



UNIVERSIDAD DE CORDOBA
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes
Departamento de Ingeniería Rural

TESIS DOCTORAL



**CARACTERIZACION FÍSICA, QUÍMICA Y ENERGÉTICA DE
BIOMASA LEÑOSA COMO MATERIA PRIMA
BIOCOMBUSTIBLE**

Autor: Rene Julio Carmona Cerda
Director: Dr. Fco. Jesús López Giménez

CORDOBA, SEPTIEMBRE DE 2015

TITULO: *Caracterización Física, Química y Energética de Biomasa Leñosa como Materia Prima Biocombustible.*

AUTOR: *René Julio Carmona Cerda*

© Edita: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Córdoba. 2015
Campus de Rabanales
Ctra. Nacional IV, Km. 396 A
14071 Córdoba

www.uco.es/publicaciones
publicaciones@uco.es

UNIVERSIDAD DE CORDOBA

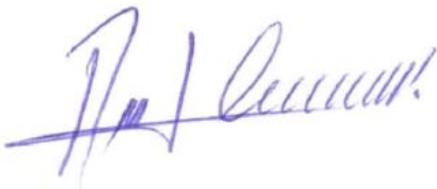
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica y de Montes

Departamento de Ingeniería Rural

**Caracterización física, química y energética de
biomasa leñosa como materia prima
biocombustible**

Tesis Doctoral presentada por Rene Julio Carmona Cerda para optar al
grado de Doctor por la Universidad de Córdoba

El Doctorando



Fdo. Rene J. Carmona Cerda

Septiembre 2015
Córdoba - España



TÍTULO DE LA TESIS: CARACTERIZACION FISICA, QUIMICA Y ENERGETICA DE BIOMASA LEÑOSA COMO MATERIA PRIMA BIOCOMBUSTIBLE

DOCTORANDO/A: RENE JULIO CARMONA CERDA

INFORME RAZONADO DEL/DE LOS DIRECTOR/ES DE LA TESIS

(se hará mención a la evolución y desarrollo de la tesis, así como a trabajos y publicaciones derivados de la misma).

El doctorando inició la realización de esta tesis al incorporarse al Programa de doctorado “Ciencia Forestal” impartido por la Universidad de Córdoba en Chile, dirigido a doctorandos senior de aquel país y limítrofes. Las dificultades de seguimiento motivadas por la financiación y la disponibilidad de tiempo (al ser profesor de la Facultad de Ciencias Forestales de la Universidad de Chile) justifican la extensión de esta tesis en el tiempo, aunque el resultado final es notable ya que ha permitido de una parte establecer una estrecha colaboración entre ambas universidades y de otra la publicación del artículo “*Biomass yield and quality of an energy dedicated crop of Poplar (Populus spp.) clones in the Mediterranean zone of Chile*” en la revista Biomass and Bioenergy o la publicación del libro “*Caracterización de Biomasa Leñosa con fines Energéticos disponible en Chile.*” Editado por Andros Impresores (2013. Santiago de Chile), así como diversas comunicaciones en Congresos internacionales.

El doctorando ha adquirido además, numerosas habilidades y destrezas en el laboratorio químico y mecánico, en relación con esta temática. Ha mostrado una alta capacidad analítica, deductiva, de buen manejo y de buen hacer en el trabajo de laboratorio. Ha mostrado iniciativa tanto en la resolución de problemas como al abordar nuevas etapas a las que le ha

conducido este estudio y conoce las herramientas necesarias para dirigir su propia investigación.

Por todo ello, se autoriza la presentación de la tesis doctoral.

Córdoba, __26__ de __Septiembre__ de 2015__

Firma del/de los director/es

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'F.J. López Giménez', with a stylized flourish underneath.

Fdo.: _F.J López Giménez_

INDICE

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	ANTECEDENTES GENERALES	2
2.1	Antecedentes de la matriz energética de Chile	2
2.1.1	Balance de Energía Primario	2
2.1.2	Balance Energía Secundaria y Consumo Sectorial	3
2.1.3	Matriz eléctrica	4
3.	ENERGIAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES (ERNC)	8
3.1	Energía Solar	8
3.2	Energía Eólica	8
3.3	Energía Geotérmica	9
3.4	Energía Hidroeléctrica	10
3.5	Energía Marina	11
3.6	Energía de la Biomasa	12
3.1.1	Biomasa y biocombustibles	13
4.	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA	18
4.1	Características Físicas	18
4.2	Características Químicas	20
4.3	Características Energéticas	26
5.	BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN CHILE	29
5.1	Residuos de la industria de transformación mecánica del recurso maderero	34
5.2	Bosque Nativo.	38
5.3	Plantaciones Dendroenergéticas	43
6.	OBJETIVOS	45
6.1	Objetivo General	45
6.2	Objetivos Específicos	45
7.	MATERIALES Y MÉTODOS	46

7.1	MATERIALES	46
7.2	MÉTODOS	48
7.2.1	Preparación de las muestras de biomasa.	48
7.2.2	Caracterización física (Densidad y Humedad)	48
7.2.3	Caracterización química	48
7.2.4	Caracterización energética (Poderes Calóricos y cenizas)	49
8.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	51
8.1	Caracterización de la biomasa residual de las Plantaciones Industriales.	51
8.1.1	Comparación de los residuos de la cosecha de las plantaciones industriales	56
8.2	Caracterización de los residuos de la industria de transformación mecánica	58
8.2.1	Determinación de elementos mayores y menores de residuos de la cosecha y la industria del aserrado	60
8.3	Residuos del Bosque nativo.	63
8.3.1	Tipo forestal "Siempreverde	63
8.3.1.1	Análisis y discusión de los resultados en tipo forestal "siempreverde"	76
8.4	Plantaciones dendroenergéticas	80
8.4.1	Biomásas de plantaciones experimentales de la VIII región	80
8.4.1.1	<i>Acacia dealbata</i> (Aromo del país	80
8.4.1.2	<i>Acacia mearnsii</i>	81
8.4.1.3	<i>Acacia melanoxylon</i>	81
8.4.1.4	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	82
8.4.1.5	Análisis y discusión de los resultados en Biomásas de plantaciones experimentales de la VIII región	83
8.4.2	Biomásas de plantaciones experimentales en la Región Metropolitana	84
8.4.2.1	<i>Robinia pseudoacacia</i> (Robinia, Acacio)	84
8.4.2.2	<i>Arundo donax</i> (Arundo)	85
8.4.2.3	Clones de híbridos de <i>Populus</i>	85
8.4.2.4	Análisis y discusión de los resultados en Biomásas de plantaciones experimentales de la Región Metropolitana	86
8.	CONCLUSIONES	88
9.	REFERENCIAS	90

Indice de Tablas.

Tabla 1. Balance de energía primaria año 2013	2
Tabla 2. Balances de energía secundaria y consumo por 4 sectores en economía Chilena	4
Tabla 3. Capacidad instalada en el país por sistema al año 2014	5
Tabla 4. Ejemplos de biocombustibles según su estado	15
Tabla 5. Composición elemental de biomasa lignocelulósica	20
Tabla 6. Consecuencias de la presencia de algunos elementos en las cenizas de biomasa	27
Tabla 7. Ejemplos de residuos forestales y su origen	30
Tabla 8. Distribución de la superficie de plantaciones en Chile (ha). Año 2012 ..	33
Tabla 9. Flujo de consumo y volumen de consumo de madera industrial en Chile	35
Tabla 10. Consumo de madera industrial para principales usos de la madera en Chile	36
Tabla 11. Estimación de la biomasa forestal disponible en Chile. 2015	37
Tabla 12. Superficie de bosques por estados de desarrollo en Chile	38
Tabla 13. Distribución de superficie de tipos de bosques en Chile	41
Tabla 14. Características del muestreo	46
Tabla 15. Métodos de determinación de los componentes de la biomasa	49
Tabla 16. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de <i>Pino radiata</i>	52
Tabla 17. Propiedades físicas, químicas y energéticas de corteza y madera de <i>E. globulus</i> y <i>nitens</i>	54
Tabla 18. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos industriales de <i>Pinus radiata</i>	58

Tabla 19. Concentración de elementos mayores y menores en residuos de cosecha e industriales de Pino radiata en Arauco (mg/kg)	61
Tabla 20. . Concentración de elementos mayores y menores en residuos de Cosecha de <i>Eucalyptus nitens</i> y <i>globulus</i>	62
Tabla 21. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Coigüe	64
Tabla 22. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Roble	65
Tabla 23. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Raulí	66
Tabla 24. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Tepa	67
Tabla 25. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Lingüe	68
Tabla 26. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Radal	69
Tabla 27. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Avellano	70
Tabla 28. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Olivillo	71
Tabla 29. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Ulmo	72
Tabla 30. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Quila	73
Tabla 31. Concentración de metales (mg/kg) para corteza de especies nativas ..	74
Tabla 32. Concentración de metales (mg/kg) para madera de especies nativas...	75

Tabla 33. Tabla resumen de las propiedades físicas, químicas y energéticas de las biomásas de Luanco. VIII Región.	82
Tabla 34. Tabla resumen de las biomásas obtenidas en Santiago	86

Índice de Figuras

Figura 1. Capacidad instalada ERNC al 30 de dic. 2014	7
Figura 2. Generación ERNC al 30 nov. 2014	7
Figura 3. Rutas termoquímicas y bioquímicas para el aprovechamiento energético de la biomasa	14
Figura 4. Rutas termoquímicas y bioquímicas para la producción de Biocombustibles de segunda generación.....	16
Figura 5. Distintas geometrías de almacenamiento y su densidad	19
Figura 6. Fibras de la estructura lignocelulósica de la madera	22
Figura 7. Composición química de la madera	23
Figura 8. Estructura de una microfibrilla de celulosa	23
Figura 9. Poder calorífico inferior en función de la humedad	26
Figura 10. Ilustración de distintos tipos de biomasa residual industrial	30
Figura 11. Participación porcentual de especies plantadas en Chile	31
Figura 12. Residuo de cosecha. Lanco. X Región (Izq) y desechos de Bosques adultos de Lenga. XII Región (dcha).....	32
Figura 13. Aprovechamiento de biomasa en bosques de <i>Eucalyptus</i>	32
Figura 14. Aprovechamiento de biomasa en bosques de <i>Pinus radiata</i>	32
Figura 15. Disponibilidad futura de madera industrial con plantaciones de crecimiento rápido	33
Figura 16. Evolución cosecha de madera industrial	34
Figura 17. Consumo de madera en Chile	35
Figura 18. Manejo de un bosque de Lenga	39
Figura 19. Bosque renoval de <i>Nothofagus</i> . Lanco. VII Region. Chile	40
Figura 20. Cultivo energético <i>Acacia dealbata</i> y <i>Eucalyptus globulus</i>	43
Figura 21. Poder calorífico y % de cenizas para tres especies de plantaciones ..	56

Figura 22. Bosque nativo. IX Región. Araucanía	63
Figura 23. Densidades básicas de las maderas de las especies analizadas ...	76
Figura 24. % de extraíbles de la madera de cada especie analizada	77
Figura 25. Composición de madera de distintas especies nativas analizadas..	78
Figura 26. Ilustración resumen del poder calorífico de las maderas de las Biomasas de cosecha del bosque nativo y su contenido en cenizas ...	79
Figura 27. Cultivo energético de <i>Acacia dealbata</i>	80
Figura 28. Muestra compuesta de madera y corteza de <i>Acacia dealbata</i>	80
Figura 29. Cultivo energético de <i>Acacia mearnsii</i>	81
Figura 30. Cultivo energético de <i>Acacia melanoxylon</i>	81
Figura 31. Cultivo energético de <i>Eucalyptus camaldulensis</i>	82
Figura 32. Muestra astillada de madera y corteza (mezcla) <i>Robinia</i> <i>pseudoacacia</i>	85
Figura 33. Ensayo de <i>Arundo donax</i> (La Pintana. Santiago)	85
Figura 34. Muestra astillada mezcla <i>Arundo donax</i>	85

1. INTRODUCCIÓN

Chile posee una matriz energética poco diversificada, altamente dependiente de los combustibles fósiles, los que además son en gran parte de origen foráneo. Estas condiciones hacen de Chile un país susceptible a la inestabilidad de los precios del mercado internacional e inseguridad en el abastecimiento entre otras desventajas, lo que compromete el desarrollo futuro del país.

Por otro lado, las autoridades del Estado chileno conscientes del efecto que tiene el uso indiscriminado de petróleo, carbón y gas natural sobre el medio ambiente y las personas a nivel global, han abordado el desarrollo e impulso de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) como respuesta a la necesidad de diversificar la matriz energética. En esta línea, se iniciaron una serie de proyectos orientados a la generación de energía eléctrica sobre la base de energía eólica y solar. La biomasa leñosa, otra fuente de ERNC, usada tradicionalmente en la generación de calor, tiene una importante participación representando en los últimos años alrededor de un 22% del consumo final de energía secundaria en el país y de un 2,96% en la generación de electricidad.

Esta fuente de energía al ser aprovechada con aplicaciones modernas sería capaz de contribuir de manera sostenida y segura en la generación de electricidad, calor y en la producción de biocombustibles. Su uso económico, social y ambientalmente sustentable, implicaría una serie de beneficios como aprovechar y dar más valor a nuestros recursos naturales, diversificar la matriz energética, contribuir a la independencia energética, sustitución parcial de combustibles fósiles, disminución de gases de efecto invernadero, disminución de la huella de carbono de la matriz energética, desarrollo rural local, generación de empleos, manejo e incorporación de bosques naturales al sector productivo, aprovechamiento de residuos, manejo de residuos sólidos orgánicos, disminución de emisiones y limpieza de aguas. Para conseguir estos beneficios, es necesario conocer la disponibilidad y características de la biomasa leñosa, lo que es abordado en este estudio como parte del proyecto “Caracterización física, química y energética de Biomasa Lignocelulósica disponible en Chile”, desarrollado entre los años 2010 y 2014 en el marco de las actividades del Consorcio Tecnológico de Biocombustibles S.A. (BIOCOMSA).

2. ANTECEDENTES GENERALES

2.1 Antecedentes de la matriz energética de Chile

2.1.1 Balance de Energía Primario

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presenta el balance nacional de energía (BNE), que se define como la contabilización del flujo anual de energía disponible y consumida a nivel nacional, identificando la producción, importación, exportación, pérdidas y/o variaciones de stock, y el uso que se da a cada energético disponible en el mercado chileno. Este balance se realiza a nivel de energía primaria como secundaria. El BNE primaria contabiliza el flujo de los recursos naturales energéticos disponibles durante un año, que deben pasar por un proceso de transformación antes de su uso final.

Como se desprende de la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, el 66% del consumo bruto de energía primaria en Chile el año 2013 (339.527 Teracalorías), fue suministrado por combustibles fósiles, los que en alrededor de 90% son importados. Esta situación, hace al país altamente vulnerable y dependiente en materia de energía, ya que está expuesto a las fluctuaciones de precios y a la eventual escasez en el suministro de este tipo de combustibles, comprometiendo el crecimiento futuro del país.

Tabla 1. Balance Energía Primaria año 2013. Fuente: Ministerio de energía de Chile. (www.minenergia.cl)

Balance Energía Primaria Año 2013					
[TeraCalorías]					
Energético	Producción Bruta	Importación	Exportación	Var. Stock + Perd y Cierre	Consumo Bruto (1)
Petróleo Crudo	3.850	100.341	0	2.069	102.123
Gas Natural	9.017	36.220	0	-442	45.680
Carbón	15.245	64.897	6.251	-1.602	75.493
Hidroelectricidad	16.973	0	0	0	16.973
Eólica	477	0	0	0	477
Leña y Biomasa	97.816	0	0	-640	98.456
Solar	191	0	0	0	191
Biogás	134	0	0	0	134
Total	143.704	201.458	6.251	-616	339.527

En la actualidad, el escenario que enfrenta el país es diferente al de los últimos treinta años, en el que temas como la volatilidad y altos precios del petróleo, producidos por el aumento de la demanda, la menor oferta y la mayor competencia que ejercen las economías emergentes por el uso de algunos combustibles, la preocupación creciente de la sociedad por las emisiones locales y globales que inciden en la salud de las personas y del medio ambiente, son razones de más para que, el Estado, consciente de la importancia de contar con energía segura, económica, social y ambientalmente sustentable, ha impulsado acciones tendientes a diversificar -en el mediano y largo plazo- la matriz energética del país. Entre ellas se destaca el impulso a las Energías Renovables No Convencionales (ERNC), tales como: la eólica, solar, geotérmica y a base de biomasa. A partir de esta última no sólo es posible obtener calor y/o electricidad para usos domiciliarios e industriales, sino también obtener biocombustibles sólidos, líquidos y gaseosos además de productos químicos.

2.1.2 Balance Energía Secundaria y Consumo Sectorial

El balance de energía secundario (BES), contabiliza el flujo de energéticos resultantes de uno o varios procesos de transformación, sean estos físicos, químicos o mecánicos y que se encuentran en un estado apto para su consumo final. La suma del consumo total de cada energético secundario da el Consumo Total Anual del BES. Es importante tener presente para evaluar las cifras, que parte del consumo total anual de cada energético secundario, corresponde al consumo final realizado por los distintos sectores de la economía chilena (Consumo Final Secundario CFS) y otra parte corresponde a lo utilizado para producir otros energéticos secundarios (Consumo de los Centros de Transformación CCT). En éste último se ha descontado la energía para el consumo propio del Centro de Transformación y se ha incluido como consumo del sector energético.

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** siguiente, se puede observar el balance de energía secundario (BES) y los consumos finales de energía de los distintos sectores de la economía. Como podemos observar, el consumo total anual el año 2013 fue de 299.302 Tcalorías en el que algo más del 90% corresponden a: los derivados del petróleo (53,65%), electricidad (19,79%), leña y biomasa (18,78%). Lo que demuestra por una parte la baja diversificación y por otra, la importancia de la

leña y biomasa (biomasa lignocelulósica), como energético, específicamente para el sector Industrial (Ind y Min) donde la biomasa es usada en la generación de calor y electricidad, y en el sector comercial, público y residencial (CPR), donde la leña es considerada una fuente de primera necesidad y ampliamente usada para calefacción y cocina particularmente en el sector residencial, ocupando el tercer lugar en el consumo.

Tabla 2. Balance Energía Secundaria y Consumo por Sectores en Economía Chilena 2013

Consumo Sectorial Año 2013							
[TeraCalorías]							
Energético	Sector				Consumo		
	Transporte	Ind. y Min.	CPR	Energético	Final	CCT	TOTAL
Derivados de Petróleo	93.158	41.630	14.877	10.901	160.567	12.428	172.994
Electricidad	439	36.792	18.727	3.266	59.225	0	59.225
Carbón (**)	0	1.388	0	0	1.388	74.106	75.493
Coke Mineral	0	196	0	0	196	2.858	3.054
Alquitrán (***)	0	0	0	160	160	0	160
Gas Coke	0	0	0	12	12	983	995
Gas Alto Horno	0	0	0	741	741	0	741
Gas Corriente	0	0	179	8	187	0	187
Gas Natural (**)	312	7.442	5.901	6.759	20.415	25.265	45.680
Metanol	0	0	0	0		0	0
Leña y Biomasa	0	20.960	35.259		56.220	42.237	98.456
Eólica	0	0	0	0	0	477	477
Solar	0	18	169	0	186	7	191
Biogás	0	0	0	0	0	134	134
Total	93.910	108.425	75.112	21.848	299.302	158.494	457.787

(**) Las Importaciones-Exportaciones se consideran en etapa de energético primario

(***) Alquitrán de uso energético (producido en siderurgia)

2.1.3 Matriz eléctrica

El año 2013 el país contaba con una capacidad instalada total de 19.581 MW distribuída en los siguientes sistemas:

El *Sistema Interconectado Central (SIC)*: sistema mayor que abastece la zona central del país, desde Taltal por el norte hasta Quellón, en la isla de Chiloé, por el sur,

extendiéndose una distancia de 2.100 km, sirve al 90% de la población y posee un 77% de la capacidad instalada total.

El *Sistema Interconectado del Norte Grande (SING)*: sistema mayor que abastece la zona norte del país, desde Arica por el norte hasta la localidad de Coloso por el sur, a diciembre de 2014, constituía el 22,2% de la capacidad total instalada en el país.

Abastece sólo al 5,8% de la población, no obstante, su generación es fundamentalmente térmica y está orientada a la industria minera (Estudio Las ERNC en el mercado eléctrico chileno, CNE/GTZ, 2009).

El *Sistema Eléctrico de Aysén*: corresponde a cinco sistemas medianos ubicados en la zona sur del país: Palena, Hornopirén, Carrera, Cochamó y Aysén. Su capacidad conjunta corresponde a sólo 0,0026% de la capacidad instalada nacional.

El *Sistema Eléctrico de Magallanes*: corresponde a cuatro subsistemas medianos: Punta Arenas, Puerto Natales, Porvenir y Puerto Williams, que abastecen a las ciudades del mismo nombre. Se localiza en el extremo más austral del país. Su capacidad instalada conjunta corresponde al 0,005% de la capacidad instalada nacional.

Finalmente el *sistema eléctrico mediano de Los Lagos*: que está asociado a la isla grande de Chiloé entre Hornopirén y Cochamó que posee sólo un 0,0003% de la capacidad instalada total.

Tabla 3. Capacidad instalada en el país por sistema al año 2014 (MW) (Elaborado a partir de estadísticas de capacidad de generación de la CNE).

Fuente	SIC	SING	Los Lagos	Aysén	Magallanes	Total por Fuente
Hidráulica	3.714,4	--	0,0	0,0	0,0	--
C. Fósiles	7.187,2	--	5,4	25,6	99,5	--
Total Conv.	10.901,6	4.126,2	5,4	25,6	99,5	15.158,2
Biomasa	419,5	0,0	--	--	--	--
Eólica	740,3	88,9	--	2,0	--	--
H. pasada	2.696,7	14,9	0,8	22,6	--	25,4
Solar	285,9	110,1	--	--	---	--
Total ERNC	4.183,5	213,9	0,8	24,6	0,0	4.422,8

TOTAL por SISTEMA	15.085,1	4.340,1	6,2	50,2	99,5	19.581
--------------------------	-----------------	----------------	------------	-------------	-------------	---------------

En el año 2013 la demanda máxima de energía alcanzó 7283,1 MWh en el SIC y 2243,1 MWh en el SING, situación que no ha variado significativamente estos dos últimos años. De acuerdo a un estudio de la Comisión Nacional de Energía (CNE, 2014) para el año 2025 se proyectan tasas de crecimiento en el consumo eléctrico en torno al 4,7% para ambos sistemas, lo que significa para un escenario medio una capacidad de generación de 88.108 GWh para el SIC y de 30.187 GWh para el SING, es decir 120.000 GWh de demanda total de energía para el año 2025, lo que requerirá aumentar la oferta a dicho año en alrededor de 9.600 MW en nuevos proyectos de generación, de los que aproximadamente 2.000 MW deberán provenir de ERNC, dados los lineamientos y compromisos asumidos en la Agenda de Energía (www.minenergia.cl).

La “Política de desarrollo eléctrico”, diseñada en los 80’s actualmente es insuficiente para abordar los nuevos desafíos en materia energética, de manera que la actual administración del estado ha definido en la Agenda de Energía (www.minenergia.cl) el “Desarrollo de recursos energéticos propios” (Eje 3), en el que se reafirma el compromiso de que a partir del año 2010, el sector eléctrico debe inyectar una cuota de ERNC en sus sistemas eléctricos, la que fue aumentada el año 2013 en la ley de servicios eléctricos (Ley 20.698), fijando como meta para el año 2025 que un 20% de las inyecciones al sistema provengan de ERNC.

A diciembre del año 2013, el aporte de las renovables era de 6,09% de centrales de ERNC instaladas (1.074 MW) (CER, Dic.2013) y a diciembre del año 2014 la potencia instalada en ERNC en los sistemas interconectados ascendió a 2.052 MW, liderados por la energía eólica con 836 MW de capacidad instalada, seguida de la biomasa con 461 MW, la energía solar fotovoltaica alcanzó el tercer puesto con 362 MW, desplazando a las centrales minihidráulicas (350 MW) que ocupaban ese lugar el mes anterior, confirmando así el fuerte despegue de la energía solar registrado durante 2014.

Con respecto a la generación, la energía proveniente de centrales de ERNC ya al mes

de diciembre del año 2014, acumulaba 5.438 MWh con una inyección reconocida por ley que prácticamente triplica la obligación establecida en la Ley 20.257 (que establece una inyección de 10% de ERNC en empresas con potencia superior a 200 MW. A fines del año 2014, la generación renovable fue liderada por la energía eólica con 199 GWh, seguida de la biomasa con 173 GWh. La inyección que aportaron las fuentes de ERNC a la matriz energética nacional dejó un importante registro: Las centrales renovables fueron responsables por primera vez de más del 10% de la generación total del sistema. La generación total acumulada en el año 2014 por las ERNC es un 49,2% más que lo registrado en el 2013, incremento producido principalmente por el ingreso en operación de centrales eólicas y solares fotovoltaicas. El día con mayor inyección de ERNC al sistema fue el 21 de noviembre, con una participación del 21,16 % de la energía (CER, dic.2014).

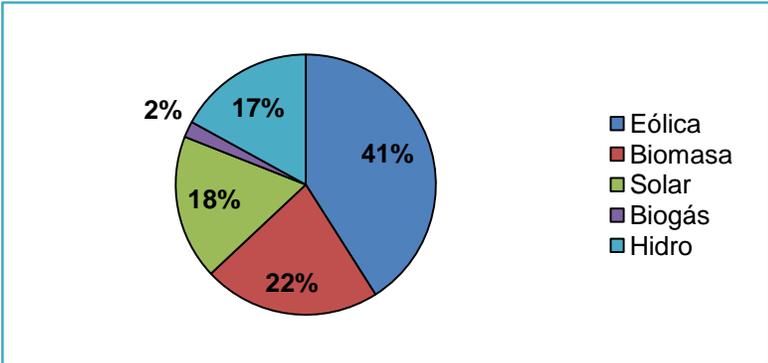


Figura 1. Capacidad Instalada ERNC al 30 dic.2014. Fuente: CIFES; SEA; CDEC; CNE

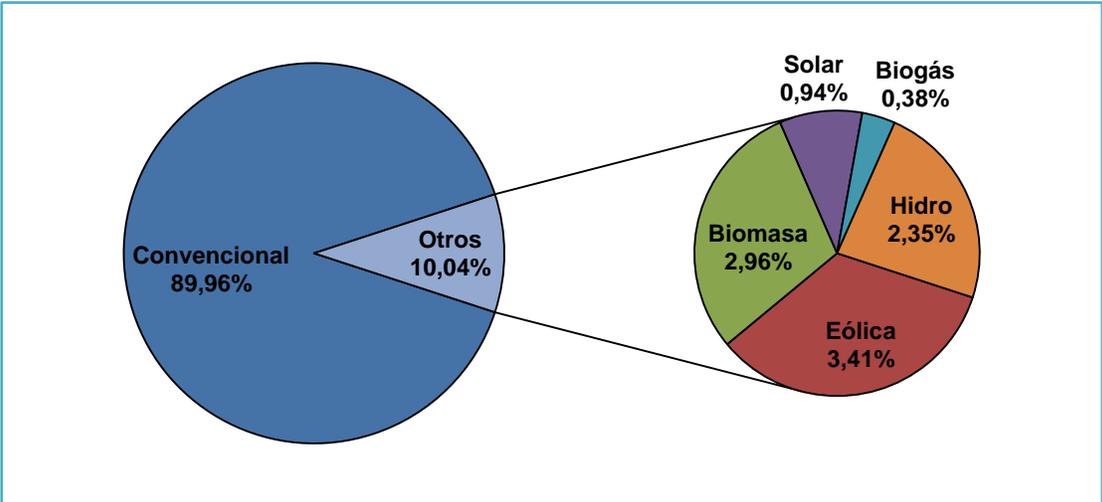


Figura 2. Generación ERNC al 30 nov.2014 Fuente: CIFES (Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables) y CDEC (Centro de Despacho Económico de Carga)

3. ENERGIAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES (ERNOC)

3.1 Energía Solar

La fuente de energía más constante con la que cuenta nuestro planeta es la proveniente del sol, que alcanza en promedio 1.360 W/m^2 en la capa exterior de la atmósfera. Por lo tanto, es el recurso energético más abundante en la tierra. Esta puede ser aprovechada de diversas maneras, tanto para generar electricidad (energía eléctrica) como calor (energía térmica) mediante sistemas fotovoltaicos, aprovechada como calor para generación eléctrica indirectamente, mediante sistemas de concentración solar de potencia o, utilizada para calentar agua a través de colectores solares (www.cifes.gob.cl).

Tanto la tecnología fotovoltaica, como los colectores, solares son modulares y escalables, desde pequeños sistemas para uso domiciliario hasta grandes instalaciones para fines industriales. Mientras que los sistemas de concentración solar de potencia (CSP), en general, requieren instalaciones de gran escala para ser viables, excepto tecnologías basadas en discos Stirling que también gozan de modularidad.

El denominado Cinturón de Sol, que va desde los 35°N hasta los 35°S , alcanza a cubrir casi la mitad del país, posibilitando el desarrollo de tecnologías de energía solar en esta área, con un potencial prácticamente ilimitado desde el punto de vista del recurso [EPIA, 2010/Estela Solar]. Además, las zonas del desierto otorgan grandes extensiones de tierras disponibles. Se estima que el potencial bruto de capacidad instalable, que posee Chile para generación de energía eléctrica a partir de energía solar es de 100.000 MW [USM, 2008]. A pesar de la existencia de sectores con gran cantidad de radiación solar incidente en el país, en la actualidad el desarrollo industrial de la energía solar en Chile es aún incipiente, siendo las aplicaciones de pequeña escala de sistemas fotovoltaicos y de colectores solares, las que se han

posicionado como una alternativa utilizada.

3.2 Energía Eólica

Según la definición del Ministerio de Energía, la energía eólica es una fuente renovable, producto de la transformación de la energía cinética del viento, en energía utilizable. El viento se produce por diferencias de temperatura entre distintas masas de aire en la atmósfera terrestre, la que es calentada por el sol. Por ello, se considera al viento como una forma indirecta de energía solar.

Las tecnologías que se han desarrollado para la utilización de este recurso como fuente energética, producen nulas emisiones durante su operación y consisten, principalmente, en turbinas que transforman la energía cinética del viento, en energía mecánica. Esta, a su vez, se convierte en energía eléctrica por medio de un generador. Los sistemas eólicos tienen una vida útil cercana a los 25 años [IEA, 2008] y pueden ser clasificados, según el lugar donde son instalados, en onshore (ubicados en tierra firme) y offshore (ubicados en mar abierto). La eficiencia de conversión teórica máxima de estos sistemas es de 59% (límite Betz), pero en la realidad, la eficiencia siempre será menor a este límite. Sin perjuicio de lo anterior, la eficiencia del proceso cobra menor relevancia si se considera que el recurso es gratuito [BWEA].

Chile presenta una larga extensión de territorio costero, donde los vientos, provenientes principalmente desde el sur oeste, tienen una mayor presencia, lo que hace a priori identificarlo como un país atractivo para el desarrollo de este tipo de tecnologías. Los costos de inversión, para la implementación de tecnologías para el aprovechamiento del recurso eólico, son altos en relación a otras formas de generación. Sin embargo, en aquellas zonas con buena disponibilidad de viento, puede transformarse en una alternativa competitiva. En la actualidad, Chile cuenta con una potencia instalada de 885 MW [CER, 2015], en su mayoría conectados al Sistema Interconectado Central, además de sistemas de menor tamaño, implementados para la electrificación de localidades aisladas.

3.3 Energía Geotérmica

Este tipo de sistemas generan energía, eléctrica y/o térmica, a partir del calor contenido en el interior de la tierra. Esta fuente de energía es un recurso renovable

existente principalmente, en zonas de alta actividad volcánica y fallas geológicas. La disponibilidad de este recurso no presenta variación estacional, tampoco está afecto a impactos climáticos, es compatible con otros sistemas de generación, y puede aprovecharse para aplicaciones como calefacción de espacios, calentamiento de agua, procesos industriales, generación de electricidad, entre otros.

Se han desarrollado diversas tecnologías para el aprovechamiento de la energía geotérmica, obteniendo tanto energía térmica como electricidad. La energía térmica se obtiene mediante sistemas de captación de calor, tanto horizontales como verticales, consistentes en tuberías dispuestas bajo tierra para calentar fluidos. La electricidad, a su vez, se obtiene por medio de sistemas de vapor o de aire caliente, sistemas flash, rocas calientes secas, entre otros. Estos sistemas consisten básicamente en la obtención de agua, vapor o aire caliente a través de afloramientos de agua a altas presiones y temperaturas, como los géiseres, o la inyección de agua fría en cámaras perforadas sobre focos caloríficos subterráneos. En general, la energía geotérmica posee una alta eficiencia en la conversión.

EEUU, Filipinas, Indonesia y México son los países con mayor capacidad de generación de energía eléctrica a partir de estas tecnologías (Islandia cubre a casi el 90% de la población con calefacción geotérmica) [NREL, 2008]. Por su parte, en Latinoamérica, México y El Salvador son líderes en el uso de la geotermia.

Chile, al estar ubicado sobre el llamado “Cinturón de Fuego del Pacífico”, zona de alta actividad geológica, presenta un potencial importante de generación [Chile Renovables, 2009]. Lahsen (2005) señala que hay más de 300 fuentes de aguas termales entre los 15°C y 100°C ubicadas en los Andes chilenos. Al año 2025 se calcula un potencial bruto de 16.000 MW en Chile [FCFM U. de Chile, 2011 (revista nº50)], sin embargo, existen barreras para la implementación de estas tecnologías, como son la escasa identificación y catastro de las fuentes disponibles, el alto costo de inversión y los riesgos involucrados en su desarrollo.

3.4 Energía Hidroeléctrica

Es la energía obtenida a partir de flujos superficiales de agua. El agua es un recurso renovable cuyo aprovechamiento es considerado como un proceso limpio, eficiente,

confiable y durable, que incurre en bajos costos de mantención y operación. Además, presenta una larga vida útil y tiene un bajo impacto ambiental.

El aprovechamiento de este tipo de energía se realiza mediante la utilización de centrales hidroeléctricas, las cuales canalizan el agua para operar turbinas, que a su vez alimentan a equipos generadores que producen electricidad. Existen centrales hidroeléctricas de dos tipos: centrales de pasada, que aprovechan la energía cinética del agua, y centrales de embalse, que almacenan agua y cuya energía primaria es la potencial. De acuerdo a lo definido en la Ley 20.257, una central hidroeléctrica es considerada renovable no convencional en caso de que su potencia sea menor a 20 MW, denominada como pequeña hidráulica, la que se divide en: mini hidráulicas con potencia menor a 20 MW, y micro hidráulica a micro centrales, con equipos que proveen energía en potencias menores a 300 KW y en sistemas aislados de la red eléctrica, según la definición de la IEA.

En la actualidad, Chile cuenta con una potencia instalada de 327 MW [CER, 2015]. El potencial teórico de Chile para pequeñas centrales de pasada es superior a los 20.000 MW, mientras que el potencial técnico es cercano a los 4.000 MW [Universidad de Chile, 2008].

Hoy, las principales barreras a las que se ve enfrentada una pequeña central hidráulica están relacionadas con la demora en la tramitación de permisos y la no existencia de criterios unificados de evaluación de impacto ambiental para estas centrales, además de la problemática asociada a la obtención de derechos de agua. Por otra parte, el alto costo de las líneas de transmisión pueden convertir a una central mini hidráulica conectada a la red eléctrica, en un proyecto inviable.

3.5 Energía Marina

La superficie del planeta Tierra está cubierta en cerca de un 80%, por agua, donde la mayor parte de ésta corresponde a océanos. El mar posee una serie de características que lo transforman en una alternativa de utilización como fuente de energía, dentro de las cuales se encuentran principalmente: el movimiento de las olas, la oscilación de las mareas, el flujo de corrientes marinas, los flujos de los estuarios y las variaciones de salinidad y temperatura.

En línea con aquellas características, es que se han desarrollado diversos sistemas para aprovechar la energía de las olas (undimotriz), de la variación de altura de las mareas (mareomotriz), de corrientes marinas y de las variaciones de temperatura y salinidad del agua. La mayoría de estas tecnologías se encuentran en etapa temprana de desarrollo, por lo cual aún presentan bajas eficiencias y altos costos, aunque variables de un sitio a otro, dependiendo de la tecnología específica y las características del lugar. La tendencia, y de acuerdo a la experiencia obtenida del desarrollo de otros sistemas de generación, indica que la masificación en el aprovechamiento del recurso, produciría mayor conocimiento, confiabilidad y menores costos de desarrollo.

Las tecnologías de las olas y corrientes de las mareas están en un estado de desarrollo similar a los de la industria eólica en 1980, los cuales podrían estar disponibles comercialmente, entre el 2015 y 2025 [SEI, 2005]. Según un reporte publicado por Bharatbook1 el año 2009 sobre el crecimiento de la industria a nivel mundial en energía marina, la capacidad instalada de esta energía al año 2009 fue de 270 MW y con un futuro esperado de 46.206 MW al año 2020.

Gracias a la extensa franja costera de Chile y a las condiciones especiales que posee, estas fuentes de energías se proyectan como actores importantes en la generación futura en el país; por ejemplo, se estima que la costa de Chile tiene un potencial de generación de energía undimotriz de hasta 164 GW. Este potencial que se presenta por el frente de la ola en kW/m variando a lo largo de la costa, aumentando a mayores latitudes (hacia el sur; 19.6 kW/m para Arica y 66 kW/m para la islas Diego Ramírez) [Garrad-Hassan, 2009], y disminuyendo su factor de capacidad de igual forma a mayores latitudes (Latitud 20°. Iquique 58% de factor de capacidad y 50% para Islas Diego Ramirez; Latitud 56°) [Baird&Asociados, 2008].

3.6 Energía de la Biomasa

La biomasa, definida como la materia orgánica renovable de origen vegetal, animal o procedente de la transformación natural o artificial de la misma, es una fuente muy variada de energía. Entre los métodos de aprovechamiento existentes se pueden mencionar la combustión directa de la biomasa, el tratamiento de residuos orgánicos y

el cultivo de algunas plantas y granos, a partir de las cuales se obtiene biogás y biocombustibles, usados como sustitutos de compuestos petroquímicos.

La bioenergía es obtenida mediante diversos procesos, como son los termoquímicos, que consisten en la combustión directa de biomasa, y los bioquímicos, que se basan en procesos de transformación biológica de la biomasa. La obtención de energía a partir de la biomasa es un proceso considerado carbono neutral, pues las emisiones del proceso son equilibradas con el CO₂ absorbido previamente por las plantas.

Proyecciones de la IEA indican que la generación de electricidad a partir de biomasa debiera crecer desde el actual 1,3% a un 3-5% para el 2050, dependiendo de diferentes supuestos a nivel mundial. En términos absolutos, el crecimiento neto podría ser 5-8 veces la producción actual, con un significativo efecto en la reducción de emisiones de GEI. Esto no parece ser considerable comparado con el potencial estimado total, 10%-20% de la energía primaria para el 2050, donde la biomasa también es usada para generación de calor y para producir combustibles para el transporte [OECD/IEA, 2007].

Las principales barreras para su implementación apuntan a la baja eficiencia de conversión, la disponibilidad y transporte de la biomasa, y la escasa logística de suministro sumado a la falta de políticas de apoyo, los riesgos asociados a la agricultura intensiva (fertilizantes, químicos, conservación de la biodiversidad), entre otros. Muchas veces es visto por la comunidad como un competidor del reciclaje, en particular para desechos municipales.

Respecto del futuro de esta tecnología en Chile, se estima que el potencial factible técnico-económico de implementar al 2025 es entre 461 a 903 MW con una participación entre un 3,1% a un 6% del parque generador [UTFSM, 2008]. Actualmente, en Chile los procesos de generación de electricidad existentes se basan de manera principal en la combustión directa de la biomasa. Adicionalmente, existen proyectos de generación a partir de la combustión de gases obtenidos a partir de procesos de transformación de la biomasa, como la extracción de biogás desde vertederos o sistemas de tratamiento anaeróbico.

3.1.1 Biomasa y biocombustibles

Este tipo de ERNC permite obtener energía aprovechable, ya sea mediante combustión directa o por su procesamiento posterior (USEPA, 2000). En ella se incluye materia orgánica generada expresamente con estos fines como cultivos de algas, cultivos dendroenergéticos y residuos orgánicos generados en distintos procesos industriales y actividades humanas. Entre estos, una muy importante fuente de biomasa a nivel mundial lo representan las materias fibrosas o lignocelulósicas producidas en la actividad forestal-maderera y agrícola (FAO, 2008).

En la Figura 3 se destaca de manera resumida los distintos tipos de biomasa lignocelulósica para fines energéticos, las cadenas logísticas asociadas y los tipos de productos que se pueden obtener de ella mediante transformaciones o vías termoquímicas, fisicoquímicas o bioquímicas de aprovechamiento. Estas vías de conversión, se encuentran en diferentes grados de desarrollo tecnológico, algunas están a nivel operativo industrial, es decir, son procesos rentables y competitivos y otras aún se encuentran en desarrollo ya sea a nivel de planta piloto o sólo de laboratorio.

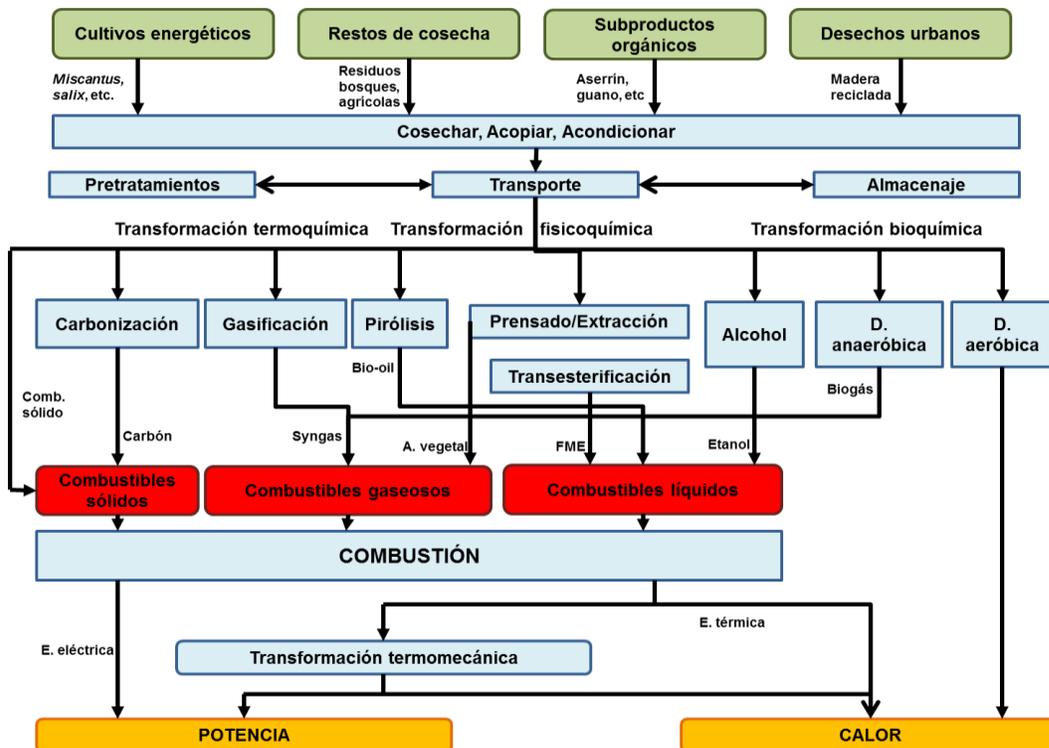


Figura 3. Rutas termoquímicas y bioquímicas para el aprovechamiento energético de la biomasa (Fuente: Adaptado de Kaltschmitt und Hartmann, 2001)

En la Figura 3 también se destaca que la biomasa se encuentra en distintas formas, con diferentes características físicas y químicas, tales como: contenido de humedad, presencia de contaminantes y composición y puede dar origen a diferentes tipos de combustibles: sólidos, líquidos y gaseosos dependiendo del grado de elaboración a que se someta. A estos combustibles se les denomina *biocombustibles* y se les define como *todo combustible -sólido, líquido o gaseoso- producido a partir de compuestos de origen biológico* (Directorio Nacional de Combustibles, Glosario). Entre las ventajas de los biocombustibles se encuentran la reducción de emisión de gases de efecto invernadero en los procesos de conversión energética, la reducción del volumen de desechos en vertederos, disminución de la dependencia de otras fuentes de energía no renovable importadas de otros países, entre otras. Algunos ejemplos de cada tipo de biocombustibles se encuentran en la Tabla 4.

Tabla 4. Ejemplos de biocombustibles según su estado

Estado del biocombustible	Ejemplo
Sólidos	Leña, astillas, pellets
Líquidos	Bio-oil, Biodiesel, bioetanol
Gaseosos	Gas de síntesis, biogás

Respecto de los biocombustibles líquidos, los más tradicionales que se han empleado desde hace décadas en el planeta son: el etanol (alcohol etílico), que se obtiene a partir de caña de azúcar o granos ricos en almidón; y el biodiésel, compuesto por varios tipos de ésteres, el que se obtiene a partir de aceites vegetales presentes en plantas oleaginosas (raps, soja, palma) y muy parcialmente a partir de grasas animales. Aquellos biocombustibles líquidos que se obtienen a partir de materias primas en su mayoría comestibles con procesos industriales establecidos se denominan *Combustibles de Primera Generación*, como es el caso del etanol a partir de caña de azúcar y de almidón de granos; y del biodiésel de materias primas oleaginosas. Estos aún tienen un bajo uso a nivel mundial en el mercado de los combustibles líquidos para el transporte y tienen importantes ventajas, sin embargo, no están exentos de problemas como ejercer presión sobre recursos alimentarios,

sobreexplotación de suelos agrícolas y creación de grandes extensiones de monocultivos. Por último, no todos pueden incorporarse a los sistemas de logística y transporte de combustibles. En parte, debido a lo anterior, los esfuerzos se han concentrado en la obtención de biocombustibles a partir de biomasa no comestible denominados *de Segunda Generación*, que se producen a partir de biomasa leñosa proveniente de residuos de faenas agrícolas y forestales, residuos de agroindustrias e industrias madereras, desechos urbanos leñosos y biomasa obtenida de cultivos leñosos de corta rotación; en este contexto destacan el etanol celulósico y el biodiésel de segunda generación o BTL (*Biomass To Liquid*), que se producen por rutas bioquímicas y termoquímicas, respectivamente (Figura 4).

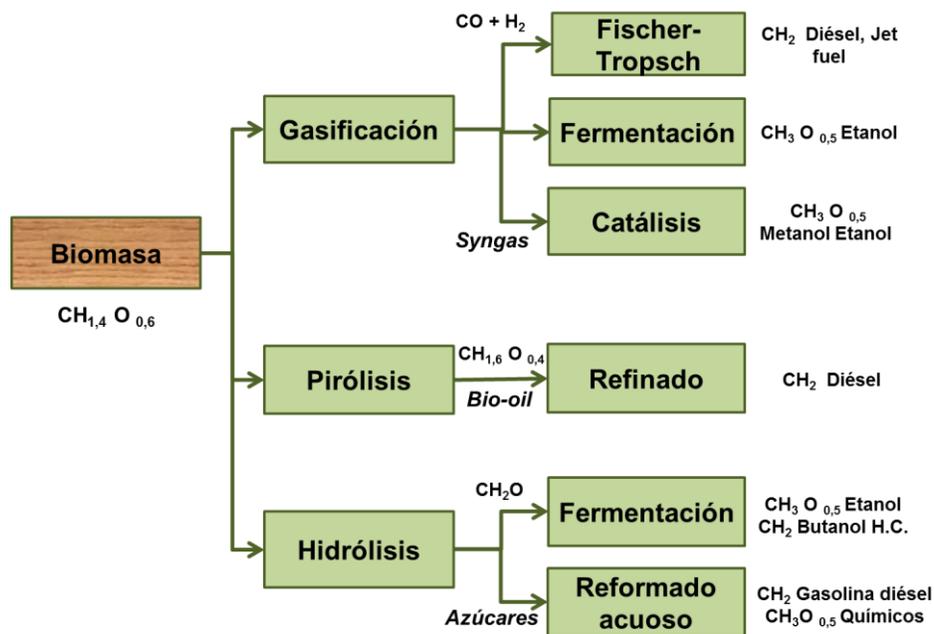


Figura 4. Rutas termoquímicas y bioquímicas para la producción de biocombustibles de segunda generación (Fuente: BIOCOSMA)

El *etanol celulósico* o *bioetanol de segunda generación* es el producto de la fermentación alcohólica de azúcares contenidas en el material lignocelulósico (Figura 4). En general, estos azúcares están en forma de macropolímeros, principalmente como celulosa. En consecuencia, para obtener los azúcares se requiere hidrolizar estas macromoléculas para descomponerlas. Debido al carácter recalcitrante de estos polímeros que componen la pared de las fibras, es preciso pretratarlas con el objeto de por una parte, reducir o modificar la barrera que representa la lignina y/o reducir la

cristalinidad de la α -celulosa de manera de facilitar el acceso de los reactivos y enzimas empleadas en la hidrólisis. Estos tratamientos pueden ser procesos físicos, químicos, mecánicos y/o algunas combinaciones de estos (Tahezadeh & Karimi, 2007; Palonen, 2011; Yang *et al.*, 2011). Una vez pre-tratado el material, los azúcares obtenidos se someten a una fermentación alcohólica para finalmente separar el alcohol mediante destilación.

El *Biodiésel de segunda generación* se puede obtener mediante diferentes rutas termoquímicas, pero las más interesantes y promisorias son mediante gasificación de biomasa, que implica la obtención de gas de síntesis y su posterior empleo en la síntesis de Fischer–Tropsch; o mediante la obtención de líquido de pirólisis (Bio-oil) y posterior mejoramiento, purificación y refinación de este (Figura 4).

4. CARACTERÍSTICAS FÍSICAS, QUÍMICAS Y ENERGÉTICAS DE LA BIOMASA LIGNOCELULÓSICA

Para evaluar la factibilidad de la conversión de biomasa en energía es necesario considerar los siguientes parámetros que se describen a continuación (Biomass Users Network, 2002; BIOCOSMA).

4.1 Características Físicas

- **Tipo de Biomasa**

Como lo hemos señalado con anterioridad, la biomasa se presenta en diferentes estados físicos y orígenes, por ejemplo, residuos forestales, industriales, agroindustriales y otros. Estos tipos de biomasa tienen características distintas, como granulometría, densidad, contenido de energía por unidad de volumen, contenido de humedad, contaminantes, entre otras, las que determinan la factibilidad técnica y económica de los procesos de conversión energética que pueden aplicarse a cada tipo en particular.

- **Contenido de Humedad (C.H.)**

El contenido de humedad es una característica muy determinante en términos de la energía que es posible obtener por unidad de biomasa, además de incidir en su manejo. Cuando la biomasa leñosa reduce de modo considerable su contenido de humedad, también reduce significativamente su peso, su volumen y la actividad biológica de agentes externos, lo que implica un mejor transporte, logística y conservación. Por otra parte, garantiza la reducción de emisiones en la combustión, incrementa el poder calorífico y facilita su astillado o molienda (NREL, 1998).

Cuando el contenido acuoso de los residuos es muy elevado (> 60 % base húmeda), es necesario llevar a cabo un proceso de secado para poderlos emplear energéticamente por la vía de la combustión. Procesos termoquímicos específicos requieren que la biomasa tenga un contenido de humedad definido. Por ejemplo, la combustión directa requiere de un contenido de humedad base húmeda inferior al 50%, mientras que otros procesos como gasificación y pirólisis exigen que la biomasa tenga un contenido de humedad en la vecindad de 15%. Una humedad mayor de los residuos implica pretratamientos de secado que requieren utilización extra de energía.

Es importante cuando se habla de humedad indicar la base de referencia sobre la que se expresa el porcentaje (ver *Sección 7, Métodos*).

- **Granulometría y geometría de la biomasa**

La granulometría y geometría de la biomasa determinan las propiedades físico-mecánicas en el transporte y la alimentación del combustible a la unidad de conversión, la que puede ser muy variable, como se ilustra en la Figura 5. El diseño de los equipos en los cuales se aprovechará la biomasa debe considerar estas características, o bien la biomasa se debe adecuar en tamaño de acuerdo con los procesos de conversión en el que se desea utilizar. Por ejemplo, para conseguir un mejor desarrollo de la combustión, conviene que el combustible se suministre finamente dividido y así tener mayor superficie de exposición al aire.

El tamaño medio y la geometría junto con contenido de humedad está estrechamente relacionada con la capacidad de almacenamiento, transporte e incluso comercialización de la biomasa. Dependiendo de estas características en origen el valor de la biomasa varía, por ejemplo, los precios difieren si se trata de aserrín, virutas, desechos de cosecha, y si la biomasa está húmeda o seca. Lo ideal sería comercializar la biomasa de acuerdo con su contenido energético.

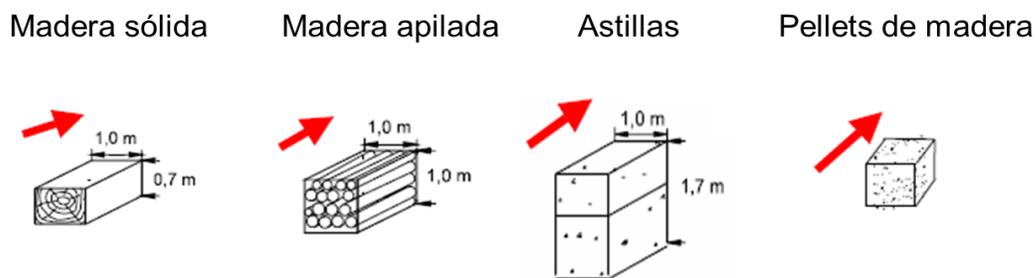


Figura 5. Distintas geometrías de almacenamiento y su densidad

4.2 Características Químicas

- **Composición elemental**

La mayoría de las biomásas están constituidas por 50% de carbono (C), 43% de oxígeno (O), 6% de hidrógeno (H), y menos del 1% por varios elementos, donde los más comunes se señalan en la Tabla 5. El C, H y O constituyen los componentes principales de la sustancia vegetal, como azúcares, almidón, lignina, celulosa, proteínas y otros. Estos elementos tienen una importancia fundamental en aplicaciones bioenergéticas de la biomasa, así como aplicaciones termoquímicas.

El C es el componente principal de la biomasa leñosa, el que mediante su oxidación libera energía, al igual que el H. En cambio, el O se encuentra oxidando de forma parcial a los otros dos elementos, contribuyendo a este proceso durante la transformación termoquímica, a diferencia del carbón mineral. Esto aclara el valor comparativo bajo del poder calorífico de la madera respecto del carbón mineral. El contenido de C e H contribuyen positivamente en el poder calorífico, mientras que el contenido de O lo hace de modo negativo (Oberberger, 2005).

Tabla 5. Composición elemental de biomasa lignocelulósica (Kaltschmitt und Hartmann, 2001)

Elemento	% de la materia seca
Carbono	40 – 47
Hidrógeno	6
Oxígeno	40 – 44
Nitrógeno	1 – 5
Fósforo	0,05 – 0,8
Potasio	0,3 – 5
Sodio	0,02 – 0,5
Azufre	0,05 – 0,8
Calcio	0,3 – 5
Silicio	0,05 - 3
Magnesio	0,5 - 1
Boro	0,005 – 0,01
Cloro	0,02 – 1
Cobre	0,0002 – 0,002
Hierro	0,005 – 0,1
Manganeso	0,002 – 0,03
Zinc	0,001 – 0,01

La biomasa contiene otros elementos, según la cantidad en que participan se clasifican en macro y microelementos. Estos son relevantes, ya que sus partículas emitidas como gases o cenizas, en primera instancia, pueden producir problemas de depositaciones y corrosión en los ductos y elementos de las unidades de conversión. Por otro lado, las emisiones a la atmósfera pueden producir alteraciones para el ecosistema, por lo que se recomienda tener en cuenta la concentración de estos elementos previo a la utilización del biocombustible, con el objeto de considerar el posible tratamiento y/o disposición de los residuos. Los macroelementos principales

son el nitrógeno (N), potasio (K), calcio (Ca), fósforo (P), magnesio (Mg), azufre (S) y

hierro (Fe). Los microelementos son aquellos cuyas concentraciones oscilan entre 0,001% a 0,03%; a este grupo pertenece el boro (B), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn) y molibdeno (Mo). El cloro (Cl) está presente con un contenido de hasta 1 %, el silicio (Si) con hasta 3% y el sodio (Na) con un contenido de hasta 0,5 % (referidos a las cenizas).

El N es un componente esencial en las plantas y forma parte de las proteínas, de los ácidos nucleicos, de las bases orgánicas, del pigmento de la clorofila, entre otras estructuras. En la biomasa lignocelulósica se encuentra en mayor concentración en la corteza, residuos de cosecha y cultivos de rotación corta, no obstante, la madera es la biomasa con menor concentración de N (Obernberger, 2005). Durante la combustión, el N orgánico se oxida a NO_x (óxidos de nitrógeno); siendo expulsado en los gases de la combustión donde solo una parte mínima se incorpora en las cenizas.

El S es un elemento esencial para la formación de proteínas en la célula y su relevancia en la biomasa radica en que en la combustión directa es un potencial formador de los gases contaminantes de óxidos de azufre (SO_x), precursores de lluvia ácida, y a su vez es un contaminante del biogás, pues participa en la formación de ácido sulfhídrico (H_2S). Sin embargo, su mayor importancia está en el papel que juega en los procesos de corrosión en la superficie de los tubos de los intercambiadores de calor en las unidades de conversión como las calderas. La incorporación del S a las cenizas es muy variable (de 40 a 90%), y esta depende de la concentración de metales alcalinos (Ca) en la biomasa (Obernberger, 2005).

Por su parte, el Cl durante la combustión forma gases de HCl, $\text{Cl}_{2(g)}$, y sales como KCl y NaCl, estas últimas normalmente forman parte de las cenizas. Investigaciones muestran que el 40-80% del Cl se incorpora a las cenizas (Obernberger, 2005). Por otra parte, tiene efectos corrosivos que se manifiestan en todo proceso que requiera elementos de metal para transporte, intercambiadores de calor, calderas, y otros que estén sometidos a condiciones extremas de temperaturas y presión.

Por último, los metales alcalinos como K, Ca, Na y Mg se encuentran en forma de óxidos en las cenizas y su presencia condiciona el pH de estas y en la temperatura de fusión.

- **Composición química**

El conocimiento de la composición química de biomasa es muy valioso en el desarrollo de procesos para producir biocombustibles y productos químicos en general. Esta información puede conducir al mejoramiento y desarrollo de métodos más eficientes de conversión. En particular, para la producción de etanol de segunda generación serán de interés los contenidos de celulosa, hemicelulosas y lignina, en tanto que para la producción de biodiésel de segunda generación son importantes los contenidos de lignina, cantidad y composición de las cenizas, porcentajes de C, H y O y la presencia de elementos contaminantes o indeseados para el proceso, como azufre, cloro y nitrógeno.

La biomasa leñosa corresponde a tejido constituido por distintos tipos de células, aquellas que cumplen una función de sostén mecánico y de conducción de agua comúnmente se denominan “fibras” (ver Figura 6).

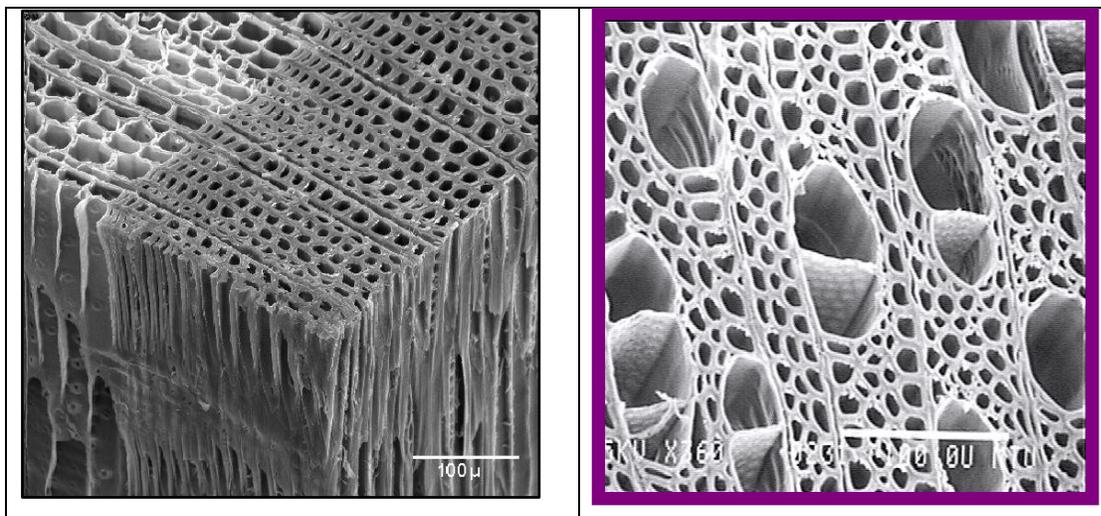


Figura 6. Fibras de la estructura lignocelulósica de la madera. A: Coníferas y B: Latifoliadas

Estas células representan en las latifoliadas alrededor de 60% y en la coníferas el 90% de las células presentes en el tejido leñoso, denominado xilema o madera. Su principal característica es que son células largas, huecas y terminadas en punta de paredes duras. Esta pared es la que le da el carácter resistente a la madera y está compuesta por varias capas de composición variable, en la que participan macromoléculas que le

otorgan la rigidez y la flexibilidad necesarias. Desde el punto de vista de la composición, en la biomasa leñosa se reconocen dos grupos de componentes químicos: estructurales y no estructurales (Figura 6).

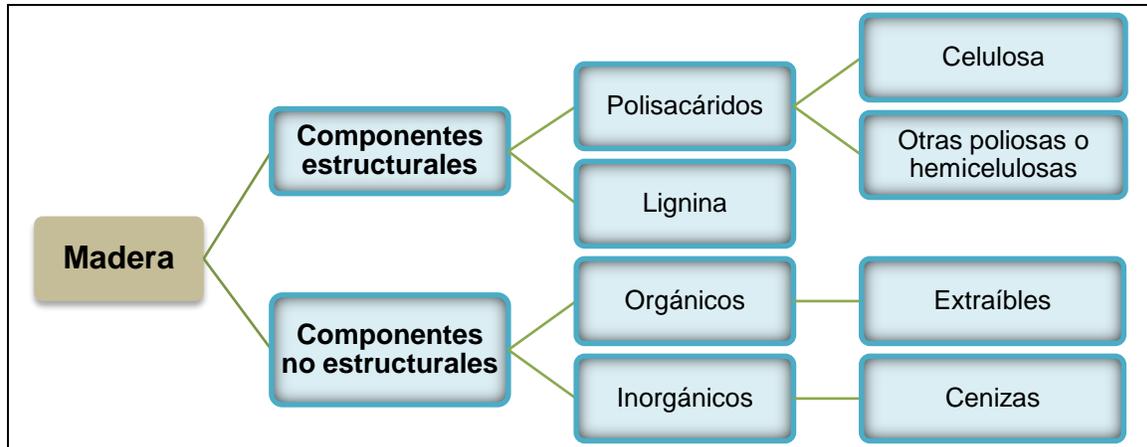


Figura 7. Composición química de la madera

Componentes estructurales: En este grupo se consideran tres tipos de polímeros: celulosa, lignina y hemicelulosas, que en conjunto conforman entre el 90% y el 95 % de la biomasa leñosa.

Celulosa

Este polisacárido tiene una fórmula genérica de $(C_6H_{10}O_5)_n$ y un peso molecular promedio entre 500.000 y 2.500.000, que equivale a grados de polimerización de entre 8.000 y 10.000 unidades en la celulosa de la madera. Es insoluble en agua y constituye aproximadamente el 50 % de la madera en peso.

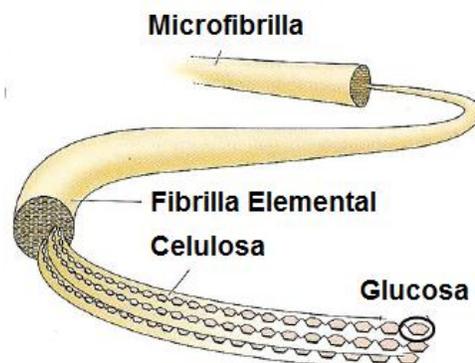


Figura 8. Estructura de una microfibrilla de celulosa (Fuente: Buchanan *et al.*, 2002).

Está formada por unidades de β D-Anhidroglucopiranosas. Durante el crecimiento del árbol las moléculas de celulosa se enlazan mediante puentes de hidrógeno formando cadenas ordenadas denominadas fibrillas (Figura 8), las que a su vez se organizan en elementos estructurales mayores que forman la pared celular de las fibras de madera. La mayor parte de la celulosa de la pared celular se encuentra en forma cristalina.

Lignina

La lignina es un polímero en red formado por unidades tridimensionales de fenilpropano (Sjöström, 1993), el que se encuentra unido a las hemicelulosas de la pared. Sus principales funciones son conferir resistencia e impermeabilidad a la matriz lignocelulósica y proteger la celulosa de ataques microbianos. Otra función importante es mantener unidas las fibras leñosas mediante de la lámina media ubicada en su parte exterior.

La lignina constituye del 23% al 33% de la biomasa leñosa en las coníferas y de 16% a 25% en las latifoliadas. Aun cuando la lignina aparece en la madera a lo largo de la pared celular, se concentra en la lámina media. A menudo se le denomina el cemento que une a las células individuales entre ellas, sin embargo, su estructura y distribución en la madera no es aún del todo comprendida. Se han desarrollado procesos para obtener celulosa pura, eliminando la lignina en gran parte de las fibras, en tales casos esta se considera un subproducto complejo que se emplea como combustible.

Hemicelulosas

Las hemicelulosas son polisacáridos complejos que se asocian con la celulosa en la pared celular y corresponden a polímeros ramificados de bajo peso molecular compuestos de varias clases de monómeros. Muchas tienen la fórmula genérica $(C_5H_8O_4)_n$, formadas por pentosanos. La hemicelulosa más abundante en las latifoliadas es el Xilano, que consiste de unidades de D-Xilosa. En las coníferas, la hemicelulosa más importante es el Glucomanano, constituido por las hexosas D-Glucosa y D-Manosa principalmente.

Componentes no estructurales: En la madera se encuentran componentes no estructurales orgánicos e inorgánicos. Los *componentes orgánicos* son principalmente los extraíbles (o extractivos). Estos componentes reciben este nombre debido a que se pueden remover de la madera mediante la extracción con solventes polares y no polares, como agua, alcohol, acetona, benceno o éter. Estas moléculas contribuyen a propiedades de la madera así como color, olor, sabor, resistencia a la pudrición, densidad, propiedades higroscópicas e inflamabilidad, entre otras, y pueden ser sustancias como taninos, polifenoles, material colorante, aceites esenciales, grasas, resinas, ceras, gomas y metabolitos intermedios. Los extraíbles pueden constituir entre 5 % y excepcionalmente 30 % de la sustancia madera, dependiendo de factores como la especie, las condiciones de crecimiento, el tipo de madera y la época en que el árbol se cosecha. En algunos casos, debido a la cantidad y el tipo de extractivo presente, pueden tener interés industrial.

Los *componentes inorgánicos*, comúnmente llamados cenizas, constituyen del 0,2% a 1 % de la masa seca de madera crecida en climas templados, aunque en ocasiones se han reportado valores mayores. Los componentes minerales están comprendidos principalmente por sales de calcio, potasio y magnesio, además de muchos otros elementos presentes a nivel de trazas (<100 ppm), así como fósforo, sodio, hierro, sílice, cobre, zinc y otros. Esta fracción determina en gran medida las características de las cenizas residuales en procesos de combustión. La composición de las cenizas puede ser muy variable, ya que depende en cierta medida del tipo de suelo donde creció el árbol y el tipo de tejido del que se hace la determinación, aunque en general en la biomasa leñosa se tiene que la cantidad de ceniza aumenta de médula a corteza.

Los contenidos de metales pesados son un grupo de elementos que afectan la calidad y cantidad de cenizas y en algunos procesos catalizan la formación de dioxinas, no obstante, los contenidos de metales pesados en la madera virgen son bajos, y por lo tanto son uno de los indicadores para reconocer la madera natural o virgen de aquella que fue tratada químicamente.

4.3 Características Energéticas

- **Poder Calorífico (PC)**

El poder calorífico mide el contenido energético de una sustancia combustible y se define como la cantidad de energía liberada por unidad de masa o por unidad de volumen de combustible, cuando este es completamente quemado (Norma ANSI/ASABE S593.1 2011). Para combustibles que contienen hidrógeno (H) en su composición se reconocen dos poderes caloríficos, el superior, cuando el calor latente de vaporización del agua formado en la combustión es recuperado; y el inferior, cuando este calor escapa en los gases de la combustión, el que varía dependiendo de la cantidad de agua que presenta el combustible. En el caso de la madera, la relación poder calorífico inferior/humedad (Figura 9) está dada por:

$$PCI = \frac{PCI_0 (100 - \%CH) - 2,44 \times \%CH}{100}$$

Donde:

PCI: Poder calorífico inferior a una humedad dada (MJ/kg). PCI_0 es el PCI con el material anhidro y CH% es el contenido de humedad base verde.

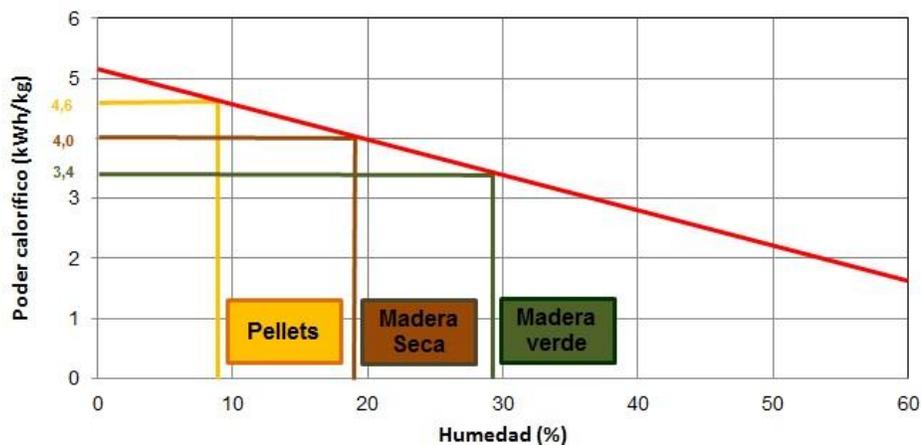


Figura 9. Poder Calorífico Inferior en función de la humedad (Biomass Trade Center, 2008)

- **Contenido de Cenizas**

Esta propiedad es importante del punto de vista energético debido a la incidencia que tiene en la cantidad de biomasa realmente combustible y, dependiendo de la composición, en los depósitos que generen problemas en los equipos de conversión

(Nordin, 1994; Obernberger, 2005). Los combustibles sólidos con menor cantidad de cenizas son la mejor opción, ya que la deposición en procesos de combustión es menor; se ha observado que la formación y composición de las cenizas depende de numerosos factores: la especie, la parte de la planta quemada (madera, corteza, hojas), mezclas de biomasa, recolección y almacenaje y condiciones de la combustión, entre otros (Nordin, 1994). Como se ha señalado, la corteza tiene mayor cantidad de cenizas, al igual que las ramas y ramillas, respecto de la madera. Las hojas a veces son parte del residuo, y generan una gran cantidad de cenizas debido a su alto contenido de sales como oxalatos, fosfatos y silicatos, entre otros (Sjöström, 1981). La cantidad de inorgánicos puede ser aumentada de modo significativo producto de contaminación con partículas de suelo, piedras y arena en las etapas de recolección y acopio en el bosque o en el caso de maderas tratadas químicamente.

Junto con la cantidad de cenizas, la composición de las mismas son características relevantes, ya que determina su comportamiento durante la combustión. Las cenizas están constituidas por elementos mayores y menores y dentro de ellos están los metales pesados y óxidos. Sustancias tales como óxidos de potasio (K) y magnesio (Mg) disminuyen el punto de fusión de las cenizas, facilitando su depósito en ductos y otros elementos de las calderas, generando aislación y corrosión. Otros elementos, como el cloro (Cl), promueven, bajo ciertas condiciones, la formación de dioxinas y furanos. En la Tabla 6 se indican algunos elementos de las cenizas y su efecto.

Tabla 6. Consecuencias de la presencia de algunos elementos en las cenizas de biomasa

Elemento	Consecuencia/Impacto
Nitrógeno (N)	Potencial formación de gases contaminantes (NO _x , N ₂ O y HCN)
Potasio (K)	Disminuye el punto de fusión de las cenizas y aumenta la capacidad de corrosión a altas temperaturas
Magnesio (Mg)	Disminuye el punto de fusión de las cenizas y facilita su aglomeración con tóxicos
Calcio (Ca)	Es el elemento que incita al aprovechamiento de las cenizas
Azufre (S)	Potencial formación de gases contaminantes SO _x y aumenta la capacidad de corrosión a altas temperaturas
Cloro (Cl)	Potencial formación de gases contaminantes HCl y contribuye a la formación de enlaces halógeno/orgánicos formando dioxinas y furanos
Metales pesados	La potencial formación de metales pesados limita el uso de los combustibles

Fuente: Kaltschmitt und Hartmann, 2001

Según Kaltschmitt *et al* (2009), y otros autores (San Miguel & Gutiérrez, 2015; Nogués, 2010; Peralta *et al.*, 2014) la concentración relativa (%) de potasio (K), calcio (Ca) y magnesio (Mg) de las cenizas, se puede relacionar con su comportamiento al someterlas a calentamiento progresivo y punto de fusión o fusibilidad. Tanto la normativa norteamericana como la europea, identifican temperaturas características en el proceso de fusión de las cenizas en ambiente controlado (oxidante o reductor) La norma CEN/TS 15370-1 2006 Biocombustibles sólidos. En el método para determinar la fusibilidad de las cenizas (San Miguel & Gutiérrez, 2015) se reconocen las siguientes temperaturas características:

Temperatura de deformación inicial: Temperatura a la cual aparecen los primeros signos de redondeamiento del vértice o vértices superiores de la forma aparente de la probeta. Las cenizas se adhieren entre ellas y se aglomeran. En la madera esta etapa ocurre a 1.200°C. (En pino 1230-1260°C).

Temperatura de ablandamiento: Temperatura a la cual la probeta pierde la forma. Las cenizas se ablandan y sus bordes se redondean. En la madera esta etapa ocurre a 1.400°C, sin embargo, en la paja de cereales ocurre a 800°C.

Temperatura de Esfera (hemisferio): Temperatura a la cual el perfil de la probeta toma la forma aparente de una semicircunferencia., es decir, cuando la altura del perfil de la probeta es igual a la mitad de su base. Es variable entre 1265 a 1400°C.

Temperatura de fluidez: Temperatura a la cual la masa de las cenizas se extiende sobre el soporte en una capa cuya altura máxima es igual a la tercera parte de la altura del perfil de la probeta a la temperatura de hemisferio. También es variable aunque superior a 1.450°C.

Cuando estas temperaturas son bajas es posible que se produzcan depósitos y ensuciamiento en los elementos empleados en los procesos termoquímicos.

5. BIOMASA LIGNOCELULÓSICA EN CHILE

Según estadísticas oficiales, Chile posee 15,58 millones de hectáreas de recursos forestales, que corresponden a bosques naturales con un total de 13,36 millones de hectáreas (84,5%), y a plantaciones que ocupan un área de 2,44 millones de hectáreas (15,5%). El año 2013 ingresó US\$5.700 en exportaciones, con un consumo de madera industrial de 41 millones de metros cúbicos y con una contribución al Producto Interno Bruto (PIB) nacional de 2,7% (INFOR, 2014).

La más importante fracción de la biomasa de origen forestal se obtiene directa o indirectamente de los bosques productivos. Una parte importante de estos corresponde a plantaciones industriales de rápido crecimiento y otra a bosque nativo, en el que los estados adulto y renewal, representan un 70% de la superficie existente (algo más de 9,3 millones de ha), si bien la participación de estos últimos como proveedores de materia prima para la industria es baja, su aporte en términos del abastecimiento de leña para uso residencial e industrial es significativa, y dada la superficie que cubren, su manejo representa una importante fuente potencial de biomasa con fines energéticos. Además de estas biomásas que quedan en el bosque, existen otros productos del procesamiento mecánico de la madera, el aserrado de *Pino radiata* principalmente.

En la Tabla 2 se observa que la biomasa tiene una participación importante en la generación de energía primaria en Chile, con un 29% (aproximadamente 98.000 TeraCalorías). Un 36% de ésta es consumida como leña por el sector comercial, público y residencial (CPR), y en menor medida por el sector industrial. La mayor parte de la leña, y en consecuencia la mayor parte de la biomasa con fines energéticos que se usa en el país, se comercializa en un mercado informal no regulado, de acuerdo a FAO en Chile solo el 6% de la leña se comercializa en el mercado formal, adicionalmente se usa con un alto contenido de humedad, en artefactos poco eficientes y con altos niveles de emisiones. No obstante, la biomasa como ERNC ha generado nuevos proyectos de biocombustibles y parte de estos desarrollos también se han iniciado en Chile, debido al gran potencial y vocación forestal-maderera que tiene el país, y, en consecuencia, de la gran disponibilidad de residuos leñosos provenientes de las plantaciones industriales y del bosque nativo, así como de las industrias asociadas de transformación mecánica de la madera.

La actividad productiva del sector genera diversos tipos de residuos de biomasa que pueden ser aprovechables como materia prima para energía, los residuos forestales son una buena alternativa para la combustión directa, que es el uso más generalizado de la biomasa en el país. Los residuos madereros pueden ser generados como desechos de cosecha y manejo de los bosques, desechos de la industria primaria y secundaria de la madera, del sector de la construcción, de la industria del embalaje, residuos leñosos urbanos, entre otros (Tabla 7 y Figura 10).

Tabla 7. Ejemplos de residuos forestales y su origen

Tipo de residuos	Origen del residuo	Descripción
Madera (tronco)	Cosecha forestal	Resultados de residuos de cosecha que quedan luego de la extracción de madera con fines industriales.
Ramillas y hojas	Cosecha forestal	
Corteza	Cosecha forestal e industria	Capa externa de la madera redonda.
Lampazos	Industria primaria	Secciones laterales de la madera, libres de corteza.
Aserrín	Industria primaria y secundaria	Es un material con una densidad aparente muy baja y de partículas muy pequeñas.
Viruta	Industria primaria y secundaria	Cintas delgadas de espesor variable en dirección a la fibra (INFOR, 2007).
Despunte	Industria primaria y secundaria	Residuos de tamaño variable provenientes de secciones terminales de piezas y que resultan del proceso de dimensionado en largo de la madera.



Figura 10. Ilustraciones de distintos tipos de biomasa residual industrial

El sector forestal chileno productivo se basa en la existencia de recursos forestales artificiales constituidos por plantaciones de especies exóticas de rápido crecimiento como principal proveedor de materias primas para una moderna industria forestal–maderera asociada; y por el bosque nativo que suministra una variedad de productos y servicios, y que, además, ocupa una importante fracción del territorio nacional y posee un potencial productivo que no se ha expresado por diversas razones que escapan al alcance de este estudio.

5.1 Plantaciones Forestales

Las plantaciones forestales en Chile están representadas por unas cuantas especies, las que se han establecido con fines industriales, principalmente. En la Figura 11 se destaca la participación de estas especies: se desprende que el 93% de la superficie plantada corresponde a dos géneros: *Pinus*, representado por *Pinus radiata*, y el género *Eucalyptus*, representado por las especies *Eucalyptus globulus* y *Eucalyptus nitens*. El 7% restante está representado por las especies leñosas: *Atriplex*, *pino ponderosa*, *Acacias sp.*, y *Populus sp.* entre otras.

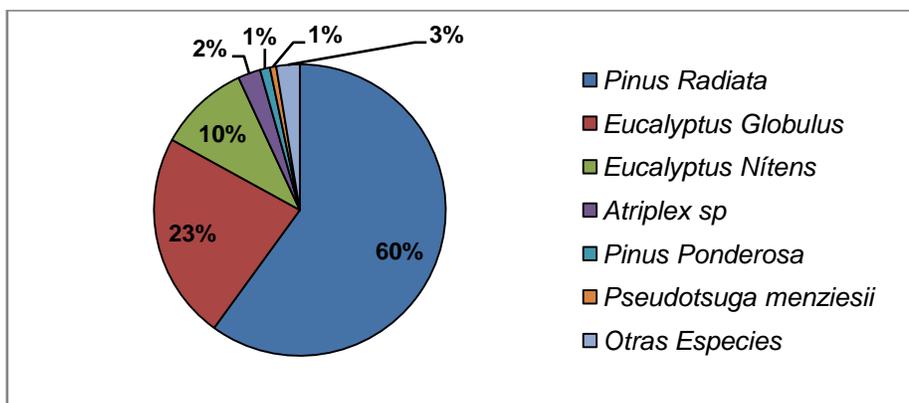


Figura 11. Participación porcentual de especies plantadas en Chile. Base 2,4 millones de ha (INFOR, 2014).

Del total de madera industrial cosechada en Chile, las plantaciones con especies de rápido crecimiento como *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.* proveen alrededor de un 98%. La información disponible indica que después de la cosecha se pueden extraer aproximadamente 20 (toneladas secas /ha de residuos), sin embargo, este rendimiento es relativo y es en función del tipo de manejo, el sitio forestal, el sistema

de cosecha y la técnica de recolección de biomasa, entre otras. De la Figura 12 a la Figura 14 se muestran imágenes de residuos de cosecha y faenas.



Figura 12. Residuos de cosecha, Lanco, X Región, Chile (Izq.), y desechos de bosques adultos de lenga, XII Región (Fuente: BIOCORMSA) (Der.)



Figura 13. Aprovechamiento de biomasa en bosques de *Eucalyptus* (Fuente: BIOCORMSA).



Figura 14. Aprovechamiento de biomasa en bosques de *Pinus radiata* (Fuente: BIOCORMSA).

De la Tabla 8 a continuación, se desprende que la mayor concentración de plantaciones forestales de rápido crecimiento se localiza en la zona centro-sur de Chile, específicamente entre la VII Región del Maule y la X Región de Los Lagos y corresponde a *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.*, como ya se ha indicado.

Tabla 8. Distribución de la superficie de plantaciones en Chile (ha) al año 2012 (INFOR, 2011)

REGIÓN	<i>Atriplex</i>	<i>E. globulus</i>	<i>E.nitens</i>	<i>P. ponderosa</i>	<i>Pinus radiata</i>	<i>Pinus oregón</i>	Otras	Total	%
Coquimbo	60.240	2.718	-	-	0	-	20.910	83.869	3,5
RM		5.738	-	-	17	-	351	6.106	0,3
Valparaíso		37.675	-	-	8.879	-	1.105	47.659	2,0
O'Higgins		42.743	14	-	68.069	-	1.938	112.764	4,7
Maule		41.934	1.502	8	405.126	217	3.965	452.752	18,9
Biobío		208.705	76.870	702	611.384	389	9.307	907.356	37,9
Araucanía		143.393	55.844	2.701	265.972	7.023	5.506	480.439	20,1
Los Ríos		20.835	51.689	3	105.535	4.123	7.928	190.111	7,9
Los Lagos		19.788	30.905	258	15.821	606	2.651	70.029	2,9
Aysén		-	7	25.164	-	4.423	14.188	43.782	1,8
TOTAL	60.240	523.530	216.830	28.835	1.480.803	16.781	67.847	2.394.866	100
%	2,5	21,9	9,1	1,2	61,8	0,7	2,8		

Las plantaciones en Chile, de acuerdo con los estudios de proyecciones del Instituto Forestal, para el 2030 contribuirán con un volumen de madera industrial del orden de los 53 millones de m³.

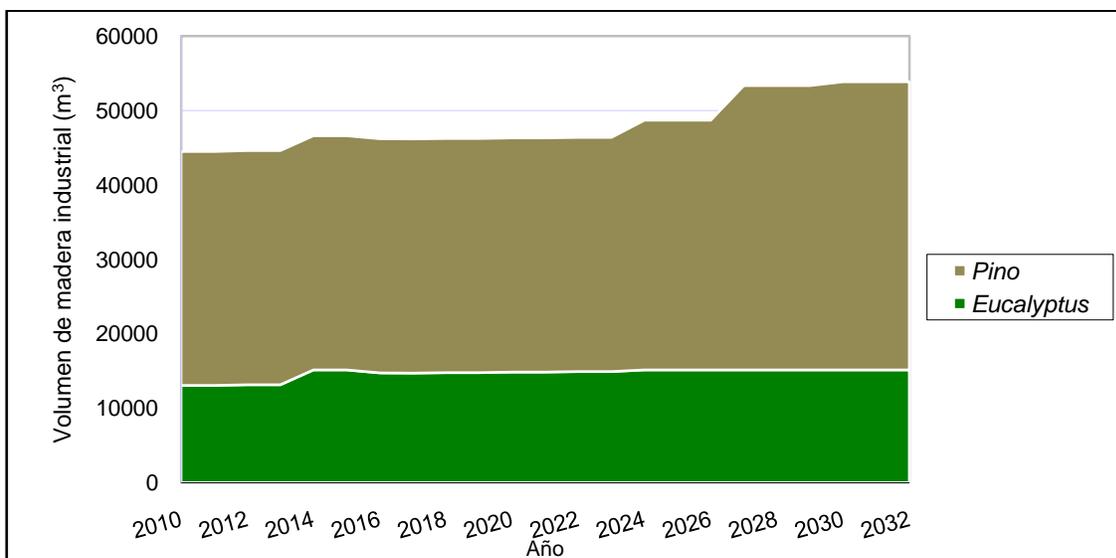


Figura 15. Disponibilidad futura de madera industrial con plantaciones de rápido crecimiento (miles de m³) (INFOR, 2011)

Debido a la importancia de *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.* y a su gran aporte tanto en la generación como en el consumo de subproductos, este estudio consideró la caracterización física y química de residuos de plantaciones de: *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* y *E. nitens*.

5.1 Residuos de la industria de transformación mecánica del recurso maderero

Como ha sido expresado anteriormente, hay una gran diferencia entre las superficies de bosques naturales y plantaciones existentes en Chile. De hecho la superficie de bosques nativos supera con amplitud a la de plantaciones, sin embargo, estas últimas contribuyen en 98% a la generación de madera industrial, con un total cosechado durante el 2013 de 41 millones de m³ de madera, el bosque nativo ese mismo año solo generó 315 mil m³ de madera industrial (Tabla 9). Se deduce de la Figura 16 que en los últimos 5 años el bosque nativo tiene una escasa participación en la producción de madera industrial y ha sido de manera amplia reemplazado por *Pinus radiata* y *Eucalyptus sp.*

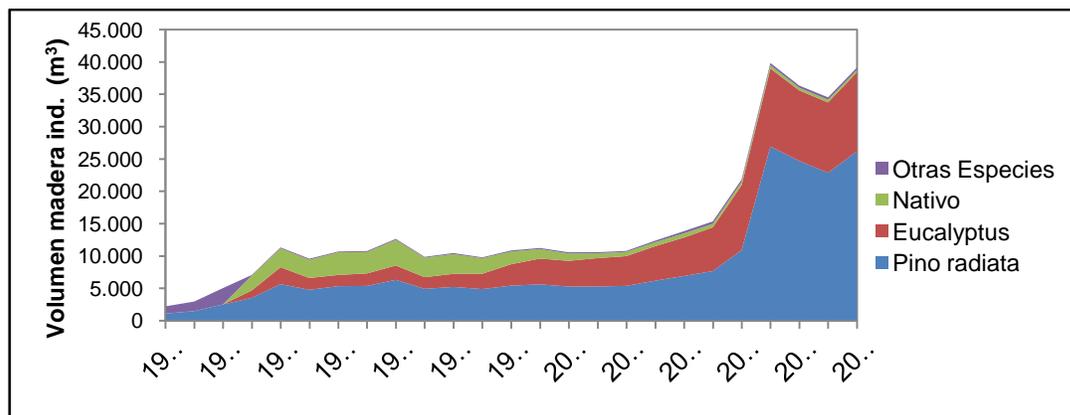
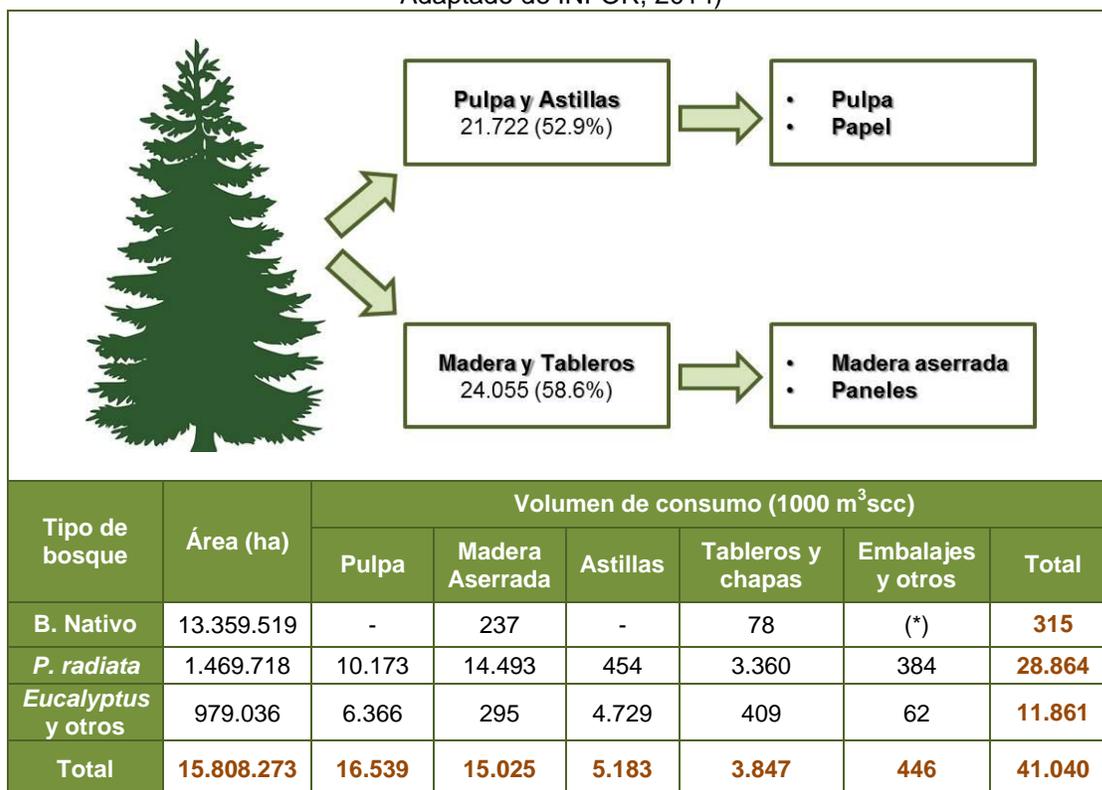


Figura 16. Evolución cosecha de madera industrial, 1987-2011 (m³)

Tabla 9. Flujo de consumo y volumen de consumo de madera industrial en Chile (Fuente: Adaptado de INFOR, 2014)



(*)Cifra inferior a 450 m³sc

La baja proporción del bosque nativo en la generación de madera industrial contrasta, en cierta medida, con lo que se refiere a la producción de madera para leña. En la Figura 17 se observa el gran volumen de madera destinada a la producción de leña en los últimos 15 años, con un total aproximado de 16 millones de m³ en la actualidad; se estima que un porcentaje levemente superior al 60% de la leña consumida en Chile proviene de bosques y matorrales naturales.

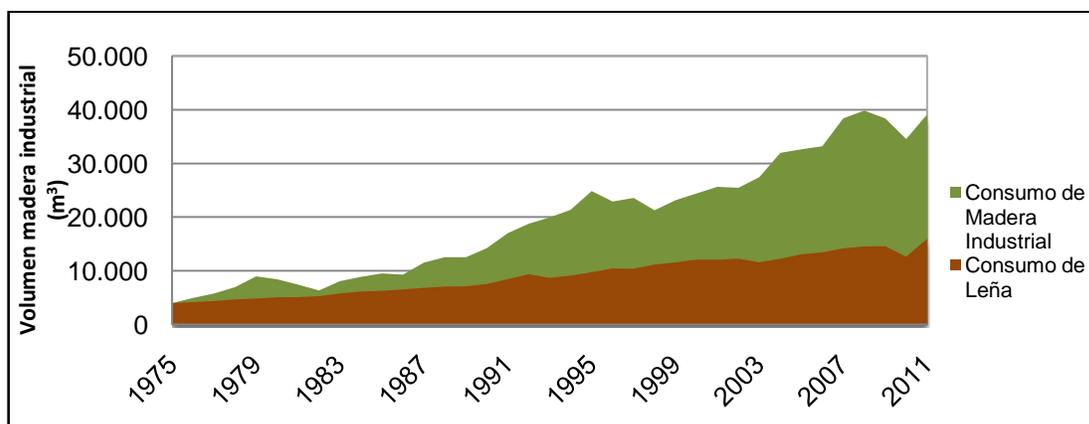


Figura 17. Consumo de madera en Chile, 1975-2011 (m³) (INFOR, 2011).

En relación con el consumo de madera (Tabla 10), la industria de pulpa, aserrío, tableros y astillas de exportación han sido los principales destinos de la cosecha de madera industrial en Chile.

Tabla 10. Consumo de madera industrial para los principales usos de la madera en Chile (INFOR, 2011-2014)

Consumo	(x 1000 m ³ ssc)								
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2013
Total general	31.998	32.658	33.218	38.416	39.869	36.401	34.560	39.151	41.040
Por industria									
Pulpa	11.212	10.879	10.405	15.782	16.969	16.598	12.760	15.575	16.539
Aserrío	15.510	16.134	16.769	15.990	13.968	11.441	12.246	13.175	15.025
Astillas	2.698	3.033	3.283	3.853	5.246	4.725	5.656	6.092	5.183
Tableros y chapas	1.814	2.029	2.316	2.394	3.317	3.355	3.535	3.867	3.847
Trozos de exportación	273	84	53	16	1	2	27	43	-
Cajones, postes y polines	491	499	392	381	368	280	336	399	446*
Por principales especies									
<i>Pinus radiata</i>	25.802	25.729	25.535	27.495	26.953	24.753	22.889	26.212	28.864
<i>Eucalyptus</i>	5.341	5.947	6.769	10.058	12.055	10.910	10.880	12.209	11.861

* Valor suma de las industrias restantes

A partir de datos del INFOR (2010-2011) es relativamente fácil hacer una estimación de los desechos que genera el sector forestal chileno. Si consideramos la cosecha de 39 millones de m³ (al año 2011) implica la generación de residuos que quedan en el bosque (ramas, despuntes y corteza¹), por su parte el aserrío genera residuos de madera (aserrín, lampazos, despuntes, eventualmente corteza, entre otros). Sobre la base de la información de INFOR, BIOCOSA realizó una estimación muy acotada de biomasa leñosa para una importante área de Chile. Este estudio se concentró entre las Regiones IV y XII y consideró el aprovechamiento de residuos de plantaciones industriales postcosecha, residuos de aserraderos, residuos de plantas de tableros y remanufactura y se descontaron los bosques e industrias pertenecientes a grandes empresas, y tampoco considera el aporte teórico de bosques nativos, cultivos energéticos, residuos urbanos y residuos agrícolas. El método empleado fue desarrollado, aprobado y empleado por FAO para la prospección de Biomasa en

¹ A diferencia de *Pinus radiata*, una parte importante de la corteza de *Eucalyptus sp.*, permanece en el bosque como desecho.

proyectos de gran escala, denominado: *Setting up Fuel supply strategies for large-scale bio-energy projects using agricultural and forest residues*. Este método analizó las ofertas brutas de biomasa y descontó las cantidades que no se encontraron disponibles, ya sea por razones técnicas o de otra índole. La proyección de los resultados obtenidos para el año 2015 se presenta en la Tabla 11.

Tabla 11. Estimación de la biomasa forestal disponible en Chile al 2015 por regiones (BDMT). Fuente: Adecuado de BIOCOSMA, 2011

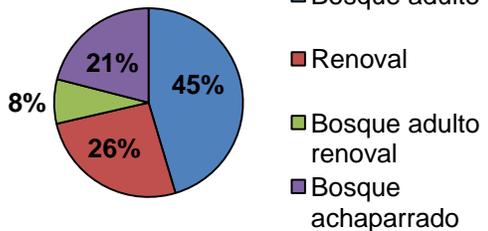
Región	Residuos de plantaciones		Residuos de aserraderos			Re-manufactura	Total
	Otros	Corteza	Aserrín	Astilla	Chapa		
IV	6.215	---	---	---	---	---	6.215
V	106.273	6.781	2.669	4.003	---	792	120.518
RM	26.756	---	---	---	---	---	26.756
VI	149.992	37.259	19.237	28.855	---	6.322	241.665
VII	243.242	99.498	67.378	101.067	---	48.647	559.832
VIII	273.448	81.336	133.683	200.525	55.545	184.984	929.521
IX	205.412	51.372	30.872	46.308	18.060	29.092	381.116
X	40.724	3.927	5.801	8.702	5.375	4.136	68.665
XIV	104.875	27.624	31.981	47.971	9.030	22.800	244.281
XI	---	---	---	---	---	---	0
XII	---	---	---	46.500	---	13.020	59.520
Total	1.156.937	307.797	291.621	483.931	88.010	309.793	2.638.089

5.2 Bosque Nativo.

En Chile, el bosque nativo clasificado en doce tipos forestales que cubren una superficie de 13,36 millones de ha, se encuentran básicamente en cuatro estados generales de desarrollo: Adulto, renoval, adulto-renoval y achaparrado. En la Tabla 12 se detalla la superficie (ha) de cada una de estas categorías.

Tabla 12. Superficie de bosques por estados de desarrollo en Chile (INFOR, 2014)

Bosque natural	Superficie (ha)	%
Bosque adulto	6.059.037	45,4
Renoval	3.477.532	26
Bosque adulto renoval	1.023.438	7,6
Bosque achaparrado	2.799.514	21
Total	13.359.519	100



El gráfico de sectores muestra la siguiente distribución de la superficie de bosques nativos en Chile por estado de desarrollo:

- Bosque adulto: 45%
- Renoval: 26%
- Bosque adulto renoval: 8%
- Bosque achaparrado: 21%

En general estos bosques son ecosistemas complejos e intervenidos fuertemente en algunos casos. Aquellos bosques que pueden considerarse comerciales o potencialmente comerciales, son en su mayoría heterogéneos tanto en su composición de especies, como en su composición etaria y corresponden a los localizados en la zona Centro-Sur y Austral del país. Los mejores bosques nativos ya no existen porque fueron eliminados y reemplazados por cultivos agrícolas o por plantaciones forestales de rápido crecimiento y los bosques remanentes se encuentran en general degradados por una sobreexplotación que se concentró en los mejores individuos, de tal modo que se encuentran empobrecidos. Por otra parte, los bosques menos explotados se localizan en áreas en muchos casos inaccesibles, en sitios de menor productividad y con una topografía accidentada. La sobreexplotación ocurrida a lo largo de los años, unida a la complejidad de las estructuras, la lejanía de los centros de consumo y malos accesos, hace que la contribución del bosque nativo a la industria forestal maderera tradicional sea muy marginal. Sin embargo, antes de la irrupción de las plantaciones forestales de rápido crecimiento, estos bosques fueron muy importantes en la industria de la madera. Además, tuvieron una participación gravitante como insumo energético de fundiciones, infraestructura productiva en construcción de líneas férreas y electrificación del país (CONAF).

Actualmente, el manejo destinado a la conservación y al mejoramiento de los bosques nativos, constituye uno de los principales desafíos del sector forestal chileno, ya que permitiría su incorporación al sector productivo, mediante intervenciones silviculturales que se concentran en dejar en pie los árboles más adecuados a objeto de garantizar un bosque futuro de mejor calidad y potencial productivo. Esta actividad es muy costosa, razón por la cual, es imperativa la obtención de productos comerciales que permitan solventar económicamente las intervenciones; en este sentido, un nuevo producto como la biomasa para fines energéticos, representa una oportunidad para el manejo, mejoramiento y conservación de los bosques nativos, debido a que permite utilizar los productos de baja calidad que se obtienen de las intervenciones.



Figura 18. Manejo de un bosque de Lenga. A la izquierda se ilustra el bosque sin manejo y a la derecha el mismo bosque luego de ser intervenido. (Cortesía Profesor H. Schmidt)

Los estados de desarrollo que ocupan las mayores superficies corresponden a bosque adulto y bosque renoval, en las zonas centro –sur y austral del país, que coinciden con las áreas de mayor demanda de biomasa en la forma de leña. A continuación se describen las principales características de estos estados de desarrollo.

Bosques nativos adultos: CONAF define estos bosques como *tipos de bosques formados por especies autóctonas, provenientes de generación natural, regeneración natural, o plantación bajo dosel con las mismas especies existentes en el área de distribución original, que pueden tener presencia accidental de especies exóticas distribuidas al azar (Ley N°20.283/2008)*. En general los bosques de esta categoría y que se encuentran más accesibles han sido sobreexplotados y, en consecuencia, degradados. Estos bosques son proveedores del mayor porcentaje de leña que se consume en el país (Hernández & Lobos, 2003). Una fracción de estos bosques es altamente interesante, ya

que por su manejo y mejoramiento se podrían obtener altos rendimientos en biomasa como materia prima combustible.

En aplicaciones como la generación de electricidad, la elección del empleo de esta biomasa pasa por el valor de la materia prima combustible, debido a que debe cubrir los costos de la faena de extracción y procesamiento. Un uso multipropósito de estos bosques, en el que aquellos trozos no utilizables por la industria sean destinados a la generación de energía y podría ser más viable económicamente en determinadas situaciones.

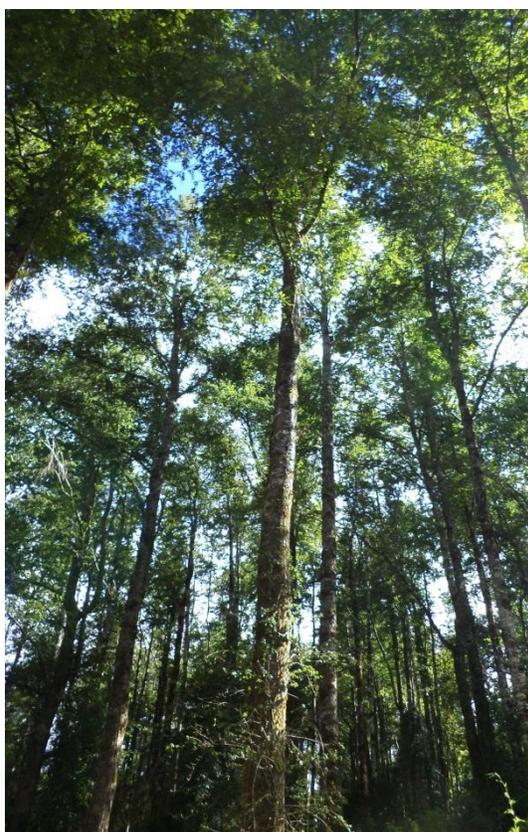


Figura 19. Bosque renoval de *Nothofagus*, Lanco, VIII Región, Chile.

Renovales de especies nativas:

Corresponden a bosques que se han originado después de grandes incendios o de faenas de habilitación agrícolas. Se trata de estructuras más simples y homogéneas más o menos coetáneas. Estos bosques son más fáciles de manejar debido a sus características estructurales. A pesar de lo anterior, tampoco existen experiencias formales en la obtención de biomasa residual. Sin embargo, sí existen experiencias para los productores de leña.

En la precordillera de la IX Región una situación promedio proporciona de 60 a 110 toneladas de leña seca/ha manejada (BIOCOMSA).

Tabla 13. Distribución de superficie de tipos de bosques en Chile (Ha) al año 2011 (INFOR, 2011)

	Bosque adulto	Renoval	Bosque adulto renoval	Bosque achaparrado	Total	%	% Acumulado
I	-	7.300			7.300	0,06	0,06
II					0	0,00	0,06
III					0	0,00	0,06
IV	193	31.073			31.266	0,24	0,29
V	1.125	93.232	207	11.812	106.376	0,81	1,10
RM	-	99.661	5.888		105.549	0,80	1,90
VI	3.512	165.354	16.373	74	185.313	1,41	3,31
VII	15.021	330.169	24.893	14.631	384.714	2,92	6,22
VIII	93.978	541.208	63.211	70.157	768.554	5,83	12,05
IX	277.941	475.490	96.643	87.238	937.312	7,11	19,16
XIV	467.962	241.131	80.268	60.410	849.771	6,45	25,61
X	1.390.542	678.697	209.114	457.978	2.736.331	20,76	46,37
XI	2.534.747	459.934	245.920	1.158.145	4.398.746	33,37	79,73
XII	1.271.907	234.219	164.827	1.000.639	2.671.592	20,27	100,00

En este estudio se caracteriza un subconjunto de especies pertenecientes a algunos de los tipos forestales más importantes de Chile, dada la superficie que ocupan o las especies que lo componen.

Tipo Forestal “Siempreverde”

Es el segundo tipo forestal más abundante y está definido en la tipología forestal actual en función de su composición multiespecífica, constituida por más de 21 especies perennifolias que crecen mezcladas en muy diferentes combinaciones, reconociéndose cinco sub-tipos según su estructura: Ñadis, Olivillo costero, Siempreverde con intolerantes emergentes, Siempreverde de tolerantes y Renovales de Canelo ; y se extiende desde los 40° 30' hasta los 47° Latitud Sur y por debajo de los 1000 m s.n.m en la Cordillera de los Andes, desde los 38° 30' hasta los 47° Latitud Sur en la Cordillera de la Costa (principalmente parte occidental) y en áreas planas y de mal drenaje del llano Central al sur de los 40° Latitud Sur. (Donoso, 1993). De la amplia distribución del tipo forestal a lo largo de prácticamente 1.000 km. (9 grados de latitud), en su parte norte coincide con la presencia de población e industrias que demandan productos de este tipo forestal. No obstante, según (Donoso, 1989), la falta de accesibilidad y el exceso de complejidad de

este tipo forestal, determinaron una baja tasa de utilización y, por ello mismo, muy poca investigación. Los pocos conocimientos que se tienen de él se deben a estudios recientes. A nivel nacional, ocupa una superficie de 4.184.408 ha, representando el 30,9% de los bosques nativos chilenos (www.gestionforestal.cl)

Tipo Forestal “Roble-Raulí-Coigüe”

El tipo forestal Roble -Raulí- Coigüe” se desarrolla entre los paralelos 36°30’S y el 40°30’S, a una altitud variable entre los 100 y los 1.000 msnm en ambas cordilleras, particularmente en las laderas interiores y valles cordilleranos. (Donoso, 1981).

Está constituido por renovales y bosques puros o mezclados de Roble (*Nothofagus obliqua*), Raulí (*Nothofagus alpina*) y Coihue (*Nothofagus dombeyi*), estos bosques son de origen secundario, es decir, generados por la intervención humana a través de cortas masivas e incendios o por desastres naturales como derrumbes y deslizamientos de tierra, están formados por especies agresivas, de rápido crecimiento y gran habilidad para competir (Donoso, 1994). Se reconocen tres estructuras para el tipo forestal: Renoval, Bosque adulto y Bosque adulto-Renoval para la confección de los esquemas técnicos de intervención, existiendo una cuarta correspondiente a Bosque achaparrado. En la actualidad los renovales de este tipo forestal cubren una superficie de 1,5 millones de ha.

Tipo Forestal “Lenga”

Este tipo forestal se presenta geográficamente entre los paralelos 36°50’S y los 56°S de latitud. Hasta el paralelo 45°S se encuentra a lo largo de la cordillera de los Andes formando el límite altitudinal arbóreo a los 1.000 msnm. De ahí al sur en la región de Coyhaique, se desarrolla a alturas menores a los 700 msnm, hasta el nivel del mar en el extremo de su distribución en Magallanes (Donoso, 1981).

La especie principal es la Lenga (*Nothofagus Pumilio*), asociándose con Coihue (*N. dombeyi*), Roble (*N. obliqua*) y Araucaria (*Araucaria araucana*) en el extremo norte de su distribución, luego a partir de paralelo 40° 30 S con Coihue y Coihue de Magallanes (*N. betuloides*), ubicándose a alturas de 900 a 1.200 msnm. En la región de Aysén (45°S). En Magallanes (56°S), hacia el oeste en las islas del litoral y en sectores húmedos se mezcla

con *N. betuloides* y hacia el interior forma bosques puros. Donoso (1981), reconoce tres sub-tipos:

- Bosques achaparrados y krummholz de Lenga
- Bosques puros de Lenga
- Bosque mixto de Lenga-Coigüe

De acuerdo con el catastro de recurso vegetacionales de Chile (1997), la superficie ocupada por el tipo forestal Lenga a nivel nacional es de 3.391.551 ha, representando el 25,3% del recurso forestal nativo del país.

5.3 Plantaciones Dendroenergéticas

Para incrementar la oferta de biomasa, se ha instalado el concepto de cultivo dendroenergético, que consisten de plantaciones con especies agrícolas o forestales en sistemas de rotación corta, y que tienen la finalidad exclusiva de producir biomasa transformable en biocombustibles para la producción de energía.



Figura 20. Cultivo Energético *Acacia dealbata* y *Eucalyptus globulus* (BIOCOMSA)

Las principales ventajas de estos cultivos son la generación materia prima homogénea en períodos breves, altos rendimientos de biomasa por unidad de superficie en distintos tipos de suelo y alta eficiencia en el aprovechamiento de las características del sitio, desarrollando individuos con tolerancia a las sequías y a plagas de insectos (Sannigrahi *et al.*, 2010).

En el ámbito de estos cultivos, podemos distinguir dos grandes grupos: En primer lugar, destacan aquellos que casi en su totalidad son *cultivos agrícolas* en los que se utiliza la parte comestible del vegetal y que se emplean para obtener biocombustibles como el

etanol y el biodiesel de primera generación. El segundo tipo de cultivos son los *cultivos energéticos*, en los cuales se aprovecha la mayor parte de la biomasa directamente para la generación de energía, como por ejemplo, aquellos destinados a la producción de leña. Estos cultivos se denominan de diferentes maneras: Short Rotation Woody Crops (SRWC), Short Rotation Coppice (SRC), Short Rotation Intensive Culture (SRIC); Short Rotation Forestry (SRF), Biomass Plantation Culture (BPC), Short Rotation Fiber Production System (SRFPS); Energy Forestry (EF). La definición más aceptada, es la de Short Rotation Woody Crops (Cultivos leñosos de Corta Rotación), que se definen según Dickmann (2006) como *un sistema silvicultural basado en cortos ciclos de cosecha, generalmente entre uno a quince años, utilizando técnicas intensivas de cultivo, tales como selección de material genético, fertilización, riego y control de malezas, que generalmente utiliza especies con alta capacidad de regeneración*. Dentro de este tipo de cultivos se distinguen tres situaciones: Short Rotation Coppice (SRC), Short Rotation Forestry (SRF) y Perennial Grasses. A diferencia de cultivos más tradicionales como el raps, la maravilla, el maíz, la soja y el trigo que son ampliamente conocidos en la agricultura, estos cultivos aún deben ser desarrollados en todos sus aspectos, desde el mejoramiento de especies hasta los métodos de cosecha.

6. OBJETIVOS

6.1 Objetivo General

Caracterizar desde el punto de vista de la densidad, composición química y poder calorífico las principales fuentes de biomasa lignocelulósica residual factibles de ser empleadas como combustible en Chile.

6.2 Objetivos Específicos

- 6.1.1 Determinar densidad del material leñoso proveniente de plantaciones industriales de pino y eucaliptos, especies del bosque nativo y plantaciones dendroenergéticas.
- 6.1.2 Determinar la composición química (Extraíbles, celulosa, lignina y cenizas) del material leñoso residual proveniente de plantaciones industriales de pino, eucaliptos, plantaciones dendroenergéticas y especies del bosque nativo.
- 6.1.3 Determinar la cantidad y composición de las cenizas del material leñoso residual proveniente de plantaciones industriales de pino, eucaliptos, plantaciones dendroenergéticas y especies del bosque nativo.
- 6.1.4 Determinar el poder calorífico del material leñoso residual proveniente de plantaciones industriales de pino, eucaliptos, plantaciones dendroenergéticas y especies del bosque nativo.
- 6.1.5 Analizar el potencial que tiene estos residuos como materia prima biocombustible, considerando sus características químicas y energéticas.
- 6.1.6 Poner a disposición del sector forestal-maderero y energético información básica para evaluar el potencial de estos residuos como materia prima combustible.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

Los análisis fueron realizados en el Laboratorio de caracterización de biomasa y química de la madera de la Facultad de Ciencias Forestales y Conservación de la Naturaleza Universidad de Chile y en el Laboratorio de Referencia Medioambiental del Centro Nacional del Medio Ambiente (CENMA).

7.1 MATERIALES

• Muestras de biomasa

El material usado en la caracterización de la biomasa residual de la cosecha forestal, fue obtenido directamente en lugares donde se realizó la cosecha, tanto de plantaciones industriales de pino y eucaliptus como de bosque nativo, cuidando de obtener tres muestras representativas en contenedores de 60 litros, las que estaban compuestas de mezcla de ramas y ramillas con corteza y algo de hojas. En algunos casos, con el objeto de obtener mayor información, las muestras fueron separadas en madera y corteza en el laboratorio (Tabla 14).

Tabla 14. Características del muestreo

Origen Biomasa	Especie	Procedencia	Coordenadas	Fecha	Tipo
Plantaciones industriales	<i>Pinus radiata</i> <i>D.Don</i>	VII Región (Constitución)	35°25'36"S, 71°39'78"O	Octubre 2012	Madera y Cosecha
		VIII región (Arauco)	37°30'S,72°20'W		Corteza
	<i>Eucalyptus nitens</i>	XIV Región (Valdivia)	39°48'30" S, 73°14'30" O	Abril 2012	Corteza, Madera y Cosecha
	<i>Eucalyptus globulus</i>	Región Metropolitana (Melipilla)	33°34'10"S, 70°38'40"W		Corteza
XIV Región (Valdivia)		39°48'30" S, 73°14'30" O	Madera		
Industria	<i>Pinus radiata</i> <i>D.Don</i>	VII Región (Constitución)	35°25'36"S, 71°39'78"O	Octubre 2012	Madera, corteza
		VIII región (Arauco)	37°30'S,72°20'W		
Bosque Nativo	Tipo forestal siempreverde	IX Región (Lanco)	39°27'0" S, 72°46'60" W	Marzo 2013	Madera
Plantaciones dendroenergéticas	<i>Populus spp.</i>	Región Metropolitana	33°34'10"S, 70°38'40"W	Marzo 2012	Corteza y Madera
	<i>Acacia spp.</i>	VIII Región del BíoBío	37°30'S,72°20'W	Mayo 2013	Corteza y Madera
	<i>Eucalyptus spp.</i>	VIII Región del BíoBío	37°30'S,72°20'W		Corteza y Madera

El material de la industria, correspondió a madera en la forma aserrín húmedo recogido en la salida de las sierras de la máquina principal y de corteza (ritidoma) obtenida en el descortezador de trozos.

En el caso de la biomasa proveniente de plantaciones dendroenergéticas, el material fue muestreado y cosechado a la edad de 2 años de las plantaciones experimentales que estableció el Consorcio BIOCOTSA S.A. Las plantaciones de *Acacia dealbata*, *Acacia mearnsii* y *Acacia melanoxylon* se establecieron a una densidad de 5.000 plantas ha⁻¹ en Luanco (37° 17'03 "S, 72 ° 18'07"W) y Santa Luisa (37°33'12" S, 72°23'22 "W) en 2011 y 2012, respectivamente. El suelo en ambos sitios de estudio corresponde a la serie Tomeco, es de 70 cm de profundidad y tiene un pH de 7,4 y 2% de carbono orgánico. La temperatura máxima media en enero y la media de temperatura mínima en julio son 26,7 y 3,75 ° C, respectivamente. La precipitación anual en los sitios de estudio es de 1.250 mm.

- **Equipos.**

En los laboratorios de la Universidad de Chile, se encuentran.

- Calorímetro adiabático. Parr 6200.
- Horno de calcinación.
- Balanzas (analítica y digital)
- Estufas de secado
- Agitador orbital.
- Refrigerador.
- Espectrofotómetro UV-Visible.
- Centrífuga.

En los laboratorios del Centro Nacional del Medioambiente (CENMA):}

- Analizador de Mercurio DMA-80 Milestone
- Detector de Fluorescencia XRF
- Espectrómetro de Emisión Óptica de Plasma de Argón con Acomplado
- Inductivamente Óptima 3300 XL – Perkin Elmer.

7.2 MÉTODOS

7.2.1 Preparación de las muestras de biomasa.

Posterior a la recolección del material, se secó en una estufa de secado a 30 ± 3 ° C, preocupándose de mover el material continuamente, para que se seque de forma homogénea. A continuación, el material se fraccionó en una astilladora de madera de 13 HP. Una vez que las muestras fueron trituradas o fraccionadas, se utilizó un molino Wiley N°4 para reducir el tamaño de la muestra a aserrín fino, para finalmente, pasar el material por un tamiz de malla 0,250 mm y debe ser retenido por uno de malla 0,100 mm.

7.2.2 Caracterización física (Densidad y Humedad)

Densidad Básica y Aparente

La densidad básica de la biomasa fue medida siguiendo las especificaciones de la Norma Chilena NCh 176/2 of 86 (Madera Parte 2 .Determinación de la Densidad) que establece la medición de la masa de muestras de material leñoso sólido en estado anhidro y el volumen saturado del mismo material.

Contenido de Humedad (C.H.)

Se midió según las especificaciones de la norma Chilena NCh 176/1 of 86 (Madera parte 1. Determinación del Contenido de Humedad) que la define como la masa de agua contenida en una pieza de madera expresada como un porcentaje de la masa de la pieza en estado anhidro.

7.2.3 Caracterización química

La determinación de la composición porcentual de la biomasa en relación a los principales componentes del material lignocelulósico, es decir, cantidad de extraíbles, lignina y polisacáridos. Su determinación se realizó principalmente por los métodos descritos en las normas American Society for Testing and Materials (ASTM) y Technical Association for the Pulp and Paper Industry (TAPPI).

Tabla 15. Métodos de determinación de los componentes de la biomasa

Componente (%)	Método
Extraíbles	T 264 om-88
Lignina Klason	T 222 om-88
Lignina	ASTM D1106-96 (2007) / T 222 om-88
Holocelulosa	T 203 om-88
α -Celulosa	T 203 om-88

7.2.4 Caracterización energética (Poderes Caloríficos y cenizas)

Poder Calorífico

El poder calorífico se determinó con un calorímetro adiabático, Parr 6200 con una bomba de oxígeno estándar, a partir de biomasa tamizada, anhidra y pelletizada, de acuerdo a lo indicado en la norma UNE-EN 14918 (2009).

Cenizas

El % de cenizas de cada muestra se obtuvo mediante el procedimiento ASTM Método Estándar E1755-01 y según Técnica Reporte NREL/TP-510-42622 (2008). Cabe señalar que, a algunas biomásas se determinaron los elementos mayores y menores en el residuo constituido por el material leñoso. Los inorgánicos se pueden dividir en 2 grandes grupos:

- **Elementos mayores como Al, Ca, Fe, K, Mg, Mn, P, Si.**
- **Elementos menores como Ag, As, B, Ba, Be, Cd, Cl, Co, Cr, Cu, Hg y otros.**

Para la caracterización de los elementos mayores y menores en las biomásas, se utilizaron los siguientes métodos:

Detector de Fluorescencia XRF	Este detector se utilizó principalmente para las determinaciones de elementos inorgánicos no metálicos como el cloro, fósforo y silicio. Pero al utilizar esta técnica se encontraron otros metales, algunos en forma de óxidos, los que por cálculos llevaron a obtener las concentraciones de Ca y Mg. Cabe señalar, que para la utilización de este equipo se utilizó un material de referencia de suelo para su calibración.
--------------------------------------	--

Mercuriómetro	El contenido de Hg se determinó mediante espectrofotometría de absorción atómica a 254 nm en un analizador de mercurio DMA-80 Milestone. Luego, de acuerdo con la curva de calibración, se interpolan los valores de la concentración de Hg con la masa inicial para obtener los datos en ppm (mg/kg).
ICP (Inductively Coupled Plasma)	Para la medición de metales (Cd, Zn, Cr, Cu, Ni, Pb, Al, Fe, Mn, V, Ag, Ba, B, Co, Mo, B, y As), la madera es digerida para liberar la materia orgánica presente en la muestra. La medición se realiza mediante un Espectrómetro de Emisión Óptica de Plasma de Argón con Acomplado Inductivamente Óptima 3300 XL – Perkin Elmer.

8. RESULTADOS. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN

A continuación se describen, analizan y discuten los resultados más relevantes obtenidos en este estudio, referidos a la caracterización con fines energéticos de las muestras de residuos de biomasa leñosa de las principales fuentes existentes en el país, compuestas por especies, tanto nativas como exóticas, vale decir: Plantaciones industriales e industria maderera, bosque nativo, así como de las experiencias con plantaciones dendroenergéticas.

8.1 Caracterización de la biomasa residual de las Plantaciones Industriales.

A continuación se describen, analizan, comparan y discuten los resultados de la caracterización de los residuos de la cosecha de las plantaciones industriales con las principales especies exóticas de rápido crecimiento existentes en el país.

• Plantaciones de *Pinus radiata* D. Don

Para esta biomasa en particular, se analizaron fisicoquímicamente tres tipos de muestras: madera, corteza y muestras compuestas de madera y corteza (mezcla), tal como esta se encuentran en la biomasa residual.

	Especie	<i>Pinus radiata</i> D. Don
	Altura [m]	30-50
	Diámetro [m]	0,4-1
	Crecimiento	Rápido
	Requerimiento de Agua	Medio
	Requerimiento de sol	Alta, sin protección
	Distribución	Desde la V hasta la X Región
	Observaciones	Resiste T° bajas (excepcionalmente hasta -20° C) pero su óptimo se alcanza en climas cálidos de 16 a 30°C (Bown, 2007)
	Usos	Pulpaje, papel, madera aserrada, tableros, muebles, embalajes y otros

Tabla 16. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de la cosecha de Pino radiata

Origen del residuo		Cosecha					
Localidad		Constitución	Arauco	Constitución	Arauco	Constitución	Arauco
Tipo de biomasa		Corteza		Madera		Mezcla	
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	0,46	0,40	0,41	0,36	0,43	0,38
	% Extraíbles	23,4	25,8	4,6	4,2	15,6	10,6
Análisis Químico	% Lignina	42,4	55,5	26,9	28,8	41,4	46,4
	% Holocelulosa	65,2	67,1	77,0	80,7	66,4	82,6
	α-Celulosa	28,6	44,5	43,9	48,0	33,0	51,7
Análisis Energético	% Cenizas	3,6	4,8	0,3	0,7	3,5	1,6
	Poder Calorífico Superior [Cal/g]	4.954	5.136	4.834	4.912	4.886	4.939
Composición elemental [%]	C	48,5	49,5	48,7	46,4	48,4	48,6
	H	5,7	5,6	6,0	5,9	5,7	5,9
	O	43,7	40,1	43,9	43,7	41,7	43,2
	S	0,0005	0,0004	0,0005	0,0002	0,0005	0,0003
	Cl	0,0059	0,0059	0,0061	0,0060	0,0071	0,0059

El análisis físico consistió en la medición de la densidad básica, densidad aparente y el contenido de humedad. No obstante, los dos últimos dependen del tipo de residuo y las condiciones particulares en que se ha generado y procesado, lo que los hace muy variables. Por lo tanto, aquí se entregan solamente los de la densidad básica, cuyos valores para la madera varían entre 0,36 y 0,41 g/cm³ y son muy similares a los obtenidos en la mezcla (0,37-0,41 g/cm³). Sin embargo, son entre 5% y 14% más bajos que para la corteza. Los valores obtenidos para la madera del residuo de cosecha son más bajos que los reportados para la madera usada industrialmente (0,41 g/cm³, según Paz & Melo, 1987; 0,42-0,43 en este estudio), lo que puede ser atribuido a que la biomasa analizada, que corresponde a material de menos de cinco años de edad (copas y ramas principalmente), muestra “juventud” en términos del ancho de anillos y a la baja presencia de madera de compresión en las ramas que en su mayoría son pequeñas a medianas (diámetro menor a 6 cms).

La composición química y elemental de las muestras de madera, en términos generales, difiere ligeramente a la informada por otros autores para la madera del fuste de esta especie, lo que es atribuido por una parte, al hecho de que la madera de este material es de reciente formación en el árbol adulto, con edades inferiores a los 5 años, y por otra, a

la variabilidad natural de las propiedades por efecto de condiciones ambientales y genotípicas. En las muestras de la mezcla (compuesta de madera y corteza) se tiene una cantidad mayor de extraíbles, lignina y cenizas, y una menor cantidad de polisacáridos (holo y α -celulosa) y de hidrógeno en la composición elemental. El aumento en la participación de los componentes, es producido por la presencia de corteza en la mezcla analizada. (Cristoffanini y Melo, 1992; Uprichard, 1991 Uprichard, J.M.; Lloyd, J.A.. Influence of tree age on the chemical composition of radiata pine. New Zealand Journal of Forestry Science 1980;10(3):551-557; Berrocal A, Baeza J, Rodriguez J, Espinosa M, Freer J. Effect of tree age on variation of Pinus radiata D.Don chemical composition J. Chil. Chem. Society 2004;49(3): 251-256

De acuerdo a las características energéticas obtenidas, la mezcla de residuos de cosecha muestra un valor promedio de poder calorífico superior (PCS) de 4.910 cal/g en el rango de lo reportado en la bibliografía (Lehtikangas, 2001; NCh3246/1 (2011)), el cual fue ligeramente superior a lo obtenido en las muestras de madera. Un comportamiento similar ocurre con las cenizas, en las que el valor obtenido con la madera proveniente de ambas localidades fluctúa entre 0,3% y 0,7% y en la mezcla aumentó a valores entre 1,6% y 3,5%. Cabe señalar que el % de cenizas puede elevarse significativamente, dependiendo del nivel de contaminación (con suelo, arena y otros) en el proceso de recolección y transporte de la biomasa. Tanto la madera como la mezcla de residuos de cosecha de Constitución y Arauco, se encuentran dentro del rango típico en las propiedades de las biomásas empleadas para biocombustibles dado a título informativo para coníferas en la Norma Chilena de Biocombustibles Sólidos (especificaciones y clases, NCh3246/1 (2011)).

Si bien es cierto, los valores de la caracterización se encuentran dentro de los valores que han sido publicados en investigaciones y en normas, existe una dispersión que puede ser atribuida en términos generales a la localidad, edad de los componentes de la muestra y su composición (mayor o menor presencia de hojas o ramillas). En este sentido se observó que la mezcla se ve claramente modificada en sus propiedades respecto de la madera del mismo material, lo que se atribuye a la presencia de la corteza en la mezcla, el que como es sabido posee una composición química, comportamiento físico y anatomía diferentes al de la madera (Carmona, 1983; Fradinho *et al.*, 2002).

• Plantaciones de *Eucalyptus globulus* y *E. nítens*

En el caso de estas especies, se hicieron las determinaciones en el material obtenido como residuo de cosecha en el bosque y se separó en muestras de corteza y muestras de madera para ambas especies. A continuación en la Tabla 17 se muestran los valores de las propiedades medidas en las muestras de biomasa ambas especies obtenidas en la localidad de Valdivia.



Plantación de *E. nitens* (a) y *globulus* (b)

Especie	<i>Eucalyptus nítens</i>	<i>Eucalyptus globulus</i>
Altura [m]	60-70	
Diámetro [m]	2	
Crecimiento	Rápido	
Requerimientos de Agua	Bajos	
Requerimientos de sol	Relativos	
Distribución	Ambas especies presentan plantaciones desde la V hasta la X Región	
Características generales	Gran adaptabilidad y resistencia a climas fríos, muy por sobre <i>E. globulus</i>	Gran adaptabilidad
Usos	Producción de madera aserrada	Obtención de celulosa de fibra corta, fabricación de papel y de pulpa

Tabla 17. Propiedades físicas, químicas y energéticas de corteza y madera del *E. globulus* y *nítens*

Localidad		Valdivia, XIV Región			
Especie		<i>E. GLOBULUS</i>		<i>E. NÍTENS</i>	
Tipo de biomasa		Corteza	Madera	Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	-	0,53	-	0,51
Análisis Químico	% Extraíbles	6,6	5,7	1,5	1,2
	% Lignina	21,3	23,9	23,7	19,2
	Holocelulosa	80,8	85,8	77,8	79,5
	α-Celulosa	49,8	55,4	52,5	39,0
Análisis Energético	% Cenizas	0,3	0,2	0,3	0,2
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	4.925	4.478	4.765	4.530
Composición elemental [%]	C	50,0	48,1	50,1	48,9
	H	6,0	6,0	6,0	6,1
	O	43,3	45,2	43,3	44,4
	N	0,5	0,59	0,53	0,62
	S	0,05	0,01	0,08	0,01
	Cl	0,13	0,03	0,08	0,03

En la madera, la densidad básica de *E. nitens* es ligeramente inferior a la de *E. globulus*, lo que también se observa en la madera de árboles adultos. Para el caso particular de *E. globulus*, los valores obtenidos son ligeramente superiores a lo informado para la madera de fuste de 7 años de edad (0,48 g/cm³ según Igartúa *et al.*, 2004), Sin embargo, es importante tener en cuenta que para la madera adulta de esta especie, el valor de densidad es significativamente más alto, fluctuando entre 0,55 y 0,71 g/cm³ (Consuegra, 1994). Para *E. nitens*, se observa un comportamiento similar, donde el valor informado para la madera de fuste de árboles adultos fluctúa entre 0,45 y 0,55 g/cm³.

Estas diferencias pueden ser atribuidas a la mayor o menor edad del material analizado. Además, en los datos se verifica que la madera de *E. globulus* tiene una densidad mayor que la madera de *E. nitens*, diferencias que pueden atribuirse a la mayor o menor presencia de madera joven.

En relación a los componentes químicos, *Eucalyptus globulus* y *E. nitens* difieren entre ellos en la composición de la madera y la corteza. Para ambos tejidos, la cantidad de extraíbles en *E. globulus* es mayor en cuatro veces la presente en *E. nitens*. De los componentes estructurales, a nivel de lignina no existen grandes diferencias con los valores publicados para la madera de ambas especies, los que se encuentran dentro del rango. Sin embargo, la corteza de *E. globulus* y *E. nitens* presenta valores relativamente bajos de lignina a diferencia de lo que ocurre con otras especies.

Los otros componentes estructurales, los polisacáridos, los valores de holo y α -celulosa son menores en la madera de *E. nitens* en comparación a la madera de *E. globulus*. Se destaca, el valor de α -celulosa obtenido en la corteza de ambas especies que es superior a lo determinado en residuos de cosecha de latifoliadas del bosque nativo.

El % de extraíbles y % de lignina de *E. globulus* obtenido en este estudio se encuentran dentro de lo informado por otros investigadores (Gutmann *et al.*, 1971; Paz & Melo, 1987; Mansilla *et al.*, 1991), Sin embargo, cabe señalar, que el % de celulosa en la biomasa de este estudio es cercana al 50%, lo que no coincide con los datos bibliográficos con un promedio cercano al 40%, lo que puede ser producto de la presencia de una mayor proporción de madera de reacción en los residuos (ramas). El % de cenizas obtenido tanto en la madera como en la corteza de estas biomásas se encuentra en el rango inferior a lo informado para latifoliadas en general y estas especies en particular.

El valor de poder calorífico se encuentra dentro de lo esperado con un mayor valor para la corteza por sobre la madera. La biomasa madera y corteza de ambas especies se encuentran dentro del valor típico de poder calorífico y % de cenizas de la norma de especificaciones técnicas de biocombustibles sólidos (NCh 3246/2011). Del punto de vista de estas características, en ambas especies se podría lograr el mismo desempeño energético para la corteza o la madera por separado o en mezclas.

A nivel de composición elemental no hay grandes diferencias en las biomásas de ambas especies según la norma de especificaciones técnicas de biocombustibles sólidos (NCh 3246/2011).

8.1.1 Comparación de los residuos de la cosecha de las plantaciones industriales

La especie con mayor densidad registrada fue la madera de *E. globulus* con una densidad básica de 0,51 g/cm³. La composición química arrojó que el mayor % de extraíbles y lignina entre las tres especies se registró en la madera y corteza de pino, muy por sobre los porcentajes de *E. nitens* y *E. globulus*.

Desde el punto de vista energético, en las tres especies, la corteza presenta un mayor poder calorífico superior (PCS) que la madera (Figura 21, Gráfico A), donde el valor más alto en ambos tejidos (madera y corteza) correspondió a *Pinus radiata*.

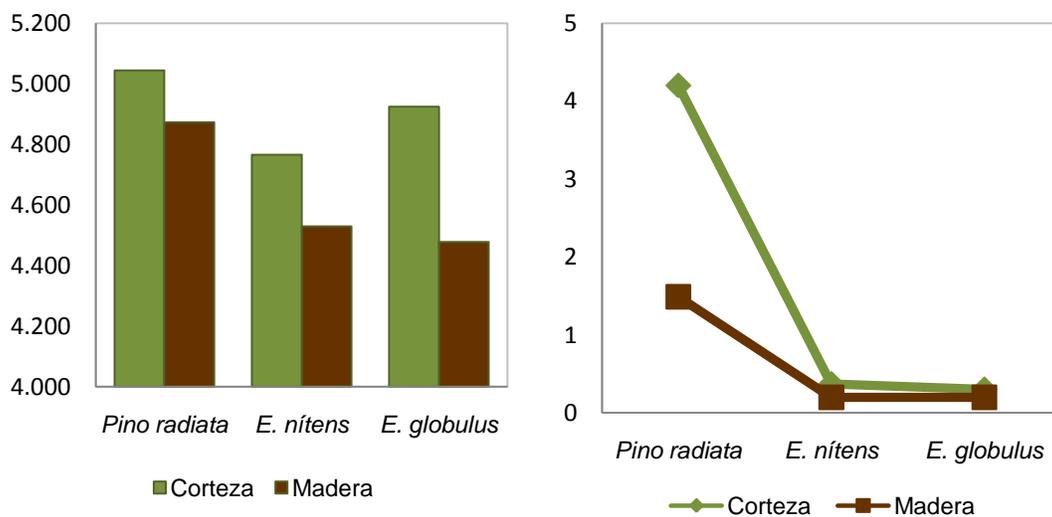


Figura 21. Poder calorífico [cal/g] (A) y % de cenizas (B) para las tres especies de plantaciones

El mayor valor de inorgánicos lo presentó la corteza de Pino, ((Ver Figura 21, Gráfico B). Como ya se señaló, para los *Eucalyptus* el % de cenizas y poder calorífico entre la corteza y la madera no presentan grandes diferencias, por lo que el uso de la mezcla para combustión directa no debería presentar mayores diferencias. Esta versatilidad de los *Eucalyptus* les otorga una ventaja comparativa por sobre el Pino. No obstante, dado el carácter fibroso de la corteza de los *Eucalyptus*, hace necesario un sistema de molienda en base a cuchillas para evitar la compactación y atascamiento en el equipo. La biomasa consistente de madera de *E. globulus* presenta las mejores características como materia prima para la ruta termoquímica y eventualmente puede incluir la corteza de esta especie si la recolección y/o preparación de la materia prima lo hacen necesario.

8.2 Caracterización de los residuos de la industria de transformación mecánica

La industria de transformación mecánica de la madera, particularmente el aserrado, está fuertemente concentrada en el *Pinus radiata*, razón por la cual, en éste punto los residuos caracterizados solo corresponden a esta especie, y fueron recolectados de las localidades de Arauco, VIII región del Bio-Bio y de Constitución, VII Región del Maule. A continuación en la Tabla 18 se indican los valores de las características físicas, químicas y energéticas del material obtenido en ambos lugares.

El material analizado correspondió a residuos constituidos por corteza y madera en la forma de aserrín, generados en el descortezado y procesamiento respectivamente de trozos de pino.

Tabla 18. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos industriales de *Pinus radiata*

Localidad		Constitución	Arauco	Constitución	Arauco
Tipo de biomasa		Corteza		Madera	
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	-	-	0,43	0,42
	% Extraíbles	23,0	35,0	5,3	8,3
Análisis Químico	% Lignina	42,2	50,3	30,1	27,9
	Holocelulosa	66,5	57,7	88,4	87,7
	α-Celulosa	31,7	30,2	51,6	59,6
Análisis Energético	% Cenizas	2,7	4,0	0,5	0,5
	Poder Calorífico [Cal/g]	5.034	5.033	4.697	4.894
Composición elemental [%]	C	50,1	49,9	48,4	49,2
	H	5,7	5,7	6,0	6,0
	O	40,6	40,4	44,4	44,1
	S	0,0002	0,0002	0,0001	0,0005
	Cl	0,0068	0,0061	0,0070	0,0069

La información obtenida sobre las propiedades físicas como la densidad básica, en el caso de la madera, no difiere de los valores promedios informados para esta especie, pues el material utilizado es el mismo que se ha caracterizado normalmente y que corresponde a una mezcla de madera madura y juvenil proveniente de trozos aserrables. La corteza tiene tejidos con humedad variable lo que hace poco práctico la obtención de esta propiedad, sin embargo, valores de densidad anhidra para el ritidoma (corteza

externa) que es el tipo de corteza más abundante en este residuo (75% del tejido) tiene un valor de $0,58 \text{ g/cm}^3$ (Carmona, 1983).

De las propiedades químicas se corrobora la información existente para esta especie en cuanto a los dos residuos analizados. Entre ambos tejidos, hay una clara diferencia en un mayor contenido de extraíbles y lignina en la corteza en comparación con la madera. Esta última no presenta variaciones significativas en su composición química en comparación a datos de Berrocal *et al.*, 2004 para material juvenil.

Energéticamente, el Poder Calorífico Superior (PCS) de la corteza es mayor que la madera, lo que confirma lo informado en la bibliografía para esta y otras especies. A pesar del alto % de inorgánicos en la corteza, el PCS no disminuye significativamente y aparentemente no incide en el comportamiento energético de esta biomasa.

El valor de % de cenizas es mayor en la corteza (5 a 8 veces más que en la madera), lo que indudablemente está influenciado por el grado de contaminación con partículas de suelo, arena o piedras que pueden haber sido incorporadas en la extracción de la madera en el bosque, transporte y/o en la manipulación y almacenamiento en planta. Este aspecto debe ser tomado en cuenta en la recolección de la biomasa, dado que la cantidad y composición de las cenizas pueden limitar su incorporación en una mezcla combustible y ocasionar dificultades en las unidades de conversión. A pesar de los altos valores de ceniza, cabe destacar que el contenido de inorgánicos de ambos tejidos se encuentra dentro del rango de valores típicos de la norma de especificaciones técnicas de biocombustibles sólidos NCh3246/1 (2011).

Desde el punto de vista de la composición elemental, no hay mayores diferencias con lo informado en estas biomásas dado que son los materiales normalmente más estudiados y analizados. Sin embargo, las diferencias entre ambos tejidos corresponde al % de H el cual es menor en la corteza que en la madera. La cantidad determinada de elementos como el N, S y Cl, importantes en los procesos de combustión no limita su aplicación de acuerdo a la NCh3246/1 (2011).

8.2.1 Determinación de elementos mayores y menores de residuos de la cosecha y la industria del aserrado

En éste punto se muestran, analizan y comparan los valores de elementos inorgánicos mayores y menores presentes en la biomasa residual de la cosecha de plantaciones de Pino y *Eucalyptus*, (virgen) y de madera y corteza generados como residuos en la transformación primaria de trozos aserrables de *Pino radiata*, lo que tuvo como objetivo verificar la existencia de contaminación en una u otra procedencia. Cabe hacer notar, que la cantidad de los elementos determinados es la que está presente en la respectiva biomasa y no a la presente en el residuo de la combustión o cenizas..

Las concentraciones determinadas en pino y los eucaliptos son mostradas en la Tabla 13 y Tabla 14 respectivamente. En ellas se destacan en cursiva y remarcados, aquellos valores que se encuentran por sobre el rango típico según la norma NCh 3246/1 (2011) de especificaciones técnicas para biocombustibles sólidos, equivalente a la norma UNE-EN 14961-1: 2011.

En general, se observa que la corteza presenta mayor concentración de elementos que las maderas de Pino y *Eucalyptus*. Al comparar los datos con la norma para Pino, tanto la biomasa de cosecha como de industria superan el rango típico para Mg, V y Fe, y las cortezas de *Eucalyptus* de todas las localidades superan el rango para Al, Fe y K.

Cabe señalar, que en los análisis se confirmó una alta variabilidad en la cantidad de elementos en los dos tejidos del fuste, lo que puede obedecer a la distinta función de los tejidos considerados así como a la procedencia del material particularmente la composición del suelo en que se desarrolló el árbol, y eventualmente a una contaminación cruzada y externa.

Tabla 19. Concentración de elementos mayores y menores de residuos de cosecha e industriales de Pino radiata para la localidad de Arauco (mg/kg)

Elementos/ Tejido		COSECHA		INDUSTRIA	
		Corteza	Madera	Corteza	Madera
Elementos mayores*	Al	2.741	1.162	694	569
	Ca	875	505	891	393
	Fe	2.092	1.584	796	746
	K	729	375	768	393
Elementos menores	Mg	2.516	3.948	1.792	3.328
	Mn	112	83	112	52
	P	<122	<122	<122	<122
	Si	1.007	866	689	512
	As	<2,3	<2,3	<2,3	<2,3
	Cd	0,2	0,1	0,1	0,3
	Cr	6,5	6,1	20,4	3,7
	Cu	6,6	6,1	4,1	5,2
	Hg	0,02	0,01	0,02	0,01
	Ni	4,6	3,7	8,3	2,6
	Pb	<0,27	<0,27	<0,27	0,6
	V	7,0	5,2	2,2	2,3
	Zn	30,2	19,8	18,8	9,7
	B**	19	35	8	9
	Be**	<0,018	<0,018	<0,018	<0,018

<LD: Bajo el Límite de Detección

**El valor de elementos mayores se calculó a partir del contenido de óxidos en las cenizas

**Los valores de Boro (B) y Berilio (Be) no tienen valores típicos en la NCh 3246/1, sin embargo, se incluyeron por su relevancia en el crecimiento y funcionalidad de las plantas

Tabla 20. Concentración de elementos menores de residuos de cosecha de *Eucalyptus nitens* y *globulus*

Localidad		Valdivia XIV Región			
Especie		<i>E. NITENS</i>		<i>E. GLOBULUS</i>	
Tipo de biomasa		Corteza	Madera	Corteza	Madera
Elementos mayores*	Al	1.853	38	591	200
	Fe	1.923	220	983	328
	Ca	2.771	201	5.572	191
	K	479	431	1.080	224
Elementos menores	Mn	318	134	3.160	53
	Cd	0,3	<LD	0,3	0,1
	Cr	4,1	0,6	3,1	2,1
	Cu	4,1	0,9	4,7	0,7
	Hg	0,014	0,005	0,01	0,005
	Ni	8,2	4,5	1,8	1,9
	Pb	2,4	<LD	3,9	1,2
	V	8,3	0,8	4,5	0,7
	Zn	31,7	<LD	<LD	<LD
	B**	20	2	21	5
	Be**	<LD	<LD	<LD	<LD

<LD: Bajo el Límite de Detección

*El valor de elementos mayores se calculó a partir del contenido de óxidos en las cenizas

**Los valores de Boro (B) y Berilio (Be) no tienen valores típicos en la NCh 3246/1, sin embargo, se incluyeron por su relevancia en el crecimiento y funcionalidad de las plantas

8.3 Residuos del Bosque nativo.

De las tres fuentes principales de biomasa residual provenientes del bosque nativo, en este estudio, se caracterizaron principalmente las especies del tipo forestal “Siempreverde”, al que se tuvo mejor acceso durante el estudio. Para los otros dos tipos forestales de importancia como potenciales proveedores de biomasa leñosa, la información que se entrega es parcial. Dada la escasa información sobre este recurso, y más aún sobre las características del material que queda como residuo de la cosecha, se hace una comparación a nivel general para las especies nativas consideradas, en su mayor parte, del tipo forestal siempreverde

8.3.1 Tipo forestal “Siempreverde

El material caracterizado de este tipo forestal, fue obtenido en la localidad de Lanco, IX región de la Araucanía ($39^{\circ} 27' 0''$ S; $72^{\circ} 46' 60''$ O). La biomasa recolectada corresponde principalmente a ramas de diámetro entre 2 y 10 cm, razón por la que la densidad básica del material se determinó con corteza.

El análisis realizado a los residuos en su conjunto, obedece a que en la práctica la intervención del bosque entrega biomasa maderable, leña y biomasa residual, la que está compuesta por copas, ramas y árboles no aprovechables como leña, los cuales participarán eventualmente en una mezcla de biomasa como materia prima combustible para una unidad de conversión u obtención de energía.

A continuación, se entrega la caracterización con fines energéticos para la madera y la corteza de las especies de mayor tamaño y/ presencia en el sitio en que se realizó el muestreo.

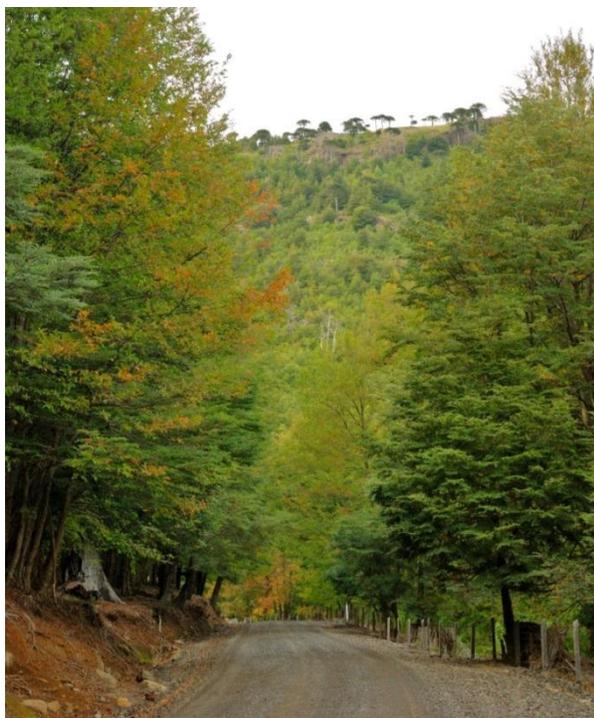


Figura 22. Bosque nativo, IX región Araucanía

***Nothofagus dombeyi*. Coigüe**

Es la tercera especie más representativa de la industria de aserrío entre las nativas del país con un 13 % de la producción total (17.000 m³) (INFOR, 2011). En la Tabla 15 se muestran los valores de las propiedades físicas, químicas y energéticas en residuos de la cosecha de esta especie.

Tabla 21. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Coigüe

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm³]	-	0,49
Análisis Químico	% Extraíbles	19,1	4,8
	% Lignina	29,0	18,7
	Holocelulosa	71,1	82,5
	α-Celulosa	49,1	38,7
Análisis Energético	% Cenizas	1,0	0,06
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	4.904	4.738
Composición elemental [%]	C	49,2	48,2
	H	6,0	6,1
	O	44,1	45,1
	N	0,54	0,36
	S	0,016	0,13
	Cl	0,15	0,15

***Nothofagus obliqua*. Roble**

Es la segunda especie más usada por la industria de aserrío de nativas del país con un 21% del volumen de producción de maderas nativas (28.000 m³) (INFOR, 2011). En la Tabla 16 se muestran los valores de las propiedades físicas, químicas y energéticas en los residuos de la cosecha de esta especie.

Tabla 22. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Roble

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físico	Densidad básica [g/cm ³]	-	0,6
Análisis Químico	% Extraíbles	16,0	10,0
	% Lignina	29,2	18,3
	Holocelulosa	69,7	81,3
	α-Celulosa	40,3	42,7
Análisis Energético	% Cenizas	1,4	0,2
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	4.994	4.736
Composición elemental [%]	C	49,8	48,6
	H	6,0	6,0
	O	43,5	44,7
	N	0,57	0,37
	S	0,03	0,02
	Cl	0,1	0,16

***Nothofagus alpina*. Raulí**

Importante y valorada en la industria del aserrado como madera para la mueblería y carpintería, participa con 32.000 m³ mcss de producción (INFOR, 2006).

Tabla 23. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Raulí

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [mg/L]	-	0,43*
Análisis Químico	% Extraíbles	19,7	4,7
	% Lignina	14,7	22,6
	Holocelulosa	55,2	83,7
	α-Celulosa	25,2	42,8
Análisis Energético	% Cenizas	3,5	0,9
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	5.274	4.859
Composición elemental [%]	C	48,7	51,9
	H	5,7	5,8
	O	41,4	40,8
	S	-	-
	Cl	-	-

***Laureliopsis philippiana*. Tapa**

Especie usada como madera serrada y para contrachapados ha ido disminuyendo su volumen de producción en los últimos años, a unos 12.000 m³ de producción (INFOR, 2011).

Tabla 24. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Tapa

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	-	0,44
Análisis Químico	% Extraíbles	25,5	17,4
	% Lignina	29,2	18,4
	Holocelulosa	70,5	84,1
	α -Celulosa	40,3	42,7
Análisis Energético	% Cenizas	1,1	0,1
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	5.241	5.087
Composición elemental [%]	C	50,0	48,9
	H	5,95	6,0
	O	43,4	44,4
	N	0,43	0,63
	S	0,06	0,02
	Cl	0,16	0,13

***Persea lingue*. Lingüe**

La madera de esta especie se emplea para obras de ebanistería y tiene una baja participación como materia prima aserrable.

Tabla 25. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Lingüe

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [mg/L]	-	0,45
Análisis Químico	% Extraíbles	24,4	7,6
	% Lignina	35,9	16,7
	Holocelulosa	70,0	84,3
	α-Celulosa	42,5	50,0
Análisis Energético	% Cenizas	2,8	0,5
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	5.085	4.579
Composición elemental [%]	C	50,2	48,8
	H	6,0	6,0
	O	43,1	44,5
	N	0,54	0,55
	S	0,1	0,03
	Cl	0,1	0,09

***Lomatia hirsuta*. Radal**

Aparece frecuentemente en el bosque nativo como especie acompañante y tiene uso limitado en mueblería y en carpintería.

Tabla 26. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Radal

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [mg/L]	-	0,49
Análisis Químico	% Extraíbles	12,4	5,2
	% Lignina	28,2	20,7
	Holocelulosa	72,5	80,6
	α -Celulosa	44,0	48,0
Análisis Energético	% Cenizas	2,0	0,5
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	4.733	4.663
Composición elemental [%]	C	49,8	48
	H	6,0	6,1
	O	43,5	45,3
	N	0,7	0,4
	S	0,03	0,2
	Cl	0,02	0,04

***Gevuina avellana* Mol. Avellano**

De manera similar a Radal, esta especie es frecuente en el bosque nativo y no tiene participación como madera aserrada. Se la emplea minoritariamente en mueblería, tornería y artesanía.

Tabla 27. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Avellano

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	-	0,50
Análisis Químico	% Extraíbles	12,4	8,0
	% Lignina	28,2	20,1
	Holocelulosa	72,5	81,8
	α-Celulosa	44	43,3
Análisis Energético	% Cenizas	1,6	0,7
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	4.836	4.793
Composición elemental [%]	C	49,0	48,4
	H	6,0	6,0
	O	44,3	44,9
	N	0,5	0,4
	S	0,09	0,05
	Cl	0,06	0,3

***Aextoxicon punctatum*. Olivillo**

Especie con baja participación en la industria del aserrío en Chile con 0,5% de la producción total para el año 2010. (678 m3) (INFOR, 2011), donde se la emplea como madera gruesa y revestimiento de construcciones de viviendas y otras.

Tabla 28. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Olivillo

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	-	0,33
Análisis Químico	% Extraíbles	21,2	5,9
	% Lignina	31,2	19,3
	Holocelulosa	72,2	81,6
	α-Celulosa	42,7	51,0
Análisis Energético	% Cenizas	4,9	2,3
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	5.215	4.409
Composición elemental [%]	C	48,3	ND
	H	6,0	ND
	O	44,9	ND
	N	0,5	ND
	S	0,1	ND
	Cl	0,2	0,329

ND: No Determinado

***Eucryphia cordifolia*. Ulmo**

Esta especie muy común y abundante en el bosque nativo, se emplea como madera aserrada para la construcción en aplicaciones estructurales, chapas, y se usa en la producción de leña y carbón de excelente calidad.

Tabla 29. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Ulmo

Tipo de biomasa		Corteza	Madera
Análisis físicos	Densidad básica [mg/L]	-	0,51
Análisis Químico	% Extraíbles	9,4	6,9
	% Lignina	31,0	21,1
	Holocelulosa	71,2	82,5
	α -Celulosa	46,5	44,2
Análisis Energético	% Cenizas	2,6	0,6
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	5.182	4.718
Composición elemental [%]	C	48,0	48,8
	H	5,7	6,0
	O	41,1	44,5
	N	ND	0,42
	S	ND	0,0002
	Cl	0,09	0,3

ND: No Determinado

***Chusquea quila*. Quila**

Esta especie corresponde a una gramínea y es una de las más importantes bambusáceas chilenas, normalmente se encuentra presente en el sotobosque y en lugares intervenidos, razón por la cual se caracterizó esta biomasa como un componente del bosque siempreverde.

Dado que, no posee corteza ni madera propiamente tales, la muestra correspondió a toda la parte aérea de la planta consistente de una mezcla de tallos (culmos) con hojas y ramillas.

Tabla 30. Propiedades físicas, químicas y energéticas de residuos de cosecha de Quila

Tipo de biomasa		Mezcla
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	0,33
Análisis Químico	% Extraíbles	4,6
	% Lignina	20,7
	Holocelulosa	77,6
	α-Celulosa	52,2
Análisis Energético	% Cenizas	0,5
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	4.566
Composición elemental [%]**	C	49,5
	H	6,0
	O	43,8
	N	0,49
	S	0,03
	Cl	0,19

** Datos para el tallo de Quila.

Determinación de elementos mayores y menores en especies nativas

A continuación en la Tabla 31 y Tabla 32, se muestran las concentraciones de elementos mayores y menores en biomásas de especies nativas muestreadas en este estudio con información para corteza y madera.

La mayoría de las cortezas superan los rangos típicos de la norma NCh 3246/1 (2011) para el contenido de Ca y K y en el caso de las maderas, el K también se encuentra muy por sobre los valores típicos en este tejido, los que son destacados en rojo.

Tabla 31. Concentración de metales [mg/kg] para corteza de especies nativas

		Coihue	Roble	Tepa	Lingue	Radal	Avellano	Olivillo	Ulmo
Elementos mayores	Al	35	32	<0,002	32	312	175	<0,002	<0,002
	Ca	6	21.236	289	23.238	34.249	14.372	71.143	47.047
	Fe	117	<0,088	<0,088	<0,088	624	1	<0,088	<0,088
	K	5.119	11.634	284	8.642	45.206	4.296	9.557	20.027
Elementos menores	Mn	29	385	44	<0,013	113	175	96	<0,013
	As	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33
	Cd	0,1	0,2	<0,064	<0,064	0,1	0,2	<0,064	<0,064
	Cr	0,8	0,9	2,0	<0,453	0,5	0,6	0,7	<0,453
	Cu	3,3	<0,275	12,3	<0,275	1,2	1,4	3,3	<0,275
	Hg	0,004	0,006	0,014	0,001	0,009	0,014	0,014	0,018
	Ni	0,6	1,0	<0,382	<0,382	4,6	2,5	4,5	<0,382
	Pb	0,8	0,7	1,5	<0,265	1,4	0,9	1,5	<0,265
	V	0,3	<0,031	3,0	<0,031	<0,031	0,1	<0,031	<0,031
	Zn	17,1	31,2	15,2	<0,13	15,2	6,8	35,8	<0,13
B	<0,46	<0,46	<0,46	<0,46	<0,46	<0,46	2,8	<0,46	

*El valor de elementos mayores se calculó a partir del contenido de óxidos en las cenizas

**El elemento Boro (B) no tiene valor típico en la NCh 3246/1, sin embargo, se incluyó en la tabla por su relevancia en el crecimiento y funcionalidad de las plantas

Tabla 32. Concentración de metales [mg/kg] para madera de especies nativas

		Coihue	Roble	Tepa	Lingue	Radal	Avellano	Olivillo	Ulmo	Quila
Elementos mayores	Al	37	14	9	6	37	288	<0,002	<0,002	15
	Ca	4.776	4.712	4.640	4.197	2.738	4.347	6.907	3.983	2.438
	Fe	263	61	31	43	<0,088	<0,088	<0,088	<0,088	39
	K	3.964	7.537	15.457	2.003	3.133	5.293	9.640	6.856	42.132
Elementos menores	Mn	58	34	5	19	355	32	<0,013	<0,013	9
	As	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33	<2,33
	Cd	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	<0,064	<0,064	<0,064
	Cr	1,7	0,7	1,0	<0,453	1,2	0,7	<0,453	<0,453	<0,453
	Cu	12,7	3,3	7,2	1,2	1,9	0,4	<0,275	<0,275	3,3
	Hg	0,003	0,005	0,009	0,007	0,007	0,013	0,007	0,008	0,003
	Ni	3,6	0,9	<0,382	3,1	2,8	1,6	<0,382	<0,382	<0,382
	Pb	0,9	0,8	0,7	1,5	1,2	0,9	<0,265	<0,265	0,4
	V	1,1	0,2	0,3	0,1	<0,031	0,05	<0,031	<0,031	0,2
	Zn	26,5	11,2	11,5	7,6	9,2	3,1	<0,13	<0,13	7,4
	B	<0,46	<0,46	<0,46	<0,46	2,5	<0,46	<0,46	<0,46	<0,46

*El valor de elementos mayores se calculó a partir del contenido de óxidos en las cenizas

*El elemento Boro (B) no tiene valor típico en la NCh 3246/1, sin embargo, se incluyó en la tabla por su relevancia en el crecimiento y funcionalidad de las plantas

8.3.1.1 Análisis y discusión de los resultados en tipo forestal “siempreverde”

La composición de especies, edades, tamaños y formas del residuo, entre otros, es altamente variable, por lo que un análisis para cada especie en la biomasa residual no se justifica del punto de vista práctico. Por lo tanto, se realizó un análisis comparativo para el conjunto de especies nativas estudiadas, considerando solo a la madera, cuya participación en los residuos de cosecha se estima en un 90% en masa como promedio de la biomasa total. En otras palabras, la estructura y composición de las maderas, determinan en gran medida las características de la mezcla de biomásas que componen el residuo proveniente del bosque nativo. La corteza, el otro componente del material, tiene una baja participación (<10%) y, dada sus características fisicoquímicas y anatómicas presenta un comportamiento variable y en general las técnicas para la determinación de sus propiedades presentan dificultades, lo que puede conducir, en algunos casos, a sub o sobreestimaciones.

Propiedades físicas: De entre todas las propiedades físicas, las de mayor interés en el residuo corresponden a la densidad (apilada, aparente y básica) y la humedad. En la práctica, la densidad apilada o a granel del residuo en bosque, así como la densidad aparente del material molido o astillado y la humedad que presentan, son altamente variables, ya que dependen de condiciones particulares asociadas al tipo de bosque, tipo de cosecha, sistemas y época de recolección, por lo tanto su determinación no es presentada. Sin embargo, dada la implicancia que tiene en la estimación o cuantificación de la masa/ha que es posible cosechar o extraer de los residuos en este tipo de formaciones vegetales, se determinó la densidad básica de la madera de los residuos incluida la corteza, las que se ilustran en la Figura 23.

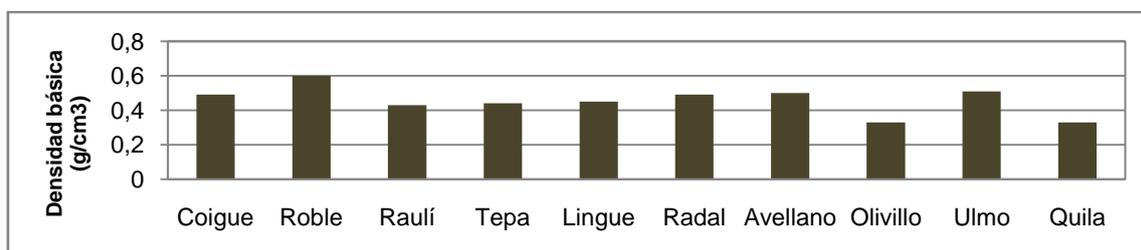


Figura 23. Densidades básicas de las maderas de las especies analizadas

Propiedades químicas: Contenido de extraíbles, polisacáridos y lignina: Dada la escasa información para la madera y la corteza del fuste de especies nativas en general, y la nula información para los residuos de estas especies, sólo es posible hacer un análisis comparativo entre las especies. El % de extraíbles en la madera de las especies analizadas fluctúa entre 4,7% y 17%, donde Tepa y Roble mostraron los porcentajes más altos y Raulí el más bajo (Figura 24).

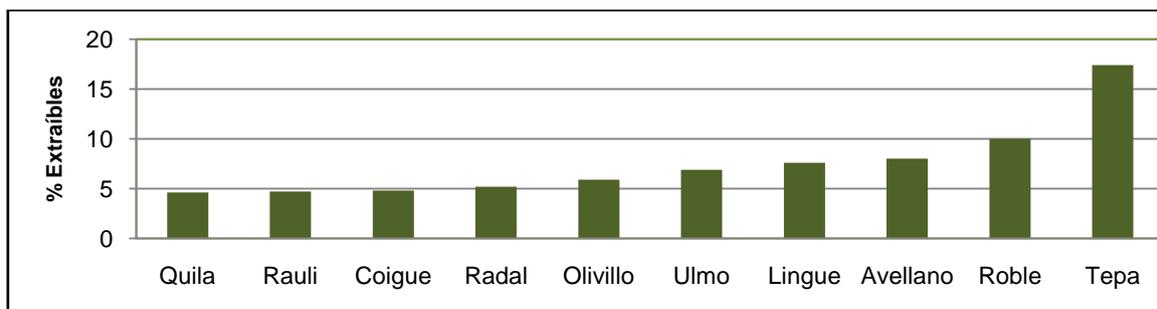


Figura 24. % de extraíbles de la madera de cada especie nativa analizada

De los componentes estructurales mostrados en la Figura 27, se desprende que para las especies leñosas los porcentajes de lignina fluctúan entre un 16% a un 22%, valores que se encuentran en el rango para especies latifoliadas (NCh3246/1 y Fengel & Wegener, 1984). En la Quila, el valor es superior al informado en la bibliografía para especies gramíneas (NCh3246/1), no obstante, es similar al reportado por (INFOR, 2003. El Bambú en Chile, 2003). Para α -celulosa, los valores fluctúan entre un 38% y 57%, presentando una mayor variabilidad aún que la lignina. Los valores de celulosa por sobre el 50% (promedio para latifoliadas) en algunas especies, puede ser atribuido a la presencia de madera de reacción (tracción), ya que gran parte de la biomasa está compuesta de ramas, las que presentan este tipo de madera anormal que se caracteriza por poseer un porcentaje alto de α -celulosa.

La determinación de mayores y menores en la biomasa de especies nativas (Tabla 31 y Tabla 32) indicó que la mayoría de las cortezas en estos residuos supera el rango típico informado en la NCh 3246/1 en el contenido de Ca y K, éste último también está elevado en la madera.

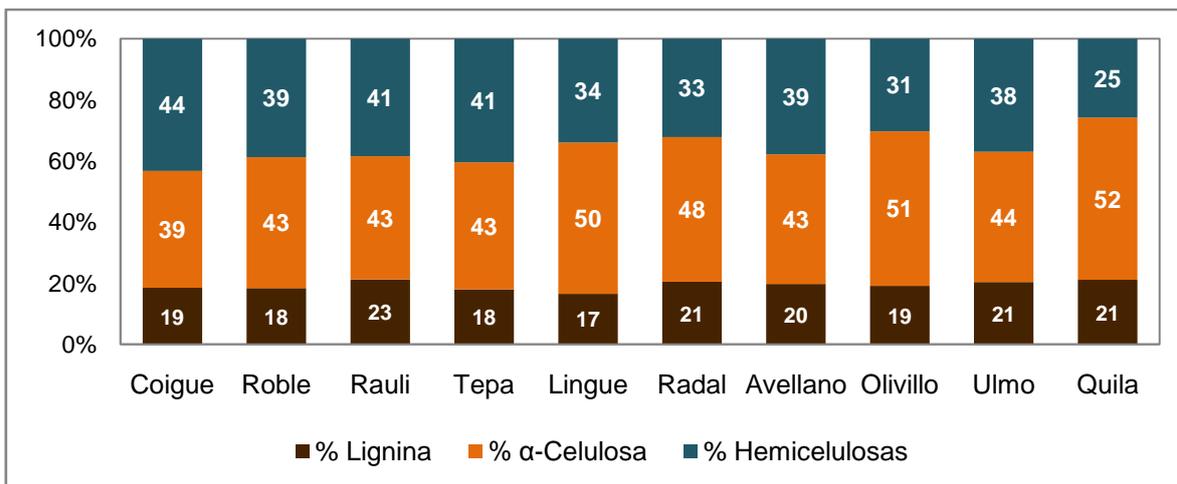


Figura 25. Composición de química de madera de distintas especies nativas analizadas

Propiedades energéticas: Poder calorífico y contenido de cenizas

En las rutas de conversión termoquímica, las dos propiedades básicas más importantes son el Poder Calorífico Superior (PCS) y el % de cenizas. El valor de PCS varió entre 4.409 y 5.087 cal/g, y el de cenizas está por debajo del 1% para todas las maderas excepto Olivillo, la cual supera el 2%, lo que es anormalmente alto para maderas vírgenes. Ambas propiedades tienen valores dentro del rango de lo informado para latifoliadas (NCh3246/1).

Las maderas de Tapa, Raulí y Avellano tienen los valores más altos de PCS entre las biomásas analizadas, y por el contrario, la madera de Olivillo posee el valor más bajo (Figura 26). A pesar de que la corteza no fue considerada en este análisis, en las fichas respectivas se puede observar que, en la mayoría de las especies, supera entre 200 y 400 cal/g el poder calorífico de la madera. De acuerdo con esto, se puede inferir que, la mezcla de madera con corteza, la forma común en la que se encuentra el residuo de cosecha, no debiera alterar significativamente el valor de los PCS de las maderas. No obstante, los mayores valores de cenizas registrados en las cortezas debieran ser ponderados cuando se preparen mezclas de estas especies para la generación de energía por combustión (Tabla 26).

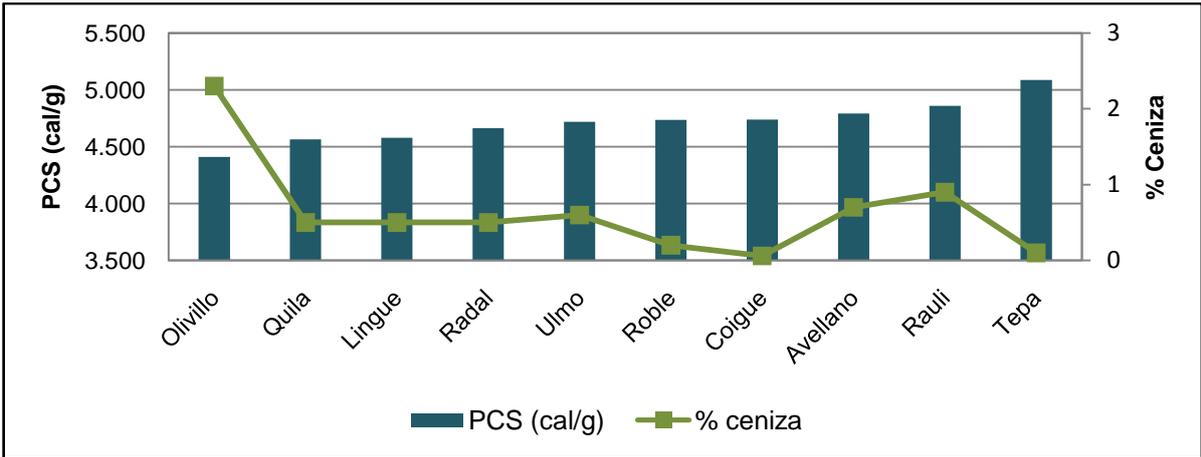


Figura 26. Ilustración resumen del poder calorífico de las maderas de las biomásas de cosecha del bosque nativo y su contenido de cenizas

8.4 Plantaciones dendroenergéticas

Para Chile, los Cultivos Forestales de Rotación Corta (SRWC) son una buena alternativa para el uso de suelos no productivos, obtención de biomasa y optimización de los cultivos, ya que en el desarrollo de estas se pueden generar especies ideales u óptimas para los requerimientos específicos de un proyecto particular. En esta sección se presenta la caracterización de biomasas provenientes de plantaciones experimentales del consorcio BIOCOTSA. Estas se encuentran ubicadas en Luanco, VIII Región (37°30'S, 72°20' W) y de ensayos de plantaciones en la comuna de La Pintana, Santiago, Región Metropolitana (Campus Antumapu, Universidad de Chile, 33°34'10"S, 70°38'40"W).

8.4.1 Biomásas de plantaciones experimentales de la VIII región

8.4.1.1 *Acacia dealbata* (Aromo del país)

A. dealbata es nativa de Australia y es un árbol de entre 10-12 m de altura, perenne, ornamental, de rápido crecimiento a temprana edad (entre 8 y 12 años). Su distribución se da en climas fríos a cálidos subhúmedos. Se emplea en procesos de recuperación de suelos, por su gran capacidad fijadora de nitrógeno (INFOR, 2000; INFOR-Ministerio de Agricultura, 2011). Es una especie que se ha propagado en forma natural en ríos y cursos de agua u orilla de caminos en la zona centro-sur del país. Su principal destino es para la obtención de leña y carbón, no obstante, su madera tiene potencial para ser empleada como materia prima



Figura 27. Cultivo energético de *Acacia dealbata* (BIOCOTSA)



Figura 28. Muestra compuesta de madera y corteza de *Acacia dealbata*

pulpable. Sin embargo, aún no existe un mercado formal que satisfaga una demanda continua de pulpa, debido a la baja superficie plantada (INFOR, 2000). Dado el potencial como materia prima para la obtención de energía, esta especie podría contribuir a la disminución en la presión existente sobre el bosque nativo y las

plantaciones (INFOR, 2011). Una muestra del material usado en la caracterización de cada uno de los tejidos presentes se ilustra en la Figura 28.

8.4.1.2 *Acacia mearnsii*

Acacia mearnsii es nativa del sureste de Australia, es una especie que puede crecer hasta 25 m con buenas propiedades para su aprovechamiento en pulpaje (INFOR 2006). Sin embargo, a nivel mundial (Nueva Zelanda, India, América) su cultivo está destinado principalmente a la obtención de los taninos vegetales de su corteza (la cual presenta un 36% a un 41% de taninos), los que son utilizados en la manufactura de la curtiembre (National Academies, 1980; INFOR, 2006). Cabe destacar, que su madera posee una alta calidad como leña y carbón vegetal (INFOR, 2006).



Figura 29. Cultivo energético de *Acacia mearnsii* (BIOCOMSA)

8.4.1.3 *Acacia melanoxylon*

Acacia Melanoxylon es una especie nativa de Australia y se le conoce generalmente como “Aromo australiano”. Es una especie latifoliada que puede llegar a medir 35 m de altura y tener un diámetro de 1,5 m (INFOR, 2000). El destino principal de la madera de esta especie es la industria de celulosa, y en Chile, se le emplea en la obtención de madera aserrada y leña (Australian Biological Resources Study, 2001; INFOR, 2000).



Figura 30. Cultivo energético *Acacia melanoxylon* (BIOCOMSA)

8.4.1.4 *Eucalyptus camaldulensis*

Eucalyptus camaldulensis es una especie oriunda de Australia donde está ampliamente distribuida, principalmente en zonas húmedas y cercanas a cuerpos de agua. Es un árbol siempreverde que puede alcanzar una altura promedio hasta 50 m. En su



Figura 31. Cultivo energético de *Eucalyptus camaldulensis* (BIOCOMSA)

país nativo, los usos más generales son la generación de miel y la obtención de carbón. En Chile, esta especie se encuentra en la zona central plantado para dar sombra y para la obtención de leña ya que su madera de alta densidad tiene buenas características como combustible.

En la tabla siguiente, se presenta el resumen de las determinaciones realizadas en estas biomásas.

Tabla 33. Tabla resumen de las propiedades físicas, químicas y energéticas de las biomásas de Luanco VIII región (BIOCOMSA)

Localidad		<i>Acacia dealbata</i>	<i>Acacia Mearnsii</i>	<i>Eucalyptus camaldulensis</i>	<i>Acacia melanoxylon</i>
Tipo de biomasa		Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	0,49	0,50	0,50	0,49
Análisis Químico	% Extraíbles	11,4	14,4	8,2	24,1
	% Lignina	24,0	25,5	28,9	25,6
	Holocelulosa	82,5	73,7	69,6	69,3
	α-Celulosa	42,2	32,2	32,3	36,8
Análisis Energético	% Cenizas	1,6	2,7	4,0	1,9
	Poder Calorífico Superior [Cal/g]	4.462	4.356	4.401	4.417
Composición elemental (%)	C	49,1	49,0	47,9	48,7
	H	5,8	5,8	5,8	5,8
	O	42,0	42,0	42,1	42,7
	N	3,1	3,1	4,2	2,6
	S	0,1	0,1	0,1	0,2
	Cl	0,3	0,2	0,4	0,5

La determinación de las propiedades de la Tabla 33, se realizó sobre muestras de material proveniente de la cosecha de estas especies efectuada a los dos años de

establecidas. Las muestras incluyen madera, corteza, y una cantidad variable de hojas y ramillas, que es la forma en que en la práctica van a ser cosechadas y usadas estas biomásas en la obtención de energía directa (combustión) o indirecta como materia para la obtención de otros biocombustibles. Cabe destacar, que existe poca información de caracterización de biomásas de cultivos energéticos de estas especies, por lo que se hizo un análisis comparativo de los datos obtenidos.

8.4.1.5 Análisis y discusión de los resultados en Biomásas de plantaciones experimentales de la VIII región

Del cuadro resumen presentado en la Tabla 33, se desprende que la densidad básica varía entre 0,4 - 0,5 g/cm³ no muestra gran diferencia entre las especies analizadas. Estos valores son ligeramente inferiores a los informados para la madera del fuste, lo que puede ser atribuido a que la muestra está constituida por madera juvenil y a la inclusión, aunque en baja proporción, de la corteza en las probetas utilizadas en la determinación.

En el análisis de los componentes químicos, estas especies, presentan un % más alto de lignina y extraíbles totales que el informado en la literatura para la madera de latifoliadas (Fengel & Wegener, 1984). A nivel de polisacáridos, estas especies presentan un bajo porcentaje de holocelulosa y α -celulosa a excepción de *A. dealbata*.

De las características energéticas, es notable el alto % de cenizas presentes en la biomasa de estas especies, que fluctúa entre 1,6% y 4%, el que, en general, para la madera es menor al 1%, lo que incide en una reducción del PCS. Por otra parte, dependiendo de la composición, podrían provocar problemas de depósito y corrosión en los sistemas de conversión como ya se señaló en el Capítulo 1. El PCS no muestra diferencias significativas entre especies y fluctúa alrededor de 4.400 cal/g, siendo ligeramente inferior al promedio de las maderas (4.500 cal/g).

En relación a los componentes elementales, se obtuvo un valor ligeramente inferior de hidrógeno y oxígeno en las biomásas, en comparación a la información publicada para la madera en general (Fengel & Wegener, 1984; Biomass Users Network, 2012). Se destaca el alto valor de nitrógeno que es 5 a 8 veces superior al 0,5% promedio de este elemento en la madera y también superior al de otras biomásas residuales caracterizadas en este estudio.

Las diferencias observadas a nivel de composición química y elemental, se atribuyen a la presencia de corteza, ramas y hojas en esta biomasa leñosa así como a la juvenilidad del material. La información de composición química de la biomasa de estos cultivos es importante de considerar cuando tiene una aplicación como materia prima en la obtención por la ruta bioquímica de biocombustibles como el bioetanol y particularmente en la obtención de biogás, en la que mejoraría la relación C/N. En cambio por la ruta de conversión termoquímica, el mayor porcentaje de nitrógeno y de cenizas, son relevantes en los procesos de combustión o gasificación, dado el impacto que podría tener en las emisiones de NO_x y en el depósito de escorias en las unidades de conversión. La presencia de hojas obligaría a un pretratamiento para reducir la cantidad de este componente que entra al sistema con el consiguiente aumento en el costo. No obstante, la biomasa proveniente de estas plantaciones no muestra mayores limitaciones desde el punto de vista de la composición para ser empleada en la mayoría de los sistemas de conversión.

8.4.2 Biomásas de plantaciones experimentales en la Región Metropolitana

8.4.2.1 *Robinia pseudoacacia* (Robinia, Acacio)

Robinia pseudoacacia es conocida como acacia blanca o falsa, es una especie originaria del este de los EEUU y naturalizada en Europa (Keil *et al.*, 2011). Es un árbol de follaje caduco, que en Chile se encuentra integrado al paisaje rural del país, especialmente



entre las Regiones V y VII. Las características más llamativas de este árbol son su rápido crecimiento con escasos requerimientos de suelo y humedad y su plasticidad adaptativa en comparación con otras especies (FIA, 2000; Keil *et al.*, 2011). La madera de *R. pseudoacacia* es densa, de gran resistencia y durabilidad, características que le han otorgado un mercado basado principalmente como madera redonda para la fabricación de postes y polines (FIA, 2011) y como madera elaborada para la obtención de pisos y muebles de exterior. Además, es aceptada como madera para leña, debido a su buen comportamiento en la combustión incluso estando húmeda (FAO, 1980). En la Figura 32 se ilustra la muestra del material analizado para la caracterización.



Figura 32. Muestra astillada de madera y corteza (Mezcla) *Robinia pseudoacacia*.

8.4.2.2 *Arundo donax* (Arundo)

Arundo donax es una especie no leñosa que pertenece a la familia botánica de las Gramíneas (Gramineae). Presenta un tallo que consta de nudos separados por entrenudos, hojas dispuestas en dos hileras a lo largo de dicho tallo formadas por una vaina (que abraza al tallo) y un limbo con forma de cinta. Crece en forma natural y abundante en lugares



Figura 33. Ensayo de *Arundo donax* (La Pintana, Santiago)

húmedos. Dado el buen desarrollo que también alcanza en suelos semihúmedos, facilidad de cosecha y de procesamiento (molienda), puede dar origen a biomasa de interés para obtención de metabolitos secundarios y aprovechamiento energético por la ruta bioquímica.



Figura 34. Muestra astillada Mezcla *Arundo donax* (mezcla)

8.4.2.3 Clones de híbridos de *Populus*

El género *Populus*, perteneciente a la familia Salicáceas, comprende de 25 a 35 especies de plantas caducifolias nativas en el hemisferio norte y que se caracterizan por tener rápido crecimiento y diversos usos en la producción de biocombustibles,

obtención de pulpa de madera, productos químicos y adhesivos (Sannigrahi *et al.*, 2010).

Tabla 34. Tabla resumen de las biomásas obtenidas en Santiago, RM (BIOCOMSA)

Especie/Tipo de biomasa		<i>Robinia pseudoacacia</i>	<i>Arundo donax</i>	Clones de <i>populus</i>			
				Deltoides St 109	Categoría 6451	Constanzo	Neva
		Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla	Mezcla
Análisis físicos	Densidad básica [g/cm ³]	0,63	0,43	0,38	0,38	0,56	0,42
Análisis Químico	% Extraíbles	16,9	18,2	12,7	12,3	14,4	13,8
	% Lignina	24,2	13,4	17,0	18,5	21,0	17,6
	% Holocelulosa	72,8	80,6	87,5	86,1	84,0	82,9
	α-Celulosa	31,4	41,2	45,3	44,5	42,0	42,4
Análisis Energético	% Cenizas	4,5	7,7	2,7	2,2	2,1	2,2
	Poder Calorífico superior [Cal/g]	4.483	4.483	5.138	5.252	4.347	5.276

8.4.2.4 Análisis y discusión de los resultados en Biomásas de plantaciones experimentales de la Región Metropolitana

A diferencia de las especies de VIII región analizadas en el punto anterior, en este caso, se empleó un sistema de cultivo diferente a los cultivos forestales tradicionales, dado que son especies establecidas en un suelo agrícola con riego. La biomasa recolectada en estos cultivos, al igual que la mayoría del material obtenido en este estudio, está compuesta por fustes y ramas que incluyen la corteza y madera juvenil (en este caso, edad menor a 2 años) que no incluyen las hojas, con la excepción de *A. donax*.

La densidad básica, según la Tabla 34, presenta valores que en general concuerdan con el rango informado para la madera de las respectivas especies. En el caso de los álamos, la densidad básica varía entre 0,38 y 0,56 g/cm³, destacándose el alto valor de *P. constanzo* en comparación con otros álamos que se desarrollan en Chile. Para *Robinia* no hay grandes diferencias entre el valor obtenido a lo informado y en *A. donax* la densidad de la parte sólida o pared de la caña, presenta un valor de 0,43 g/cm³ que corresponde a la categoría de densidad media.

La composición química de estas especies arrojó un alto contenido de extraíbles, los porcentajes de lignina en general están dentro del rango informado para la madera de estas especies, con la excepción de *Robinia pseudoacacia* que presenta un valor

bastante más alto que el resto, no obstante está en el límite superior para las especies latifoliadas. *A. donax* presenta un % bajo de lignina el que es similar a las gramíneas, tales como caña de trigo que tiene un contenido de lignina de 15,7% y 15%, según datos obtenidos en este estudio y Sung & Chen, 2002, respectivamente.

Entre los componentes estructurales de tipo polisacárido, el % de α -celulosa se encuentra dentro de lo esperado y similares a los valores de la madera de estas especies, con la excepción de *Robinia pseudoacacia* la cual presenta el valor más bajo (31%).

Energéticamente, se observan dos grupos con valores similares de PCS entre las especies de la Tabla 34, uno constituido por *R. pseudoacacia* y *P. constanzo* (4.415 cal/g), y el otro por *P. deltoides*, *categoria* y *neva* (5.222 cal/g). Según la literatura, la información de PC determinado para los clones es muy variable, lo que también se vio reflejado en este estudio. De acuerdo a los valores de inorgánicos, no son muy recomendables como materia prima en procesos termoquímicos, las biomásas de *R. pseudoacacia*, y *Arundo donax*, que poseen 4% y 7,7% respectivamente.

Las diferentes especies analizadas, reflejan también diferencias en las propiedades determinadas, las que pueden ser atribuidas a la presencia de corteza en la biomasa, a la edad del material y a otros factores, tales como la presencia de suberina u otros compuestos grasos en el caso de *A. donax*, cantidad y tipo de extraíbles en Robinia.

8. CONCLUSIONES

-La densidad básica del residuo leñoso producido en el aserrado de *Pinus radiata* D.Don, no difiere de los valores promedios informados para esta especie, lo que difiere en el caso de la madera presente en los residuos de cosecha, la que muestra valores inferiores en alrededor de 14 % a la de la madera industrial, dependiendo de la localidad de la cual proceden las muestras.

-En los residuos de plantaciones de *Eucalyptus* sp., la densidad básica de la madera de *E. nitens* (0,51 g/cm³) es ligeramente inferior a la de *E. globulus* (0,53 g/cm³), diferencia que también se observa en la madera del fuste de árboles adultos de estas especies. En ambas especies la densidad de la madera de los residuos es inferior a la del fuste. Aunque en el caso particular de *E. globulus*, los valores de densidad son significativamente más altos, fluctuando entre 0,55 y 0,71 g/cm³, que en el caso de *E. nitens* que varían entre 0,45 y 0,55 g/cm³.

-La densidad determinada en los residuos de las distintas especies del bosque nativo siempreverde, varió entre 0,33 g/cm³ para *Aextoxicum punctatum* (Olivillo) y 0,60 g/cm³ para *Nothofagus obliqua* (Roble), siendo en la mayoría de los casos menor a la informada para la madera del fuste de dichas especies.

-La densidad básica de la plantaciones dendroenergeticas que varía entre 0,4 - 0,5 g/cm³ no muestra gran diferencia entre las especies analizadas. Estos valores son ligeramente inferiores a los informados para la madera del fuste, lo que puede ser atribuido a que la muestra está constituida por madera juvenil y a la inclusión de la corteza en la determinación.

-La composición química y elemental de las muestras de madera de las biomásas residuales de plantaciones industriales analizadas, en términos generales, difieren ligeramente de la madera del fuste de las especies que componen dichas biomásas, lo que es atribuido que la madera de este material es de reciente formación en el árbol adulto, y a la variabilidad natural de las propiedades por efecto de condiciones ambientales y genotípicas.

- En las muestras de plantaciones dendroenergeticas la biomasa compuesta de madera y corteza (mezcla), tiene una cantidad mayor de extraíbles, lignina y cenizas, y una menor cantidad de polisacáridos (holo y α -celulosa) y de hidrógeno en la composición elemental.

- La madera y corteza de la biomasa del tipo forestal siempreverde difieren entre ellas en composición química, composición elemental y en la cantidad y composición de las cenizas, particularmente en el % de extraíbles, celulosa y lignina. No obstante, los valores de composición química de la madera de estos residuos si bien son variables, en general se encuentran en el rango informado para las especies latifoliadas.
- Desde el punto de vista energético, el PCS de todos los residuos analizados está dentro del rango informado. Se confirma que la corteza presenta un mayor valor de PCS que la madera y que al estar formando parte de la biomasa eleva el valor en comparación a la madera.
- La cantidad de hierro y aluminio en los elementos mayores presentes en los residuos de la cosecha en plantaciones industriales y de calcio y potasio en el caso del bosque nativo, superan el rango típico informado en la norma NCh 3246/1.
- De acuerdo con la caracterización efectuada, en general, las biomasa analizadas no presentan restricciones para ser empleadas como biocombustible sólidos de acuerdo a la normativa existente, más aún cuando aquellos residuos como la corteza que pueden hacer superar los límites aceptables en algunos parámetros, puede ser incluido formando parte de una mezcla de biomásas.

9. REFERENCIAS

- ASABE Standards. 2011. American Society for Agricultural & Biological Engineers, St. Joseph, MI: ASABE
- ASTM E870-82(2006) Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels. <http://www.astm.org/Standards/E870.htm>
- Baker, A. J, Wegner, T. H., Bendtsen, B. A., Highley, T. L., and Howard, J. L. (eds.) (1989). Wood. In: Mark-Bikales-Overberger-Menges Encyclopedia of Polymer Science and Engineering. Vol. 17. 2nd ed. John Wiley and Sons, New York.
- Berrocal A, Baeza J, Rodriguez J, Espinosa M, Freer J. Effect of tree age on variation of *Pinus radiata* D. Don chemical composition J. Chil. Chem. Society 2004;49(3): 251-256
- Biomass Users Network (BUN-CA)/Manuales sobre energía renovable: Biomasa/. -1 ed. -San José, C.R. :Biomass Users Network (BUN-CA), 2002. ISBN: 9968-904-02-3
- Brown RC, 2003. Biorenewable resources : Engineering new products from agriculture, Iowa State Press, Ames, IA.
- Bustamante R.O. & J.A. Simonetti, 2005. Is *Pinus radiata* invading the native vegetation in Central Chile? Demographic responses in a fragmented forest. Biological Invasions 7: 243-249.
- Carmona R., González J., Silva R., 2004. Caracterización de madera pulpable de *Eucalyptus globulus* (labill), III Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel (CIADICYP), Córdoba, España, Instituto Nacional de Investigación Agraria y Alimentaria (INIA) y Ministerio de Ciencia y Tecnología de España
- Comisión Nacional de Energía (CNE)/ Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ): Potencial de biomasa forestal. Potencial de generación de energía por residuos del manejo forestal en Chile. Santiago, enero 2008.
- Comisión Nacional de Energía (CNE)/ Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ): Las Energías Renovables No Convencionales en el mercado eléctrico chileno. Santiago, Marzo 2009.
- CONAF, 2008. Caracterización de los cultivos y residuos de vegetales derivados de la cosecha de cultivos forestales y agrícolas en Chile. Ministerio de Agricultura.
- Consuegra, R. 1994. Caracterización del *Eucalyptus globulus* (Labill) como Materia Prima Pulpable. Memoria, Ingeniería Forestal. Universidad de Chile. Santiago, Chile. 93 p.
- Cristofanini C., Melo R. 1992. Proceso discontinuo de pulpaje kraft con preimpregnación de astillas

- Dickmann D.I. 2006. Silviculture and biology of short-rotation woody crops in temperate regions: Then and now. *Biomass Bioenergy* 30:696-705.
- Donoso, 1993. *Bosques Templados de Chile y Argentina*. Ed Universitaria. 484 p
- Donoso, 1989, "Antecedentes básicos para la silvicultura del tipo forestal siempreverde" *BOSQUE*: 10(1): 37-53, 1989
- Gerding S., V. 1991. "Manejo de las plantaciones de *Pinus radiata* D. Don en Chile. *Bosque* 12 (2): 003 – 010.
- Granifo R., 2009. Recuperación de los residuos de la madera para uso energético en la Región Metropolitana. Universidad Andrés Bello.
- Gutmann, P., Pistono, L., Bluhm, E. 1971. Serie de investigación. Publicación N° 3, Análisis Químico de la Madera de Eucalipto (*Eucalyptus globulus* Labill.) creciendo en Chile. Instituto Forestal. Chile. 29 p.
- FAO, 1980. La Acacia Falsa. Revista internacional de silvicultura e industrias forestales, N7750.
- FAO, 2008. Bosques y energía: Cuestiones Claves. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y Alimentación, Roma. ISSN 1014-2886
- Fengel D, Wegener G. *Wood: Chemistry, Ultrastructure, Reactions*. Walter de Gruyter, Berlín; 1984.
- FIA, 2000. Fundación para la Innovación Agraria. El Acacio (*Robinia pseudoacacia*): una alternativa para producir postes y polines. Ministerio de Agricultura, Santiago de Chile.
- Hernández A. & Lobos M., 2003. Leña: una fuente energética renovable para Chile. Editorial Universitaria, Fuelwood 171 p.
- Igartúa D., Monteoliva S., Nuñez C., 2004. Densidad básica, longitud y composición química de la madera de *Eucalyptus globulus* en el sudeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. III Congreso Iberoamericano de Investigación en Celulosa y Papel (CIADICYP), Córdoba, España, Instituto Nacional de Investigación Agraria y Alimentaria (INIA) y Ministerio de Ciencia y Tecnología de España
- Lehtikangas P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass and Bioenergy* 2001; 20:351-360.
- Ley N°20.283, Sobre Bosque Nativo y Fomento Forestal, Ministerio de Agricultura, 2008.
- Kaltschmitt M., Hans Hartmann, Hermann Hofbauer (Hrsg.): *ENERGIE AUS BIOMASSE. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2009. Springer Verlag, Heidelberg, ISBN: 978-3-540-85094-6 99.95 EURO

Kaltschmitt M. und H. Hartmann (Hrsg.), 2001. Energie aus Biomasse - Grundlagen, Techniken und Verfahren. Springer Verlag. ISBN 3-5440-64853-4.

IEA (2008) IEA wind energy annual report 2008. Kendall Printing Company, USA

Mancilla, H., García, R., Tapia, J., Durán, H., Urzúa, S., 1991. Chemical Characterization of Chilean Hardwoods. Wood Sci. Technol. Vol 25: 145-149.

Mata-Sanchez, J., Perez-Jimenez, J.A., Diaz Villanueva, M.J., Serrano, A., Nuñez-Sanchez, N. López-Giménez, F.J. 2013. Statistical evaluation of quality parameters of olive Stone to predict its heating value. Fuel, 113, 750-756

Melissari B., 2012. Comportamiento de cenizas y su impacto en sistemas de combustión de biomasa, Memoria de Trabajos de Difusión Científica y Técnica, núm. 10:69 ISSN 1510-7450 • ISSN (en línea) 1688-9584

Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, 2008. Ley 20.698, INTRODUCIR MODIFICACIONES A LA LEY GENERAL DE SERVICIOS ELÉCTRICOS RESPECTO DE LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA CON FUENTES DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES (Ley no. 20.257)

Ministerio de Energía, 2014. Balance Nacional de Energía 2013. Elaborado por la División de Prospectiva y Política Energética del Ministerio de Energía, Santiago.

Ministerio de Energía, 2014. Agenda Nacional de Energía

Ministerio de Energía, 2013, Informe ERNC (CER), Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables (CIFES), < www.cifes.gob.cl>

Ministerio de Energía, 2014, Informe ERNC (CER), Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables (CIFES),< www.cifes.gob.cl>

Ministerio de Energía, 2014, Informe ERNC (CER), Centro Nacional para la Innovación y Fomento de las Energías Sustentables (CIFES),< www.cifes.gob.cl>

National Renewable Energy Laboratory (NREL), 1998. Report on Biomass Drying Technology. NREL/TP-570-25885

National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2008. Geothermal Tomorrow 2008. Report DOE/GO 102008-2633

Nogués, F., 2010. Energías renovables. Energía de la Biomasa Volumen 1, Universidad de Zaragoza, 557 pp.

INFOR, 2006. Exportaciones Forestales Chilenas. Boletín Estadístico 115.

INFOR, 2011. El Sector Forestal Chileno. ISBN: 978-956-318-046-6

INFOR, 2014. El Sector Forestal Chileno. ISBN: 978-956-318-046-6

INFOR, 2011. Bosque Nativo, Boletín 1.

Obernberger, I; Brunner, T; Bärnthaler, G., 2005. Chemical properties of solid biofuels-significance and impact. Biomass and Bioenergy ISSN: 0961-9534

Obernberger, I. and G. Thek. 2010. The Pellet Handbook. IEA Bioenergy. Earthscan LLC, Washington, DC.

Palonen H., 2011. Role of lignin in the enzymatic hydrolysis of lignocellulose, 103. VTT Technical research center of Finland, ISBN 951-38-627-2.

Paz J. & Melo R., 1987. Nuevas especies en la producción de pulpa, Celulosa y Papel 3(1):13-15

Peralta Florencia, Zamora Gimena, Mistretta Gabriela, Zalazar Héctor, Bravo M. Valeria, Feijoo Enrique, Golato Marcos, Paz Dora & Cárdenas Gerónimo J. Determinación del punto de fusión de cenizas de bagazo y residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar en Tucumán <www.eeaoc.org.ar/upload/contenido/pdf/20150219103059000000.pdf>

Pérez, P. 2006. Caracterización de Biocombustibles en Plantaciones de *Pinus radiata* Sometidas a Diferentes Esquemas de Manejo. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Forestales. Escuela de Ciencias Forestales. Departamento de Manejo de Recursos Forestales. 68 p.

Rudnick H., 2011. Energía de biomasa forestal, lecciones internacionales y su potencial en Chile, Pontificia Universidad Católica de Chile.

Ruiz J.M., 2004. Determinación de factores ambientales para el crecimiento de dos hongos (*lentinus edodes* y *stereum hirsutum*) y su acción biodegradante sobre la ladera de *pinus radiata* y *eucalyptus globulus*, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Forestales.

San Miguel G. & Gutiérrez F., 2015. Tecnologías para el uso y transformación de biomasa energética. 2015.. Ediciones Mundi-Prensa, ISBN 978-84-8476-674-2. Printed in Spain. pp 456

Sannigrahi, P.; Ragauskas, A.J.; Tuskan, G.A. Poplar as a feedstock for biofuels: A review compositional characteristics. Biofuels Bioprod. Bioref. 2010, 4, 209–226.

Senda Darwin, 2008. Ficha Olivillo Chileno, Archivo julio 2008.

Senovilla L. & G. Antolín, 2005. Revalorización energética de los residuos de la Industria Vitivinícola. U. Valladolid.ley

Sjoding D., 2008. Forest Biomass to Energy: Getting More out of CHP. Northwest CHP Application Center. Harvesting Clean Energy VIII (January, 2008).

Sjöström, E., 1993. Wood Chemistry: Fundamentals and Applications. Gulf Professional Publishing- Nature

Sun Y & Cheng J 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. Bioresour. Technol. 83: 1–11.

Taherzadeh M.J., Karimi K. 2007. Enzymatic-based hydrolysis processes for ethanol from lignocellulosic materials: A review, BioResources, 2(4): 707-738.

Universidad Federico Santa María (UFSM), 2007. Evaluación del Potencial Productivo de biocombustibles en Chile con Cultivos Agrícolas Tradicionales. Centro Avanzado de Gestión, Innovación y Tecnología para la Agricultura, como parte del estudio “Evaluación Socioeconómica y Balance Energético de la Cadena Productiva desde la Producción de Materia Prima hasta la Elaboración de Biodiésel y Etanol en Chile, a partir de Cultivos Agrícolas Tradicionales”, contratado por CNE, FIA y ODEPA.

Uprichard J.1991. Chapter 2. In. New Zealand Ministry of forestry. New Zealand Radiata Pine. New Zealand. Pp. 2-16.

Uprichard, J.M.; Lloyd, J.A.. Influence of tree age on the chemical composition of radiata pine. New Zealand Journal of Forestry Science 1980;10(3):551-557

USDOE-Office of Energy Efficiency and Renewable energy, 2006. Biomass feedstock and composition database.

Valdebenito G., 2001. Estado Actual del manejo forestal en Chile. Proyecto Información y análisis para el manejo forestal sostenible, FAO.

Yang B., Ziyu Dai, Shi-You Ding & Charles E Wyman, 2011. Enzymatic hydrolysis of cellulosic biomass. Future Science, ISSN 1759-7269.

ANEXO.

**PUBLICACIÓN INTERNACIONAL ASOCIADA AL TRABAJO DESARROLLADO EN ESTA
TESIS DOCTORAL.**

Available online at www.sciencedirect.com

ScienceDirect

<http://www.elsevier.com/locate/biombioe>

Biomass yield and quality of an energy dedicated crop of poplar (*Populus* spp.) clones in the Mediterranean zone of Chile

René Carmona ^{a,*}, T. Nuñez ^a, M.F. Alonso ^b^a Department of Wood Engineering and Biomaterials, FCFCN, University of Chile, Chile^b Department of Environmental Sciences and Natural Resources, University of Chile, Chile

ARTICLE INFO

Article history:

Received 14 July 2014

Received in revised form

29 December 2014

Accepted 5 January 2015

Available online 30 January 2015

Keywords:

Populus clones

Lignin

Cellulose

Heating value

Chemical composition

Biomass

ABSTRACT

The biomass of nineteen *Populus* spp. clones was measured and characterized as a feedstock for energy production. Biomass yield was estimated using the average volume and dry weight of each clone. Quality traits analyzed include higher heating value (HHV) and chemical composition. Biomass yield ranged between 0.31 and 9.54 kg individual⁻¹. HHV ranged between 17.69 and 20.75 MJ kg⁻¹. Total extractives varied between 11.78% and 19.62% (mass fraction% on dry basis), Klason lignin ranged between 14.31% and 20.92% and α -Cellulose ranged between 42.38% and 48.70%, both without extractives. The ash content ranged from 2.05% to 3.40%. The chemical composition of the clones reported here is slightly different to the previously reported for this genre, but this is attributed to the juvenile wood and the inclusion of bark in the samples. As a result of the biomass used in this study, the correlations between the chemical composition and extractives content on HHV are of very poor quality. Based on our results, an approach including both biomass yield and quality is required in order to ensure the most viable treatment for a sustainable utilization of the biomass for energy generation. For a direct combustion perspective, the preferred clones are those which a high combination of yield and heating value as Bocalari, Beaupre, Constanzo and Nmdv.

© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Among the most promissory woody species in Chile are hybrid poplars, due to their fast growth, high adaptability to a wide variety of soils and climatic conditions and wide range of potential applications as biofuels, pulp and paper, as well as other bio-based products such as chemicals and adhesives [1].

Lignocellulosic biomass is typically the fibrous and non-edible plant material composed primarily by fibers of walls

formed by layers of organic macromolecules, the polysaccharides cellulose and hemicellulose and a phenolic polymer, lignin. All these macromolecules provide a strong mechanical stability due to the bonds of lignin in the cell wall, providing a natural resistance to its degradation [2] and becoming one of the main challenges for the second generation biofuel industry [3]. However, lignin contribution to the higher heating value (HHV) has been demonstrated in different species [4,5].

* Corresponding author. Tel.: +56 2 29785909; fax: +56 22 5417971.

E-mail address: recarmon@uchile.cl (R. Carmona).

<http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2015.01.004>

0961-9534/© 2015 Elsevier Ltd. All rights reserved.

Besides the structural components there are also extractives and inorganics. Extractives are a varied group of organic compounds usually represent a minor proportion of the biomass and vary with the species, structure of the plant analyzed and the solvents used for the extraction. Depending on their quantity and industrial value they could represent a potential source of co-products [1]. White [4] states that differences in HHV between softwoods and hardwoods species could be more related to the presence of extractives than to the lignin content of these groups. On the other hand, Kacik et al. [6] found that HHV in *Populus* depend on the content of both, lignin and extractives.

Mineral compounds or inorganics are usually informed as ash. They represent less than 1% of the dry weight (mass fraction) of woody biomass [7] and include metals and metalloids that vary in type and quantity depending on the biomass type (i.e. whole plants or harvest residues), plant tissue (i.e. wood, bark or leaves), soil type and management (i.e. fertilization). Their relevance depends on their quantity and composition [8,9] and, as the other chemical compounds, are used to screen biomass feedstocks for biofuel applications [1].

According to Dinus [10] and others researchers [1,7,11], in order to reduce the cost of pre-treatments and to increase the total energy produced we should select feedstocks based on the available biomass conversion technology, the end-product required and the chemical composition of the feedstock utilized. Different energy conversion processes require different biomass quality in order to reach the end product with high performance and at low cost [10].

In Chile, the most common process for energy generation with lignocellulosic biomass is combustion. A 20% of the primary energy (234 EJ) is generated from wood fuel and its derivatives to produce heat for domestic and industrial uses and electricity (900 GWh, 1.6% of the total) [12]. In the short term, the biomass participation in the energy generation matrix should increase by the adoption of short rotation lignocellulosic crops.

For the purpose of this study, nineteen *Populus* spp. clones from an energy dedicated plantation were studied as potential feedstock for combustion processes [13] and as a primary source for solid fuels like pellets. The goal of this study was the characterization of the biomass for energy purposes, thus samples used in the analyses were composed by juvenile wood and included bark.

2. Materials and methods

2.1. Experimental site

The plantation included nineteen two-years old *Populus* spp. clones growing in a density of 9,000 plants ha⁻¹ at Antumapu Experimental Station located in the Central Zone of Chile at 33°34'10"S 70°38'40"W and 368 m of altitude. The soil is a Mollisol, coarse loamy over sandy, skeletal, mixed Thermic Entic Haploxeroll, 60 cm deep, flat and well drained [14] with 28.70 mg kg⁻¹ of N; 3.27 mg kg⁻¹ of P; 125 mg kg⁻¹ of K; 25.19 mg kg⁻¹ of S; a pH of 8.24 and 2.34% of organic matter. The site has a Mediterranean semiarid climate, with 8 dry

months during the warm season, a minimum temperature of 3.4 °C in July and a maximum temperature of 28.7 °C in January, with 231 frost-free days and an annual precipitation of 330 mm [15]. The trial was irrigated 3 times a week from October to March to keep the soil at field capacity.

2.2. Biomass productivity

Stem and branches of six random individuals of nineteen clones of *Populus* spp. were harvested manually and cut in pieces 0.5 m long. We estimated the volume of each individual geometrically multiplying the area corresponding to the average diameter of each piece by its longitude [16]. The apex was considered as a cone. Each piece was dried at 60 ± 3 °C until a constant weigh was reached and then weighted. We used the average volume and dry weight of the six individuals for the determination of the specific gravity and the total biomass per hectare of each clone.

2.3. Higher heating value (HHV)

The heating value (HHV) was determined in a ballistic bomb calorimeter (Gallen Kamp 23C679). Two samples of 0.5–1.0 g of each clone were weighed and ignited.

2.4. Chemical analyses

A sample of each clone was chipped in a hammer mill of 9.7 W and milled in a Wiley Mill N°4 to reduce the sample to dust size. Finally, part of the material was sieved to a size of 0.40 mm–0.25 mm, as described by T 264 om-88 "Preparation of Wood for Chemical Analysis" [17].

Determinations of extractives (removed sequentially with ethanol-toluene, ethanol and water and expressed as total extractives), total, Klason and soluble lignin, holocellulose, α -cellulose and ash were done in duplicate according to TAPPI and NREL procedures [18]. Hemicellulose was obtained by difference. For the determination of soluble lignin, 1 mL of the homogeneous filtrated liquor was taken in Eppendorf tubes in duplicate, and then centrifuged at 1047.2 rad s⁻¹ for 15 min. The supernatant was separated from the pellet and taken to a Spectrometer adjusted to 240 nm, to the recommended wavelength. Then, samples were diluted to match a range between 700 and 1000 of absorbance and the absorptivity at the recommended wavelength corresponded to 2.5 × 10⁶ L kg⁻¹ m⁻¹ [18].

A multiple regression analysis was carried out in JMP® 9.0.2 to detect the quality variables of the biomass (extractives, lignin, α -cellulose, holocellulose and ash) explaining its HHV.

3. Results and discussion

3.1. Biomass productivity

Table 1 shows the biomass productivity of the clones evaluated in this study. Biomass yield varied between 0.31 and 9.54 kg dry weight (DW) individual⁻¹. The most productive clones were Bocalari, Constanzo, Beaupre and Nmdv.

When extrapolated to a hectare basis, biomass yield range from 1.57 (VSB-2) to 47.7 (Bocalari) Mg DW ha⁻¹ (Fig. 1). Twelve

Table 1 – Biomass yield (kg dry weight (DW) individual⁻¹) of the *Populus* clones evaluated in this study (mean ± SD).

Clon	n	Yield (kg DW indiv ⁻¹)	Clon	n	Yield (kg DW indiv ⁻¹)		
Bocalari	4	9.54 ± 5.11	a	Eridano	3	2.47 ± 2.16	b
Constanzo	6	5.95 ± 3.71	ab	Categoría	10	2.18 ± 1.79	b
Beaupre	7	5.47 ± 2.58	ab	269	2	1.99 ± 2.63	b
Nmdv	3	4.95 ± 2.52	ab	Carolinensis	2	1.79 ± 2.17	b
ST-109	10	3.44 ± 2.46	b	70038/31	6	1.66 ± 1.32	b
Dvina	5	3.42 ± 2.47	b	Chopa Blanca	3	1.53 ± 1.27	b
Neva	6	3.38 ± 2.30	b	Triplo	3	0.79 ± 0.59	b
Unal	3	3.04 ± 3.33	b	NM6	3	0.73 ± 0.31	b
Boelare	7	2.78 ± 1.75	b	VSB-2	3	0.31 ± 0.20	b
I-488	4	2.53 ± 1.98	b				

Mean values followed by the same letters are not significantly different at $P < 0.05$.

of the nineteen clones studied produced more than 10 Mg DW ha⁻¹. Liesebach et al. [19] obtained similar yields in energy plantations like those used in this study. Four clones yielded more than 20 Mg DW ha⁻¹, as was reported by Liberloo et al. [20] in a high-density coppice plantation of three years old in a second rotation.

3.2. Higher heating value (HHV)

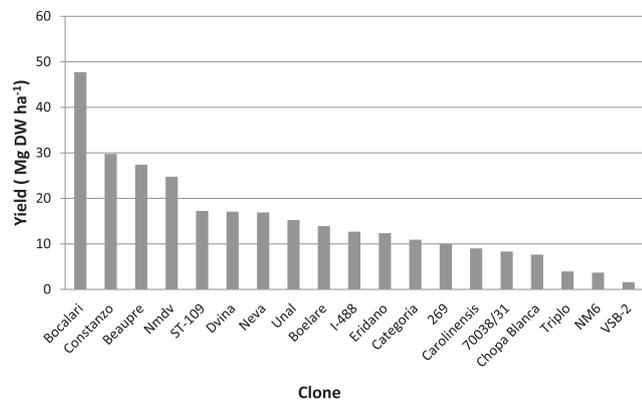
Results of the higher heating value (HHV) determination are shown in Table 2.

HHV varied between 17.69 and 20.75 MJ kg⁻¹. The clones with the highest HHV were Neva, 269 and VSB-2. Constanzo and Eridano showed the lowest HHV. The values presented in this work are within the range informed in previous studies on *Populus* spp. wood [21,22] and close to those reported for stem wood of two years old secondary sprouts of *Populus x euro-america* [23].

3.3. Extractives

Results showed in Table 3 correspond to the extractives soluble in ethanol-toluene, ethanol and water, and total extractives in a mass fraction basis (%).

Total extractives varied between 11.78% and 19.62%. Ethanol-toluene removed close to 10% of the woody biomass.

**Fig. 1 – Biomass yield of the *Populus* clones evaluated in this study extrapolated to Mg dry weight (DW) ha⁻¹.****Table 2 – Higher heating value (HHV; MJ kg⁻¹) of the *Populus* spp. clones evaluated in this study (mean ± SD).**

Clon	HHV (MJkg ⁻¹)	Clon	HHV (MJkg ⁻¹)		
Neva	20.75 ± 0.52	a	I-488	19.59 ± 0.47	abcd
269	20.49 ± 0.16	ab	Chopa Blanca	19.35 ± 0.42	abcd
VSB-2	20.44 ± 1.22	ab	70038/31	19.26 ± 0.03	abcde
Bocalari	20.38 ± 0.22	ab	NM6	19.08 ± 0.45	bcde
Nmdv	20.28 ± 0.07	abc	Categoría	18.89 ± 0.02	bcde
ST-109	20.02 ± 0.04	abc	Triplo	18.88 ± 0.03	bcde
Beaupre	19.97 ± 0.01	abc	Unal	18.73 ± 0.45	cde
Boelare	19.86 ± 0.23	abc	Eridano	18.20 ± 0.42	de
Carolinensis	19.82 ± 0.48	abcd	Constanzo	17.69 ± 0.21	e
Dvina	19.63 ± 0.06	abcd			

Mean values followed by the same letters are not significantly different at $P < 0.05$.

Water removed around 3% of the biomass and ethanol removed less than 1%. Total extractives values are higher than those reported for wood of broadleaf species (hardwoods) and for *Populus* spp. in particular [1,4,7,8,24]. Isenberg [25] reported extractives contents of 1.4%–2.4% in alcohol-benzene and of 3.5%–3.6% in ethanol when working on mature wood of poplar clones. Values of 1.5%–2.0% of extractives in ethanol/toluene were informed by Kacik et al. [6] in wood of *Populus* spp. from different clones. Extractives in ethanol in a range of 2.6%–3.6% for wood of seven years old *deltoides x nigra* clones were reported by Davis et al. [26]. These authors concluded that *deltoides x nigra* clones showed similar results to other hybrid poplars analyzed in previous studies. Fernandez et al. [24] obtained a range of 2.3%–4.0% (freeze dried wood) of solubles in acetone for nine clones of *Populus tremuloides* when analyzing the wood of mature trees. Luo and Polle [23] obtained between 11.2% and 12.8% of removed material in a more exhaustive extraction with water and methanol.

Our results are closer to those informed by Isenberg [25] for the bark of poplar clones and are in accordance with those presented by Bowersox et al. [9] who used composite samples of wood and bark from four years old hybrid poplars and using a similar method for the extractives (ASTM) to the one used in this study (TAPPI).

The difference in total extractives between this and other studies could be attributed to the presence of bark in the samples analyzed. It is well known that stem wood and bark differ on fiber structure and chemical composition, and that bark has an especially high content of extractives [11,27,28].

3.4. Lignin

Results of lignin determinations are shown in Table 4.

Lignin was divided in Klason (insoluble or acid lignin) and soluble lignin. Klason lignin ranged between 14.31% and 20.92%. This range is similar to the one reported by Kacik et al. [6], who found values between 17.68% and 23.66% of Klason lignin in wood from sixteen years old *Populus* clones. However, insoluble lignin contents for most of the clones of this study were lower than 20%, the average value for hardwoods reported by Scurlock [29]. This could be attributed to the presence of bark in the samples and the use of juvenile wood.

Table 3 – Extractives in ethanol/toluene, ethanol, water and total extractives of *Populus* spp. clones as mass fraction (% on dry basis).

Clon	Ethanol/toluene (%)	Ethanol (%)	Water (%)	Total (%)	
70038/31	15.61 ± 0.08	0.38 ± 0.09	3.63 ± 0.16	19.62 ± 0.35	a
Unal	14.43 ± 0.05	0.20 ± 0.04	3.57 ± 0.07	18.20 ± 0.16	ab
Nmdv	12.06 ± 0.33	0.58 ± 0.07	4.97 ± 0.36	17.62 ± 0.62	bc
Eridano	12.61 ± 0.23	0.28 ± 0.19	4.48 ± 0.12	17.37 ± 0.16	bcd
Carolinensis	11.31 ± 0.14	0.53 ± 0.07	4.64 ± 0.90	16.48 ± 0.83	cde
NM6	11.94 ± 0.01	0.35 ± 0.01	3.59 ± 0.07	15.89 ± 0.08	def
Boelare	11.91 ± 0.13	0.43 ± 0.07	3.04 ± 0.14	15.38 ± 0.20	efg
Constanzo	9.49 ± 0.17	0.77 ± 0.03	4.46 ± 0.41	14.73 ± 0.55	fgh
Beaupre	9.78 ± 0.01	0.75 ± 0.09	4.00 ± 0.40	14.53 ± 0.30	fgh
Bocalari	10.95 ± 0.10	0.43 ± 0.27	3.14 ± 0.03	14.53 ± 0.34	fgh
269	10.90 ± 0.14	0.55 ± 0.08	2.92 ± 0.04	14.37 ± 0.27	fgh
Triplo	10.64 ± 0.37	0.46 ± 0.09	3.05 ± 0.30	14.16 ± 0.02	ghi
VSΒ-2	10.04 ± 0.63	0.54 ± 0.24	3.31 ± 0.31	13.89 ± 0.07	ghi
Dvina	8.75 ± 0.06	0.74 ± 0.13	4.30 ± 0.02	13.80 ± 0.04	hij
Neva	10.03 ± 0.48	0.50 ± 0.09	3.24 ± 0.12	13.78 ± 0.50	hij
I-488	9.40 ± 0.44	0.64 ± 0.10	3.59 ± 0.24	13.64 ± 0.57	hij
ST-109	9.03 ± 0.05	0.46 ± 0.01	3.24 ± 0.48	12.73 ± 0.41	ijk
Categoría	8.35 ± 0.01	0.33 ± 0.02	3.65 ± 0.21	12.33 ± 0.19	jk
Chopa Blanca	8.47 ± 0.41	0.27 ± 0.07	3.03 ± 0.02	11.78 ± 0.31	k

Mean values followed by the same letters are not significantly different at $P < 0.05$.

Insoluble lignin values obtained in this study are closer to the range obtained by White [4] in hardwoods and softwoods, by Adam et al. [30] and Agblevor et al. [31] in hybrid poplars and similar to those presented by Fengel and Wegener [7] in wood of *P. tremuloides* and other poplars.

Soluble lignin has a low molecular weight. It is solubilized in an acidic hydrolysis solution and usually ranges between 0.5% and 4.0% of the dry mass. In this study, the values of soluble lignin showed little variability and were relatively

high, ranging between 3.0% and 4.0%. This range is slightly higher than the one reported previously for poplar clones in short rotation schemes [1,28].

Lignin content has a direct influence in the heating value of the biomass [4] because it is a high-energy component [32]. This fact was confirmed by the heating value determinations of the Klason lignin obtained in this study, which reached 22.89 MJkg⁻¹.

3.5. Holocellulose

Holocellulose content of the samples are shown in Table 5. Values ranged between 83.32% and 88.29%. These values are higher than the average of 77.2% reported by Vassilev et al. [33], the 79.12%–84.77% range obtained by Kacic et al. [6] and the 78.4%–80.3% range reported by Fengel and Wegener [7] in poplar wood. They are also higher than those obtained by Davis et al. [26] and Zamora et al. [34] from wood of hybrid clones of seven and thirteen years old respectively, in short rotation forestry systems established in Minnesota, USA. These higher values could be attributed to the presence of bark in the samples analyzed and a residual of lignin product of its incomplete oxidation or an incomplete extraction of polyphenols during the preparation of the wood free of extractives.

α -Cellulose ranged between 42.4% and 48.7%. Hemicellulose, obtained as a difference between holocellulose and cellulose, ranged between 38.81% and 42.48%. The reference value given by Vassilev et al. [33] for cellulose in hardwoods is 46.3%. In other studies with *Populus* spp. the values of cellulose ranged between 42.7% and 51%, while hemicellulose content is about 30% [1,6,9,34]. Results obtained in this study, although from juvenile wood with bark, are within the ranges reported previously.

3.6. Ashes

The ash content of the *Populus* spp. clones studied here ranged between 2.05% and 3.40% (Table 6). These values are higher

Table 4 – Klason lignin, soluble lignin and total lignin contents of *Populus* spp. clones as mass fraction (% on dry basis).

Clon	Klason lignin ^a (%)	Soluble lignin ^a (%)	Total lignin ^a (%)	
Constanzo	20.92 ± 1.14	3.91 ± 0.01	24.84 ± 1.14	a
Beaupre	20.61 ± 0.37	3.18 ± 0.01	23.80 ± 0.37	ab
Eridano	20.10 ± 0.74	3.44 ± 0.27	23.54 ± 0.47	abc
Carolinensis	19.81 ± 0.57	3.59 ± 0.02	23.40 ± 0.55	abcd
Categoría	18.40 ± 1.39	3.44 ± 0.08	21.84 ± 1.48	abcde
Nmdv	18.07 ± 0.12	3.54 ± 0.01	21.61 ± 0.14	abcde
Neva	17.35 ± 1.84	4.02 ± 0.09	21.37 ± 1.75	bcde
Bocalari	18.19 ± 0.13	2.98 ± 0.28	21.17 ± 0.41	bcde
I-488	17.39 ± 0.14	3.27 ± 0.02	20.66 ± 0.16	bcdef
NM6	17.23 ± 1.63	3.29 ± 0.11	20.52 ± 1.51	bcdef
ST-109	17.00 ± 1.12	3.35 ± 0.05	20.36 ± 1.07	cdef
VSΒ-2	16.59 ± 0.91	3.49 ± 0.20	20.08 ± 0.71	def
70038/31	16.70 ± 0.94	3.23 ± 0.14	19.93 ± 0.95	ef
Unal	16.37 ± 0.45	3.50 ± 0.14	19.88 ± 0.31	ef
269	16.29 ± 0.22	3.46 ± 0.08	19.75 ± 0.31	ef
Dvina	16.71 ± 0.26	2.98 ± 0.14	19.69 ± 0.12	ef
Chopa Blanca	16.42 ± 0.76	3.25 ± 0.04	19.67 ± 0.71	ef
Triplo	16.01 ± 0.17	3.28 ± 0.11	19.29 ± 0.06	ef
Boelare	14.31 ± 0.25	3.38 ± 0.02	17.69 ± 0.22	f

Mean values followed by the same letters are not significantly different at $P < 0.05$.

^a Percentage based on material free of extractives.

Table 5 – Holocellulose and α -Cellulose contents of *Populus* spp. clones as mass fraction (% on dry basis).

Clon	Holocellulose ^a (%)	Clon	α -Cellulose (%)
I-488	88.29 ± 0.61 a	Beaupre	48.70 ± 0.50 a
70038/31	88.29 ± 0.78 a	NM6	46.98 ± 0.22 ab
Boelare	88.22 ± 0.72 a	Chopa Blanca	46.96 ± 1.27 ab
Beaupre	88.09 ± 0.40 ab	70038/31	46.29 ± 0.28 abc
Carolinensis	87.82 ± 0.49 ab	Boelare	46.23 ± 0.57 abc
Chopa Blanca	87.65 ± 1.54 abc	Unal	46.19 ± 0.59 abc
Unal	87.53 ± 0.65 abcd	Carolinensis	46.10 ± 0.35 abc
ST-109	87.48 ± 0.11 abcd	I-488	45.81 ± 0.12 abc
Eridano	87.21 ± 0.24 abcde	VSB-2	45.52 ± 1.02 bc
Categoría	86.08 ± 2.32 abcdef	Eridano	45.51 ± 0.09 bc
NM6	85.96 ± 0.21 abcdef	ST-109	45.25 ± 0.38 bcd
Triplo	85.39 ± 1.14 abcdef	Bocalari	45.13 ± 0.61 bcd
VSB-2	85.13 ± 0.02 abcdef	269	44.89 ± 0.05 bcd
269	84.71 ± 0.64 bcdef	Dvina	44.77 ± 0.14 bcd
Bocalari	84.27 ± 0.51 cdef	Categoría	44.27 ± 2.08 bcd
Constanzo	84.09 ± 0.44 def	Triplo	44.09 ± 0.84 bcd
Neva	83.77 ± 0.89 ef	Nmdv	43.85 ± 0.31 cd
Dvina	83.58 ± 0.27 f	Constanzo	42.48 ± 0.06 d
Nmdv	83.32 ± 0.68 f	Neva	42.38 ± 0.80 d

Mean values followed by the same letters are not significantly different at $P < 0.05$.

^a Percentage based on material free of extractives.

than the 0.45% reported by Scurlock [29] as typical for hardwoods, the 0.2%–0.4% range reported for poplar wood [31] and the 0.5%–0.9% range reported for *Populus* spp. in short rotations [31]. The explanation for our results could be that the young bark or phloem has higher ash content than wood [35]. Although higher than the values reported previously, the ash content on samples including bark does not impose any limitation as a feedstock for combustion, pyrolysis and gasification. However, additional characterization of the composition of these ashes would be necessary in order to identify potential contaminants in the process of energy production [33] and technical troubles such as slagging, fouling, sintering and corrosion in the combustion system [36]. Caution must be given in using HHV as the only criterion of quality for clone selection, because there are other factors that have to be

Table 6 – Ash content of poplar clones as mass fraction (% on dry basis).

Clon	Ash (%)	Clon	Ash (%)
Carolinensis	3.40 ± 0.23 a	Boelare	2.69 ± 0.03 abcde
NM6	3.38 ± 0.16 ab	Unal	2.60 ± 0.13 abcde
I-488	3.27 ± 0.05 abc	Chopa Blanca	2.58 ± 0.45 bcde
70038/31	3.24 ± 0.08 abcd	Triplo	2.47 ± 0.04 cde
VSB-2	3.11 ± 0.31 abcd	Dvina	2.44 ± 0.12 de
Beaupre	2.83 ± 0.17 abcde	269	2.22 ± 0.04 e
Bocalari	2.77 ± 0.38 abcde	Categoría	2.10 ± 0.14 e
ST-109	2.75 ± 0.01 abcde	Neva	2.09 ± 0.23 e
Nmdv	2.73 ± 0.07 abcde	Constanzo	2.05 ± 0.14 e
Eridano	2.71 ± 0.01 abcde		

Mean values followed by the same letters are not significantly different at $P < 0.05$.

Ash Percentage based on material free of extractives.

considered when choosing clones for energy purposes, such as ash composition, S and Cl content and agglomeration tendency [37–41]. Such characterization is beyond the scope of this study.

3.7. Correlations between the chemical composition and extractives content on HHV

We look for correlations between the chemical composition and extractives on HHV (not shown here), and found very low square correlation coefficient values ($R^2 < 20$). Among all the correlation models proposed in the literature [5,42–44], the most suited for our data was the one proposed by Demirbas [5], although the square correlation coefficient value was also low. Thus, our results show a lack of correlation between the chemical composition and extractives on HHV, as suggested by Sheng and Azevedo [45]. We attributed this lack of correlation to the variable chemical structure and composition of the clones' biomass, the use of juvenile wood and the presence of bark in the samples analyzed.

3.8. Energy production

We used the biomass yield and its energy content (HHV) to establish a ranking of the energy potential of the clones studied (Fig. 2). Clone Bocalari showed the highest yield and one of the highest HHV, so was the clone with the highest energy potential ($486 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$) and the best candidate for energy generation by combustion. Beaupre and Constanzo were in the second and third place with 273 and $263 \text{ GJ ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ respectively. Constanzo, although with the lowest HHV could compensate its energy potential due its high biomass productivity. On the other hand, clone VSB-2 although with a high HHV, it occupied the lowest position in the ranking due its low biomass yield.

In general, the position on the energy potential ranking is related to the biomass productivity. However, for clones with similar yield (Constanzo and Beaupre) the position in the ranking depends strongly on the HHV. Thus, biomass productivity is the most important factor when selecting clones for energy purposes, but for clones with similar productivity, HHV should also be used as a selection criterion.

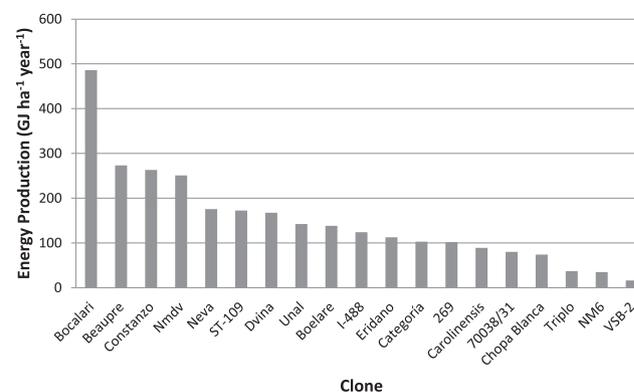


Fig. 2 – Ranking of the *Populus* spp. clones studied by their energy potential as a combination of biomass yield and HHV.

The energy production values of this study confirmed the results presented by Luo and Polle [23], who obtained energy productions that ranged between 368.5 and 461.5 GJ ha⁻¹ year⁻¹ in *Populus* clones of similar age (two years old) and growing conditions (irrigated and unfertilized) to those of this study.

4. Conclusions

Data presented here confirm the potential of using *Populus* for biomass production purposes in the Mediterranean Zone of Chile. Yields obtained in this study are alike to those reported worldwide with different *Populus* clones and similar management.

The use of bark and juvenile wood in the samples analyzed in this work modify substantially the extractives and lignin contents of the biomass when compared with previous studies on chemical quality of mature wood on the same species. The ash content reported, higher than the average for the *Populus* genre, is attributed to the presence of bark in the raw material. However, the ash content on samples including bark does not impose any limitation for using this type of biomass in thermochemical processes.

As previously reported in the literature, our results show a lack of correlation between the chemical composition and extractives on HHV.

When defining the energy potential of a poplar clone for direct combustion purposes, a combination of biomass yield and quality must be considered. In our study, Bocalari, Beaupre, Constanzo and Nmdv growing under irrigation at a density of 5000 plants ha⁻¹ demonstrated been the most promissory clones for biomass production in the Mediterranean Zone of Chile.

Acknowledgments

The authors wish to acknowledge the support of the Technical Consortium on Biofuels (BIOCOMSA) and the Program Innova from CORFO-Chile for funding this research through Grant No. 208-7321.

REFERENCES

- [1] Sannigrahi P, Ragauskas AJ, Tuskan G. Poplar as a feedstock for biofuels: a review of compositional characteristics. *Biofuel Bioprod Bior* 2010;4:209–26.
- [2] Lange JP. Lignocellulose conversion: an introduction to chemistry, process and economics. *Biofuel Bioprod Bior* 2007;1:39–48.
- [3] McAloon A, Taylor F, Yee W, Ibsen K, Wooley R. Determining the cost of producing ethanol from corn starch and lignocellulosic feedstocks. NREL-TP-580-28893. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory; 2000.
- [4] White RH. Effect of lignin content and extractives on the higher heating value of wood. *Wood Fiber Sci* 1987;19(4):446–52.
- [5] Demirbas A. Relationships between heating value and lignin, fixed carbon, and volatile material contents of shells from biomass products. *Energy Sources* 2003;25:629–35.
- [6] Kacic F, Durkovic J, Kacicová D. Chemical profiles of wood components of poplar clones for their energy utilization. *Energies* 2012;5:5243–56. <http://dx.doi.org/10.3390/en5125243>.
- [7] Fengel D, Wegener G. Wood: chemistry, ultrastructure, reactions. 1st ed. Berlín. New York: Walter de Gruyter; 1984.
- [8] Tharakan PJ, Volk TA, Abrahamson LP, White EH. Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass Bioenergy* 2003;25(6):571–80.
- [9] Bowersox TW, Blankenhorn PR, Murphey WK. Heat of combustion, ash content, nutrient content and chemical content of populus hybrids. *Wood Sci* 1979;11:257–62.
- [10] Dinus RJ. Genetic improvement of poplar feedstock quality for ethanol production. *Appl Biochem Biotechnol* 2001;91–93:23–34.
- [11] Kumar R, Mago G, Balan V, Wyman CE. Physical and chemical characterizations of corn stover and poplar solids resulting from leading pretreatment technologies. *Bioresour Technol* 2009;100:3948–62.
- [12] Ministerio de Energía de Chile. Balance de Energía. 2011. Available from: <http://www.minergia.cl>.
- [13] Sluiter JB, Ruiz RO, Scarlata CJ, Sluiter AD, Templeton DW. Compositional analysis of lignocellulosic feedstocks. 1. Review and description of methods. *J Agric Food Chem* 2010;58:9043–53.
- [14] Comisión Nacional de Riego. Estudio de suelos del Proyecto Maipo (4 vol./4 tomos de mapas). Stgo: Agrolog-Chile Ltda; 1981. p. 802.
- [15] Santibáñez F, Uribe JM. Universidad de Chile, Facultad de Cs. Santiago, Chile: Agrarias y Forestales, Laboratorio de Agroclimatología; 1990. p. 66.
- [16] Ministry of Forest, lands and natural resources operation. Available from: <http://www.for.gov.bc.ca/ftp/hva/external!/publish/web/manuals/scaling/chapters/Ch4.pdf>.
- [17] Technical Association of Pulp and Paper (TAPPI). Test methods, vol. 1. Atlanta, GA, USA: Tappi Press; 2008.
- [18] National Renewable Energy Laboratory. LAP determination of structural carbohydrates and lignin in biomass. Laboratory Analytical Procedures. 2008.
- [19] Liesebach M, Wueshlich G, Muhs HJ. Aspen for short-rotation coppice plantations on agricultural sites in Germany: effects on spacing and rotation time on growth and biomass production of aspen progenies. *For Ecol Manag* 1999;121:25–39.
- [20] Liberloo M, Calfapietra C, Lucak M. Woody biomass production during the second rotation of a bio-energy populus plantation increases in a future high CO₂ world. *Glob Change Biol* 2006;12:1094–106.
- [21] Ciria MP, Gonzales E, Mazon P, Carrasco J. Influence of the rotation age and plant density on the composition and quality of poplar biomass. In: Biomass for energy and the environment. Proceedings of the Ninth European Bioenergy Conference, Copenhagen, Denmark, 1996, vol. 2; 1996. p. 968–73.
- [22] Klasnja B, Kopitovic S, Orlovic S. Wood and bark of some poplar and willow clones as fuelwood. *Biomass Bioenergy* 2002;23:427–32.
- [23] Luo ZB, Polle A. Wood composition and energy content in a poplar short rotation plantation on fertilized agricultural land in a future CO₂ atmosphere. *Glob Change Biol* 2009;15:38–47. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01768.x>.
- [24] Fernandez MP, Breuil C, Watson PA. Natural clonal variation of wood extractives in *Populus tremuloides*. *Can J For Res* 2002;32:1192–9.

- [25] Isenberg IH. *Pulpwoods of the United States and Canada. Hardwoods*, vol. II. Appleton WI, USA: The Institute of Paper Chemistry; 1981.
- [26] Davis MF, Johnson DK, Deutch S, Agblevor F, Fenell J, Ashley P. Variability in the composition of short rotation woody feedstocks. In: *Second Biomass Conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture and Industry. Proceedings*; 1995. p. 216–25.
- [27] Bridgwater AV, Meier D, Radlein D. An overview of fast pyrolysis of biomass. *Org Geochem* 1999;30:1479–93.
- [28] Jenkins BM, Baxter LL, Miles Jr TR, Miles TR. Combustion properties of biomass. *Fuel Process Technol* 1998;54(1–3):17–46.
- [29] Scurlock J. *Bioenergy feedstock characteristics*. Oak Ridge National Laboratory; 2008.
- [30] Adam P, Ashley P, Chum H, Deutch S, Fennell J, Johnson DK, Wiselogle A. Study of Compositional changes in biomass feedstock upon storage(results). In: *Proceedings of the International Energy Agency. Department of Forest products, Report N°241*. p. 28–52. Also see: http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/8098_pt1.pdf.
- [31] Agblevor FA, Chum H, Johnson DK. Compositional analysis of NIST biomass standards from the IEA whole feedstock Round Robin, Orlando, Florida. Chicago, IL: Institute of Gas Technology. p. 395–421. Also see: http://www.nrel.gov/docs/legosti/old/8098_pt1.pdf.
- [32] Koeppen AV, Cohen WE. A study of “Chlorite” Holocelluloses prepared from *Eucalyptus regnans*. *Holzforschung Int J Biol Chem Phys Technol Wood* 1953:102–10.
- [33] Kollman F. *Technologie des Holzes und der Holzwertstoffe*. Berlin: Springer; 1951. p. 1050.
- [34] Vassilev SV, Baxter D, Andersen L, Vassileva C, Morgan T. An overview of the organic and inorganic phase composition of biomass. *Fuel* 2012;94:1–33.
- [35] Zamora DS, Wyatt GJ, Apostol KG, Tschirner U. Biomass yield, energy values, and chemical composition of hybrid poplars in short rotation woody crop production and native perennial grasses in Minnesota, USA. *Biomass Bioenergy* 2013;49:222–30.
- [36] Vassilev SV, Baxter D, Andersen L, Vassileva C. An overview of the chemical composition of biomass. *Fuel* 2010;105:40–76.
- [37] Liao CP, Wu CZ, Yan YJ, Huang HT. Chemical elemental characteristics of biomass fuels in China. *Biomass Bioenergy* 2004;27:119–30.
- [38] Chow P, Rolfe GL, Lambert RO, Barrier W, Ehrlinger HP, Lightsey GR. Higher heating values for pellets made from short rotation biomass of hardwood species. In: *Second biomass Conference of the Americas: Energy, Environment, Agriculture and Industry. Proceedings*; 1995. p. 244–52.
- [39] Sjöström E. *Wood chemistry, fundamentals and applications*. 2nd ed. New York: Academic Press; 1993. p. 71–113 [Chapter 4–6].
- [40] Lehtikangas P. Quality properties of pelletised sawdust, logging residues and bark. *Biomass Bioenergy* 2001;20:351–60.
- [41] Öhman M, Pommer L, Nordin A. Bed agglomeration characteristics and mechanisms during gasification and combustion of biomass fuels. *Energy Fuels* 2005;19:1742–8.
- [42] Shafizadeh F, Degroot WG. *Thermal uses and properties of carbohydrates and lignins*. New York: Academic Press; 1976. p. 332.
- [43] Jimennes L, Gonzales F. Study of the physical and chemical properties of lignocellulosics residues with a view to the production of fuels. *Fuel* 1991;70:947–50.
- [44] Tillman DA. *Wood as an energy resource*. New York: Academic Press; 1978. p. 266.
- [45] Sheng C, Azevedo JLT. Estimating the higher heating value of biomass fuels from basic analysis data. *Biomass Bioenergy* 2005;28:499–507.