estudio**

<b>VI</b>	Región del Libertador Bernardo O'Higgins
<b>VII</b>	Región del Maule
<b>VIII</b>	Región del Biobío
<b>IX</b>	Región de la Araucanía
<b>XIV</b>	Región de Los Ríos
<b>X</b>	Región de Los Lagos
<b>RM</b>	Región Metropolitana

## CONTENIDO

	<b>Página</b>
<b>RESUMEN</b>	1
<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	2
<b>2. MARCO TEÓRICO</b>	4
2.1. Bosques y energía en Chile, precios documentados	4
2.2. Energías Renovables (ER) – Biomasa	5
2.3. Cogeneración	6
2.4. Mercado de biomasa forestal en Chile: cadena de abastecimiento	6
2.5. Cadena de abastecimiento de biomasa forestal: Mercado de Finlandia	7
2.6. Actores en el mercado de la biomasa forestal en Finlandia	7
2.6.1. <i>Desarrollo de Tecnología en Finlandia</i>	8
2.6.2. <i>Incentivos en Finlandia</i>	8
<b>3. METODOLOGÍA</b>	9
3.1. Área de Estudio	9
3.2. Catastro de centrales de generación	9
3.3. Levantamiento de información en el área de estudio	10
3.4. Estimación del consumo de biomasa forestal en Chile	10
3.4.1. <i>Estimación de disponibilidad de biomasa de Industrias de la Madera (IM)</i>	12
3.4.2. <i>Estimación de la disponibilidad de fardos de Eucalyptus spp.</i>	13
3.5. Estimación de superficie de aprovechamiento y propiedad de la tierra	13
3.6. Proyección de consumo de biomasa	14
3.7. Caracterización de la cadena de abastecimiento de biomasa	15
3.8. Información del mercado de la biomasa: rendimientos, distancia económica y precios	15
<b>4. RESULTADOS</b>	16
4.1. Descripción de principales actores de la cadena de abastecimiento de biomasa en Chile	16
4.2. Potencia eléctrica con biomasa forestal en Chile	17
4.3. Consumo de biomasa para generación en Chile	17
4.3.1. <i>Desechos de Industrias de la Madera (IM)</i>	18
4.3.2. <i>Volumen de fardos de eucalipto</i>	19
4.3.3. <i>Balance energético consumo/disponibilidad de biomasa forestal</i>	19
4.3.4. <i>Superficie de aprovechamiento necesaria para satisfacer la demanda de energía; desechos de pino</i>	20
4.3.5. <i>Superficie aprovechada de eucalipto para satisfacer la demanda</i>	21
4.3.6. <i>Proyecciones del consumo de biomasa</i>	22
4.4. Cadena de abastecimiento de biomasa forestal en Chile	23
4.4.1. <i>Tipos de contratos</i>	24

4.4.2.	<i>Adquisición de biomasa para generación</i>	25
4.5.	Requerimientos óptimos para aprovechamiento de desechos de cosecha forestal	24
4.6.	Tipos de productos transados y precios	26
4.6.1.	<i>Factores que determinan el precio de la biomasa</i>	29
4.6.2.	<i>Cadena de abastecimiento de biomasa en Chile y comparación con Finlandia</i>	31
<b>5.</b>	<b>DISCUSIÓN</b>	<b>32</b>
5.1.	Actores en la cadena de abastecimiento	32
5.2.	Volumen anual de desechos transados	33
5.3.	Consumo de biomasa para generación actual y potencial	34
5.4.	Cadena de abastecimiento de biomasa forestal en Chile	35
5.5.	Requerimientos óptimos para el aprovechamiento de un predio	33
5.6.	Precios de biomasa forestal	37
5.7.	Desafíos futuros para abastecer la demanda de biomasa	38
5.8.	Comentarios finales	42
<b>6.</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>43</b>
<b>7.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>45</b>

## **ANEXOS**

## RESUMEN

Se analizó la situación actual y futura del consumo de biomasa forestal para generación, en el área de estudio comprendida por las regiones VI, VII, VIII, IX y XIV de Chile, mediante la estimación del consumo actual (año 2013) y futuro (año 2015), con la aprobación de nueve proyectos en evaluación ambiental. Se analiza además la cadena de abastecimiento de biomasa, con información obtenida de 55 entrevistas realizadas a actores del mercado de la biomasa (pequeños y medianos propietarios, empresas forestales, industrias de la madera, intermediarios, transportistas y generadoras). La motivación para realizar este estudio fue la limitada información existente, sobre todo referente a la cadena de abastecimiento.

La biomasa forestal sustenta una potencia de 938 MW para SIC y autoconsumo de generadoras, estas generadoras utilizan biomasa de desechos provenientes de: industrias de la madera (35%), fardos de eucalipto (12%) y desechos de cosecha de pino (53%). Para los dos primeros productos existen barreras de entrada, debido a los convenios y contratos vigentes entre empresas forestales que sustentan a las generadoras e intermediarios. Los desechos de pino provienen del aprovechamiento post-cosecha de predios de medianos propietarios y empresas.

Los pequeños propietarios quedan fuera de la cadena de abastecimiento, pues no cumplen con los requisitos mínimos para el aprovechamiento de sus desechos. Estos requisitos son establecidos por los intermediarios, quienes controlan las utilidades del sistema, pero son las empresas forestales quienes controlan los precios transados. A este sistema se integran los medianos propietarios, quienes no reciben un pago por esta biomasa, pero sí un “ahorro” en el costo de habilitación de los predios.

Actualmente existe disponibilidad de biomasa para abastecer el consumo de las generadoras, utilizando los tres tipos de desechos. Ante la inminente aprobación de nuevos proyectos, este escenario podría cambiar, hacia una escasez y probable aumento en los precios transados. Esta situación impulsará nuevos desafíos al mercado, como la incorporación de biomasa desde otras fuentes (biomasa nativa, y raleos), integrar a pequeños propietarios a la cadena de abastecimiento, masificar la utilización de desechos de eucalipto y aumentar la productividad de las faenas de aprovechamiento.

## 1. INTRODUCCIÓN

El consumo de energía en Chile aumenta anualmente, manteniendo una composición relativamente estable en el tiempo, debido a que los hidrocarburos constituyen el principal grupo energético consumido, generando dependencia energética externa. Las principales fuentes nacionales de ERNC son la energía eólica, solar, mini-hidroeléctrica, biogás y biomasa (CER, 2014). En regiones Centro-Sur, las principales fuentes energéticas son la hidroelectricidad y la biomasa; ésta última ha jugado un rol importante y estable en el consumo energético desde la VI a la X región (Piña, 2007).

La incertidumbre que provoca el aumento de precio del petróleo y el escenario de desabastecimiento de gas, ha evidenciado la necesidad de diversificar fuentes energéticas del país. Por esta razón, Chile ha definido una política de diversificación energética que abre espacios de participación a combustibles alternativos, en conjunto a oportunidades de reducción de emisiones de GEI. Se considera que la energía con biomasa contribuye a mitigar emisiones, desplazando a combustibles fósiles (UdeC, 2011; Bertrán y Morales, 2008, IPCC, 2006).

La biomasa como recurso energético renovable, presenta ventajas en comparación a otras ERNC, debido a la ausencia de variabilidad temporal en la generación; al poseer abastecimiento del recurso se podrá generar a la hora deseada, a diferencia otras ERNC (Bellolio y Karelovic, 2011).

Actualmente en Chile, la biomasa forestal sustenta una potencia de 938 MW (SIC y autoconsumo) (Modificado de LIGNUM, 2014) y se espera aumente a 1.174 MW en dos años con la aprobación de nueve proyectos en SEIA. Bertrán y Morales (2008, actualizado a 2012) obtuvieron que Chile maneja 92 mil ha/año de pino y eucalipto que podrían generar entre 310 y 470 MW de potencia, sin contar con el aporte de biomasa de IM. Pontt (2008) estima que los residuos del manejo forestal tienen un potencial bruto mínimo de 393 MW y máximo de 523 MW y los residuos de industria entre 313 y 912 MW al año 2010. Siendo un mercado tan importante, la información de su funcionamiento no ha sido completamente transparentada ni está disponible en literatura. Parte importante de este negocio está integrado verticalmente a la industria de celulosa, por lo que las señales de precios son simples valores de transferencia acordados, que no siempre reflejan los costos de producción.

Los productos utilizados por las generadoras que funcionan con biomasa son principalmente: desechos de cosecha de pino, fardos de eucalipto y desechos de IM (el presente estudio se enfocará en estos productos). Otros tipos de desechos son mínimamente utilizados.

Según Bellolio y Karelovic (2011) el manejo del bosque nativo otorga otra oportunidad de desarrollo de esta energía<sup>1</sup> para los propietarios del recurso, aunque actualmente no es factible debido a una serie de limitaciones legales, sociales, ecológicas, ambientales y económicas. En conjunto a ello, el mercado de la leña es económicamente más atractivo transversalmente para especies nativas y exóticas. Pontt (2008) estima que el manejo del bosque nativo tendría un potencial mínimo de 2.361 MWe y máximo 4.723 MWe. UACH (2013) plantea un potencial de 2.129 MWe bajo una serie de restricciones.

Se plantean por lo tanto, una serie de interrogantes, ¿cuánta superficie de plantaciones se utiliza para abastecer el mercado energético?, ¿será esta superficie suficiente ante un escenario de aumento de generación?, ¿qué desafíos se plantean al mercado de la biomasa forestal en Chile?

Bajo las circunstancias actuales, las señales del mercado de la dendroenergía no son claras para actores externos, se desconocen: precios, cadena de abastecimiento y nivel de utilización de biomasa actual y futura. El presente trabajo busca acercar el conocimiento del mercado y sus principales características de forma resumida y general. Se aclara que el presente estudio sólo se basa en biomasa para dendroenergía (centrales de generación) no residencial: la leña no es objetivo de análisis.

## **Objetivo General**

Analizar la situación actual y futura del consumo de biomasa forestal para generación en Chile.

## **Objetivos Específicos**

1. Describir a los principales actores en la cadena de abastecimiento de biomasa forestal en Chile.
2. Estimar el volumen de desechos de industrias de la madera, fardos de *Eucalyptus spp.* y desechos de cosecha de *Pinus radiata* que se transan en el mercado de la dendroenergía.
3. Estimar el consumo actual y potencial de biomasa forestal para generación en Chile.
4. Describir la cadena de abastecimiento de biomasa forestal en Chile.
5. Comparar la cadena de abastecimiento de biomasa forestal de Finlandia y Chile
6. Describir los factores que influyen en el aprovechamiento de la biomasa de un predio.
7. Estimar los precios de tipos de biomasa forestal transada
8. Analizar brevemente desafíos futuros para abastecer la demanda de biomasa.

---

<sup>1</sup> El manejo del bosque debe concordar con principios ecológicos y sustentables, asegurando y resguardando la mantención de la biodiversidad, estructura y parámetros forestales que aseguren la recuperación de los bosques post-intervención.

## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. Bosques y energía en Chile, precios documentados

La superficie total del país alcanza 75,6 millones de ha, excluyendo el Territorio Antártico. Un 45,5% de esta superficie tiene aptitud forestal (Bertrán y Morales, 2008; INFOR, 2013). Un 17,4% de superficie corresponde a bosque nativo, 19,3% áreas protegidas y 3,2% a plantaciones forestales, como se muestra en Anexo 1. *Pinus radiata* es la especie plantada que posee mayor superficie (1,47 Mha).

Los bosques considerados productivos son tres: bosques nativos adultos, renovales y plantaciones forestales. Los bosques nativos adultos se encuentran degradados y atomizados debido a la extracción selectiva de leña y los renovales tienden a proveer productos madereros de mayor calidad. Las plantaciones en tanto, proveen la mayoría de la demanda por productos madereros, más del 95% de la materia prima industrial proviene de las plantaciones (Bertrán y Morales 2008 e INFOR, 2013).

Bertrán y Morales (2008, actualizado a 2012), determinaron la viabilidad de desarrollar en Chile el potencial de generación de energía a partir de residuos de manejo de biomasa forestal. Los autores estimaron que la industria forestal en Chile cosecha alrededor de 62 mil ha/año e interviene unas 30 mil con actividades de manejo intermedio, conformando una manipulación total de alrededor de 92 mil ha/año. Estas estadísticas concuerdan con las estadísticas de CONAF (2013) 1998-2012 que en promedio estiman una reforestación de 63 mil ha/año distribuidas en el país; 64% de la reforestación anual corresponde a *Pinus radiata*, 23% a *E. globulus*, 9% *E. nitens* y 5% a otras especies.

Bertrán y Morales (2008) simulan distintos escenarios de abastecimiento por región, teniendo en cuenta la capacidad instalada actual en Chile, estimando un potencial del orden de los 470 MWe de potencia instalable factible como máximo y 310 como mínimo (integrando manejos intermedios a pino y eucalipto), con la distribución por región que se muestra en Anexo 2. Los costos de biomasa (sin realizar pagos por su compra), varió entre 15 y 20 US\$/Ton a distancias entre 30 a 60 kilómetros (años 2007-2008). Los precios sin transporte involucran el costo del acanche y carguío (0,2144 US\$/TM) más el *mulching* o triturado (2,49 US\$/TM), es decir 7,1 US/TM sin transporte.

Pontt (2008) con base en los resultados de Bertrán y Morales (disponibilidad de biomasa de cosecha y manejos intermedios) agregó el aporte de los residuos de IM, estimando que ambos tipos de

desechos podrían abastecer una demanda energética de 712 a 1.450 MW. El autor reconoce la alta dispersión de sus valores, explicados por la concentración geográfica de los desechos.

## **2.2. Energías Renovables (ER) - Biomasa**

La biomasa es una ERNC, debido a su grado de penetración en Chile (CER, 2013). CER (2014) estima que la capacidad instalada de las ERNC alcanza un 7,84% de la potencia total instalada del país (sin autoconsumo). Esta situación contrasta con el potencial de las ERNC del país, poco aprovechado por la baja competitividad económica con respecto a energías convencionales. Según MINENERGIA (2014) la utilización de ERNC reporta una serie de ventajas y desventajas (Anexo 3).

La biomasa es el conjunto de materia orgánica de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma. La energía de biomasa corresponde a toda aquella que puede obtenerse de ella, bien sea a través de su quema directa o procesamiento para conseguir otro tipo de combustible, como el biogás o biocombustibles líquidos (Gómez y Vergara, 2013).

Para el protocolo de Kyoto, la biomasa forestal tiene un factor de emisión igual a cero; su combustión produce agua y CO<sub>2</sub>, pero este último ingresa al flujo de circulación natural a la atmósfera, no representando un incremento en las emisiones. El uso de este combustible contribuye a reducir las emisiones siempre y cuando sustituya a otros combustibles fósiles (MINENERGIA, 2014).

### **Biomasa forestal para generación**

Se define biomasa forestal como la materia orgánica de un ecosistema, por encima y debajo del suelo (Gómez y Vergara, 2013). Se puede clasificar en: biomasa residual de IM y biomasa proveniente del bosque (desechos de cosecha forestal, manejos intermedios y madera desclasificada). Los desechos de cosecha se generan por el aprovechamiento de productos más nobles, como trozas debobinables, aserrables y pulpables (UACH, 2013), hasta un diámetro límite de utilización. Diámetros o calidades menores (y dependiendo de la especie) se utilizan para leña. Lo restante es lo que se transforma en biomasa para generación de energía (diámetros menores, ramas, ramillas y corteza). La producción de leña disminuye el rendimiento de astillas, pero reporta un beneficio económico mayor, pues es de mayor precio y genera ingresos a los pequeños y medianos propietarios<sup>2</sup> para algunas especies.

---

<sup>2</sup> Leña mayormente de *Eucalyptus spp.* Según lo observado en terreno, la leña de *Pinus radiata* se comercializa en menor cantidad, principalmente en formato de astillas (leña en trozos para utilización directa en estufas).

Según CNE-INFOR-GTZ (2007) el volumen de desechos de cosecha constituye una importante fuente de combustible; sin embargo existe un problema de disposición y manejo dada su dispersión espacial y difícil acceso. Para una planta de generación, el abastecimiento de materia prima requiere de logística operacional. Las entregas deben ser confiables y oportunas, la calidad conocida, y los costos suficientemente bajos para hacer de este tipo de biomasa un combustible económicamente competitivo.

### **2.3. Cogeneración**

La cogeneración es la producción conjunta, en proceso secuencial, de energía mecánica o eléctrica y energía térmica útil, a partir de la misma fuente de energía primaria. Normalmente, los sistemas de cogeneración se diseñan para satisfacer la demanda eléctrica, pues la mayor parte de los casos resulta inviable la compraventa de energía térmica a un agente externo. Por el contrario, sí se puede comprar energía eléctrica, e incluso venderla bajo ciertas condiciones (Lozano y Ramos, 2007).

Gómez y Vergara (2013) señalan que la aplicación de cogeneración es factible en la industria forestal agregando rentabilidad. Una fuente de energía se utiliza directamente para electricidad en una primera etapa. Luego, el calor residual, en forma de vapor o gases calientes, se utiliza para el secado de la madera, constituyendo la segunda etapa. Es también utilizado en la industria de celulosa y papel ya que los requerimientos de calor son moderados con temperaturas de 250°C a 600°C.

Los beneficios ambientales derivados de la reducción del consumo de combustibles, además del gran desarrollo tecnológico alcanzado, han hecho de la cogeneración una alternativa altamente atractiva, ya que además proporciona mayor eficiencia en el uso de recursos (Gómez y Vergara, 2013).

### **2.4. Mercado de biomasa forestal en Chile: cadena de abastecimiento**

Actualmente, no fue posible encontrar documentación explícita del funcionamiento o cadena de abastecimiento de biomasa forestal. Sí existe en Chile material que explica y cuantifica la cadena de producción y comercialización de trozas industriales, pulpables y leña. INFOR (2013) documenta la cadena de comercialización de madera en trozas, señalando el destino de las astillas de exportación (Anexo 4). Bertrán y Morales (2008) reconoce que la propiedad de los predios es mayoritariamente de empresas forestales, señalando eventuales dificultades en su aprovechamiento, sin analizar el mercado de la biomasa. Por su parte Pontt (2008) también evidencia la sensibilidad del costo del transporte de acuerdo a la distancia a generadoras, pero tampoco analiza la cadena de abastecimiento.

Bellolio y Karelovic (2011) menciona la inclusión de los desechos de IM a generación mediante la comercialización, pero tampoco analiza la forma en que se produce este traspaso ni el porcentaje disponible para generación.

## **2.5. Cadena de abastecimiento de biomasa forestal: Mercado de Finlandia**

La cadena de abastecimiento de biomasa forestal depende de la particularidad de cada país, como por ejemplo: tipos de energía utilizada, tenencia de la tierra, regulación estatal, entre otros.

En Finlandia alrededor de un 20% de la energía se basa en biomasa y se tiene previsto que al año 2020 este porcentaje aumente al 30% (Snäkin *et al.*, 2010). Dentro de estas cifras se incluye la obtención de energía con pellets de madera (que está en proceso de sustituir al carbón) cuya principal materia prima son los residuos de madera aserrada provenientes de las industrias (Wang *et al.*, 2014).

Para llegar a ser uno de los países líderes en el uso de biomasa, Finlandia superó un proceso de dependencia de petróleo y carbón, debido al aumento sostenido en el precio del petróleo, el cambio climático y disminución de apoyo económico y político a estas energías. Además, los tres objetivos de la política energética (suministro continuo, bajo impacto a la salud y medioambiente y competitividad económica a través del uso eficiente de recursos) han impulsado la energía en base a biomasa, en un país que cuenta con importantes recursos forestales que cumplen un papel importante en su economía.

La biomasa para la generación proviene desde dos principales fuentes: biomasa de operaciones forestales y cosechas finales que proveen aproximadamente un 66% del requerimiento, y los desechos de la IM. La biomasa de IM alimenta a su vez la industria de los pellets de uso doméstico e industrial, dada su baja humedad y homogeneidad (Tromborg *et al.*, 2013).

## **2.6. Actores en el mercado de la biomasa forestal en Finlandia**

La estructura del mercado de la biomasa en Finlandia se observa en el Anexo 5. Tiene IM, de pulpa y papel que generan distintos tipos de residuos utilizados en procesos de combustión (Ericsson *et al.*, 2004). Además utilizan desechos de cosechas de plantaciones, astillados a orillas de camino. También se obtiene de faenas de raleo, cuyos productos finales son biomasa de desechos y leña.

La mayoría de las plantaciones forestales pertenecen a PP y MP, que se agrupan en “sociedades forestales (SF)” y las restantes están administradas por EFor. Las SF han funcionado bien y son una

forma eficiente de distribución de beneficios para propietarios de predios. Las cosechas de estos predios son realizados por empresas intermediarias que poseen alta mecanización, en cambio los raleos son realizados por propietarios mediante uso de motosierras (imposibilidad de operar con maquinaria).

### **2.6.1. Desarrollo de Tecnología en Finlandia**

El desarrollo continuo de tecnología y logística de cosecha se ha traducido en una reducción en costos de producción. Principalmente se reducen costos en el astillado, el cual se produce en bordes de caminos. Otra opción es utilizar enfardadoras para transportar los desechos sin astillar hasta las plantas de generación. En faenas de raleo, la acumulación de biomasa es baja, por lo cual su extracción no es rentable. Sin embargo este manejo es parte de las etapas de una plantación forestal, su utilización como combustible puede considerarse un ingreso extra (Savolainen y Berggren, 2000) y una buena práctica.

### **2.6.2. Incentivos en Finlandia**

En Finlandia, los impuestos han sido una iniciativa importante para aumentar la utilización de energías limpias. Desde la introducción de impuestos sobre productos del petróleo (desde 1970), la dependencia de este hidrocarburo ha ido reduciéndose. Desde entonces el impuesto a los combustibles fósiles ha ido aumentando (Hakkila, 2005). Snäkin *et al.*, 2010 señalan que los biocombustibles están exentos de impuestos, excepto el IVA (Impuesto al Valor Agregado), aumentando con ello el consumo de biomasa, debido a sus menores costos, disminuyendo la utilización de carbón. Se crean planes de acción para promover el uso de astillas de madera como combustible neutro en carbono:

- Biomasa combustible libre de impuesto ecológico (este impuesto sí aplica para derivados del petróleo y carbón).
- Reembolso de una parte del impuesto a la electricidad al producirse con biomasa.
- Subsidio especial a productores que utilicen biomasa de raleos (árboles de pequeño tamaño).
- Ayuda financiera a inversiones de producción de astillas de bosque.
- Apoyo financiero público en Investigación y Desarrollo para proyectos de desarrollo industrial, nuevos productos y tecnologías, aplicaciones prácticas, además de promover su utilización.

### 3. METODOLOGÍA

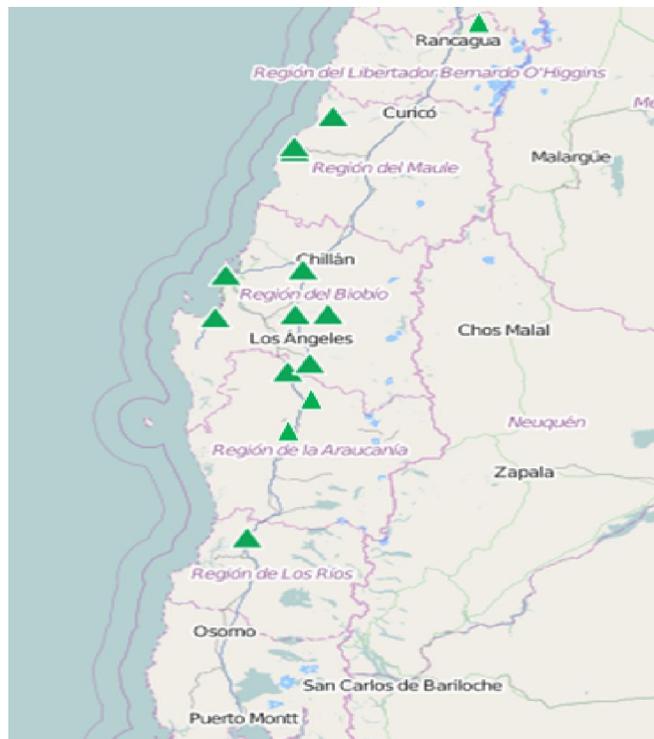
#### 3.1. Área de Estudio

Las plantas que operan con biomasa forestal se ubican entre la VI y XIV regiones, concentrándose en la VIII. Tienden a ubicarse estratégicamente en sectores cercanos al recurso, a caminos principales, cursos de agua, industrias que demanden calor, y al SIC. Por esta razón es posible ubicarlas generalmente en el valle central o sectores costeros. En la Figura 1 se presentan las plantas que actualmente están en operación y que utilizan biomasa forestal como combustible.

#### 3.2. Catastro de centrales de generación

Se identificaron las plantas operando con biomasa en Chile, mediante cruce de información de Central Energía (2012), CDEC (2013) y CER (2013). Se confirmó la información con un profesional de la SEREMI de Energía<sup>3</sup> y se revisaron las DIA por proyecto. Con este material se obtuvo:

- El total de centrales que operan en Chile con biomasa forestal, capacidad instalada y/o ampliación al año 2013 (Figura 1, Anexo 6)



- **Figura 1.** Centrales generando energía con biomasa. Modificado de módulo cartográfico de MINENERGIA.

<sup>3</sup>Comunicación personal con Sr. Hernán Martínez Salamanca, Profesional de la Secretaría Regional Ministerial de Energía, Regiones Maule, Biobío y Araucanía, con el visto bueno de Srta. Carola Venegas Bravo, SEREMI de Energía.

- La generación efectiva del último año (2013) con biomasa forestal
- Las empresas que producen celulosa y tableros (autoconsumo de desechos y licor negro)

### **3.3. Levantamiento de Información en el área de estudio**

Debido la limitada información referente al funcionamiento del mercado de la biomasa en Chile, se decidió realizar un levantamiento de información primaria directamente con los involucrados en la cadena de abastecimiento. Se entrevistó a gran parte de actores en el mercado de la dendroenergía (ver actores en Cuadro 2, Resultados) en un periodo de tres semanas.

Se utilizó la información levantada en un proyecto de carácter privado llevado a cabo por un equipo de la Universidad Austral de Chile, en el cual se realizaron entrevistas a los principales actores del mercado de la biomasa en las regiones VII, VIII y IX, donde se concentra la actividad forestal en Chile. En Anexo 7 se presenta un resumen de las principales preguntas planteadas, número de entrevistados, los objetivos y las limitaciones de obtención de información.

### **3.4. Estimación del consumo de biomasa forestal en Chile**

En esta etapa se reconstruye el consumo de biomasa forestal con base en la potencia instalada (SIC y autoconsumo) en el área de estudio, asumiendo que el consumo no puede superar la oferta.

Se estima la generación con biomasa forestal mediante la revisión de los antecedentes que cada proyecto expuso en su DIA. En algunos casos se pudo realizar la consulta directa a cada central, con información de carácter reservado; esta consulta buscaba conocer los porcentajes de biomasa forestal y agrícola consumido. Se revisó además las memorias anuales de las empresas Arauco (2012) y Empresas CMPC (2011). Se procede a realizar el cálculo del consumo de biomasa en unidades de m<sup>3</sup>st, Ton y BDT con base a la capacidad instalada de cada planta, como se esquematiza en la Figura 2.

- Primera parte: se calcula la generación total con biomasa para todas las generadoras y se descuenta el consumo de biomasa agrícola y aporte energético de licor negro de plantas de celulosa, además se asume un descuento en las plantas de tableros que también utilizan un porcentaje de sus desechos.
- Segunda parte: se estima el PCI (Poder Calorífico Inferior) de pino y eucalipto (memoria de cálculo en Anexo 8). En el caso del pino se utilizaron dos CH% distintos, 45% para los desechos de predios

y 25% para desechos de IM la densidad básica (DB) utilizada fue 488 kg/m<sup>3</sup>. Para los fardos de eucalipto se utilizó un CH de 18,7% y un peso de 315 kg/fardo (1 fardo = 1,009 m<sup>3</sup>st).

- Tercera parte: se transforman las unidades de masa a unidades energéticas, utilizando la biomasa disponible (de fardos e IM en cálculos separados), y el factor de planta que corresponde a las horas reales de operación (factor de 86%, es decir se opera efectivamente 7.500 horas de un total de 8.760 anuales). En CER (2011) se señala que los factores de plantas de combustión directa y cogeneración varía entre 86 a 94,2%, por lo cual se utiliza el valor más conservador. Luego se calculó la energía en kWh mediante la constante de potencial energética 860,42 kcal/kWh (Álvarez y Peña, 2011). Por último se aplicó el factor de eficiencia eléctrica 0,3<sup>4</sup> (UACH, 2013), obteniendo el aporte energético al sistema.
- En la cuarta parte, se descuenta el aporte energético de fardos e IM (incluyen corteza) a la generación neta y se estima el volumen necesario para abastecer la generación con biomasa forestal (Fórmula 1). Para transformar a potencia eléctrica se divide por horas reales de funcionamiento.

$$G_{DCPR} \text{ (MWhe)} = G_{TN} \text{ (MWhe)} - [G_{DIM} \text{ (MWhe)} + G_{fardos} \text{ (MWhe)}] \text{ (1)}$$

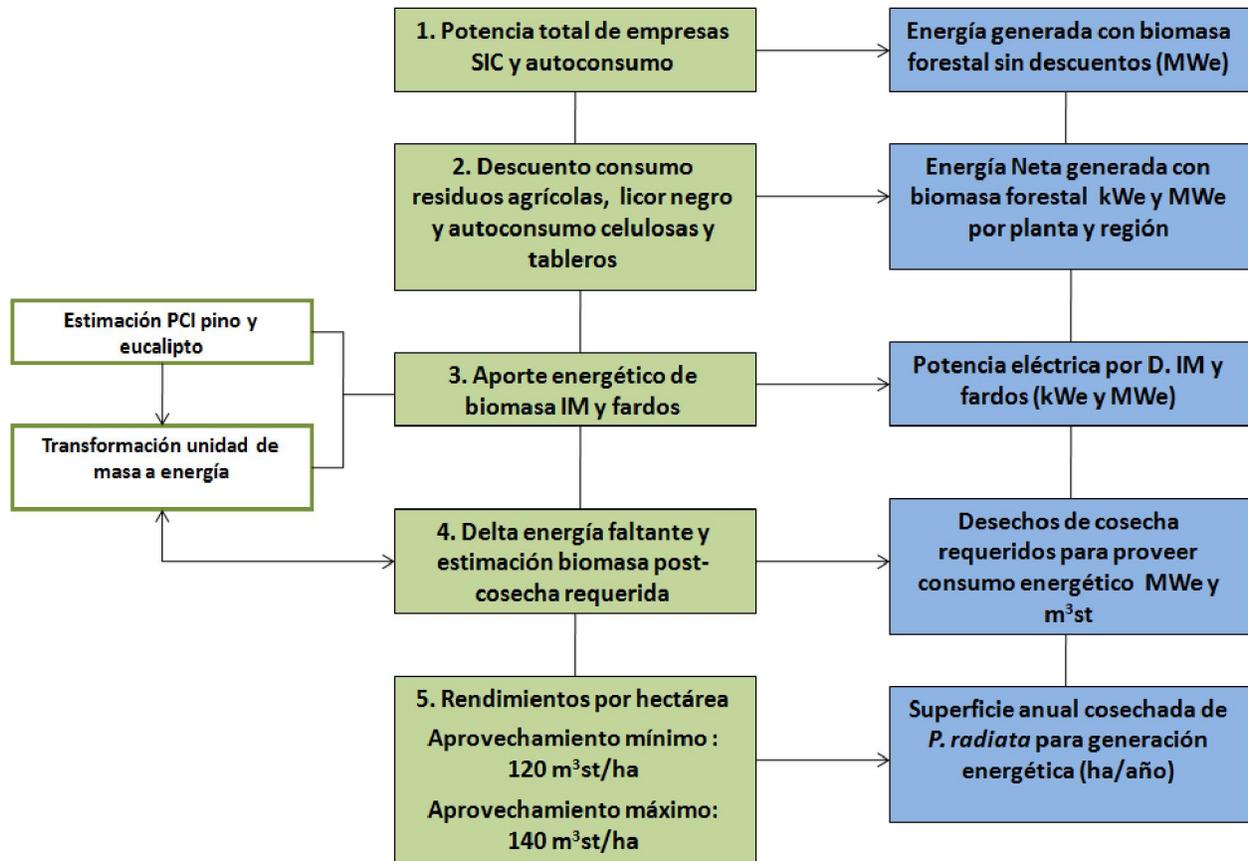
**Donde:**

- $G_{DCPR}$  : Generación con desechos de cosecha de *Pinus radiata* (MWhe)
- $G_{TN}$  : Generación Total Neta en MWhe (Generación real con biomasa forestal, aplicados descuentos por biomasa agrícola, autoconsumo de celulosas y plantas de tableros)
- $G_{DIM}$  : Generación con desechos de industrias de la madera (MWhe)
- $G_{fardos}$  : Generación con fardos de *Eucalyptus spp.* (MWhe)

- Por último, se transforma el requerimiento volumétrico en superficie de aprovechamiento anual para satisfacer la demanda de biomasa restante. Se utilizó la información recabada en las entrevistas, bajo dos niveles de aprovechamiento post-cosecha de biomasa en plantaciones de pino: 120 y 140 m<sup>3</sup>st/ha.
- **Aclaración:** La metodología presentada, balancea el consumo de biomasa forestal de acuerdo a la potencia neta actual, descontando el aporte en energía de desechos de las IM y fardos. La potencia neta restante se obtiene del aprovechamiento de desechos de pino post-cosecha, planteando que la superficie disponible anual es igual a la superficie de reforestada informada por CONAF. No se

<sup>4</sup> UACH (2013) señala que este factor se sitúa entre 20 a 25% para tecnologías convencionales, pero para tecnologías mejoradas como ciclos de Rankine y alternativas de gasificación se puede mejorar la eficiencia en un 10 a 15%, por lo cual se opta por utilizar un 30%.

incluye utilización de manejos intermedios, ni otros combustibles biomásicos distintos de los planteados. Las diferencias entre la situación real y lo estimado pueden variar en virtud de la potencia real de cada planta, la superficie de bosque plantada (sin reforestación), entre otros.



**Figura 2.** Esquema-resumen de la estimación de la biomasa forestal consumida para generación de energía. Elaboración propia basada en comunicaciones personales (EFor, IM, generadoras) y literatura.

### 3.4.1. Estimación de disponibilidad de biomasa de Industrias de la Madera (IM)

Los desechos de IM son el resultado del proceso de aserrío o pre aprovechamiento. El gran porcentaje corresponde a pino (96,7%) y un volumen menor a especies nativas (1,9%), álamo (0,7%), pino oregón (0,6%) y eucalipto (0,1%). Los desechos transados en el mercado son: corteza, aserrín, lampazos y astillas de lampazo, despuntes y viruta (Bertrán y Morales, 2008).

Bertrán y Morales (2008) estiman el volumen de desechos con respecto al volumen de madera aserrable, por lo cual en este estudio se realizó el mismo procedimiento para estimar la disponibilidad actual (distribución porcentual de desechos de madera aserrada).

### **3.4.2. Estimación de la disponibilidad de fardos de *Eucalyptus* spp.**

Los fardos de eucalipto corresponden a la biomasa de ramas, restos de fustes y corteza, compactados al 75-80% y enfardados. Este tipo de desecho requiere ser triturado en destino, y el único mercado hasta ahora es la empresa CMPC que cuenta con la tecnología de triturado (astillador de 1.200 HP). Es importante destacar que esta especie es una de las preferidas para leña<sup>5</sup>, por lo cual los desechos que se convierten en fardos son los restantes del aprovechamiento integral de esta especie.

Se consultó a dos empresas dedicadas al aprovechamiento de biomasa de eucalipto, sobre el rendimiento de faenas y volúmenes transados. Con esta información se estimó la disponibilidad de esta biomasa. El rendimiento de fardos/ha es variable y depende del método de cosecha (si se extrae o no la corteza del árbol). Se estima que por ha se aprovechan entre 170 a 180 fardos cuando los rollizos son retirados con corteza, y de 220 a 240 fardos cuando la corteza queda en terreno, pero en general se utiliza una media de 200 fardos/ha (equivalencias y transformaciones en memoria de cálculo, Anexo 8).

### **3.5. Estimación de superficie de aprovechamiento y propiedad de la tierra**

Como se muestra en la Figura 2, se estima la superficie bajo dos niveles de aprovechamiento en predios post-cosecha de pino: 120 y 140 m<sup>3</sup>/ha. La información sobre los rendimientos de faenas de cosecha de astillas de pino fue entregada por las empresas intermediarias. Es importante conocer (aproximadamente) la tenencia de los predios, por lo cual se estimó el porcentaje de superficie plantada (forestada y reforestada) de CONAF (2013) por tipo de propietario y región al año 2012, como se muestra en el Anexo 9. Esto es una aproximación, debido a que la definición de tamaño de propiedad concebida por este mercado no es la misma que presenta CONAF<sup>6</sup>.

---

<sup>5</sup> Especialmente *E. globulus* (de mayor valor). *E. nitens* también se transa, pero con un menor valor de mercado. La leña se obtiene principalmente de trozas de diámetros menores.

<sup>6</sup> CONAF define en la Ley 20.283 sólo a pequeños propietarios, cuya superficie debe ser menor a 200 ha no ubicadas en las regiones: I a IV, XI, XII, en la comuna de Lonquimay en la IX Región y en la provincia de Palena en la X Región por el Autor.

### 3.6. Proyección de consumo de biomasa

Para proyectar el consumo futuro de biomasa, se utilizó la información de proyectos enviados al SEIA en sus dos estados: DIA y RCA, brindadas por las SEREMIA de Energía respectivas. En Anexo 10 se presenta el número de proyectos en evaluación por región y su estado actual, teniendo en cuenta los descuentos por consumo de biomasa agrícola, licor negro, y autoconsumo cuando corresponda. Se utilizaron los siguientes supuestos referentes a la disponibilidad de biomasa de IM y fardos:

- **Industrias de la madera (IM):** se estima el volumen anual de trozas aserrables para los próximos 2 años con las estadísticas entregadas por INFOR (2013) y metodología aplicada por Bertrán y Morales (2008), referentes al consumo de trozas aserrables (m<sup>3</sup>s.s.c.) de pino de los últimos 37 años y porcentaje de desechos respectivamente (Anexo 11).
- **Fardos de eucalipto:** se presenta como supuesto que anualmente el volumen disponible de eucalipto aumentará 5%, (Anexo 12). Para balance se utilizó el volumen del segundo año.

### 3.7. Caracterización de la cadena de abastecimiento de biomasa

En la revisión bibliográfica realizada pre-levantamiento de información en terreno, no se pudo conocer el funcionamiento de la cadena de abastecimiento de biomasa. Esta información era parcialmente conocida, pero fue importante delimitar y caracterizar a cada actor por separado, caracterizando su labor, importancia e interrelación. Esta información sí existe para trozas aserradas o leña. Por lo cual, se caracteriza la información obtenida en el área de estudio, pues fue posible levantar importantes hallazgos.

Se adjunta la pauta de consultas efectuadas a los actores del mercado de la biomasa para generación (Anexo 7), con el cual se fue armando la cadena completa, explicando las particularidades de cada actor.

La importancia de conocer el funcionamiento se plantea como una necesidad ante el análisis de la situación actual del mercado de la biomasa para dendroenergía.

## **Cadena de abastecimiento de biomasa en Chile y comparación con Finlandia**

Además de caracterizar el mercado nacional de la biomasa, se comparó con uno de los mercados líderes en la producción de dendroenergía. Por ello se eligió Finlandia, país que ha superado una serie de barreras operativas, presenta una industria primaria de la madera y ha avanzado de forma importante en optimización de los procesos de obtención. El ejercicio de comparación del mercado actual chileno con el finlandés, es una herramienta base para detectar el camino que debe recorrer nuestro país para mejorar la forma de operación y distribución de los beneficios. Se analizó el funcionamiento del mercado de la biomasa mediante una revisión bibliográfica actualizada y apoyo de docentes del área de la dendroenergía<sup>7</sup>.

### **3.8. Información del mercado de la biomasa: rendimientos, distancia económica y precios**

En el presente estudio se sintetiza la información de entrevistas (Anexo 7.1). Los precios se presentan en moneda chilena (CLP\$), como resultado de entrevistas del año 2013 (precio del combustible del año 2013). Se estima la mediana entre precios de desechos de IM mínimos y máximos observados y los precios mínimos y máximos por faena de aprovechamiento de biomasa de desechos de pino.

---

<sup>7</sup> Comunicación personal con: Comité evaluador, Felipe Leiva y Patricio Carey.

## 4. RESULTADOS

A continuación se describen a los principales actores en el mercado de la biomasa forestal, se presentan los resultados de la estimación del consumo de biomasa y los principales componentes de la cadena de abastecimiento de biomasa forestal para generación en Chile.

### 4.1. Descripción de principales actores en la cadena de abastecimiento de biomasa en Chile

De acuerdo a la información recogida en las entrevistas, se describió a los principales actores en la cadena de abastecimiento de la biomasa forestal en Chile (Cuadro 1). Los límites entre tamaño de propiedad son definidos por los intermediarios de acuerdo al cumplimiento de sus requisitos de aprovechamiento, y no necesariamente concuerdan con la definición legal de CONAF.

**Cuadro 1.** Descripción de principales actores en cadena de abastecimiento de biomasa forestal, según se conoce por los principales actores del mercado de la biomasa. Elaboración Propia.

<b>Actor en la cadena</b>	<b>Descripción</b>
<b>Generadoras de energía</b>	Empresas que producen energía y que pueden contar o no con patrimonio forestal; en el caso de contar este patrimonio es administrado por las empresas forestales. Las generadoras son además industrias forestales de papel y derivados, tableros u otros productos de madera. También pueden ser sólo generadoras de energía eléctrica.
<b>Intermediarios</b>	Contratistas o empresas de servicio de producción, dedicadas a la habilitación de terrenos forestales para la obtención de biomasa para combustible. Realizan el apilado, triturado y (en algunas ocasiones) transporte de la biomasa desde los predios hasta las empresas interesadas.
<b>Transportistas</b>	Transporte de la biomasa desde predio/industria de la madera hasta el centro de consumo. Generalmente las empresas forestales tienen este servicio o bien terceros que pueden o no ser los intermediarios.
<b>Industrias de la madera (IM)</b>	Esencialmente aserraderos. Transan en el mercado los desechos de sus operaciones: aserrín, viruta, astillas, lampazos (entre otros) como subproducto. Las IM pueden estar integradas a empresas forestales o ser independientes (de terceros).
<b>Empresas Forestales</b>	Administran el patrimonio forestal para proveer a industrias de la madera, generadoras, plantas de celulosa o mercado internacional.
<b>Mediano propietario</b>	Posee una superficie plantada superior a 50 ha, no pertenecientes a empresas forestales.
<b>Pequeño propietario</b>	Posee una superficie plantada inferior a 50 ha.

## 4.2. Potencia eléctrica con biomasa forestal en Chile

Actualmente en Chile, la biomasa forestal debe sustentar una potencia bruta de 938 MWe (Modificado de LIGNUM, 2014), de los cuales 405 MWe se inyectan al SIC y 532 MWe son utilizados para autoconsumo de las industrias integradas. La potencia neta que se sustenta con los tres tipos de biomasa forestal analizada en el presente estudio (se realizan descuentos por aporte de biomasa agrícola, licor negro y autoconsumo de celulosas y plantas de tableros) es de 324 MWe (Cuadro 2).

**Cuadro 2.** Energía con biomasa (MWe) en área de estudio.

Región	Número de centrales	Energía con biomasa forestal, totales agrupados (MWe)			
		SIC	Autoconsumo	Bruta	Neta (descuentos)
O'Higgins	1	16	0	16	3
Maule	4	54	65	119	45
Biobío	12	250	363	613	207
Araucanía	2	25	25	50	23
Los Ríos	1	61	79	140	46
<b>Total</b>	<b>20</b>	<b>405</b>	<b>532</b>	<b>938</b>	<b>324</b>

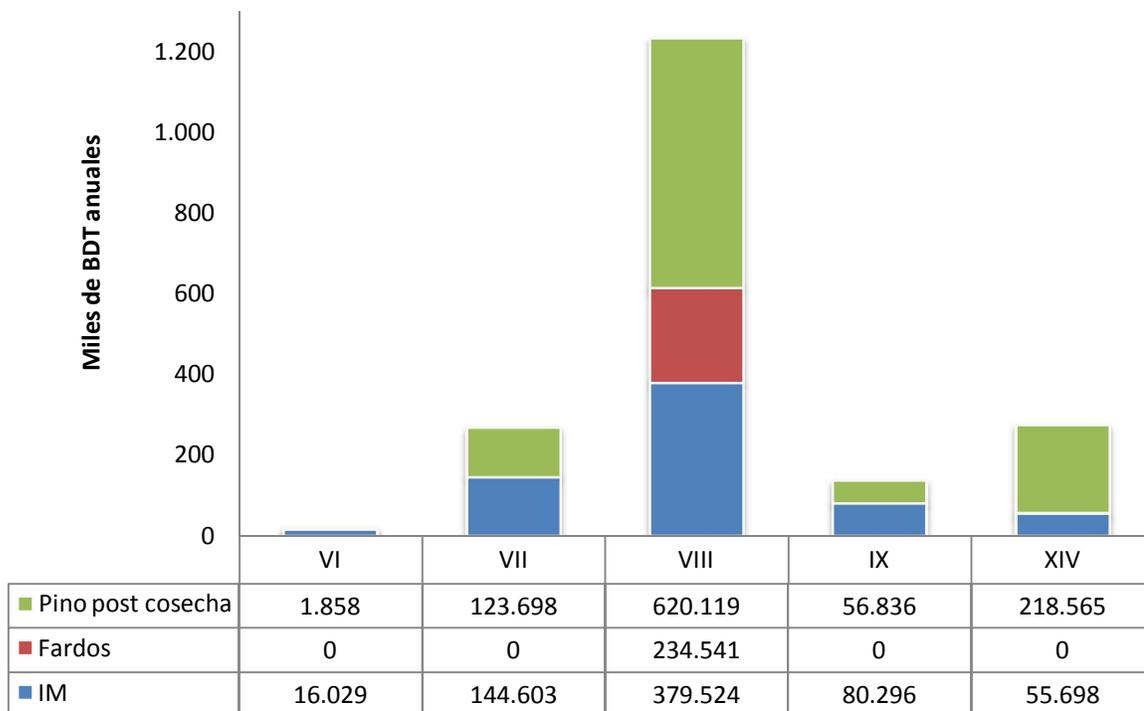
## 4.3. Consumo de biomasa para generación en Chile

El consumo anual de biomasa de manejo forestal en Chile alcanza los 1,93 MBDT (2,6 MTon húmedas) concentrándose un 64% de este consumo en la Región del Biobío (Cuadro 3 y Figura 3). Este volumen de biomasa es capaz de levantar la potencia neta de 324 MWe.

El volumen de desechos de cosecha de pino deben generar 1,15 MMWhe ó una potencia de 153,7 MWe necesarios para cubrir la potencia neta del sistema.

**Cuadro 3.** Consumo de biomasa forestal en Chile, Toneladas con CH% transado, BDT y potencia neta generada.

Tipo biomasa	Toneladas	CH%	BDT	MWe	MWhe
Desechos de IM	845.186	25	676.149	127,5	956.250
Fardos de eucalipto	278.400	18,7	234.541	43,2	324.000
Desechos de cosecha	1.480.560	45	1.021.076	153,7	1.152.750
<b>Total</b>	<b>2.604.146</b>	<b>-</b>	<b>1.931.766</b>	<b>324</b>	<b>2.433.000</b>



**Figura 3.** Consumo de biomasa (BDT) por tipo y región. Se asume que la VI región consume biomasa propia y de RM, la XIV biomasa propia y de X y las demás regiones consumen su propia biomasa.

#### 4.3.1. *Desechos de Industrias de la Madera (IM)*

Se estimó el volumen de madera aserrada para el año 2013 y por consiguiente el volumen de desechos total de las IM (Cuadro 4).

En el marco de las entrevistas realizadas, se contactó a un total de doce IM distribuidas entre la VII y VIII región, y se logró determinar que un 40% de los desechos biomásicos son transados en el mercado energético. Con este valor se estimó la biomasa neta disponible proveniente de este mercado. Los desechos de IM anuales son 4,33 Mm<sup>3</sup>s.s.c., pero sólo un 40% (1,73 Mm<sup>3</sup>s.s.c. ó 676 mil BDT) son transados en el mercado, como se observa en el Cuadro 3. Los desechos de las IM son capaces de levantar una potencia de 127,5 MWe en el área de estudio (Cuadro 3 y 4).

**Cuadro 4.** Estimación de volumen anual de desechos totales y desechos transables de industrias de la madera en Chile (40% del total). Ver estimación de desechos totales en Anexo 13 y por producto en Anexo 13.1). Elaboración Propia.

Región	Volumen trozas aserradas (m <sup>3</sup> s.s.c.)	Volumen desechos totales (m <sup>3</sup> s.s.c.) <sup>a)</sup>	Volumen desechos disponibles (m <sup>3</sup> s.s.c.) <sup>b)</sup>	BDT anual disponibles
RM <sup>c)</sup>	4.095	529	212	83
VI	316.980	102.112	40.845	15.946
VII	2.874.503	925.993	370.397	144.603
VIII	7.544.401	2.430.355	972.142	379.524
IX	1.596.158	514.187	205.675	80.295
XIV <sup>d)</sup>	1.107.193	356.671	142.669	55.698
<b>Total</b>	<b>13.405.530</b>	<b>4.329.847</b>	<b>1.731.939</b>	<b>676.149</b>

a) Volumen total de desechos generados por las industrias de la madera.

b) Volumen disponible de desechos. En las entrevistas se logró determinar que un 40% de los desechos totales se transan en el mercado y que el 60% restante es utilizado para autoconsumo de las IM.

c) La RM se ubica en el radio de abastecimiento de la central Energía Pacífico (de San Francisco de Mostazal), por lo cual se consideró que un 40% del volumen de desechos de *Pinus radiata* procesados en la RM estarán disponibles para la central.

d) Se consideró que un 30% de los desechos *Pinus radiata* de IM de la X Región están disponibles para la zona de influencia de Planta Celulosa Valdivia.

#### 4.3.2. Volumen de fardos de eucalipto

La cantidad transada de fardos alcanza las 800 mil unidades anuales, pesando cada uno aprox. 348 kilos con un CH promedio de 18,7%, es decir 278,4 mil Ton<sub>18,7%CH</sub> ó 234,5 mil BDT.

Los actores de este mercado son enfáticos en señalar que actualmente sólo se desarrolla en la Región del Biobío. Mediante esta información y los datos entregados en el Cuadro 4, se estima que este volumen es capaz de generar 323,6 mil MWhe o una potencia de 43 MWe.

#### 4.3.3. Balance energético consumo/disponibilidad de biomasa forestal

El requerimiento de biomasa forestal en el área de estudio se presenta en el Cuadro 5 y Figura 3. Se logró determinar que 5.962 BDT pueden levantar 1 MWe, con esta información, se procede a estimar el requerimiento en superficie de aprovechamiento post-cosecha de *Pinus radiata* para levantar la potencia de 153,7 MWe estimada.

El 53% de la biomasa para generación se obtiene de los desechos de cosecha de pino, 35% de las industrias de la madera y 12% de fardos. En la Región del Biobío la procedencia de biomasa es más

variada, recibiendo importantes aportes de las IM y fardos. Cabe destacar que la biomasa también se mueve entre regiones, pero hasta ahora se desconoce su dinámica.

**Cuadro 5.** Balance energético con biomasa forestal. Requerimientos volumétricos y aprovechamiento de superficie para satisfacer la demanda actual. Elaboración Propia.

Región	Consumo BDT				Requerimiento biomasa m <sup>3</sup> st	Superficie pino anual a cosechar (ha)	
	IM	Fardos	Desechos cosecha	Total BDT		Aprovechamiento 1	Aprovechamiento 2
VI	16.028		1.858	17.887	8.553	71	61
VII	144.603		123.698	268.301	569.381	4.745	4.067
VIII	379.524	234.541	620.119	1.234.184	2.854.407	23.787	20.389
IX	80.295		56.836	137.131	261.616	2.180	1.869
XIV	55.698		218.565	274.263	1.006.055	8.384	7.186
<b>Total</b>	<b>676.149</b>	<b>234.541</b>	<b>1.021.076</b>	<b>1.931.766</b>	<b>4.700.012</b>	<b>39.167</b>	<b>33.572</b>
%	35	12	53	100	-	-	-

#### 4.3.4. Superficie de aprovechamiento necesaria para satisfacer la demanda de energía; desechos de pino

Se estima que la superficie necesaria para satisfacer los 4,7 Mm<sup>3</sup>st varía entre 33,5 y 39,2 mil hectáreas anuales de aprovechamiento de pino post cosecha.

El rendimiento de madera y desechos (m<sup>3</sup>st/ha) podría variar de acuerdo al tipo de propiedad de predios (manejo y productividad son diferentes), por lo cual se presenta la estimación de superficie disponible anualmente para aprovechamiento post-cosecha por región, especie y tipo de propietario. En Anexo 9 se observa que la reforestación con pino presenta marcadas diferencias los últimos 15 años, estabilizándose desde 2010. El eucalipto, ha aumentado su tasa de reforestación desde el año 2007.

Actualmente ambas especies son plantadas en su mayoría por empresas forestales, como se observa en el Cuadro 6, aproximadamente un 60,2% de los predios desde la VI a la XIV Región pertenece a empresas. Un 30,2% a medianos propietarios y un 7,1% a pequeños.

La superficie promedio de *Pinus radiata* cosechada en el área de estudio anualmente es de 43,5 mil hectáreas y de *Eucalyptus spp.* de 29,4 mil, cuya mayoría corresponde a *Eucalyptus globulus*.

**Cuadro 6.** Superficie estimada de cosecha anual (estadística CONAF 1998-2012 y CONAF, 2013) por tipo de propietarios, pino y eucalipto. Elaboración Propia.

Región	Especie	Tipo de propietario <sup>a)</sup>			Superficie estimada cosecha (ha) <sup>b)</sup>
		Pequeño	Mediano	Empresas	
VI	<i>Pinus radiata</i>	231	672	89	992
	<i>Eucalyptus pp.</i>	167	487	65	720
VII	<i>Pinus radiata</i>	664	4.771	5.963	11.397
	<i>Eucalyptus spp.</i>	97	696	870	1.663
VIII	<i>Pinus radiata</i>	1.411	6.910	14.503	22.824
	<i>Eucalyptus spp.</i>	1.089	5.331	11.189	17.609
IX	<i>Pinus radiata</i>	505	1.119	4.037	5.660
	<i>Eucalyptus spp.</i>	693	1.537	5.545	7.775
XIV	<i>Pinus radiata</i>	199	1.412	992	2.603
	<i>Eucalyptus spp.</i>	124	880	618	1.622
Total	<i>Pinus radiata</i>	<b>3.010</b>	<b>14.884</b>	<b>25.583</b>	<b>43.477</b>
	<i>Eucalyptus spp.</i>	<b>2.170</b>	<b>8.932</b>	<b>18.287</b>	<b>29.389</b>
Total		<b>5.180</b>	<b>23.816</b>	<b>43.870</b>	<b>72.866</b>
Porcentaje (%)		<b>7,1</b>	<b>32,7</b>	<b>60,2</b>	<b>100</b>

<sup>a)</sup> Esto es una aproximación, ya que las definiciones de tamaño de propiedad no necesariamente concuerdan con lo planteado por CONAF, quien define en la Ley 20.283 de Bosques sólo a pequeños propietarios, cuya superficie debe ser menor a 200 ha no ubicadas en las regiones: I a IV, XI, XII, en la comuna de Lonquimay en la IX Región y en la provincia de Palena en la X Región.

#### 4.3.5. Superficie aprovechada de eucalipto para satisfacer la demanda

La reforestación con eucalipto ha aumentado los últimos 15 años, alcanzando actualmente 29,4 mil hectáreas anuales, de las cuales sólo aprovechan aprox. 4 mil (total fardos: 800 mil anuales con un rendimiento medio por hectárea de 200 fardos). La especie *Eucalyptus globulus* es la más forestada y reforestada en el área de estudio. Según lo señalado por los entrevistados, satisfacer la demanda de las generadoras con los desechos de esta especie tiene ventajas y desventajas, como se presentan en el Cuadro 7.

**Cuadro 7.** Desventajas y ventajas de la utilización de biomasa de eucalipto. Elaboración Propia.

<b>Desventajas</b>
Sub aprovechamiento de la especie por la dificultad de astillar su corteza
Bajo conocimiento y recursos para trabajar con la especie
Situación actual del mercado: precio de los fardos es asignado por la única empresa compradora
La tecnología de las enfardadoras no ha sido masificada en Chile
<b>Ventajas</b>
Especie generalmente se encuentra en predios planos o pendientes moderadas, facilitando el ingreso de maquinarias
La madera de esta especie tiene mayor densidad que pino, por lo cual la cantidad de energía disponible es también mayor
Los fardos no se auto-combustionan al ser acopiados
Los fardos son de fácil manipulación

#### **4.3.6. Proyecciones del consumo de biomasa**

Actualmente existen nueve proyectos en evaluación ambiental, su aprobación significará un aumento en el consumo de biomasa de 20% en relación a la situación actual, aumentando la generación de energía de 938 a 1.174 MW en período aproximado de 2 años (Cuadro 8). Este significativo aumento se debe particularmente al proyecto MAPA (Modernización y Ampliación Planta Arauco, Horcones) el cual generará 166 MW en la VIII Región, y fue aprobado por la Comisión de Evaluación Ambiental del Biobío con fecha 5 de febrero de 2014. A partir de los mismos supuestos presentados, se estima la potencia bruta y neta proyectada al 2015, debido a que existen proyectos que utilizarán biomasa agrícola, o autoconsumo de desechos y licor negro (celulosas y plantas de tableros).

**Cuadro 8.** Potencia actual (MWe) y proyectada (neta y bruta), área de estudio.

<b>Regiones</b>	<b>Potencia MWe</b>			
	<b>Actual Bruta</b>	<b>Proyectada Bruta</b>	<b>Actual Neta</b>	<b>Proyectada Neta</b>
VI	16	16	3	3
VII	119	126	45	52
VIII	613	842	207	302,4
IX	50	50	23	23
XIV	140	140	46	46
<b>Total</b>	938	1.174	324	426,4

Se observa en el Cuadro 9, que con el ingreso de estos proyectos, el requerimiento de biomasa de desechos aumenta, requiriendo una superficie de aprovechamiento estimada de 43,7 – 51 mil hectáreas anuales (Ver proyección por tipo de propietario en Anexo 13).

**Cuadro 9.** Proyección de balance energético al 2015 en base a biomasa forestal. Requerimientos volumétricos y aprovechamiento de superficie para satisfacer la demanda actual. Elaboración Propia.

Región	Consumo BDT				Requerimiento biomasa m <sup>3</sup> st	Superficie pino anual a cosechar (ha)	
	IM	Fardos	Desechos cosecha	Total BDT		Aprovechamiento 1	Aprovechamiento 2
VI	17.349		538	17.887	11.126	93	79
VII	177.477		132.560	310.037	740.676	6.172	5.291
VIII	468.127	258.581	1.334.855	1.802.982	3.713.136	30.943	26.522
IX	98.549		38.582	137.132	340.322	2.836	2.431
XIV	68.360		205.903	274.263	1.308.720	10.906	9.348
<b>Total</b>	<b>829.862</b>	<b>258.581</b>	<b>1.712.437</b>	<b>2.800.881</b>	<b>6.796.186</b>	<b>50.950</b>	<b>43.671</b>
%	30	9	61		-	-	-

#### 4.4. Cadena de abastecimiento de biomasa forestal en Chile

Las Efor subcontratan servicios de intermediarios para obtención y transporte de biomasa desde sus predios (Contratos de Obtención, ver detalle en capítulo 4.4.1.). A la vez contrata a intermediarios para proveerse de biomasa de terceros (MP). Estos últimos se llaman Contratos de Abastecimiento.

Por último las IM proveen de biomasa a las centrales mediante convenios directos o intermediarios. Los convenios directos involucran el abastecimiento de rollizos provenientes de las empresas forestales y el compromiso de las IM en suministrar los desechos resultantes del proceso de aserrío, mediante cánones estipulados por la empresa.

El flujo de los distintos tipos de biomasa depende de la especie (pino, eucalipto o nativas). En la Figura 4 se muestra el flujo completo de productos según especie e industria. Eucalipto abastece a industrias de celulosa, y en un porcentaje muy menor a IM. Los últimos años se están utilizando sus desechos para generación energética. Pino abastece IM, plantas de energía y plantas de celulosa

conectadas al SIC. Las especies nativas son utilizadas para producción de leña, principalmente en el mercado informal, y un porcentaje menor se procesa como madera de alto valor en las IM.

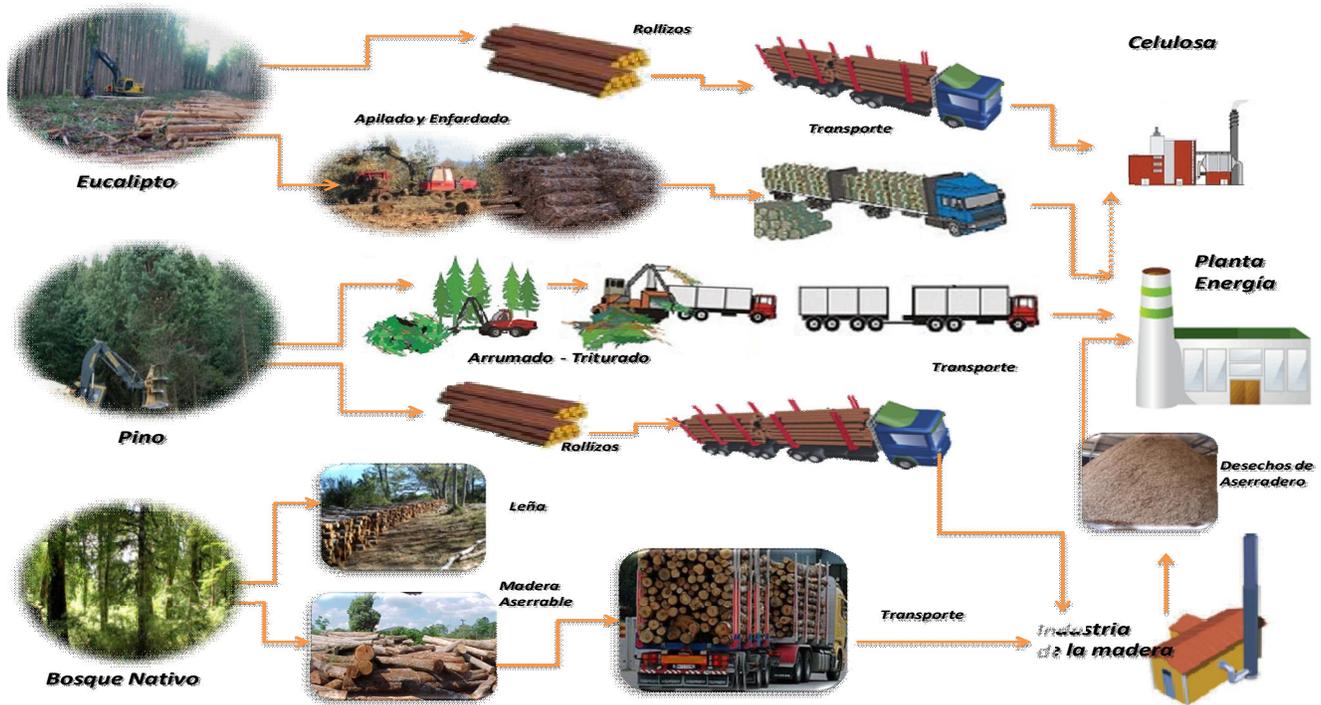


Figura 4. Flujo de biomasa según especie e industria. Elaboración Propia<sup>8</sup>.

#### 4.4.1. Tipos de contratos

Se reconocen dos tipos de contratos para transar biomasa forestal (entre actores de la cadena de abastecimiento) y un convenio, que dependen de la existencia patrimonial de las empresas contratantes. Es probable que el patrimonio de estas empresas no sea suficiente para cubrir sus necesidades, por lo cual deben contar con los dos tipos de contratos. De igual forma, empresas cuyo patrimonio es suficiente para la operación de las centrales, ingresan al mercado de manera de controlar los precios de la biomasa. Los tipos de contratos observados fueron:

- **Contratos de abastecimiento de biomasa:** generalmente utilizados por empresas que solicitan un flujo temporal (día, semana, mes) de biomasa. Este tipo de contratos no significa disminución de los precios transados, pero tienen una serie de beneficios, tales como: disminuir tamaño de “acanchamiento”, garantizar un flujo continuo y simplificar su sistema de gestión. Los predios desde donde se obtiene la biomasa son de terceros.

<sup>8</sup> Agradecimientos por Figura 4 a Paola Gayoso Morelli.

- **Contratos de obtención de biomasa** (habilitación de predios forestales): las empresas que tienen patrimonio “tercerizan” las labores de recolección de biomasa y habilitación. En conjunto a este tipo de contratos, aparecen los “bonos por aseguramiento de volumen” que no rigen para predios de terceros: este bono se entrega a intermediarios por concepto de gestión.
- **Convenios con industrias de la madera:** se utiliza este tipo de convenios entre industrias de la madera pertenecientes a terceros y empresas forestales. Empresas como Mininco, Arauco, Masisa venden rollizos de madera aserrable con el compromiso que el aserradero les venda sus residuos (astillas de lampazo, corteza, viruta y aserrín).

#### **4.4.2. Adquisición de biomasa para generación**

La biomasa es “adquirida” a medianos propietarios. Las empresas forestales contratan a intermediarios para la búsqueda de esta biomasa y el aprovechamiento de los predios.

Los intermediarios identifican los predios que cumplen con las condiciones mínimas de aprovechamiento (Capítulo 4.5.) y ofrecen realizar la habilitación post-cosecha, retirando los desechos. Por esta transacción no se realiza pago alguno, siempre que se cumpla con los requerimientos óptimos de los intermediarios. Se estima que el valor de esta habilitación es de \$100.000/ha<sup>9</sup>. Los propietarios que demandan un valor por su biomasa generalmente quedan fuera del negocio, debido a que el desplazamiento de la maquinaria de arrumado y triturado tiene importantes costos fijos.

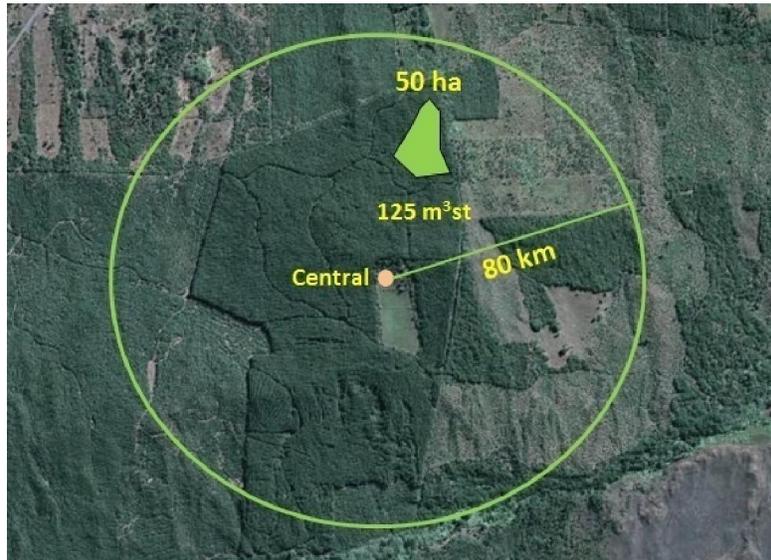
Cuando los propietarios no cumplen con requisitos óptimos establecidos por los intermediarios, se les cobra un menor valor por la habilitación a cambio de los desechos, previa evaluación, según lo informado por los propios intermediarios.

#### **4.5. Requerimientos óptimos para aprovechamiento de desechos de cosecha forestal**

La decisión (intermediarios) de aprovechar un predio recae en tres factores principales, que a modo de ecuación determinan la factibilidad de mover los equipos de apilado y triturado de biomasa: distancia equivalente, aprovechamiento de desechos de pino por hectárea y superficie mínima de habilitación. Según las empresas que realizan estas faenas, los valores que maximizan sus utilidades son distancia <80 km, rendimiento 125 m<sup>3</sup>st/ha y 50 ha mínimo superficie plantada (Figura 5). En esta figura se representan los requerimientos óptimos para el aprovechamiento. Esta representación es

<sup>9</sup> Se desconoce cómo se maneja la parte impositiva.

teórica, ya que el radio de cada central se sobrepone con el de otras empresas, por lo cual se produce competencia por biomasa.



**Figura 5.** Esquema ejemplo de cumplimiento de requisitos para la optimización en la habilitación de predios forestales. Elaboración Propia.

Los números señalados anteriormente pueden variar en virtud del aumento de otro factor; a modo de ejemplo, se pueden aprovechar predios de menor superficie, siempre y cuando su distancia equivalente sea menor a 80 km.

#### 4.6. Tipos de productos transados y precios

Se identificaron ocho tipos de productos que ingresan a las principales plantas, seis de los cuales se presentan en el Cuadro 10 (desechos de IM) con sus precios. Los productos como fardos y desechos de cosecha se presentan más adelante. Si bien son frecuentes los negocios donde se transa biomasa forestal, generalmente se desconoce las condiciones de los mismos (volúmenes transados, seguridad de contratos, contenido de humedad e impurezas, tipo de biomasa).

Los precios de la biomasa proveniente de desechos varían entre \$4.500<sup>10</sup> y 6.400/m<sup>3</sup>st, siendo el precio usual de transacción \$5.900 (Figura 6) puesto en planta (distancia de 80 km equivalentes).

<sup>10</sup> Pesos chilenos CLP\$, año 2013.

El precio está definido por: apilado, triturado, transporte y bono por aseguramiento de volumen, dirigido a intermediarios que cumplen con el volumen temporal (año/mes) contratado. Es importante aclarar que este bono sólo rige para el volumen de biomasa obtenida de predios de empresas forestales. El precio del apilado es el más variable, ya que depende del método de cosecha<sup>11</sup>, características del rodal y de la biomasa y época del año. El triturado tiene un valor más homogéneo, pues sólo depende del tipo de triturador y contenido de humedad de la biomasa.

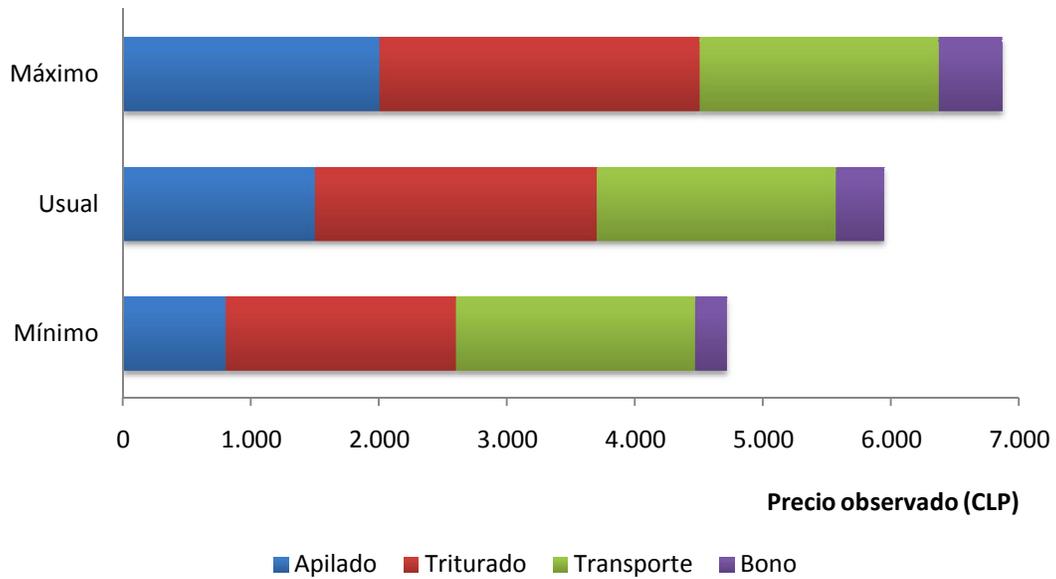
**Cuadro 10.** Precios observados de los principales desechos de industrias de la madera transados (con y sin transporte) en la zona de estudio (Precios expresados en pesos por metro estéreo de biomasa). Elaboración Propia.

Productos	Precios (sin IVA) en origen ST <sup>a)</sup>		Precios en destino con transporte		
	Mínimo y máximo observado (\$/m <sup>3</sup> st)	Mediana	40 km	80 km	130 km
Aserrín combustible pino	3.000 - 3.500	3.249	4.208	5.766	8.083
Lampazo pino	3.300 - 3.900	3.599	4.558	6.116	8.432
Astilla combustible aserradero pino	3.800 - 6.000	4.903	5.857	7.420	9.736
Corteza pino	3.000 - 4.300	3.652	4.606	6.169	8.485
Viruta pino	3.000 - 3.500	3.249	4.208	5.766	8.083
Rollizo combustible eucalipto	5.000 - 5.300	5.152	6.106	7.669	9.985

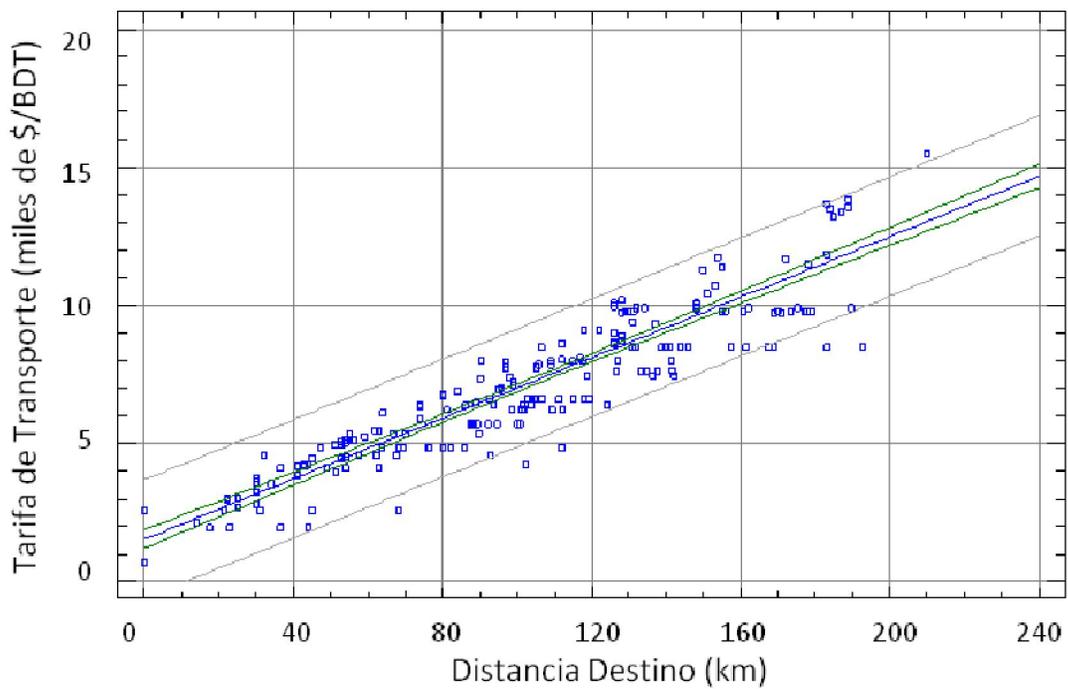
<sup>a)</sup>Sin Transporte

El transporte de la biomasa se realiza generalmente en camiones “chiperos” cuya capacidad es de 70-90 m<sup>3</sup>st (se utiliza el valor medio de 80 m<sup>3</sup>st/viaje), según el contenido de humedad. El precio que pagan las empresas varía según la distancia equivalente. Se presenta la función de transporte de astillas construida con información obtenida en el área de estudio (principalmente Región del Maule y Biobío), Figura 7. El costo de transporte es de \$580 por tonelada por cada 10 km equivalentes.

<sup>11</sup> Fuste o árbol completo. El primer método obliga a que las maquinarias ingresen a terreno aumentando los costos en aproximadamente 30%. El método de árbol completo sólo requiere operar desde cancha.



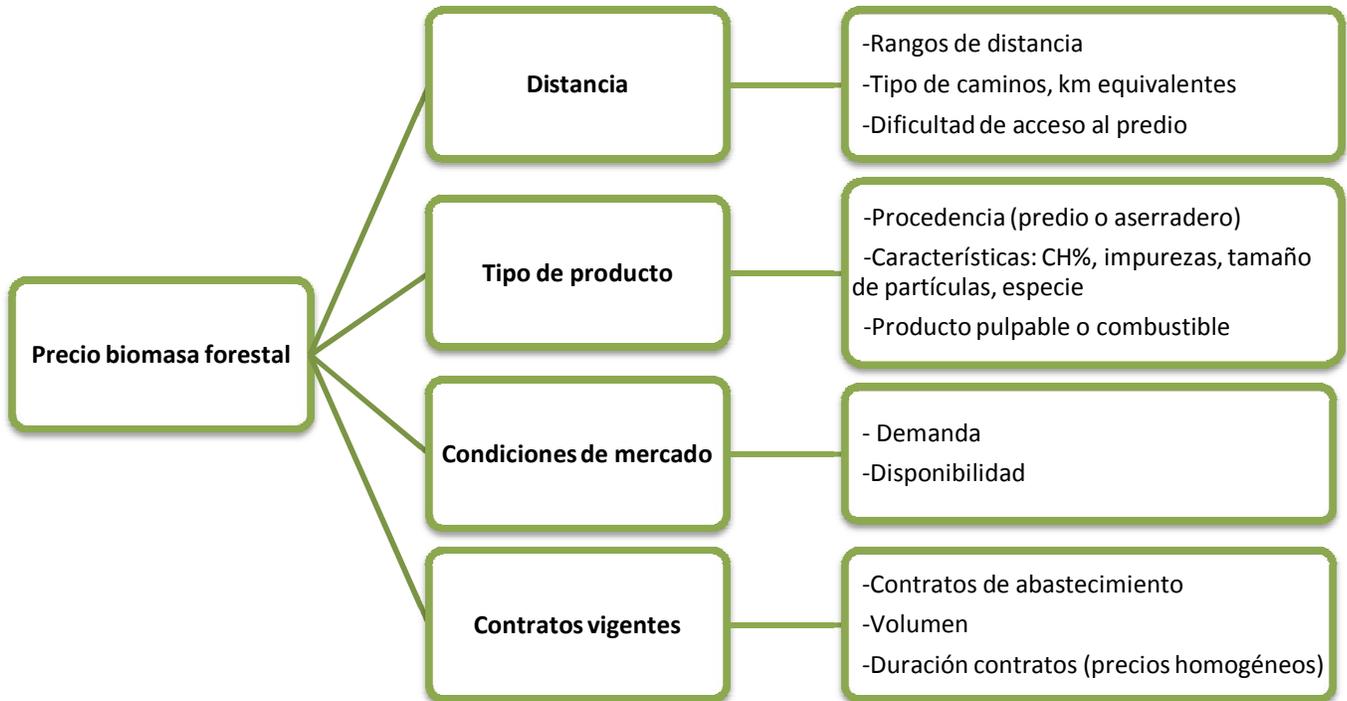
**Figura 6.** Precio de transacción de los desechos de cosecha (biomasa forestal, valor combustible 2013). Elaboración Propia.



**Figura 7.** Función de transporte de astillas. Tarifa en miles de \$/BDT. Datos de origen (N) 236;  $R^2=84,8\%$ . Ecuación:  $\$/BDT= 1.635,09 + 58,01xD$ ; D=Distancia en kilómetros equivalentes. Elaboración Propia.

#### 4.6.1. Factores que determinan el precio de la biomasa

El precio de la biomasa está determinado principalmente por cuatro factores (Figura 8): la distancia, el tipo de producto (relación peso/volumen), las condiciones del mercado y contratos vigentes. En el Cuadro 11 se explicará cada uno de estos factores.



**Figura8.** Factores que determinan el precio de la biomasa, VII y VIII Región. Elaboración Propia.

**Cuadro 11.** Definición de factores que determinan el precio de la biomasa forestal para dendroenergía.

<b>Distancia</b>	En general los costos de transporte los asume la empresa compradora y se trabaja con rangos de distancia. Conforme a lo señalado por varios entrevistados, se obtuvo que se utiliza el término “kilómetros equivalentes”; referido a la distancia por tipo de camino (carretera, camino ripiado o camino de “cerros”).
<b>Tipo de producto</b>	<p>Se podría pensar que las características del material son fundamentales para la determinación del precio, pero esto sólo se ha dado el último año debido al “sobre-stock” de biomasa. Con este nuevo escenario se ha manifestado un interés en controlar ciertas características (humedad, tamaño, contenido de inertes), en especial de los desechos de cosecha, pues aquella que proviene de IM tiene características más homogéneas. En conjunto a lo anterior, existe un contrato o convenio en vigencia que obliga al proveedor a entregar material de las características solicitadas.</p> <p>No se pudo identificar diferencias en el valor de la biomasa post-cosecha de acuerdo a sus características, aún así, los intermediarios consultados señalan controlan las principales características físicas (CH%, impurezas y tamaño) debido a los contratos vigentes. En general se entiende que realizan controles a la entrada de cada planta, pero no se maneja con qué frecuencia. Se resumen las características por las cuales se podría disminuir el precio de la biomasa.</p> <p><u>Contenido de Humedad (CH%)</u>: existen rangos de tolerancia, la cual no puede superar el 45% base seca, o en ocasiones se reciben con un máximo de 55% (especialmente en invierno).</p> <p><u>Contenido de Impurezas</u>: el contenido de tierra o material descompuesto. Los entrevistados señalan que se debe tener en cuenta los cambios de coloración debido al excesivo acopio, pues pueden considerarse impurezas o bien disminuir la calidad del material.</p> <p><u>Tamaño de partículas</u>: En cuanto a la granulometría del material en el pasado se solicitaba que el contenido de inertes fuera entre un 3 y un 5% (en este porcentaje se incluían los finos). Hoy en día este contenido no debe superar el 2%. El resto del material debe estar entre 1 y 10 cm.</p>
<b>Condiciones del mercado</b>	Las condiciones del mercado son fundamentales para la determinación del precio de la biomasa. En general se logró recoger que existe sobreoferta de biomasa, lo que se traduce en un menor precio.
<b>Contratos vigentes</b>	Usualmente las plantas de tableros o generadoras tienen un patrimonio que alcanza para abastecer un porcentaje importante de sus requerimientos. Para asegurar su abastecimiento, muchas empresas realizan convenios con IM e intermediarios para que los provean de biomasa. Aparte de pagar los precios acordados (que cubren la cosecha y transporte de biomasa) se les entrega el “bono volumen”.

#### **4.6.2. Cadena de abastecimiento de biomasa en Chile y comparación con Finlandia**

Similar a lo que ocurre en Chile, Finlandia ha diversificado su matriz energética debido al aumento progresivo del precio del petróleo, disminuyendo su dependencia. Además de ello ha utilizado el pellet para reducir el uso del carbón, disminuyendo la emisión de GEI.

El mercado de biomasa en Finlandia tiene una estructura relativamente similar a la de Chile en cuanto a actores presentes: posee industrias de la madera y del papel, empresas forestales y propietarios de predios (pequeños y medianos), intermediarios que realizan labores de aprovechamiento y transporte.

Debido a su política energética, que contiene un fuerte énfasis ambiental, se entrega una serie de beneficios a todos los actores de la cadena de abastecimiento, lo que conlleva un ordenamiento eficiente y alta producción y disminución de los costos. Los propietarios además reciben apoyo financiero del Estado al aprovechar la biomasa de los raleos comerciales.

La tecnología para la obtención de residuos ha avanzado notablemente, dando cuenta que uno de los procesos más costosos es el triturado, debido al alto costo que significa mover el equipo hasta el predio. En Finlandia este equipo opera a orilla de caminos o bien en la planta generadora.

## 5. DISCUSIÓN

Según los resultados obtenidos en el levantamiento de información y la revisión bibliográfica (Wang *et al.*, 2014; Tromborg *et al.*, 2013 y Ericsson *et al.*, 2004), la situación actual de biomasa en Chile, contrasta con lo que sucede en Finlandia, no solamente por lo avanzado del sistema de aprovechamiento, sino también por el funcionamiento del mercado finlandés, que incluye totalmente a pequeños y medianos propietarios en la cadena de abastecimiento. Esta situación aumentó el aprovechamiento integral de los desechos de manejos intermedios, agregando potencial al sistema e ingresos adicionales a los propietarios.

La propiedad de los predios con plantaciones forestales en el área de estudio, es mayoritariamente de empresas forestales, que han utilizado la gran mayoría de superficie disponible con aptitud forestal. A pesar de ello, UACH (2013) señala que aún existe superficie disponible, pero que no cumple con los requisitos mínimos para establecer plantaciones forestales o dendroenergéticas (saneamiento de predios, distancias superiores al radio de abastecimiento, accesibilidad limitada, fragmentación predial, entre otros).

La ausencia de pagos directos o incentivos para aprovechamientos integrales disminuye el interés de los pequeños y medianos propietarios en ser parte de la cadena de abastecimiento e intentar aumentar el aprovechamiento total de las plantaciones de pino (los actores de biomasa reconocen la tendencia de menor rendimiento pre y post-cosecha en predios no empresas), afectando a todo el sistema.

### 5.1. Actores en la cadena de abastecimiento

Existe un importante nexo entre intermediarios y empresas forestales/generadoras, pues son estas últimas las que contratan los servicios de aprovechamiento de predios, otorgando a los intermediarios un bono de producción al cumplir con el volumen contratado. Este bono, rige sólo para la biomasa obtenida del patrimonio de empresas forestales. Por este motivo el aprovechamiento de predios de medianos propietarios no es tan atractivo a los intermediarios, pero igualmente les genera utilidades.

Los intermediarios por lo tanto, tienen una importante responsabilidad y lugar en la cadena de abastecimiento de la biomasa, siempre regidos por los precios pagados por las empresas

forestales/generadoras. Son los intermediarios quienes determinan qué predios aprovechar. Los ingresos de los intermediarios se distribuyen en faenas de carguío, triturado y transporte; si bien el precio del triturado es más elevado, el ingreso más importante es por transporte; este último se rige por la distancia máxima económica de abastecimiento, en cambio el triturado, tiene importantes costos fijos.

Esta situación contrasta claramente con lo que sucede en Finlandia, pues la organización de los pequeños y medianos propietarios y la fiscalización estatal, regulan las condiciones y precios del mercado, aunque el papel de los intermediarios en el mercado finlandés es también importante (Ericsson *et al.*, 2004).

## **5.2. Volumen anual de desechos transados**

A diferencia de estudios precedentes de disponibilidad de desechos, el presente estudio estima la biomasa necesaria para levantar la generación actual, mediante la demanda actual y futura. Bertrán y Morales (2008) realizan el ejercicio país y señalan que todos los residuos del país (incluyendo desechos finales de cosecha y de manejos intermedios o raleos) podrían alimentar como máximo una potencia de 470 MWe. Para comparar el presente estudio con el de 2008, se deben tener presentes ciertas diferencias detectadas, como se mencionan:

- Rendimientos por hectárea. Bertrán y Morales señalan un rendimiento de aproximadamente 146 m<sup>3</sup>st/ha.
- No explica rendimientos diferenciados por especie o manejo (cosecha o raleo). Además de ello, las características sugeridas para eucalipto (peso) son diferentes de lo obtenido en el presente estudio.
- Utiliza 8.400 horas de funcionamiento para las plantas de generación.
- Agrupa las comunas por distancia a generadoras: el ejercicio es realizado con radios máximos de 60 km. El presente estudio determina que el radio límite económico es 80 km, pero también se obtienen productos a distancias mayores.

Bajo estas diferencias, los resultados del presente estudio no podrían compararse con Bertrán Morales (2008), pues no se cuenta con la información necesaria para homogeneizar los resultados obtenidos. Si bien es cierto, los resultados del estudio de 2008 estiman un potencial cercano a la proyección 2015 de carga máxima del sistema (429,4 MWe), se debe considerar que Bertrán y Morales

utilizan la totalidad de residuos de pino y eucalipto de manejos intermedios y cosechas finales. En ausencia de mayor información, no se puede diagnosticar el origen de estas importantes diferencias.

Por otra parte, el estudio de Bellolio y Karelovic (2011) estiman un potencial mínimo y máximo, pero también basados en los resultados de Bertrán y Morales (2008). Se desconoce el volumen de desechos que utilizaron para llegar a los resultados presentados. A pesar de ello, las cifras obtenidas, brindan un punto de comparación para el presente estudio; el potencial de desechos de cosecha y aprovechamientos intermedios más desechos de IM podrían sustentar una potencia mínima de 706 MWe y máxima de 1.433 MWe. En el presente estudio se estimó el consumo y autoconsumo en 938 MWe, ubicándose dentro del intervalo, considerando una importante disminución en el consumo que sustenta esta potencia debido al autoconsumo de licor negro y desechos de las plantas de celulosa.

### **5.3. Consumo de biomasa para generación actual y potencial**

La industria de los fardos y desechos de IM sustentan el 47% del requerimiento actual de biomasa, las generadoras adquieren la totalidad de los desechos transables de IM propias y fardos del sistema (los fardos son adquiridos por Empresas CMPC), quedando disponibles sólo los de IM de terceros. El 53% restante es aprovechado de las cosechas finales de plantaciones de pino ubicadas en la zona de abastecimiento de cada central.

La biomasa de pino que requiere el sistema, se obtiene de aprovechar los desechos post cosecha de 33,6 a 39,2 mil hectáreas anuales, es decir entre un 77 a 90% de la superficie reforestada anualmente en el área de estudio, siempre y cuando el abastecimiento de fardos y desechos de IM para generación se mantenga constante.

Ante la inminente aprobación de los nueve proyectos en evaluación ambiental (en los próximos dos años), la superficie requerida de pino aumentará a 93 a 109% de la superficie reforestada, parte de ella pertenece a pequeños propietarios o no es aprovechable debido a restricciones ambientales y económicas. Ante este eventual escenario de sobre-demanda de biomasa, se analizan acciones y desafíos futuros para sustentar este mercado.

Bertrán y Morales (2008, actualizado al 2013) señala que la superficie cosechada anualmente alcanza las 62 mil hectáreas, entre pino y eucalipto y 30 mil en manejos intermedios. Este dato es importante, debido a que abre la posibilidad a mayor disponibilidad del recurso, pero se requieren

estadísticas anuales de cosecha para un análisis más acabado. También es necesario separar la superficie total intervenida anualmente por especie, debido a la disparidad del aprovechamiento observado.

Se desconoce la cantidad exacta de superficie intervenida anualmente diferenciada por especie, pero los desechos de manejos intermedios son una fuente de biomasa forestal, que al ser aprovechados no sólo agregan valor al sistema, sino que disminuyen el riesgo de incendios forestales. Según CONAF (2006), la “Silvicultura Preventiva” requiere un correcto manejo de los desechos de podas y raleos.

#### **5.4. Cadena de abastecimiento de biomasa forestal en Chile**

Al comparar la situación actual de Chile con los procesos sucedidos en Finlandia, es posible aseverar que el mercado actual dendroenergético se encuentra en sus primeros pasos. La tecnología de aprovechamiento de biomasa post-cosecha es una de las únicas áreas en que Chile ha intentado asemejarse a Finlandia.

En el área de estudio, la propiedad de los predios forestales plantados con exóticas se concentra en empresas forestales (Según estadísticas CONAF, 2013) quienes regulan el mercado y los precios de biomasa. Bajo este escenario, será difícil integrar a pequeños y medianos propietarios a un mercado que no les genera ingresos directos. Esta situación podría cambiar siempre y cuando el Estado brinde incentivos a este segmento. El caso de Finlandia es distinto: se obtuvieron incentivos debido a que los pequeños y medianos propietarios se asociaron y obtuvieron aportes del Estado, inclusive para integrar al sistema la biomasa de raleos (Hakkila, 2005 y Snäkin *et al.*, 2010).

Será importante poder evaluar la inclusión de incentivos a la generación de energía, con el fin de aumentar los rendimientos de biomasa, alinear los objetivos silviculturales con la maximización de rendimientos de desechos, fortalecer las energías renovables, entre otros.

#### **5.5. Requerimientos óptimos para el aprovechamiento de un predio**

Los factores que influyen en el aprovechamiento de biomasa forestal desde un predio son principalmente tres:

- **Radios de abastecimiento o distancia económica:** Los radios de abastecimiento son determinados por cada empresa y sus intermediarios. Se logró determinar que la distancia límite de abastecimiento es 80 km equivalentes. Bertrán y Morales (2008) reconocen la importancia de este factor, pero mencionan radios de abastecimiento de entre 30 y 60 km. Estas diferencias pueden deberse al aumento sostenido en el aprovechamiento y precio de la biomasa forestal, que obliga a aprovechar desechos a mayor distancia. Bellolio y Karelovic (2011) atribuyen el aumento en la distancia de carga al tamaño de las plantas, señalando que plantas con potencia instalada mayor a 2 MW utilizan desechos que provienen de distancias mayores.
- **Rendimientos por hectárea:** Los rendimientos por hectárea están ligados al método de cosecha. Los métodos de cosecha se resumen en dos: extracción de fuste o árbol completo, o extracción de productos. En el primer caso, se extrae el fuste o árbol y las máquinas operan desde canchas de madereo, disminuyendo los costos del apilado (no deben entrar a los predios). En el segundo caso, los costos de apilado aumentan.

En cuanto a los rendimientos volumétricos, se determinó que varían de acuerdo al tipo de propietario, alcanzando entre 120 y 150 m<sup>3</sup>st/ha (este último en casos excepcionales). El promedio que se utiliza es de 125 m<sup>3</sup>st/ha. También es posible medir el rendimiento en camionadas, como se realiza en terreno, siendo lo óptimo 1,5 por hectárea. Bertrán y Morales (2008) estiman un rendimiento medio por hectárea de 146 m<sup>3</sup>st, para pino y eucalipto y que la capacidad de un camión es de 80 m<sup>3</sup>st. Si bien los resultados obtenidos por ambos estudios son similares, es necesario diferenciar entre rendimientos por especie.

- **Tamaño del predio:** Los intermediarios aprovechan la biomasa residual de predios cuya superficie plantada sea superior a 50 ha. Recientemente algunos intermediarios a modo de competencia, están aprovechando predios con superficies iguales o superiores a 25 ha. Bertrán y Morales (2008) reconocen que los desechos no son extraídos desde “superficies dispersas”, pues no son atractivas para abastecer a una planta. La razón es el costo fijo del astillador, el cual requiere de un volumen mínimo para ser económico.
- **Otras restricciones:** existen otras restricciones al aprovechamiento de biomasa, que afectan el volumen total disponible. Entre ellos se mencionan: la calidad de caminos o acceso a los predios, la

pendiente del terreno y el fraccionamiento de las plantaciones, debida principalmente a la propiedad de los predios.

## 5.6. Precios de biomasa forestal

Se observó que los precios de desechos de IM son homogéneos en todas las regiones estudiadas. A modo de ejemplo se menciona que el precio aserrín de pino fluctúa entre \$3.000 y \$3.500 en origen, es decir menos del 15%. Las variaciones se presentan debido a los convenios entre IM y empresas forestales que las proveen de trozas y al contenido de humedad de los desechos. Cuando existen convenios, los precios pagados presentan baja variabilidad, pues están convenidos con anterioridad entre ambas partes.

Sin duda la distancia de abastecimiento es uno de los factores claves en la definición del precio de la biomasa, Bertrán y Morales (2008), Bellolio y Karelovic (2011) y Pontt (2008) también señalan esta situación. Aun conociendo este criterio, las empresas no pagan costos diferenciados por distancia ante el aprovechamiento de predios de medianos propietarios, sino un valor único, siendo el intermediario quien maneja sus costos. Esta situación afecta el aprovechamiento de predios lejanos, pues el intermediario intentará disminuir sus costos. Cuando los intermediarios aprovechan predios de empresas forestales, los precios se transan de acuerdo a los kilómetros equivalentes recorridos, además de brindarles el “bono volumen”.

El precio de los desechos de pino depende: del costo de transporte, astillado y carguío. Se agrega además el “bono volumen”. El precio actual del carguío está ligado al método de cosecha, variando entre 800 a 2.000 CLP<sup>12</sup>\$/m<sup>3</sup>st. Esta fluctuación se debe a las condiciones del terreno, que determinarán el método de cosecha adecuado y maquinaria utilizada. El precio del astillado es más homogéneo, pues sólo depende de la especie, contenido de humedad y eventualmente el sitio desde donde se realiza la faena. Los precios fluctúan entre 1.800 y 2.500 CLP\$/m<sup>3</sup>st. Por último se estima que el precio del transporte es de \$580 por tonelada cada 10 km equivalentes. (valor de combustible 2013). Como se mencionaba, el bono rige para aprovechamientos de predios de empresas forestales. Se estima que los precios de la biomasa fluctúan entre 4.500 y 6.400 CLP\$/m<sup>3</sup>st, siendo el precio usual de transacción 5.900 CLP/m<sup>3</sup>st.

---

<sup>12</sup> Base 530CL\$/US\$

El precio de transacción también responde a la situación actual del mercado. En el transcurso de las entrevistas se logró evidenciar que existía un “sobre-stock” de biomasa, por lo cual las empresas recibieron esas señales y disminuyeron los precios pagados.

### **5.7. Desafíos futuros para abastecer la demanda de biomasa.**

Actualmente los desechos de IM y de cosecha de predios pertenecientes a empresas forestales son aprovechados eficazmente Chile<sup>13</sup>. A pesar de ello este aprovechamiento debe mejorar, mediante:

- La disminución de humedad de la biomasa (aprovechamiento integral del transporte)
- Aumento de rendimientos en cosecha y transporte de biomasa

Por otra parte, los PPyMP también deben concordar con los objetivos productivos actuales, pues sus características de manejo generan menores rendimientos, en comparación a predios de empresas.

Con la entrada de nuevos proyectos en las regiones del Centro-Sur de Chile, la presión por biomasa de desechos de cosecha aumentará al punto de incluir plantaciones de pequeños propietarios, más volumen de fardos de eucalipto y probablemente biomasa de bosque nativo.

La competencia por similar recurso entre astillas para otros fines (pulpa, tableros, etc.) se plantea como inquietud para un nuevo análisis. Sin embargo, no se pudo comprobar que actualmente exista esta situación.

Al aumentar la superficie requerida para sustentar la generación energética proyectada, existen una serie de desafíos asociados para planificar el abastecimiento de las centrales energéticas. Muchos empresarios e intermediarios entienden esta situación, por lo cual están realizando una serie de acciones para aumentar la disponibilidad de biomasa. A continuación se resumen las acciones que se están llevando a cabo y desafíos pendientes en el mercado de la biomasa.

---

<sup>13</sup> Es importante mencionar que este estudio no pudo verificar si el aprovechamiento realizado por estas faenas extrae porcentajes que limiten la permanencia del suelo orgánico, sin embargo, las calderas que funcionan con biomasa sólo permiten entre un 1-5% de impurezas (generalmente partículas de suelo), por lo cual los aprovechamientos se enfocan en el piso superior, es decir a una distancia del suelo que disminuya el contenido de impurezas.

## *Acciones*

- **Aprovechamiento de biomasa de raleos:** Se conoció la reciente experiencia de aprovechamiento de biomasa forestal de raleos a desecho en pino. Este primer raleo se realiza a los 6 ó 7 años de edad, disminuyendo la densidad de plantación de 1.333 a 700 árb/ha. Debido a la variabilidad de sitios para la especie, se estima un rendimiento de biomasa por hectárea de 70 a 90 m<sup>3</sup>st. La dificultad de esta faena radica en el madereo de la biomasa, debido al poco espacio entre hileras de árboles. Actualmente se está madereando con caballos, y los costos se elevan con respecto a la cosecha de predios para habilitación. Los raleos siguientes pueden ser mecanizados, y se puede obtener biomasa para pulpa y para generación.

Aunque los costos son más elevados, hay empresas que están comenzando a utilizar esta biomasa debido a diversos motivos: reduce la dependencia externa de biomasa, aseguramiento de volumen, respaldo ante aumento de precios de mercado, disminución de riesgos de incendio, entre otros.

En Finlandia se aprovecha la biomasa proveniente de todas las faenas intermedias, cuyos productos no tienen otro destino que la generación de energía, dadas sus características.

- **Fardos:** Las empresas que realizan aprovechamiento de eucalipto están apostando en la compra de más equipos, siempre que la demanda por los fardos aumente. Además se investiga cómo realizar los aprovechamientos para que los rendimientos por unidad de superficie sean mayores.
- **Utilización de otras especies:** La mayoría de la biomasa que se utiliza para energía se obtiene de pino y eucalipto, pero hay ocasiones en que se utilizan otras especies, como espino, acacias, aromos, entre otras. Esta biomasa también aporta al balance, pero es muy difícil de cuantificar, debido a que son oportunidades de habilitaciones de predios, roces u otros.

## *Desafíos*

- **Inclusión de pequeños propietarios (PP):** Actualmente los desechos de cosecha de los PP no están siendo aprovechados, debido a la dispersión predial y bajos rendimientos. Para incluir a este segmento como proveedor de biomasa, se deben coordinar habilitaciones a grupos homogéneos y cercanos y motivar alianzas entre propietarios.

Se observó que en el caso de Finlandia, los pequeños y medianos propietarios se agrupan en “sociedades forestales”, para poder entrar al sistema, solicitar incentivos del estado y facilitar la venta de biomasa.

- **Aumentar rendimientos:** Es uno de los desafíos más importantes, depende de los manejos, métodos de cosecha y maquinarias utilizadas, siempre resguardando las condiciones del suelo. El desafío considera que los manejos y métodos de cosecha que se practiquen a lo largo de la rotación, deberán considerar la extracción futura de biomasa, proyectando la mejor combinación para cada tipo de terreno, aumentando los rendimientos por unidad de superficie.
- **Mercado de eucalipto:** La reforestación con eucalipto hasta el año 2012 ha aumentado a razón de 2 mil hectáreas anuales, y su aprovechamiento en el área dendroenergética es menor. Para sustentar la demanda futura de biomasa será necesario aprovechar este importante recurso. El desafío radica en evaluar nuevas técnicas de astillado para esta especie.
- **Contenido de Humedad:** Disminuir el contenido de humedad al transportar la biomasa disminuye los costos de producción. Controlar la humedad en las plantas de generación aumenta el poder calorífico inferior y disminuye el consumo de biomasa. Bajo estas condiciones, los requerimientos de biomasa serían menores, disminuyendo la presión sobre las plantaciones de pino. Será importante contrastar esta disminución con los contenidos de humedad óptimos que requiere cada caldera.
- **Centros de acopio:** Con el objetivo de optimizar los costos de transporte y centralizar la distribución de biomasa, se requiere planificar la ubicación de centros de acopio, tomando relevancia en centrales sin capacidad de acopiar biomasa. Además presenta beneficios respectivos a la disminución de la humedad de los productos, aseguramiento de volumen de biomasa debido a la estacionalidad de los manejos en plantaciones, posibilidad de inclusión de propietarios de predios más pequeños utilizando una logística avanzada. El almacenamiento de esta biomasa requiere condiciones de seguridad que deben analizarse para disminuir riesgos de incendios (Adaptado de Cameron PartnersGbR, 2010).
- **Aprovechamiento de tocones:** La biomasa radical de pino y eucalipto está disponible, pero actualmente no está siendo utilizada por altos costos de extracción, dificultad y contaminación con partículas de suelo. Gayoso *et al.* (2002) estima que en pino las raíces sobre la biomasa aérea alcanzan un 25% y en eucalipto un 22% (Anexo 14) y que los rendimientos son de aprox. 40 a 50 BDT/ha para pino y 30 BDT para eucalipto.
- **Pelletización y torrefacción de desechos:** Los pellets se caracterizan por poseer una alta densidad energética<sup>14</sup> y menor contenido de humedad, disminuyendo los costos de transporte. Su utilización presenta una serie de ventajas, disminuyendo la emisión de GEI y el espacio de acopio. Su maniobrabilidad, durabilidad y bajo contenido de cenizas significan una serie de beneficios para las

---

<sup>14</sup> Al ser comparados con otros tipos de biomasa. Al compararlos con combustibles fósiles, su densidad energética sigue siendo menor.

generadoras. A pesar de los beneficios de este combustible su valor es mayor, el cambio de equipos significaría una inversión importante y su producción aun es de baja escala en Chile.

- **Aprovechamiento de especies nativas:** Las especies nativas son mínimamente utilizadas debido a una serie de limitaciones. UACH (2013) concluye que existe un potencial neto de biomasa de 9,5 millones de BDT anuales provenientes del manejo sustentable del bosque nativo, capaces de generar más de 2 mil MWe. A pesar de ello, el estudio plantea que depende del precio a transar, debiendo superar como mínimo los costos de producción y transporte; aún bajo este análisis hay un importante desafío en la disminución de la brecha entre los precios pagados por las generadoras y los costos de producción. Debe tenerse en cuenta además la falta de un mercado de productos de mayor valor, la construcción de caminos y aporte del Estado con subsidios a los propietarios.

El mercado de la leña sigue siendo un importante competidor, debido a que los propietarios reciben pago por esta transacción, no así con la biomasa. La dispersión predial es una limitante importante, que podría mejorarse aplicando el esquema de Finlandia.

El manejo del bosque nativo debiera mejorar bosques degradados y fomentar el aprovechamiento de bosques productivos (generalmente renovales), con un mercado primario de trozas de alto valor, leña y desechos de cosecha. Este aprovechamiento debe alinearse con los manejos planteados por CONAF.

- **Plantaciones dendroenergéticas:** UACH, 2013 analiza la posibilidad de establecer plantaciones dendroenergéticas, transformándose en una opción atractiva debido a rotaciones más cortas, pero se espera que tengan un menor retorno en comparación con otros objetivos silviculturales debido a que no producirían materia prima de mayor valor. El desafío en este sentido será disminuir los costos de producción, y apoyar a emprendedores que se ubiquen en radios económicos de abastecimiento, que por razones sitio-específicas no tengan más opciones de utilizar sus tierras.

## 5.8. Comentarios Finales

A modo de apreciación personal, la superficie reforestada anual es sólo una estimación de la superficie cosechada; se estima que esta última puede ser mayor en el área de estudio. Según la apreciación de los actores del mercado de la biomasa, la diferencia entre la superficie reforestada y cosechada podría ser al menos de 10 mil hectáreas. Este vacío en las estadísticas nacionales podría significar un aumento de desechos de cosecha disponibles en el mercado, que podrían aportar entre 40 a 46 MWe más a lo planteado en el presente estudio, bajo los supuestos de aprovechamiento post-cosecha.

Se deja además planteada la necesidad de contar con información más exacta de este mercado, ya que pequeñas variaciones en CH% de la biomasa, PCI, Potencia Neta (MWe), horas reales de funcionamiento, eficiencia eléctrica, rendimientos volumétricos por hectárea, % de desechos de IM disponibles, porcentaje de aprovechamiento de desechos para autoconsumo, utilización de licor negro, desechos de industrias de tableros o utilización de biomasa de origen agrícola, entre otros, pueden generar importantes variaciones con lo estimado en el presente estudio, por lo cual se deja abierta esta incertidumbre al lector, a modo de consideraciones con los resultados entregados.

Por otra parte, la información que se analiza en este documento, hasta ahora se manejaba en reserva debido a lo hermético de este mercado, lo que disminuye las opciones de desarrollo e inclusión de nuevos actores a la industria. La transparencia será fundamental ante un escenario de sobredemanda, en donde todos los actores deberán conocer las opciones y posibilidades que les ofrece el sistema.

Al abrir el conocimiento sobre este mercado a las generaciones venideras de profesionales, aumentará la competitividad del sector, mejorando los aspectos claves y apuntando hacia un aprovechamiento integral de los recursos. La logística y accesibilidad son la clave para mejorar el sistema completo, que hasta ahora se utiliza sólo a nivel de cada interesado.

Queda en evidencia la necesidad de contar con estimaciones más exactas del consumo actual de biomasa, con el fin de comenzar a incluir esta información a los proyectos que se evalúan en el SEIA, condicionando nuevas aprobaciones a la capacidad real del sistema.

## 6. CONCLUSIONES

Para levantar la potencia actual, las generadoras adquieren la totalidad de desechos de IM y fardos del mercado. Los desechos de pino son la fuente más importante, y se sustenta con un 77 a 90% de la superficie reforestada anualmente, pudiendo disminuir por la inclusión de otros desechos. A pesar de existir biomasa para sustentar la potencia actual, gran parte está cautiva por Efor mediante contratos con intermediarios y convenios con IM. Los desechos eventualmente disponibles son de MP.

Al aprobarse nuevos proyectos, la superficie requerida de pino aumentará, pudiendo no ser suficiente para abastecer el consumo futuro. Por ello se plantean acciones y desafíos para abastecer este mercado. Entre los desafíos importantes, se reconocen: utilización de biomasa nativa, aprovechamiento de desechos de raleos, aumentar el nivel de aprovechamiento de eucalipto e integración de pequeños propietarios a la cadena de abastecimiento. Para aprovechar la biomasa nativa, será importante crear un mercado primario de productos, construcción de caminos, incentivos y manejo sustentable de bosques degradados y productivos. Por otra parte, la biomasa de raleos tiene mayores costos de aprovechamiento, pero disminuye la dependencia externa y riesgo de incendios. Por último, el aprovechamiento actual de eucalipto es muy limitado, siendo una importante fuente combustible.

La integración de pequeños propietarios al sistema dependerá del cumplimiento de los requisitos para aprovechamiento de predios solicitados por los intermediarios. Cumplir con ello actualmente es poco probable; para que estos propietarios se integren al sistema, se sugiere seguir el modelo finlandés, donde se agrupan en “sociedades forestales”.

Las Efor e intermediarios destacan en importancia en la cadena de abastecimiento, pues las primeras son propietarias de la mayoría de predios plantados del área de estudio, regulando el precio de biomasa. Los intermediarios regulan costos de aprovechamiento, por tanto las utilidades del sistema.

Por último, los precios de desechos de IM son menos variables, debido a la homogeneidad de los productos y los convenios existentes. Los desechos de predios y fardos dependen de lo ofrecido por las empresas, la situación del mercado y últimamente de las características del producto.

Se concluye además que para eventuales incentivos a la generación con ER, debiese existir mayor regulación al mercado, con el propósito de diagnosticar a qué actor de la cadena entregar beneficios. Chile deberá establecer protocolos de transacción de biomasa, la integración de todos los

actores de la cadena y crear estrategias para enfrentar un escenario de sobre-demanda de biomasa. A la vez, la evaluación ambiental de proyectos debiera regirse por la capacidad máxima del sistema. Este estudio propone una aproximación, pero con la inclusión de todos los actores a la discusión, se puede estimar fehacientemente la disponibilidad de biomasa para energía.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

### *Referencias de artículos en revistas periódicas*

- Ericsson K, S Huttunen, L Nilsson, P Svenningsson. 2004. Bioenergy policy and market development in Finland and Sweden. *Energy Policy*. 32(1): 1707-1721.
- Hakkila P. 2005. Factors driving the development of forest energy in Finland. *Biomass and Bioenergy*. 30 I(4): 281-288.
- Snäkin J, T Muilu, T Pesola. 2010. Bioenergy decision-making of farms in Northern Finland: Combining the bottom-up and top-down perspectives. *Energy Policy*. 38 I(10): 6161-6171.
- Tromborg E, T Ranta, J Schweinle, B Solberg, G Skjevrak, D Tiffany. 2013. Economic sustainability for wood pellets production. A comparative study between Finland, Germany, Norway, Sweden and the US. *Biomass and Bioenergy*. 57(1): 68-77.
- Wang L; M Lurina, J Hyytiäinen, E Mikkonen. 2014. Bio-coal market study: Macro and micro-environment of the bio-coal business in Finland. *Biomass and Bioenergy*. 63(1): 198-209.

### *Referencias de libros y otras publicaciones*

- Bellolio, R.; Karelovic, P. 2011. Energía de Biomasa Forestal, lecciones internacionales y su potencial en Chile. Informe Final. Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. 28 p.
- Bertrán, J., E Morales. 2008. Potencial de Biomasa Forestal. Potencial de Generación de Energía por Residuos del Manejo Forestal en Chile. CNE - GTZ. 54 p.
- Cameron PartnersGbR. 2010. Logística de recolección y tratamiento de biomasa. Estudio de capital humano para desarrollar la industria de las energías renovables no convencionales. 49 p.
- Celulosa Arauco y Constitución S.A. 2012. Memoria Anual 2012. 315 p.
- Centro de Energías Renovables (CER). 2011. Libro Biomasa. Energía Biomasa.
- CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). 2008. Silvicultura Preventiva. Silvicultura para la prevención de incendios forestales en plantaciones forestales. Documento de trabajo 452. 38 p.
- CNE-INFOR-GTZ. 2007. Disponibilidad de Residuos Madereros. Residuos de la Industria Primaria de la Madera. Disponibilidad para uso energético. 120 p.
- Empresas CMPC. 2011. Memoria Anual 2011. 218 p.
- FIA (Fondo de Innovación Agraria). 2011. Informe Técnico Caracterización de materia prima Combustibles Sólidos de Madera (CSM). FIA. Mejoramiento de la gestión comercial y la calidad de

combustibles sólidos de madera (CSM) como fuente de energía renovable en la Región de Los Ríos. Código PYT-2010.0176.

Gayoso J, J Guerra, D Alarcón. 2002. Contenido de carbono y funciones de biomasa en especies nativas y exóticas. Universidad Austral de Chile. Valdivia, Chile.

IPCC. 2006. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases efecto invernadero. Sector Energía. Volumen 2: energía.

Universidad Austral de Chile (UACH). 2013. Evaluación del mercado de biomasa y su potencial. Informe Final de Proyecto. Versión 1.4. 179 p.

Universidad de Concepción (UdeC). 2011. Evaluación Económica, Ambiental y Social del Uso Racional y Sustentable de la Biomasa Forestal de la Región de Aysén. Unidad de Desarrollo Tecnológico. Código 07CN13IFM-208. 190 p.

### ***Referencias a documentos en Internet:***

Álvarez O, F Peña. 2011. Zonificación del potencial energético de la biomasa residual forestal en la cuenca del lago Ranco, Chile. Antecedentes para la planificación energética regional. Consultado 2 de Agosto, 2014. Disponible en [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0717-92002011000100009](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0717-92002011000100009)

Central Energía. 2011. Legislación eléctrica. Consultado 11 de Abril, 2014. Disponible en <http://www.centralenergia.cl/regulacion/legislacion-electrica-chile/>

Central energía. 2012. Proyectos. Consultado 13 Mayo, 2014. Disponible en <http://www.centralenergia.cl/proyectos/>

Centro de Energías Renovables (CER). 2013. Guía de Gestión ERNC. Consultado en Marzo 15, 2014. Disponible en <http://cer.gob.cl/manual-de-desarrollo-de-proyectos-ernc/>

Centro de Energías Renovables (CER). 2014. Reporte CER Abril 2014. Estado de Proyectos ERNC en Chile. Consultado 2 Mayo, 2014. Disponible en [http://www.cer.gob.cl/mailling/2014/abril/REPORTE\\_Abril%20Dise%fl0%20V1.pdf](http://www.cer.gob.cl/mailling/2014/abril/REPORTE_Abril%20Dise%fl0%20V1.pdf).

CORPORACIÓN NACIONAL FORESTAL (CONAF). 2013. Estadísticas forestales. Consultado en Enero-Mayo, 2014. Disponible en <http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/estadisticas-forestales/>

Gómez, T.; Vergara, M. 2013. Biomasa Forestal. Seminario de Electrónica Industrial. Consultado 3 Mayo, 2014. Disponible en <http://www2.elo.utfsm.cl/~elo383/apuntes/InformeBiomasa.pdf>.

INFOR. 2013. Estadísticas Forestales. Consultado 12 Enero, 2014. Disponible en <http://wef.infor.cl/>

MINENERGIA (Ministerio de Energía). 2014. Energías Renovables No Convencionales. Biomasa. Consultado 30 Abril, 2014. Disponible en

[http://antiguo.MINENERGIA.cl/minwww/opencms/03\\_Energias/Otros\\_Niveles/renovables\\_no\\_convencionales/Tipos\\_Energia/biomasa.html](http://antiguo.MINENERGIA.cl/minwww/opencms/03_Energias/Otros_Niveles/renovables_no_convencionales/Tipos_Energia/biomasa.html)

LIGNUM. 2014. En Chile: destacan proyección de la biomasa forestal como energía renovable. Consultado 10 Octubre, 2014. Disponible en <http://www.lignum.cl/2014/07/17/en-chile-destacan-proyeccion-de-la-biomasa-forestal-como-energia-renovable/>

Lozano, M.; Ramos, J. 2007. Análisis Energético y Económico de Sistemas de Cogeneración. Consultado 13 Marzo 2014. Disponible en [http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0718-07642007000500010](http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-07642007000500010)

Piña, C. 2007. Regulación y Funcionamiento del sector energético en Chile. Capítulo I. Consultado 13 Marzo 2014. Disponible en [http://www.ariae.org/download/sistemas\\_energeticos/chile.pdf](http://www.ariae.org/download/sistemas_energeticos/chile.pdf)

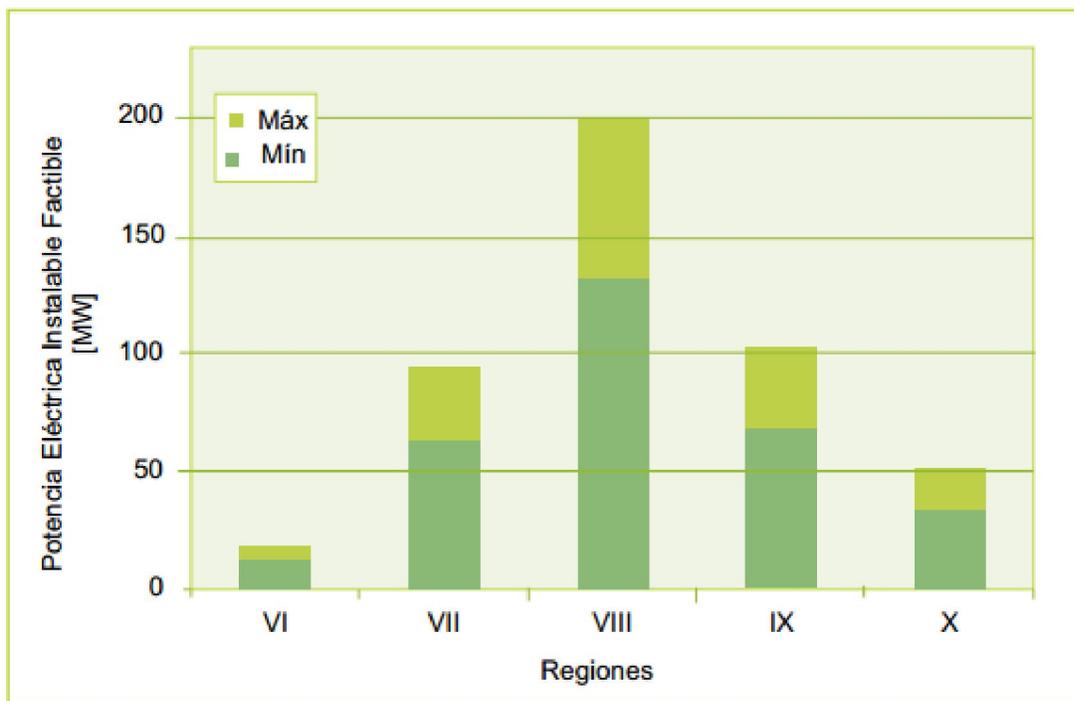
Pontt, C. 2011. Estudio de contribución de las ERNC al SIC al 2015. Informe sectorial final. Potencial de biomasa en Chile. Universidad Técnica Federico Santa María. 74 p.

## ANEXOS

**Anexo 1.** Superficie de uso forestal, 2013. Fuente: INFOR (2013).

<b>Uso Actual territorio</b>	<b>Superficie (ha)</b>	<b>Porcentaje</b>
Bosque Nativo	13.182.824	17,4%
Áreas Silvestres Protegidas	14.569.896	19,3%
Plantaciones forestales	2.414.389	3,2%
<i>Pinus radiata</i>	1.470.665	60,9%
<i>Eucalyptus globulus</i>	541.860	22,4%
<i>Eucalyptus nitens</i>	232.138	9,6%
Otras especies	169.726	7,1%

**Anexo 2.** Potencia eléctrica (MWe) instalable factible por Región, según Bertrán y Morales.

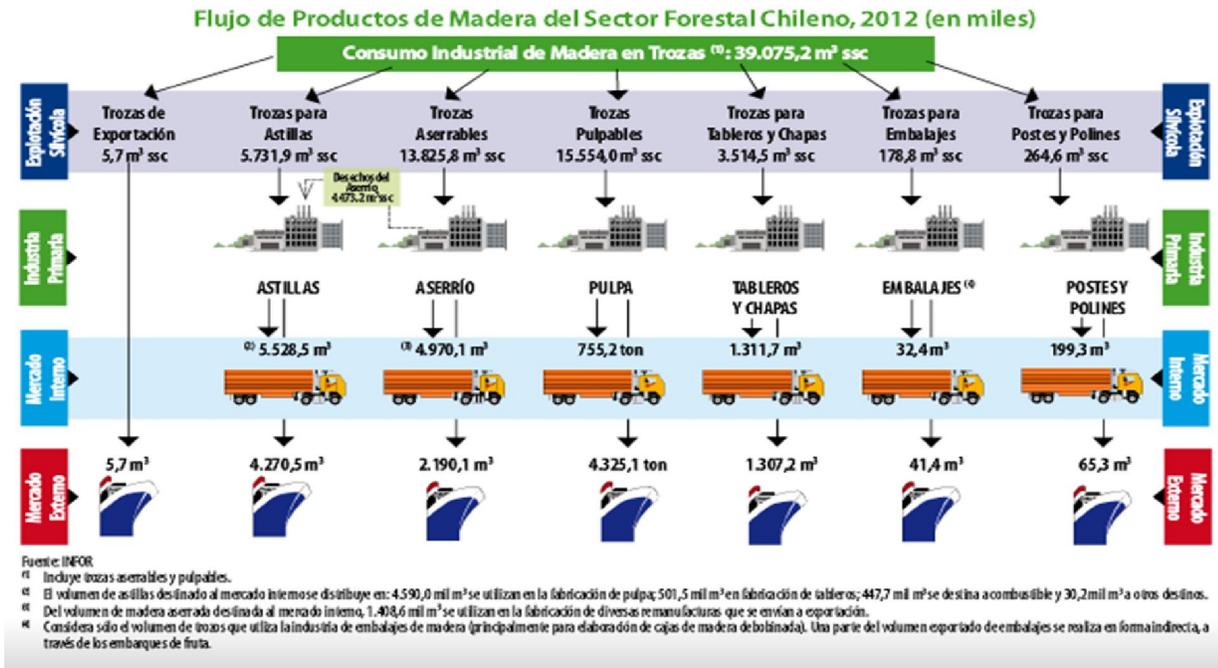


Para los efectos de la figura, X Región representa a las Regiones de Los Lagos y de Los Ríos.

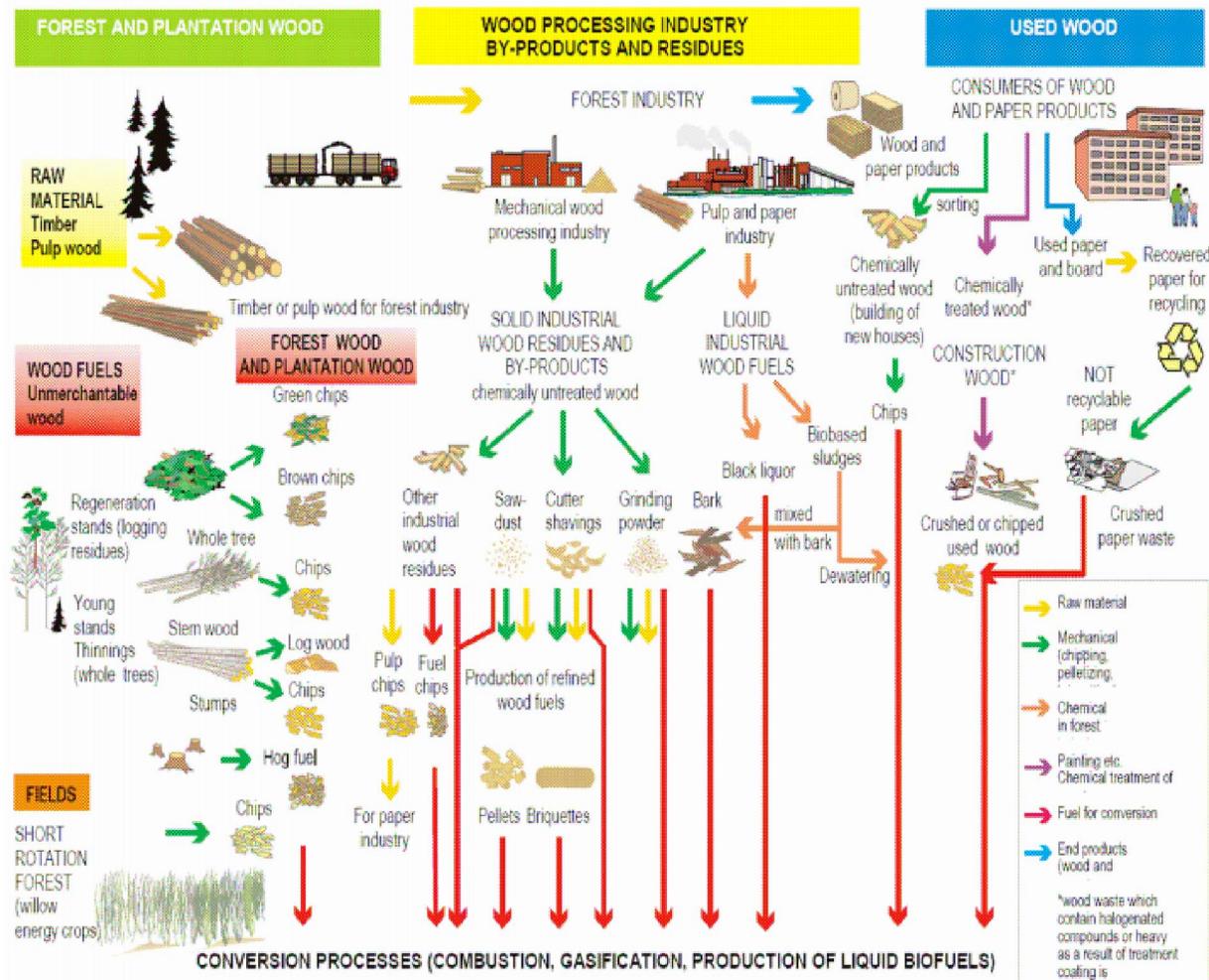
**Anexo 3.** Ventajas y desventajas de las ERNC (Energías Renovables no convencionales).

<b>Algunas Ventajas de las ERNC</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Fuentes locales de energía que contribuyen a la diversificación de combustibles y disminución de la dependencia externa.</li><li>• Los costos de generación son estables y no dependen de costos de derivados del petróleo.</li><li>• Contribuyen a disminuir la incertidumbre del precio a largo plazo de la energía.</li><li>• Suministro confiable a escalas temporales largas, y a excepción de las pequeñas hidráulicas, tiene poca variabilidad interanual.</li><li>• Menor impacto ambiental (local y global).</li><li>• El uso de biomasa puede incentivar economías locales y rurales, creando nuevas opciones de ingresos.</li></ul>
<b>Algunas desventajas de las ERNC</b>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mayores costos de operación.</li><li>• No todas las ERNC pueden almacenarse.</li><li>• Mayor inversión en investigación.</li><li>• Son dependientes de las variaciones climático-ambientales.</li><li>• La biomasa tiene una baja densidad relativa de energía, por lo que se requieren grandes volúmenes para producir niveles de potencia comparables con los producidos por combustibles fósiles. Esto hace que su transporte y manejo se encarezcan.</li></ul>

Anexo 4. Cadena de comercialización de trozas INFOR (2010).



**Anexo 5. Esquema de funcionamiento de mercado de la biomasa en Finlandia.**



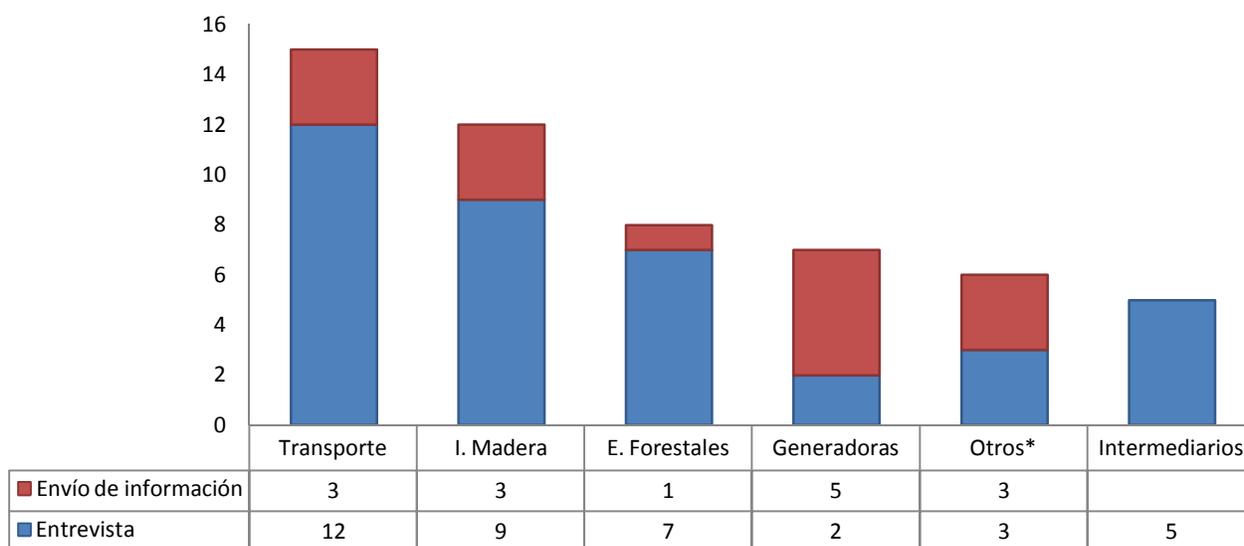
**Anexo 6.** Centrales que operan con biomasa forestal en Chile (Conectadas al SIC) consideradas en el estudio.

<b>Región</b>	<b>Nombre central</b>	<b>Comuna</b>
Región de O'Higgins	Central Energía Pacífico	San Francisco de Mostazal
Región del Maule	Celco-Constitución	Constitución
Región del Maule	Licantén	Molina
Región del Maule	Constitución ENESA	Constitución
Región del Maule	Viñales	Constitución
Región del Biobío	Arauco-Horcones	Arauco
Región del Biobío	Cholguán-Celco-Trupán	Yungay
Región del Biobío	Nueva Aldea I	Ránquil
Región del Biobío	Escuadrón ex FPC	Concepción
Región del Biobío	Nueva Aldea III	Ránquil
Región del Biobío	Masisa	Cabrero
Región del Biobío	Santa Fé	Nacimiento
Región del Biobío	Central Laja CMPC	Cabrero
Región del Biobío	Forestal León	Coelemu
Región del Biobío	NorskeSkog	San Pedro de La Paz
Región del Biobío	Nueva Energía	Coronel
Región del Biobío	Energía Verde	Cabrero
Región de la Araucanía	Bioenergía Lautaro	Lautaro
Región de la Araucanía	Pacífico Mininco	Mininco
Región de Los Ríos	Valdivia	San José de la Mariquina

**Anexo 7.** Principales preguntas planteadas en entrevistas a actores del mercado de la biomasa en Chile, objetivos y limitaciones para la obtención de esta información y Universo de entrevistas.

<b>Interrogantes</b>	<b>Objetivo planteado</b>	<b>Limitaciones para obtención de información</b>
Consumo de biomasa por central	Información requerida para estimar el volumen y superficie de biomasa en Chile	Las centrales no entregan el volumen de productos que requieren o aproximan en número de camionadas diarias.
Porcentaje de biomasa forestal y agrícola consumida	Determinar la generación energética en base a biomasa forestal	No se pudo determinar esta información en San Francisco de Mostazal, en las demás se obtiene una aproximación en porcentaje anual
Autoconsumo de desechos y licor negro en plantas de celulosa	Determinar el consumo real de biomasa de IM y predios	No se pudo contar con información directa, sólo aproximaciones de expertos
Volumen de productos de industrias de la madera transados	Determinar la biomasa requerida de predios mediante balance	La información entregada es sólo una aproximación, pero los valores señalados son similares entre industrias de la madera
Características de astillas de madera	Caracterizar los requerimientos mínimos de las empresas y determinar la existencia de distintos precios por calidad	Recientemente se está evaluando la biomasa por calidad debido al sobre-stock actual
Costos y precios transados de biomasa de predios e industrias de la madera	Determinación de costos y precios de transacción	Información difícil de obtener, debido a que este mercado aún no está regulado y los precios son determinados por las empresas
Valor de transacción de astillas de madera pequeños y medianos propietarios	Determinar los precios pagados a pequeños y medianos propietarios por sus desechos de cosecha	No se logró determinar una situación de pago por desechos de cosecha
Distancias económicas de transporte	Determinar radios de abastecimiento por central	Sin limitante
Tipos de contratos de abastecimiento de biomasa	Determinar la forma de operar entre empresas-intermediarios y propietarios	No se pudo establecer el plazo mínimo y máximo de los contratos entre empresas e intermediarios
Existencia de centros de acopio de biomasa	Determinar la forma de operar en meses de alta precipitación	No se pudo determinar operaciones con este método
Costos y rendimientos de los procesos de obtención de biomasa de predios	Conocer los costos del proceso	Información difícil de obtener, debido al hermetismo de las empresas
Utilización de leña a la matriz dendroenergética	Determinar la tipología de productos utilizados para la generación de energía	Sin limitaciones

**Anexo 7.1.** Cantidad de entrevistados por tipo de actor en la cadena de abastecimiento de biomasa.  
Entrevista y envío de información vía correo electrónico.



\*Otros: CONAF, CORMA, Organismos Públicos.

**Anexo 8.** Memoria de Cálculo y supuestos.

CH% y peso: señalados por actores del mercado de la biomasa.

PCS: Proyecto FIA. 2013. Mejoramiento de la gestión comercial y la calidad de combustibles sólidos de madera (CSM) como fuente de energía renovable en la Región de Los Ríos. Código PYT-2010.0176.

Estimación potencia Desechos de IM, actual

<b>Desechos de IM</b>		
Peso	488	kg/m3s.s.c.
Disponibilidad	1.731.939	m3st
PCS	4.832	kcal/kg
CH%	25%	
PClcero	PCS kcal/kg-(0,06 x 9 x 580 kcal/kg)	
Donde:		
0,06	% Hidrógeno	
9	Factor de conversión H en H2O	
580	Entalpía	
PCI25%	3.244,10	kcla/kg
Peso total	1.731.939 kg x 488 kg/m3ssc	
Peso total	2,74187E+12	kg
kW	Peso total x (1 kWh/860 kW)	
kW	3.188.219.366,55	
kWh	kW/7500	
kWh	425.095,92	
kWhe	kWh*0,3 (factor eficiencia eléctrica)	
kWe	127.528,77	
Mwe	127,53	

Estimación potencia fardos, actual

Fardos		
Peso	348	kg/fardo
Disponibilidad	800.000	fardos
PCS	4.545	kcal/kg
CH%	18,7%	
PCIcero	PCS kcal/kg-(0,06 x 9 x 580 kcal/kg)	
Donde:		
0,06	% Hidrógeno	
9	Factor de conversión H en H2O	
580	Entalpía	
PCI18,7%	3.332,36	kcla/kg
Peso total	800.000 fardos x 348 kg/fardo	
Peso total	9,2773E+11	kg
kW	Peso total x (1 kWh/860 kW)	
kW	1.078.755.632,58	
kWh	kW/7.500	
kWh	143.834,08	
kWhe	kWh*0,3 (factor eficiencia eléctrica)	
kWe	43.150,23	
Mwe	43,15	

Estimación potencia Desechos de cosecha pino, actual

Desechos de cosecha		
Peso		315 kg/m3st
Disponibilidad		4.700.189 m3st
PCS		4.846 kcal/kg
CH%		45%
PCIcero	PCS kcal/kg-(0,06 x 9 x 580 kcal/kg)	
Donde:		
0,06	% Hidrógeno	
9	Factor de conversión H en H2O	
580	Entalpía	
PCI45%		2.232,04 kcal/kg
Peso total	4.700.189 m3st x 315 kg/m3st	
Peso total		3,30467E+12 Kg
kW	Peso total x (1 kWh/860 kW)	
kW		3.842.637.330,82
kWh	kW/7.500	
kWh		512.351,64
kWhe	kWh*0,3 (factor eficiencia eléctrica)	
kWe		153.705,49
Mwe		153,71

Estimación potencia Desechos de IM, proyección

Desechos de IM		
Peso	488	kg/m <sup>3</sup> s.s.c.
Disponibilidad	2.125.671	m <sup>3</sup> st
PCS	4.832	kcal/kg
CH%	25%	
PCIcero	PCS kcal/kg-(0,06 x 9 x 580 kcal/kg)	
Donde:		
0,06	% Hidrógeno	
9	Factor de conversión H en H <sub>2</sub> O	
580	Entalpía	
PCI25%	3.244,10	kcal/kg
Peso total	1.731.939 kg x 488 kg/m <sup>3</sup> ssc	
Peso total	3,36519E+12	kg
kW	Peso total x (1 kWh/860 kW)	
kW	3.913.016.248,90	
kWh	kW/7500	
kWh	521.735,50	
kWhe	kWh*0,3 (factor eficiencia eléctrica)	
kWe	156.520,65	
Mwe	156,52	

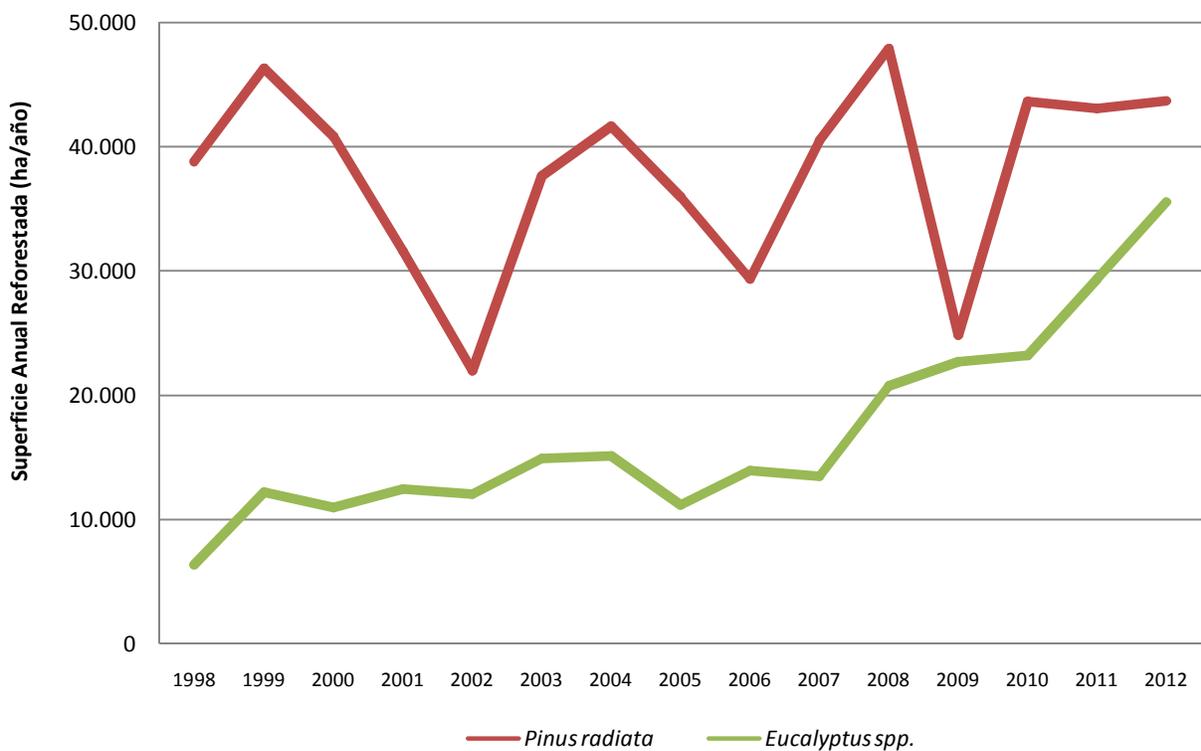
Estimación potencia fardos, proyección

<b>Fardos</b>		
Peso	348	kg/fardo
Disponibilidad	882.000	fardos
PCS	4.545	kcal/kg
CH%	18,7%	
PClcero	PCS kcal/kg-(0,06 x 9 x 580 kcal/kg)	
Donde:		
0,06	% Hidrógeno	
9	Factor de conversión H en H2O	
580	Entalpía	
PCI18,7%	3.332,36	kcal/kg
Peso total	800.000 fardos x 348 kg/fardo	
Peso total	1,02282E+12	Kg
kW	Peso total x (1 kWh/860 kW)	
kW	1.189.328.084,91	
kWh	kW/7.500	
kWh	158.577,08	
kWhe	kWh*0,3 (factor eficiencia eléctrica)	
kWe	47.573,12	
Mwe	47,57	

Estimación potencia Desechos de cosecha pino, proyección

Desechos de cosecha		
Peso	315	kg/m3st
Disponibilidad	6.796.186	m3st
PCS	4.846	kcal/kg
CH%	45%	
PCIcero	PCS kcal/kg-(0,06 x 9 x 580 kcal/kg)	
Donde:		
0,06	% Hidrógeno	
9	Factor de conversión H en H2O	
580	Entalpía	
PCI45%	2.232,04	kcal/kg
Peso total	4.700.189 m3st x 315 kg/m3st	
Peso total	4,77835E+12	kg
kW	Peso total x (1 kWh/860 kW)	
kW	5.556.218.703,28	
kWh	kW/7.500	
kWh	740.829,16	
kWhe	kWh*0,3 (factor eficiencia eléctrica)	
kWe	222.248,75	
Mwe	222,25	

Anexo 9. Superficie anual reforestada pino y eucalipto, 1998-2012. Fuente (INFOR, 2013).

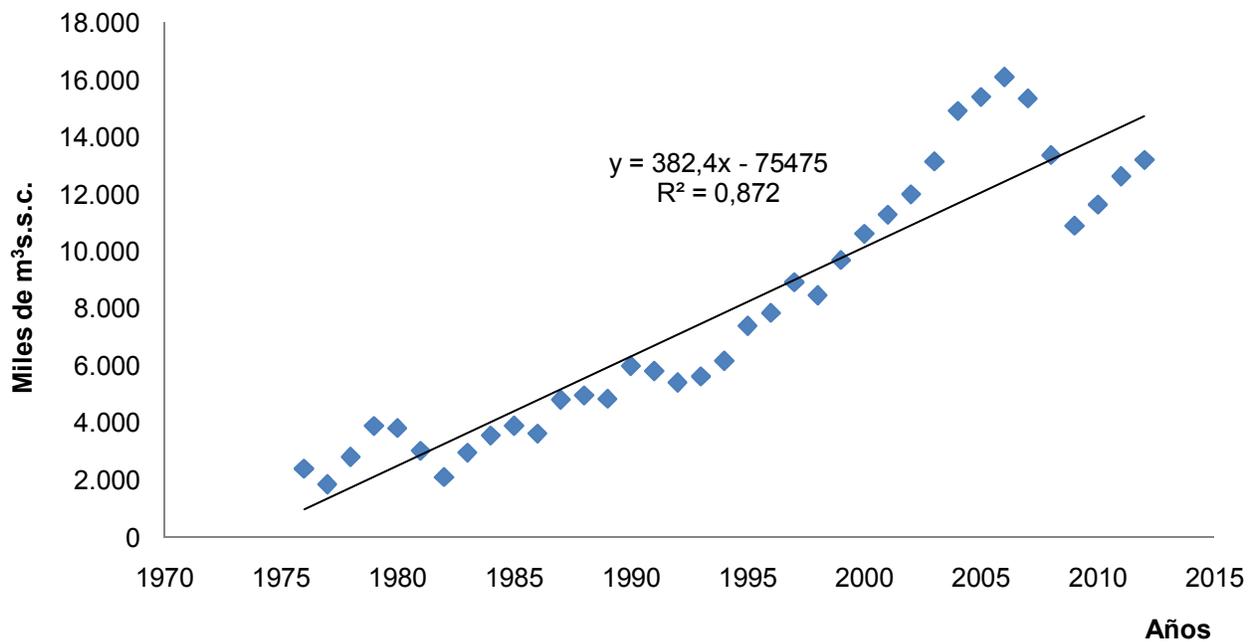


**Anexo 10.** Proyectos en Evaluación Ambiental por Región, total 276 MW.

<b>Región</b>	<b>Proyectos SEIA</b>	<b>Total MW SEIA</b>	<b>Proyectos RCA</b>	<b>Total MW RCA</b>
<b>VII</b>	1	6	1	1
<b>VIII</b>	3	80	4	189
<b>TOTAL</b>	<b>4</b>	<b>86</b>	<b>5</b>	<b>190</b>

Fuente: SEREMIA de Energía del Biobío (2014) y CER (2013).

**Anexo 11.** Proyección de volumen de trozas al año 2015.



**Anexo 12.** Proyección volumétrica anual de fardos de *Eucalyptus spp.*

<b>Año</b>	<b>Volumen m<sup>3</sup>st/año</b>
<b>Actual</b>	800.000
<b>1</b>	840.000
<b>2</b>	882.000

**Anexo 13.** Proyección de superficie cosecha anual al inicio de operación de los nuevos proyectos en EA por tipo de propietarios para pino y eucalipto. Elaboración Propia.

Región	Especie	Tipo de propietario <sup>a)</sup>			Superficie estimada cosecha (ha) <sup>b)</sup>
		Pequeño	Mediano	Empresas	
VI	<i>Pinus radiata</i>	247	719	96	1.061
	<i>Eucalyptusspp.</i>	199	580	77	857
VII	<i>Pinus radiata</i>	753	5.410	6.762	12.926
	<i>Eucalyptusspp.</i>	115	829	1.036	1.981
VIII	<i>Pinus radiata</i>	1.435	7.026	14.745	23.205
	<i>Eucalyptusspp.</i>	1.297	6.350	13.328	20.975
IX	<i>Pinus radiata</i>	683	1.515	5.466	7.664
	<i>Eucalyptusspp.</i>	826	1.831	6.605	9.262
XIV	<i>Pinus radiata</i>	145	1.031	724	1.901
	<i>Eucalyptusspp.</i>	148	1.048	737	1.933
Total	<i>Pinus radiata</i>	3.263	15.701	27.793	46.757
	<i>Eucalyptusspp.</i>	2.585	10.640	21.783	35.008
<b>Total</b>		<b>5.849</b>	<b>26.340</b>	<b>49.576</b>	<b>81.765</b>
<b>Porcentaje</b>		<b>7,153</b>	<b>32,215</b>	<b>60,631924</b>	<b>100</b>

<sup>a)</sup> Esto es una aproximación, ya que las definiciones de tamaño de propiedad no necesariamente concuerdan con lo planteado por CONAF, quien define en la Ley 20.283 de Bosques sólo a pequeños propietarios, cuya superficie debe ser menor a 200 ha no ubicadas en las regiones: I a IV, XI, XII, en la comuna de Lonquimay en la IX Región y en la provincia de Palena en la X Región.

<sup>b)</sup> Se ponderó la superficie de reforestación por tipo de propietario informado estadísticas de CONAF. Para *Pinus radiata* se consideró el promedio de superficie anual reforestada desde 2010 a 2012, debido al mayor ajuste y correlación entre esos años. Para *Eucalyptusspp.* se utilizó el promedio de superficie reforestada de 2005 a 2012, debido a que la reforestación se presenta más estable. Se sumó además la superficie forestada que entró a edad de rotación, estimando 12 años.

**Anexo 14.** Participación de los componentes del árbol, % en peso.

<b>Componente</b>	<b><i>Pinus radiata</i></b>	<b><i>Eucalyptus globulus</i></b>	<b><i>Nothofagus obliqua</i></b>
Fuste sin corteza	60,61	57,60	73,62
Corteza	9,61	13,44	15,13
Ramas	14,60	14,45	10,04
Follaje	14,13	14,51	1,21
<b>Suma biomasa aérea</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>
<b>Raíces sobre biomasa aérea</b>	<b>25,43</b>	<b>21,59</b>	<b>33,24</b>

(Fuente: Gayoso, *et al.* 2002)