



Desarrollo de *pellets*

a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas

Development pellets from three woody species under Mediterranean conditions

Harald Fernández-Puratich^{1*}, José Vicente Oliver-Villanueva², Mireya Valiente³, Salvador Verdú³, Nuria Albert³

¹ Centro de Sistemas de Ingeniería. Universidad de Talca. Curicó, Chile

² Universitat Politècnica de València. Grupo de Investigación en Ciencias y Tecnología Forestal. Valencia, España

³ Universitat Politècnica de València. Escuela Técnica de Ingeniería Agronómica y del Medio Natural. Valencia, España

* Autor de correspondencia, e.e.: hfernandezp@utalca.cl

RESUMEN

La biomasa leñosa como recurso energético varía según tres factores: 1) especie, 2) condiciones ambientales que influyen en su producción y 3) dispersión en el territorio. La estimación de la aptitud de este recurso es crucial para el desarrollo sustentable del sector agroforestal y, en concreto, de la cadena de valor bosque-industria-consumo. Tomando en cuenta esta situación, el objetivo de este documento consistió en determinar la aptitud de tres tipos arbóreos como biocombustible sólido. Una especie forestal (*Quercus ilex*), un cultivo energético (*Paulownia spp.*) y tres especies frutales *Citrus sinensis* (naranja), *Olea europaea* (olivo) y *Prunus amygdalus* (almendra). Para alcanzar este objetivo, la investigación se centró en la caracterización física, química y energética de la biomasa leñosa de estas especies. Con base en un muestreo representativo, los resultados obtenidos sirvieron para determinar de forma cualitativa las aptitudes y limitaciones de estas especies como biocombustible sólido. Los principales resultados demuestran que la biomasa de cada especie estudiada es apta para su uso energético como biocombustible sólido, con la excepción de la madera de naranja que presenta algunas limitaciones para la fabricación de *pellets*.

PALABRAS CLAVES: biocombustible sólido, *Quercus ilex*, *Paulownia spp.*, *Citrus sinensis*, *Olea europaea*, *Prunus amygdalus*.

ABSTRACT

Woody biomass as an energy source varies according to species, environmental conditions that influence their production and dispersal in the territory. The estimation of the suitability of this resource is crucial for sustainable development of agro-forestry and, specifically, of the value chain forest-industry-consumer. Considering this situation, the aim of this paper was to determine the suitability of three types of trees as solid biofuel. A forest species (*Quercus ilex L. subsp. ballota (Desf.) Samp*); Energy crop (*Paulownia spp.*); Three fruit species *Citrus sinensis* (orange), *Olea europaea* (olive) and *Prunus amygdalus* (almond). In order to achieve this goal, the paper is focused on the physical, chemical and energy of woody biomass of these species. Based on representative sampling obtained results qualitatively determined the capabilities and limitations of these species as solid biofuel. The main results of the analysis show that the biomass of all species are suitable for energy use as solid biofuel, with the exception of the orange tree wood that has some limitations for the production of pellets.

KEYWORDS: Solid biofuel, *Quercus ilex*, *Paulownia spp.*, *Citrus sinensis*, *Olea europaea*, *Prunus amygdalus*.

INTRODUCCIÓN

El presente escenario de costos derivados de la demanda del petróleo, junto con los problemas por la producción de CO₂ provenientes de los combustibles fósiles, han llevado a las autoridades a compromisos de potenciación de las

energías renovables y de fomento a la biomasa forestal con fines energéticos (Tolosana, 2009).

Visto desde una perspectiva global, según el Programa Chile Sustentable (2002), el actual sistema de abas-

tecimiento de energía repercute en el aumento de los precios de esta a nivel mundial y en el uso casi exclusivo de fuentes energéticas no renovables, siendo un modelo de solución un método de abastecimiento propio de gran autonomía, lo que se puede lograr con el uso complementario de recursos renovables.

En Chile, el recurso renovable de mayor consumo es la leña, que representa alrededor de 18% de la matriz energética del país. En promedio, en el sector residencial el consumo de leña es de 65% (Ministerio de Energía, 2011; FAO, 2012), porcentaje que va aumentando hacia el sur del país, reflejando la magnitud del uso de este biocombustible a nivel nacional. Sin embargo, la combustión residencial de leña en artefactos de baja eficiencia implica grandes consecuencias, entre ellas, el deterioro de la calidad del aire de varias ciudades del centro-sur y sur del país, principalmente en los meses de invierno. Sin embargo, es el combustible más económico con que cuenta la población para su calefacción.

Por esto último, el gobierno de Chile considera prioritario el desarrollo de una estrategia tendiente a la reducción de las emisiones ocasionadas por la combustión de leña, contemplándose incentivar el uso de tecnologías de combustión residencial alternativas a la leña. Dentro de estas tecnologías se encuentran los *pellets*, que son biocombustibles sólidos, homogéneos, de bajo contenido de humedad y con una alta densidad energética, tienen forma cilíndrica con diámetros normalmente comprendidos entre 7 mm y 22 mm y longitudes de 3,5 cm a 6,5 cm, cuya fabricación se realiza a alta presión, sin necesidad de utilizar algún tipo de adhesivo (Marcos y Núñez, 2006). Estos, generan bajas emisiones cuando se emplean en artefactos de alta eficiencia, reduciendo las emanaciones de CO₂ en 50% comparado con la combustión de leña o astillas, posee bajas concentraciones de azufre (entre 0,004% y 0,007% del peso seco final de cada *pellet*) y de nitrógeno (entre 0,05% y 0,16% del peso seco final de cada *pellet*) (Rojas, 2004). Son empleados principalmente en países con alta demanda de calefacción. En Chile, se están comenzando a consumir en calderas, pero aún existe una baja penetración en el mercado.

Al fabricar y comercializar este tipo de combustibles, se disminuye considerablemente la cantidad de residuos, se reduce el volumen transportado, así como también se logra una combustión más limpia y eficiente.

Si bien, el estudio es llevado a cabo en la región mediterránea de España los resultados obtenidos son completamente homologables a la región mediterránea chilena, debido a las similitudes climáticas (Boydak y Dogru, 1997). La región mediterránea de España abarca gran parte de la costa del mismo nombre y algunas zonas del interior de España. Las lluvias son irregulares, entre 400 mm y 700 mm anuales, y se concentran especialmente en otoño y primavera. Los inviernos son cortos y suaves mientras que los veranos son largos y calurosos. La temperatura media anual ronda entre 15 °C y 18 °C (AEMET, 2014). El sector mediterráneo chileno, abarca la región geográfica Centro-Norte del país, entre los 32° y 38° de latitud Sur aproximadamente, siendo en general el promedio de precipitación de 500 mm a 700 mm al año y una temperatura promedio de 13 °C a 14 °C al año, lo que varía en la zona costera con respecto al interior (Arroyo *et al.*, 1995, Santibáñez y Uribe, 1992). También existe similitud en la flora de estas regiones (Verdú *et al.*, 2002; Domínguez-Lozano y Schwartz, 2005) que se presenta en la zona central del país. Además, cuentan con similares especies forestales y las mismas especies frutales tratadas en este estudio. El caso de *Paulownia spp.* (*paulonia*) es distinto ya que, si bien en España existen actualmente plantaciones productivas tanto para biocombustible como para su uso en la industria del tablero, en Chile no existen estudios acabados al respecto, por lo que se examinará con el objetivo de un futuro establecimiento masivo para fines energéticos.

De esta manera, este estudio apunta a determinar el potencial energético de las especies seleccionadas teniendo por fin el suministro sostenido de biomasa agroforestal bajo condiciones mediterráneas lo que se logrará a través de la caracterización de sus maderas desde el punto de vista físico, químico y energético determinando su aptitud para estos fines a través de normas de calidad existentes.

Cabe mencionar que las especies analizadas en este estudio cumplirían la función de complemento como



materia prima con respecto a *Pinus radiata* que es la especie forestal de principal explotación en Chile, siendo su participación de 95% en la industria del aserrío (GTZ/ INFOR, 2007), y por ende, es la especie de mayor generación de residuos leñosos.

OBJETIVOS

El objetivo general fue investigar el potencial energético de nuevas fuentes biomásicas de especies leñosas para el suministro sostenido de energía bajo condiciones mediterráneas, similares a las de la zona Central de Chile.

Para alcanzar el objetivo general, se incluyen los siguientes objetivos específicos:

- Seleccionar especies y diseñar el muestreo.
- Determinar las propiedades físicas de la biomasa leñosa obteniendo principalmente la información sobre la densidad (básica) y contenido de humedad.
- Caracterizar químicamente la biomasa leñosa por medio de un análisis elemental y análisis secundario en todas las especies estudiadas.
- Determinar las propiedades energéticas de la madera por especie, determinando el poder calorífico y porcentaje de cenizas.
- Comparar los resultados obtenidos para todas las especies con las normas existentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El área de estudio abarca el litoral e interior de la Comunidad Valenciana (España) localizada entre los 40° 47' y 37° 51' de latitud Norte. Fue elegida como se señaló anteriormente por su similitud climatológica y de flora con la zona central de Chile, ambas de clima mediterráneo.

Selección de especies

Se clasificaron las especies estudiadas en tres tipos arbóreos:

Especie forestal: la encina (*Quercus ilex* spp. ballota) que es la latifoliada más representativas de España. Según PGO (2004) más de 70% de sus bosques puros se encuen-

tran de 1000 m a 1200 m snm. Una parte importante es regeneración natural resultante de devastadores incendios hace aproximadamente 30 años.

Cultivo energético leñoso: la paulonia (*Paulownia* spp.), escogida por su rápido crecimiento, sus favorables características energéticas para la producción de *pellets* (Falasca y Bernabe, 2010), además de la existencia de viveros, parcelas conocidas de ensayo y producción dentro de España. Si bien es cierto que Paulonia es una especie ya probada en algunos países, en Chile no existen plantaciones productivas y los artículos científicos publicados sobre esta especie y en esta materia son escasos hasta el momento.

Especies agrícolas leñosas: que presentan la mayor superficie ocupada de la región (Censo Agrario, 1999) y tienen características arbóreas definidas (fuste y copa): *Citrus sinensis* (naranja), *Olea europaea* (olivo) y *Prunus amygdalus* (almendro), siendo estas especies también cultivadas en Chile.

Diseño muestral de áreas y toma de muestras

El muestreo de las especies se realizó en distintas comarcas de la región y a distintas altitudes. La encina fue muestreada a 1000 m snm, la paulonia a 20 m y 700 m snm, el naranja a 70 m y 110 m snm, el olivo y el almendro a 620 m snm, siendo la recolección de muestras para encina en zonas boscosas, para paulonia en plantaciones comerciales y para los árboles frutales en terrenos de carácter agrícola.

Selección de parcelas

Se seleccionaron 20 parcelas representativas por especie, de un tamaño mínimo de 0,25 hectáreas. Los criterios de selectividad, para efectos prácticos de medición y homogenización de los datos obtenidos, han sido: una misma zona geográfica; representatividad, disponibilidad y accesibilidad; coetaneidad, requerimientos hídricos, edafológicos, climatología y de altitud similares (Fernández-Puratich, 2013). Luego de estas 20 parcelas se seleccionaron cuatro a seis de forma aleatoria para ser evaluadas.

Selección de individuos

Dentro de cada parcela, utilizando el método de Hapla y Saborowski (1984), que establece como cifra aceptable 15 árboles por parcela, se recolectó el material teniendo una muestra total mínima de 75 árboles por especie, coetáneos, de un mismo origen y en iguales condiciones de sitio. Ese número es una cantidad representativa, de acuerdo con lo indicado por este método, para las estimaciones y análisis de este estudio. Una vez seleccionados los 15 árboles por muestreo aleatorio simple se tomaron muestras de fuste y ramas según correspondía.

Recolección de muestras

Se obtuvieron muestras de fuste del cultivo energético y de la especie forestal cortando cinco árboles representativos de cada parcela, y de cada uno se obtuvieron seis discos hasta los 5,5 m de altura. Luego, las muestras se llevaron a laboratorio para su caracterización (análisis físicos, químicos y energéticos) según las normas técnicas establecidas.

De las especies frutales se tomaron muestras en las ramas, las ramas de primer orden se consideraron parte del fuste, ya que poseen características visuales similares, por lo que se catalogaron como no representativas y no corresponden al tipo de ramas de podas (ramas de segundo y/o tercer orden). La toma de muestras se subdividió en dos clases:

- Diámetro < 7,0 cm: Se seleccionaron tres ramas representativas por árbol, tomando como muestra la sección inferior y superior de cada rama.
- Diámetro ≥ 7,0 cm: Se seleccionó una rama por árbol por ser ramas productivas, tomando una muestra de la sección inferior de la rama. Este tipo de muestreo no se realizó en los árboles de almendros, ya que por su estructura de pocas ramas, cortar una de esta envergadura supone una pérdida de producción de frutos importante en el árbol.

Caracterización física de la madera

Determinación de densidad

Se determinó la densidad básica según Kollmann (1959). La determinación de la densidad fue realizada por el teo-

rema de Arquímedes, siguiendo lo descrito por Olesen (1971), ya que se considera uno de los métodos más prácticos y exactos, así como el más utilizado para calcular la densidad de material leñoso de formas irregulares:

$$P_c = m_c m_c^* P_a$$

Donde:

P_c : densidad del cuerpo (g/cm³)

P_a : densidad del agua (g/cm³)

m_c : masa del cuerpo (g)

m_c^* : masa relativa al valor de empuje del cuerpo en el agua (g)

Determinación de la humedad en estufa

En ramas de diámetro ≥ 7,0 cm no es posible seguir la especificación técnica EN 14774, en cuanto a la disposición en recipiente, debido a las mayores dimensiones e irregularidad de sus formas, por lo que en este aspecto se adaptó la metodología.

Así, las muestras fueron pesadas sobre una balanza de 0,1 mg de resolución, sin recipientes. Al ingresarlas a la mufla, solo se utilizó de base una placa de aluminio para evitar el contacto directo de las muestras con la mufla como precaución ante la posibilidad de desprendimiento de corteza. El contenido de humedad de la madera durante el secado se obtuvo utilizando la siguiente ecuación (Kollmann, 1959):

$$Ph - PsPs \times 100\%$$

Donde:

CH : contenido de humedad (%)

Ph : peso húmedo (g)

Ps : peso secado en estufa (g)

Preparación de las muestras

Las muestras eran recién cortadas, y fueron llevadas directamente a laboratorio para su análisis, por lo que no habían logrado su secado natural. Hubo que secarlas, teniendo en cuenta que cuando la madera tiene agua, su poder calorífico se reduce, primero por el propio conte-



nido de agua y segundo porque parte de la energía calorífica de la madera se invierte en evaporar agua (Vignote y Martínez, 2006).

Para poder efectuar las pruebas siguientes fue necesario transformar las muestras en aserrín o fragmentos < 5 mm. En el caso de las muestras de diámetros < 7,0 cm se utilizó un triturador portátil marca Garland modelo BGS 2400, luego de ser triturado el material fue fragmentado en partes más pequeñas en un molino marca IKA-WERKE modelo M20 obteniendo el aserrín. En ramas con diámetros \geq 7,0 cm, una vez obtenidas las astillas (5 cm de longitud como máximo), se dejaron secar 2 días, para introducirlas en un martillo de trituración marca OIOTECHNOLOGY modelo ETCR110 Trituradoras/afinadora 11 kW obteniéndose el aserrín (0,5 mm - 5 mm).

Caracterización química de la madera

Se realizó el análisis químico elemental y se identificaron algunos otros microcomponentes inorgánicos presentes en un análisis secundario. El análisis químico elemental se realizó en el laboratorio del Departamento de Química del ETSIAMN de la Universidad Politécnica de Valencia y el análisis químico secundario en el Instituto Agrario de la Generalitat Valenciana.

Análisis elemental

El material de análisis se dividió en restos de corta (árboles frutales) y árboles enteros (cultivo energético y especie forestal), según norma EN 14918.

Los elementos H, O, N, son utilizados principalmente para el cálculo del poder calorífico inferior (PCI). Aun cuando el C y el S no son requeridos en esta fórmula, se determinaron debido a las combinaciones que se pueden dar en diversas formas, principalmente con H, O y otras sustancias que pueden participar o no en la combustión (IDAE, 2007).

Análisis secundario

Era importante determinar el contenido de metales pesados que se encontraban incorporados en la madera, sobre todo en biomasa agrícola, a través de suelos agrí-

colas contaminados. Por esto, se determinaron los siguientes elementos químicos que son monitoreados en la producción de *pellets* para uso doméstico (EN 14961-2):

- Determinación de elementos metálicos y azufre, utilizando en este estudio el método ICP (Inductively Coupled Plasma)
- Determinación de arsénico por fluorescencia
- Determinación de mercurio por espectroscopía de absorción atómica mediante analizador automático

Una vez obtenidos los resultados, se establecieron los niveles de concentración de estos elementos químicos, determinando si sus valores se encontraban dentro de los límites establecidos por las normas ya señaladas.

Caracterización energética de las astillas

Se evaluó la capacidad de las astillas como biocombustible sólido (*pellets*), esto se llevó a cabo en los laboratorios del Instituto de Ingeniería Energética (IIE) de la Universidad Politécnica de Valencia.

Se pretendía conocer el PCI y el porcentaje de cenizas. En la actualidad, las normas referentes a biocombustibles sólidos son desarrolladas por el AEN/CTN 164 (Jiménez y Sánchez, 2007), las usadas en este estudio fueron:

- EN 14918 EX Biocombustibles sólidos. Determinación del poder calorífico.
- EN 14961 EX Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles.
- EN 15234 EX Biocombustibles sólidos. Aseguramiento de la calidad del combustible.
- EN 14775 EX Biocombustibles Sólidos. Determinación del contenido de ceniza.

Poder calorífico

Con base en lo que dicta la norma EN 14918, se realizaron 33 pruebas en total a 0% de humedad.

El poder calorífico inferior (PCI) se puede calcular en base seca y libre de cenizas según la siguiente ecuación (norma UNE-CEN/TS 15234 EX):

$$q_{p, net, d} = q_{v, gr, d} - 212,2xw H_d - 0,8xw O_d + w N_d$$

Donde:

$q_{p, net, d}$: poder calorífico inferior de la materia seca a presión constante (MJ kg⁻¹);

$q_{v, gr, d}$: poder calorífico superior de materia seca (MJ kg⁻¹)

$w(H)_d$: contenido en hidrógeno, en porcentaje de masa, del biocombustible (seco) libre de humedad (incluyendo el hidrógeno del agua de hidratación de la materia mineral así como el hidrógeno en la sustancia del biocombustible)

$w(O)_d$: contenido en oxígeno, en porcentaje de masa, del biocombustible libre de humedad

$w(N)_d$: contenido en nitrógeno, en porcentaje de masa, del biocombustible libre de humedad

Cenizas

El porcentaje de cenizas indica la cantidad de materia sólida no combustible por kilogramo de material. En los procesos térmicos de aprovechamiento de la biomasa que incluyen la combustión, es importante conocer el porcentaje contenido de ceniza en la biomasa, ya que en algunos procesos puede causar un deterioro de los equipos por formación de escorias.

El material (aserrín) fue clasificado de la misma forma que se hizo para el PC.

Se utilizó la norma UNE 14775 EX: 01. Método para la determinación del contenido de cenizas. Biocombustibles sólidos. Se pesó una pequeña cantidad de la muestra en

una balanza de precisión Mettler Toledo (modelo AB 304-S/Fact, de 0,0001 g de resolución). Se desecó y posteriormente se incineró a 550 °C ± 10 °C en una mufla marca Selecta modelo Select-Horn (con alcance de 1100 °C).

Tras determinar un periodo de tiempo, la muestra se acondicionó a temperatura ambiente y se volvió a pesar. El proceso se repitió hasta alcanzar peso constante.

Se calculó el contenido de cenizas como la cantidad de cenizas referidas a la muestra inicial desecada, por diferencia de peso y expresado en porcentaje.

Análisis de la astilla

Para determinar el potencial de cada especie para la fabricación de biocombustibles sólidos se analizaron los parámetros técnicos mínimos para este material: se tabularon para compararlos con lo que establece la normativa vigente y con base en el Manual para la certificación de pellets de madera para usos térmicos del Consejo Europeo del Pellet (2011), que tiene como referencia la norma EN 14961-2.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Caracterización física

Los resultados de la caracterización física muestran la estadística descriptiva de ramas con diámetro < 7,0 cm y ≥ 7,0 cm con respecto a la densidad básica.

Para el material de encina se obtuvo una densidad básica promedio de 0,732 g/cm³, con variación prácticamente nula entre individuos (CV = 3,2%). Sin embargo,

TABLA 1. Densidad básica (kg m⁻³) de las especies estudiadas

Especies	Min	-σd	Prom.	+σd	Max	CV (%)
<i>Q. ilex</i>	687...	709...	732...	756...	772...	3,2
<i>Paulownia spp.</i>	270...	267...	297...	327...	390...	10,1
<i>C. sinensis</i>	521...	549...	616...	684...	758...	10,9
<i>O. europaea</i>	549...	611...	654...	698...	717...	6,7
<i>P. amygdalus</i>	572...	620...	668...	715...	766...	7,1



CPF (2004) y CREAM-DMAH (2011) obtuvieron valores promedio de densidad básica de esta especie de 0,870 g/cm³, valor más alto que el obtenido en este estudio. Estas diferencias de densidad en una misma especie, según Gutiérrez *et al.* (2010) y Zobel y Talbert (1988) se deben principalmente a la influencia de las diferentes condiciones de sitio donde pudiese establecerse la especie, y en menor grado al control genético.

El valor de densidad básica del material del fuste de paulonia fue de 0,297 g/cm³, similar al obtenido por Hakan-Akyildiz y Sahin-Kol (2009) y por Sobhani *et al.* (2011) (0,272 g/cm³ y 0,260 g/cm³, respectivamente). La ligereza demostrada por la madera de paulonia se considera una ventaja importante, ya que en España, esta es la especie que posee la menor densidad con respecto a otros cultivos productores de madera, siendo *Populus spp.* la que le sigue en ligereza con valores de densidad entre 0,330 g/cm³ y 0,370 g/cm³ dependiendo de la localidad de procedencia (Jovanovski *et al.*, 2011; Díaz *et al.*, 2002).

En la tabla 1 se observa que, en promedio, en ramas de frutales las densidades básicas son uniformes, obteniéndose para naranjos 0,616 g/cm³, para olivos 0,654 g/cm³ y para almendros 0,668 g/cm³. Es importante resaltar que no existen estudios previos sobre la obtención de valores medios de densidad básica de estas especies, por lo que estos valores son pioneros.

Fernández (2009) estudió las mismas especies frutales evaluadas en este trabajo y provenientes de condiciones

climáticas similares. Sin embargo, sus resultados de densidad de madera de naranjos y de almendros fueron mucho más altos (1,002 g/cm³ y 0,981 g/cm³ respectivamente), aunque no especifica qué tipo de densidad se trata. En contraste, Passialis y Grigoriou (1999), si bien no evaluaron las mismas especies, obtuvieron datos de densidad básica para otras especies frutales como melocotón, manzano, cerezo, pero y damasco entre 0,65 g/cm³ a 0,75 g/cm³ que son valores más cercanos a los de este estudio.

Características químicas

Los resultados obtenidos en la composición química elemental de la madera de los tres tipos de árboles fueron comparados con los de literatura encontrada para las mismas especies. Sin embargo, en cuanto a la composición química secundaria no se encontraron estudios con los que comparar. Krook *et al.* (2004) han determinado valores para el fuste de las especies forestales más importantes del sector forestal europeo (*Pinus spp.* y *Picea spp.*). En este ítem se hizo una comparación de la concentración de los metales pesados para las especies en estudio *versus* lo publicado por esos autores, ya que resulta interesante conocer las diferencias y similitudes de los elementos químicos de las especies ensayadas, que no son tradicionalmente utilizadas en el sector forestal, con respecto a las especies que sí forman parte activa en este sector, proponiendo opciones para complementar a las especies forestales utilizadas tradicionalmente.

TABLA 2. Concentración de los elementos principales en muestras de fuste y ramas según la especie.

Elemento	EN 14918 (%)	<i>Q. ilex</i>	<i>Paulownia spp.</i>	<i>C. sinensis</i>	<i>O. europaea</i>	<i>P. amygdalus</i>
C	-	39,0	58,6	35,0	36,8	34,6
H	6,2 (fuste)	-	-	-	-	-
	6,1 (ramas)	-	-	-	-	-
O	42 (fuste)	-	-	-	-	-
	41 (ramas)	-	-	-	-	-
N	-	0,2	0,4	0,6	0,5	0,3
S	-	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02

Análisis elemental

Los valores promedio que se incluyen en la tabla 2 para H y O son los que establece la norma EN 14918 para material obtenido de los fustes de árboles enteros y se utilizó únicamente para el cálculo del PCI, ya que no están incluidos en las especificaciones técnicas para producción de *pellets*.

Para la encina, según Ponce y Cárdenas (2004), el porcentaje medio de C está entre 48% y 52% y de N entre 0,07% y 0,38%, siendo el primer valor mayor al obtenido en este estudio de C que es 39%. Sin embargo, los valores que presenta para N son similares al obtenido en esta investigación. Alves *et al.* (2009), para la madera de encina, obtienen 0,18% en N que es un valor muy cercano al encontrado en el fuste de esta especie. Sin embargo, Viejo-Montesinos *et al.* (1996) obtuvieron un valor medio de 0,63%. Esto indica que para este elemento se encuentran muchas variaciones.

Los valores de C, N y S obtenidos para paulonia se muestran en la tabla 2 y son similares a los obtenidos por Kasamaki (2007) quien obtuvo 49,5% para C; 0,24% para N y 0,02% para S, coincidiendo con los valores obtenidos por Esteban-Pascual *et al.*, (2007).

En ramas de frutales, al comparar los valores de la tabla 2 con la literatura, los resultados obtenidos son dispares. Sánchez *et al.* (2002), obtuvieron 45,5% para C, en cambio para N son bastante similares (0,03%) al igual

que en olivos y el S no lo detecta en la madera. Por ende, en general, la composición elemental de los frutales no difiere demasiado entre sí.

Análisis secundario

Según la tabla 3, casi todos los compuestos químicos analizados tuvieron presencia en la encina, a excepción de As y Pb, cuya presencia fue muy baja o inexistente, lo que los hizo imposibles de detectar.

Krook *et al.* (2004) han determinado valores del fuste para *Pinus spp.* y *Picea spp.* como las especies forestales de referencia para uso bioenergético en Europa. Según la tabla 3, presentan valores más bajos con respecto al fuste de encina en todos sus elementos excepto en As y Pb, por los motivos señalados anteriormente.

Como se puede observar en la tabla 3, al igual que en la encina, casi todos los compuestos químicos tuvieron presencia en paulonia, a excepción de Pb que fue inexistente o de muy baja presencia e imposible de detectar.

En general, el fuste de paulonia presentó valores más altos a los obtenidos por Krook *et al.* (2004), en todos sus elementos, excepto en As que son valores prácticamente iguales y en Pb que no estuvo presente en paulonia o su concentración fue menor a la señalada en la tabla, por lo que no fue detectado.

TABLA 3. Concentración de los componentes secundarios que pueden hallarse en las especies estudiadas

Elemento	Unidad	Fuste <i>Pinus spp.</i> y <i>Picea spp.</i>	Fuste <i>Q. ilex</i>	Fuste <i>Paulownia spp.</i>	Ramas <i>C. sinensis</i>	Ramas <i>O. europaea</i>	Ramas <i>P. amygdalus</i>
Arsénico (As)	mg/kg	0,03	< 0,03	0,036	0,094	0,031	< 0,03
Cromo (Cr)	mg/kg	0,06	0,5	0,8	1,3	0,5	1,2
Plomo (Pb)	mg/kg	0,07	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6	< 0,6
Mercurio (Hg)	mg/kg	0,06	2,7	1,5	3,3	2,8	1,9
Níquel (Ni)	mg/kg	0,01	0,3	1,1	0,7	0,3	0,4
Zinc (Zn)	mg/kg	9,6	3,8	19,7	6,0	9,8	14,7

* Krook *et al.* (2004)



Según la tabla 3, casi todos los compuestos químicos analizados tuvieron presencia en las especies frutales estudiadas, a excepción de Pb que fue inexistente o imposible de detectar, lo mismo ocurrió con el As en almendro. Los resultados indican que, en general, estos frutales presentan valores más altos con respecto a los obtenidos por Krook *et al.* (2004) para *Pinus spp.* y *Picea spp.* en todos sus elementos con las excepciones de As en almendros y Pb para todos los frutales, es decir que no están presentes o su concentración fue menor a la señalada en la tabla sin ser detectado. También la excepción se encuentra en Zn en naranjos donde se obtuvo un valor menor (6,0 mg/kg) que el autor de referencia (9,6 mg/kg).

Caracterización energética de la biomasa

Para la caracterización energética de la biomasa se determinó el PC (superior e inferior) expresado en MJ kg⁻¹ y del porcentaje de cenizas en ramas agrupadas de acuerdo con sus diámetros (< 7,0 cm y ≥ 7,0 cm).

Especie forestal mediterránea

Se determinó el PC en fuste, ramas con follaje y árbol completo de encina calculándose el PCI de los diferentes materiales como materia seca a 0% de humedad.

Se incluyeron en el análisis las ramas con follaje, ya que la defoliación es técnicamente complicada de realizar, por ende, sería muy costosa.

En la tabla 4 se aprecia que el material de fuste de *Quercus ilex* presentó el mayor PCI con 17,0 MJ/kg, seguido por biomasa del árbol completo con 16,41 MJ/kg y finalmente la biomasa de ramas con hojas con 16,22 MJ/kg.

Se realizó la prueba de *t* para comparar las medias entre fuste y ramas con hojas resultando una diferencia estadísticamente significativa entre sus medias con un nivel de confianza de 95,0%. Sin embargo, al realizar la prueba de *t* para comparar las medias obtenidas de biomasa de ramas con hojas y de árbol completo, no hubo diferencia estadísticamente significativa entre sus medias con el mismo nivel de confianza de 95,0%.

De lo anterior se concluye que el material leñoso del fuste tiene mayor PCI que el que presentaron los materiales provenientes de otras muestras (ramas con hojas y árbol completo), ya que según Rodríguez-Rivas (2009) un PC mayor se obtiene de material de especies que presentan mayor lignificación, que son más densas y que tienen mayor contenido de resinas, terpenos y aceites esenciales, explicándose así el por qué de la tendencia a la disminución del PCI cuando se incorporaron muestras con hojas.

Con respecto al porcentaje de cenizas, la tendencia indicó que la biomasa de fuste presentó el menor porcentaje de cenizas (1,8%) con respecto al de ramas con hojas que presentaron prácticamente el doble de cenizas (3,2%). De esto se concluye que el material más lignificado (fuste) presenta un porcentaje de cenizas más acorde con lo requerido por la norma EN 14775 (≤ 1,5%).

De los resultados obtenidos se puede concluir que la incorporación del follaje a la materia prima para la producción de energía tendería a producir una disminución de su calidad para estos fines, con los perjuicios para las calderas ya explicados anteriormente. Este es un factor a tener en cuenta, ya que la encina es una especie perenne, por lo que si se quiere obtener una mayor calidad en el producto final con fines energéticos posteriormente al

TABLA 4. Descripción de propiedades energéticas de *Q. ilex*

Material	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	Cenizas (%)
Fuste	18,35	17,00	1,8
Ramas c/hojas	17,57	16,22	3,2
Árbol completo	17,76	16,41	-

raleo se aconsejaría realizar una actividad de desrame, que sea previa al astillado o a cargar las trozas al camión para su transporte. Estos resultados no se pudieron contrastar con otros estudios de la misma especie o variedad de *Quercus ilex*, ya que la información específica al respecto es escasa. Sin embargo, resultados de material de otras especies de la familia de los *Quercus*, Bárcenas-Pazos *et al.* (2008) indican que en *Quercus sebifera* y *Q. tinkhami*, el porcentaje de cenizas promedio va de 2,7% a 3,2%, Bodirlau *et al.* (2007) obtuvieron en *Q. robur* entre 0,1% y 1,3% de cenizas. Para Fengel y Wegener (1984), en términos generales, las maderas de clima templado y frío están constituidas por 0,2% a 0,5% de cenizas.

Si bien estos resultados son diferentes con respecto a los obtenidos en este estudio, cabe destacar que, al menos, las condiciones de sitio y variedad de la especie son distintas a los bosques de encina muestreados. Así, por ejemplo, la variación del contenido de cenizas puede deberse a una adaptación fisiológica a condiciones de potencial hídrico de un suelo más o menos restrictivas (Bárcenas-Pazos *et al.*, 2008)

Cultivo energético leñoso

En paulonia la caracterización energética se determinó en el fuste y en ramas sin hojas. Se determinó el PCI del material en materia seca a 0% de humedad.

TABLA 5. Descripción de propiedades energéticas de *Paulownia* spp.

Material	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	Cenizas (%)
Fuste	17,4	16,1	1,1
Ramas	18,1	16,7	1,3

Los valores de la tabla 5 presentan los resultados obtenidos con material separado en fuste y ramas con un PCI de 16,1 MJ/kg para el fuste y el 16,7 MJ/kg en las ramas sin hojas.

Se realizó la prueba de *t* para comparar las medias de estos resultados entre fustes y ramas de esta especie, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas

entre sus medias con un nivel de confianza de 95%. Por lo anterior, es posible establecer un valor promedio para ambos tipos de muestra de 16,38 MJ/kg, siendo este valor aceptable según la norma (EN 14918).

Los valores obtenidos en este estudio son menores que los presentados por otros autores como Muñoz (2011) quién determinó 18,00 MJ/kg de PCI para paulonia, mientras que Lucas *et al.* (2010) obtuvieron 19,50 MJ/kg. Esta diferencia según Ince (1977) se puede deber a que la biomasa presenta un contenido de humedad más alto mientras esté más fresca, lo que contribuye a que el PC sea más bajo. Sin embargo, el material usado en laboratorio fue ensayado en base seca a 0% de humedad, por lo que las diferencias de PCI con respecto a los presentados por otros autores pueden ser atribuibles a otras causas, como a que las especies en forma individual presentan diferencias en la finalización de su actividad vegetativa y evolución según la estación del año (fenología) (Rodríguez-Rivas, 2009).

De los valores de cenizas de paulonia, presentados en la tabla 5 se observa que los resultados tienden a ser prácticamente iguales en los dos tipos de materiales (fuste y ramas), 1,1% para la fracción fuste y 1,3% en las ramas sin hojas.

Latorre y Ruano (2009) mencionan que para la mayoría de los cultivos energéticos se obtiene un porcentaje de cenizas que oscila entre 3% y 5%. Sin embargo, la norma EN 14775 señala que el contenido de cenizas no debe ser mayor a 1,5%, dato que paulonia cumplió satisfactoriamente (Tabla 5).

Los resultados obtenidos por otros autores como Kasamaki (2007) oscilaron entre 1,1% y 1,5%; para Latorre y Ruano (2009) estuvieron en torno a 2,0%; Muñoz (2011) obtuvo un porcentaje de cenizas de 1,7% y Yorgun *et al.* (2009) 1,1%, lo que corrobora los resultados obtenidos en este estudio.

El análisis de contenido de cenizas (%) permite determinar la cantidad de residuos acumulados en calderas tras la combustión de la biomasa (Latorre y Ruano, 2009) y, en vista de los resultados obtenidos (1,2%), el rendimiento de la caldera no se verá afectado (IDAE 2009).



Especies agrícolas leñosas

La caracterización energética se determinó en ramas de diámetro $< 7,0$ cm y $\geq 7,0$ cm.

TABLA 6. Descripción de propiedades energéticas de frutales

Especie	Clasif. (cm)	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	Cenizas (%)
<i>C. sinensis</i>	$< 7,0$	16,0	14,7	2,8
	$\geq 7,0$	16,8	15,4	
<i>O. europaea</i>	$< 7,0$	17,4	16,0	2,4
	$\geq 7,0$	17,5	16,1	
<i>P. amygdalus</i>	$< 7,0$	18,2	16,9	1,0

Según la tabla 6, se puede inferir que las muestras de biomasa de olivos y almendros poseen un PCI aceptable (norma EN 14961-2) con valores que, si bien son menores a los requeridos para la obtención de *pellets* de calidad (16,5 MJ/kg) son similares. Sin embargo, el valor obtenido con la biomasa de naranjos es menor que el mínimo establecido en la norma, ya que el valor más alto obtenido fue de 15,4 MJ/kg.

Se realizó la prueba de *t* para comparar las medias de las muestras entre ramas de diámetros $< 7,0$ cm y $\geq 7,0$ cm de naranjos y olivos y no hubo diferencia estadísticamente significativa, para un nivel de confianza de 95,0%.

Los valores obtenidos están dentro del amplio intervalo establecido por IDAE (2005 y 2009), que para biomasa de olivo está entre 12,1 MJ kg⁻¹ y 19,5 MJ kg⁻¹ y en almendros entre 11,6 MJ kg⁻¹ y 18,9 MJ kg⁻¹. Así mismo, existen varios autores que han determinado el PCS del material de estas especies, encontrando valores superiores a los obtenidos en este estudio. Por ejemplo, Fernández (2009) determinó para cítricos sin hojas (mandarinos y naranjos) un PCS de 17,4 MJ kg⁻¹; para olivos, Sánchez *et al.* (2002) obtuvieron 17,9 MJ kg⁻¹; para almendros González (2008) obtuvo 18,2 MJ kg⁻¹ e IDAE (2005) 11,9 MJ kg⁻¹.

En cuanto al porcentaje de cenizas en frutales los valores que se presentan en la tabla 6, corresponden al material de mezcla de ramas de diámetros $< 7,0$ cm e indican que el proveniente de los naranjos presentó mayor

porcentaje de cenizas (2,8%), con respecto al que se determinó para la biomasa de olivos y almendros (2,4% y 1,0% respectivamente), siendo estos últimos los que menor cantidad de cenizas produjeron como residuo.

Otros autores han analizado cenizas de los residuos de podas de estas especies, pero no especifican los diámetros promedio que tenían las ramas de residuos, por lo que con fines de comparación con los resultados de este estudio se consideraron como resultados generales. Siendo así, Fernández (2009) obtuvo 5,2% de cenizas para residuos de naranjos y 0,8% para almendros, mientras que Sánchez *et al.* (2002) obtuvieron 1,5% para olivos. Estas cifras, con la excepción de lo obtenido para almendros, varían notablemente con respecto a las obtenidas para el material incluido en este estudio, debido a que el porcentaje de cenizas de la madera varía considerablemente con el clima, época del año, tipo de suelo, tipo de madera y especie, parte del árbol, y de la presencia de otros contaminantes adicionales como tierra y arena (Bárceñas-Pazos *et al.*, 2008). Como recomendación para el control en el aumento del porcentaje de cenizas, se aconseja que en la fase de la entrega de la materia prima en planta, los camiones de suministro de biomasa cumplan ciertos requisitos mínimos que aseguren una adecuada humedad durante la entrega, así como que incluyan equipamientos que permitan el pesado del combustible suministrado (IDAE, 2009).

Análisis del material como biocombustible sólido

A continuación, la tabla resumen determina el cumplimiento de los requisitos en la producción de *pellets* con base en los resultados obtenidos previamente de los distintos análisis realizados durante el desarrollo de esta investigación, siendo los resultados comparados con un estándar de valores dado por la norma para una calidad de *pellets* A2.

Cabe mencionar que la densidad medida corresponde a la astilla leñosa de las especies, sin embargo, por metodología, la confección de *pellets* densifica por presión el material, por lo tanto, si ya la madera cumple con una densidad igual o mayor a 600 kg m⁻³, con la sola excepción de paulonia, es claro que el *pelletizado* de las astillas de la madera aumentará la densidad del *pellet*.

TABLA 7. Resumen de cumplimiento de requerimientos de la astilla para la producción de *pellets* según normas.

Propiedades del análisis	Unid.	Parámetros técnicos	Cumplimiento de normas				
			C.s.	O.e.	P.a.	P. spp.	Q.i.
Propiedades físicas							
Densidad	kg/m ³	≥600 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Propiedades energéticas							
Cenizas	(%)	≤1,5 ¹	✗	✗	✓	✓	✗
PC	MJ/kg	16,3≤Q≤19 ⁵¹	✗	✓	✓	✓	✓
Elementos químicos							
Nitrógeno (N)	%	≤0,5 ¹	✗	✓	✓	✓	✓
Azufre (S)	%	<0,03 ¹	✗	✓	✓	✓	✓
Arsénico (As)	mg/kg	≤1,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Cromo (Cr)	mg/kg	≤10,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Plomo (Pb)	mg/kg	≤10,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Mercurio (Hg)	mg/kg	≤0,1 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Níquel (Ni)	mg/kg	≤10,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓
Zinc (Zn)	mg/kg	≤10,0 ¹	✓	✓	✓	✓	✓

ENI496I-2

Por lo que se presenta en la tabla 7 es posible concluir que, con excepción de la biomasa de naranjos, la de las otras especies analizadas cumple con la normativa para ser usadas como materia prima alternativa o de complemento a las ya probadas para la fabricación de *pellets*. Si bien la biomasa de olivos (2,4%) y encinas (1,8%) no cumplen con los límites establecidos en la norma (porcentaje de cenizas < 1,5), la diferencia es mínima, al ser material complementario a las materias primas destinadas a estos usos, el porcentaje final de cenizas del *pellet*, en promedio, será menor que los obtenidos con la biomasa de estas dos especies.

CONCLUSIONES

La determinación de las propiedades físicas, químicas y energéticas señalan que las especies estudiadas cumplen, en general, con la normativa para la producción de *pellets* a partir de ellas. La excepción la podría constituir el naranjo que se muestra como la especie menos apta para

la confección de *pellets*, aunque esta no debe ser descartada, ya que su inclusión o no dentro de la producción de *pellets* estará supeditada a su porcentaje de participación.

Se muestra que todas las especies estudiadas, en términos generales, tienen el potencial energético como suministro complementario sostenido de biomasa agroforestal para la producción de biocombustibles sólidos (*pellets*). Cabe recordar que las especies analizadas en este estudio solo cumplirían la función de complemento como materia prima con respecto a *Pinus radiata* que es la especie forestal de principal explotación en Chile y la de mayor generación de residuos leñosos, lo cual debe ser aprovechado para la producción de *pellets* de forma masiva.

REFERENCIAS

- AEMET (Asociación Española de Meteorología). 2014. Guía resumida del clima en España (1981-2010). Consultado 18 de agosto 2013. Disponible en <http://www.aemet.es/es/conocerlas/publicaciones>



- Alves, C., C. Goncalves, A.P. Fernandes, L. Tarelho y C. Pio. 2009. Fireplace and woodstove fine particle emissions from combustion of western Mediterranean Wood types. *Atmospheric Research* 101:692-700
- Arroyo, M.T.K., L. Cavieres, C. Marticorena y M. Muñoz. 1995. Convergence in the mediterranean floras in central Chile and California: insights from comparative biogeography. In: M.T.K. Arroyo, P.H. Zedler y M.D. Fox, eds. *Ecology and biogeography of Mediterranean ecosystems in Chile, California, and Australia*. Springer-Verlag, Nueva York, NY. p:43-88.
- Bárceñas-Pazos, G.M., R. Ríos-Villa, J.R. Aguirre-Rivera, B.I. Juárez-Flores y J.A. Honorato. 2008. Composición química y densidad básica relativa de la madera de dos especies arbustivas de encino blanco en la Sierra de Álvarez, México. *Madera y Bosques* 14(3):81-94
- Bodirlau, R., I. Spiridion y C.A. Teaca. 2007. Chemical investigation of wood tree species in temperate forest in East Northern Romania. *Bioresources* 2(1):41-57
- Boydak, M. y M. Dogru. 1997. El intercambio de experiencias y los últimos adelantos en el manejo forestal sostenible por ecorregiones: Los bosques Mediterráneos. XI Congreso Forestal Mundial. Antalya, Turquía. 13-22 de octubre.
- Censo Agrario 1999. Los montes valencianos en cifras. Extracto del segundo inventario forestal de la Comunidad Valenciana. Valencia, España. Conselleria de Agricultura y Medio Ambiente. 51 p.
- CPF (Centre de la Propietat Forestal). 2004. L'inventari Forestal: Anexe indicadors dendromètrics. En Generalitat de Catalunya, Departament de Medi Ambient i Habitatge. Manual de redacció de plans tècnics de gestió i millora forestal (PTGMF) i plans simples de gestió forestal (PSGF). Instruccions de redacció i l'inventari forestal. Torrefurru, España. Abast. 216 p.
- CREAF-DMAH (Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals – Direcció General del Medi Natural del Departament de Medi Ambient i Habitatge de la Generalitat de Catalunya). 2011. Sistema d'informació dels boscos de Catalunya. Consultado 5 de marzo 2012. Disponible en <http://www.creaf.uab.es/sibosc/>
- Díaz, B.J., L. Luna, G.D. Keil, M.E. Otaño y P.L. Peri. 2002. Tratamiento de la madera de *Populus nigra* CV. *Italica* ante la preservación con creosota y CCA. *Investigaciones Agrarias y Sistemas Forestales* 11(2):325-338.
- Domínguez-Lozano, F. y M.W. Schwartz. 2005. Comparative taxonomic structure of the floras of two Mediterranean-climate regions. *Diversity and Distributions* 11(5): 399-408.
- EN 14774-1: 2007 EX. Biocombustibles Sólidos: Determinación del contenido de humedad: Método de secado en estufa.
- EN 14961-2: 2011. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 2: Pellets de madera para uso no industrial.
- EN 14775: 2007 EX. Biocombustibles Sólidos: Método para la determinación del contenido de ceniza.
- EN 15103: 2007. Biocombustibles Sólidos: Métodos para la determinación de densidad aparente.
- EN 23103: 1978. Determinación del calor de combustión de los materiales de construcción mediante la bomba calorimétrica.
- EN 14918: 2011. Biocombustibles sólidos: Determinación del poder calorífico.
- Esteban-Pascual, L.S., R. García-Arambilet, R. Cabezón-González y J.E. Carrasco-García. 2007. Plan de aprovechamiento energético de la biomasa en las comarcas de El Bierzo y Laciana (León). CEDER-CIEMAT. 125 p.
- Falasca, S. y M. Bernabe. 2010. Aptitud agroclimática argentina para la implantación de bosques energéticos de *Pau- lownia spp.* *Revista Geográfica* (148):151-164
- FAO (Food and Agriculture Organization). 2012. Activities related to poplar and willow cultivation and utilization in Serbia. 25 p.
- Fengel D. y G. Wegener. 1984. Wood: chemistry, ultrastructure, reaction. Walter de Gruyter & Co. Berlín, Alemania. 163 p.
- Fernández-Puratich, H. 2013. Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal bajo condiciones mediterráneas. Tesis doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. 354 p.

- Fernández, E. 2009. Análisis de los procesos de producción de biomasa residual procedente del cultivo de frutales mediterráneos. Cuantificación, cosecha y caracterización para su uso energético o industrial. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España.
- González, J. 2008. Centrales de calefacción y electricidad a partir de biomasa. Consultado 7 de junio 2012. Disponible en http://centrodeinvestigacionlaorden.gobex.es/archivos/calefaccion_y_electricidad_a_parit_de_biomasa.pdf
- GTZ/INFOR. 2007. Disponibilidad de Residuos Madereros: Residuos de la industria primaria de la madera. Disponibilidad para uso energético. ISBN: 978-956-7700-09-7. 122 p.
- Gutiérrez V., B., M. Gómez-Cárdenas y S. Valencia-Manzo. 2010. Wood density variation in natural populations of *Pinus ocarpa* Schiebe Exschltdl. from the Chiapas State, México. *Fitotécnica Mexicana* 33(4):75-78
- Hakan-Akyildiz, M. y H. Sahin-Kol. 2009. Some technological properties and uses of paulownia (*Paulownia tomentosa* Steud.) wood. *Journal of Environmental Biology* 31(3):351-355.
- Hapla, F. y J. Saborowski. 1984. Überlegungen zur Wahl des Stichprobenumfangs bei Untersuchungen der physikalischen und technologischen Holzeigenschaften. *Forstarchiv* 55(4):135-138.
- IDAE (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía). 2007. Manuales de energías renovables: Energía de la biomasa. Consultado 15 feb. 2011. Disponible en: <http://www.idae.es/index.php/mod.documentos>
- IDEA (Instituto para la Diversificación y Ahorro de Energía). 2009. Guía técnica de instalaciones de biomasa térmica en edificios. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio de España. 76 pp.
- Ince, P.J. 1977. Estimating effective heating value of wood or bark fuels at various moisture contents. Madison, Wisconsin: FPL 13. Forest Products Laboratory. U.S. Department of Agriculture. 9 p.
- Jiménez, L. y L. Sánchez. 2007. Consideraciones sobre el aprovechamiento de la biomasa forestal con fines energéticos, según el nuevo decreto 661/2007 por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen general. *Revista Técnica del Medio Ambiente* 20(120): 18-23.
- Jovanovski, A., G. Robles y M. Davel. 2011. Propiedades físicas de la madera de *Populus spp.* proveniente de cortinas forestales plantadas en Esquel, Chubut, Argentina. Jornadas de Salicáceas. Neuquén, Argentina. 6p.
- Kasamaki, P. 2007. La Paulownia como base de los cultivos energéticos. Consultado 8 mayo 2011. Disponible en <http://www.vicedex.com/pdf/paulownia.pdf>.
- Kollmann, F. 1959. Tecnología de la madera y sus aplicaciones. Tomo I. Ministerio de Agricultura. Instituto Forestal de Investigaciones, Experiencias y Servicios de la Madera. Madrid, España. 676 p.
- Krook, J., A. Matensson y M. Eklund. 2004. Metal contamination in recovered waste wood used as energy source in Sweden resources. *Conservation and Recycling* 41(1):1-14
- Latorre, B. y J.R. Ruano. 2009. Caracterización energética de la biomasa de *Paulownia spp.* procedente de plántulas cultivadas de una savia. *Montes* 98:77-82.
- Lucas, M., E. Martínez, F. García Morote, F. López Serrano y M. Andrés Abellán. 2010. El cultivo de Paulonia para la obtención de madera y biomasa en Castilla-La Mancha: Primeros resultados. *Foresta* 47/48:103-110
- Marcos, F. y M. Núñez. 2006. Biomasa forestal: fuente energética. *Energética XXI IV*(52):80-85.
- Ministerio de Energía de Chile. 2011. Balances energético 2002-2010. Consultado 2 julio 2013. Disponible en <http://www.cne.cl/estadisticas/balances-energeticos>
- Muñoz, F. 2011. Experiencias en plantaciones dendroenergéticas. Seminario: la energía del futuro viene de bosques. Colegio de Ing. Forestales. Talca, Chile. 40 p.
- Olesen, P.O. 1971. The Water Displacement Method, The Royal Veterinary and Agricultural University of Copenhagen, 18 p.
- Passialis, C. y A. Grigoriou. 1999. Technical properties of branch-wood of apple, peach, pear, apricot and cherry fruit trees. *Holz als Roh- und Werkstoff* 57:41-44.
- PGOF. 2004. Plan General de Ordenación Forestal de la Comunidad Valenciana. Conselleria de Medio Ambiente. Vol. 2003/43. Valencia, España.
- Ponce, M. y R. Cárdenas. 2004. Determinación de la importancia del consumo de leña por el sector industrial de la X



- región y sus implicancias ambientales. Boletín Técnico de la Universidad de Santiago de Chile. 66 p.
- Programa Chile Sustentable. 2012. Un Plan Nacional de Acción de Eficiencia Energética para Chile Consultado 24 noviembre 2010. Disponible en <http://www.chilesustentable.net/category/publicaciones/energia-y-proteccion-del-clima/>
- Rodríguez-Rivas, A. 2009. Estudios de valoración energética de combustibles forestales para la prevención de incendios forestales en la Sierra de la Primavera (Jalisco, México) mediante calorimetría de combustión y ensayos de inflamabilidad. Santiago de Compostela: Universidade. Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico. 128 p.
- Rojas, M. 2004. Prefactibilidad técnica y económica para la instalación de una planta de pellets para combustibles a partir de desechos de madera. Tesis Ing. Forestal. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Escuela de Ciencias Forestales: 22-26 p.
- Sánchez, S., A.J. Moya, M. Moya, I. Romero, R. Torrero y V. Bravo 2002. Aprovechamiento del residuo de poda del olivar. *Ingeniería Química* 34(391):194-202.
- Santibáñez, F. y J.M. Uribe. 1992. Atlas agroclimático de Chile: Región V y Metropolitana. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Santiago.
- Sobhani, M., A. Khazaeian, T. Tabarsa y A. Shakeri. 2011. Evaluation of physical and mechanical properties of paulownia wood core and fiberglass surfaces sandwich panel. *Key Engineering Materials* 471-472: 85-90
- Tolosana, E. 2009. Manual técnico para el aprovechamiento y elaboración de biomasa forestal. Madrid. FUCOVASA/Mundi-prensa. 348 p.
- Verdú, M., y P. Garcia-Fayos. 2002. Ecología reproductiva de *Pistacia lentiscus* L. (Anacardiaceae): un anacronismo evolutivo en el matorral mediterráneo. *Revista Chilena de Historia Natural* 75(1):57-65.
- Viejo-Montesinos, J.L., F. Molino-Olmedo y J. Marín. 1996. Variación del contenido de carbono y nitrógeno a lo largo del proceso de putrefacción de la madera de *Quercus*, *Pinus* y *Abies* en Andalucía. Tomo extraordinario, 125 Aniversario de la RSEHN. *Boletín de la Real Sociedad de Historia Natural* 455-458.
- Vignote, S. e I. Martínez. 2006. Tecnología de la madera. Mundi-prensa. Madrid. 678 p.
- Zobel, B. y J. Talbert. 1998. Técnicas de mejoramiento genético de árboles forestales. Limusa. México. 545 p.

Manuscrito recibido el 17 de octubre de 2013.

Aceptado el 28 de mayo de 2014.

Este documento se debe citar como:

Fernández-Puratich, H., J.V. Oliver-Villanueva, M. Valiente, S. Verdú, y N. Albert. 2014. Desarrollo de *pellets* a partir de tres especies leñosas bajo condiciones mediterráneas. *Madera y Bosques* 20(3):95-109.