



Tese de Doutoramento

**Caracterización energética de  
*Quercus robur* L.**

**Alberto Jesús González Rodríguez**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PROPIEDADES TERMOFÍSICAS  
DE FLUIDOS Y BIOMATERIALES (PTFB)**

**Programa de Doutoramento en Enerxías  
Renovables e Sustentabilidade Enerxética**

**FACULTADE DE FÍSICA**

**SANTIAGO DE COMPOSTELA  
2015**





Tese de Doutoramento

**Caracterización energética de  
*Quercus robur* L.**

**Alberto Jesús González Rodríguez**

**DEPARTAMENTO DE FÍSICA APLICADA  
GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN PROPIEDADES TERMOFÍSICAS  
DE FLUIDOS Y BIOMATERIALES (PTFB)**

**Programa de Doutoramento en Enerxías  
Renovables e Sustentabilidade Enerxética**

**FACULTADE DE FÍSICA**

**SANTIAGO DE COMPOSTELA  
2015**



José A. Rodríguez Añón, María Villanueva López y Jorge Proupín Castiñeiras, Profesores Titulares de Universidad del Departamento de Física Aplicada de la Universidade de Santiago de Compostela (USC),

**INFORMAN:**

Que la memoria titulada "**Caracterización energética de *Quercus robur* L.**" ha sido realizada bajo su dirección por el Ingeniero de Montes D. Alberto Jesús González Rodríguez, y constituye la Tesis Doctoral que presenta para optar al Grado de Doctor por la Universidade de Santiago de Compostela (USC).

Santiago de Compostela, a 17 de Julio de 2015

Fdo. José A. Rodríguez Añón

Fdo. María Villanueva López

Fdo. Jorge Proupín Castiñeiras

Fdo. Alberto Jesús González Rodríguez





## Agradecimientos





*Quisiera agradecer sinceramente la colaboración de todas aquellas personas que de un modo u otro han participado en la realización de este trabajo, especialmente José, Xurxo y María, que lo han hecho todo por mí. También a mis padres, impulsores vocacionales incansables, de este, y de otros viajes similares.*



Pero tú, sacra encina del celta,  
y tú, roble de ramas añosas,  
sois más bellos con vuestro follaje  
que si mayo las cumbres festona  
salpicadas de fresco rocío  
donde quiebra sus rayos la aurora,  
y convierte los sotos profundos  
en mansión de gloria.

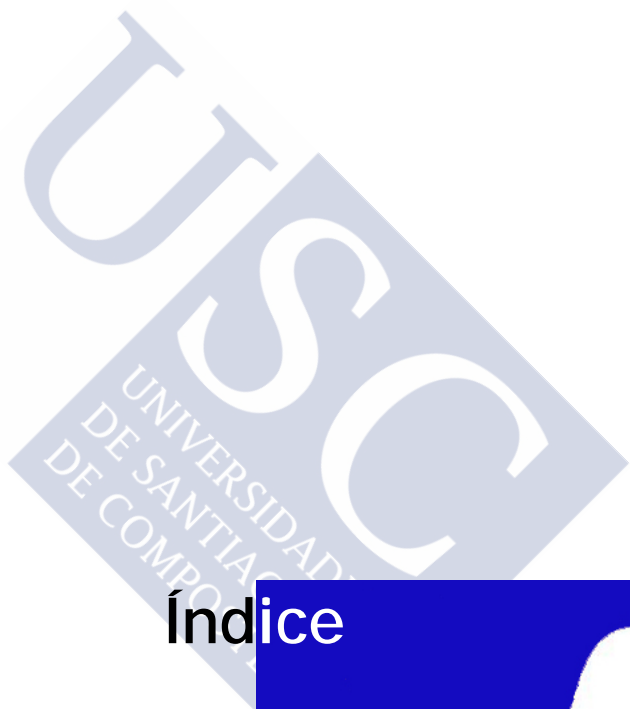
*En las orillas del Sar (1884)*

Poema "Los robles"

Rosalía de Castro







# Índice





# Índice

Prólogo	3
Capítulo 1. Bases teóricas y conceptuales de la investigación	43
Capítulo 2. Trabajo experimental	57
Capítulo 3. Presentación y discusión de los resultados	107
Capítulo 4. Conclusiones	145
Reflexiones y futuro	157
Glosario	163
Anexos	173
Índice de Figuras	179
Índice de Tablas	185







# Prólogo





# Prólogo

Denominación	Pág.
Prólogo	3
Pero, ¿qué es el roble?	6
Breve recorrido histórico por la presencia del roble en Galicia	8
Importancia global del carballo en la Galicia actual	14
La biomasa	21
Pero ¿qué es realmente la biomasa forestal?	22
Galicia y la madera de <i>Quercus</i> : aprovechamiento de la leña	24
La producción de leñas en España y en Galicia	26
Principales tipos de leñas	29
Pero, ¿existe la leña ideal?	31
Normalización de leñas	31
Ventajas e inconvenientes del uso de leña frente a los combustibles fósiles tradicionales	33
Bibliografía	35



## Prólogo

**G**alicia, reacia al cambio, desconfiada de él, pero implícitamente llena del necesario potencial para afrontarlo, es un lugar históricamente de compleja relación entre el ser humano y el medio, un mosaico de particular condición y personal carácter que necesariamente se ha transmitido al paisaje y a sus aprovechamientos.

Con una superficie de 29.574 km<sup>2</sup>, se levanta sobre el endemismo geográfico de sus rías, que hablan de un litoral de más de 1.200 km y de una amplia biodiversidad atlántica, mediterránea, insular, y peninsular. Cuenta con más de veinte mil asentamientos humanos posiblemente debidos en sus orígenes a la existencia de fuentes y manantiales en toda su geografía. El 90 % del territorio gallego se desenvuelve en unos rangos de altitud que van desde los 200 a los 600 m, lo que la convierten en un lugar idóneo para el cultivo de multitud de plantas y en particular de las que generan leñas, pues las condiciones anteriores llevan implícita una enorme capacidad para la producción de biomasa en sus montes.

Tanto las estrategias políticas de forestación nacionales como europeas han venido dejando de lado la producción de leñas invitando a la fabricación de pasta de papel, obviando nuestro pasado y sobre todo la potencialidad y la vocación de una tierra llena de roble, considerado como árbol patrio y científicamente conocido como *Quercus robur* L., o en su denominación gallega y popular más tradicional carballo. Esta Tierra Llena de lugares “para la reflexión”, una Comunidad Autónoma donde la leña de carballo es extraordinariamente abundante de forma natural, y donde tradicionalmente se viene demostrando la competitividad energética implícita de la misma, pero intencionadamente desdibujada por la aparente mejor economía de los combustibles fósiles, favorecidos, mimados y defendidos por encima de cualquier lógica sostenible desde una mirada ambiental y humanamente inteligente. Una correcta explotación de la leña de carballo debería de convertirla en uno de los pilares básicos de la tan pretendida fijación de población en el medio rural de esta Comunidad.

Aunque históricamente el carballo ha sido un árbol estratégico en el desarrollo de Galicia, en la actualidad muchos estudios desestiman considerar a las masas de *Quercus* como una fuente potencial para la producción sostenible y eficiente de biomasa residual [1]. Aún así, en este trabajo se buscarán justificaciones sólidas que respalden la implantación de un proceso de silvicultura eficaz aplicable a las masas de *Quercus* con

el doble objetivo de sanearlas a la vez que extraer de ellas biomasa forestal de calidad utilizable en procesos de producción energética a pequeña escala. Para conseguir estos dos objetivos debemos primero plantear la importancia actual del carballo en Galicia en su contexto más global y justificar así una inversión importante en labores silvícolas de ordenación y saneamiento de estas formaciones forestales, y en segundo lugar, y mediante un exhaustivo estudio de sus propiedades térmicas, su valor como generador de biomasa de calidad con fines energéticos.



Figura 1. *Kaer quez* era como los celtas llamaban al carballo. Aunque para los celtas el árbol sagrado era la encina, consideraban al carballo, o “árbol bello”, como un altar verde en el que los Dioses se manifestaban a aquellos que poseían “la sabiduría del roble” o Druidas.

Además, la posibilidad de explotar de forma racional y sostenible nuestro patrimonio forestal de forma local podría proporcionar las bases para la recuperación y el crecimiento económico sostenible de muchas zonas deprimidas de nuestra Comunidad manteniendo simplemente el capital natural de las mismas. Pero este proceso va necesariamente ligado a la implantación de una cultura silvícola inexistente en nuestra Comunidad que implemente una gestión integral, racional y sostenible de nuestro patrimonio forestal en general, y a las masas de *Quercus* en particular, y que choca con creencias tradicionales que postergaron a un papel secundario en la economía del sector forestal a estas masas de frondosas autóctonas. Todo esto ha llevado en los últimos años al abandono actual de las “carballeiras” y/o la sustitución de las mismas por especies de crecimiento más rápido y económicamente más rentables, obviando aspectos tan

importantes como la conservación y mejora del entorno en donde se desarrollan, la potenciación de la biodiversidad, y sus valores paisajísticos y recreativos.



Figura 2. Fraga de Quiroga (Lalín), también llamada carballeira de Quiroga, es un buen ejemplo de bosque caducifolio mixto conformado por castaños y robles principalmente.

Por otro lado, la ocupación del suelo y a la extracción de madera en Galicia ocupa sin género de dudas un papel destacado dentro del sector forestal español. Sin embargo cuando hablamos de su significación relativa en el proceso que transforma la madera, aparecen las primeras contradicciones. Así por ejemplo, produciendo casi la mitad de la madera del país y teniendo un mercado exportador pujante a países como Portugal, Marruecos o Italia, Galicia es la tercera comunidad importadora de maderas con una tipología que no se encuentra aquí. Hablamos de 337 millones de euros por detrás de Valencia y Cataluña, con (367 y 342) millones de euros respectivamente. Estos datos fueron presentados en el I Monográfico Forestal Nacional para el Sur de Europa-Galiforest 2010.

Este hecho recoge una realidad solamente entendible bajo la consideración de que las necesidades del mercado interno en todas las fases de transformación, no han sido contempladas en las políticas de ordenación y plantación forestal.

Por otro lado, la producción maderera se ha centrado en un tipo de madera concreto con el eucalipto como eje principal de una política forestal encaminada a la trituration, aserrado y chapa, complementada con el pino del país molido como materia prima para tablero, pero en un proceso industrial insuficiente, que implica que multitud de chapas y tableros no se terminan en las fábricas gallegas, al igual que la obtención de papel a partir de pasta.

Todo esto nos debería hacer reflexionar sobre un sector que a pesar de estar deslavazado e infrautilizado, genera el 3,5 % del PIB de Galicia y emplea de forma directa a más de 20.000 personas [2].

La superficie ocupada en Galicia por los bosques puros de frondosas, a excepción del eucalipto, es aproximadamente el 20 % de la superficie total arbolada, unas 192.369 ha. A estos datos es preciso añadir las mezclas de coníferas y frondosas, 178.230 ha, que representan un 18 % del total, con lo cual la superficie correspondiente a frondosas y sus mezclas es de 370.599 ha, lo que supone un 38 % de la superficie total arbolada [3]. A pesar de este porcentaje de superficie ocupada, su aportación a la producción de madera no llega al 2 % de la producción total. Por el contrario, pinos y eucaliptos, con una superficie de 605.477 ha, un 62 % del total de las masas arboladas, producen el 98 % de la madera cortada [3].

Existe una pregunta que resume de forma magistral todo cuanto estamos comentando "¿por qué Galicia es el territorio que más madera corta y posee la industria de la primera transformación más potente de España y, sin embargo su madera y sus productos no sirven para la segunda transformación, a pesar de localizarse en ella un número muy alto de este tipo de actividades? [2].

Tal vez esta pregunta, y otras muchas similares a este sector se puedan constatar de la misma manera, el abandono de las masas de *Quercus robur* se deben a un retroceso dirigido y a la falta de metodologías que posicionen su explotación en un lugar económicamente atractivo.

## Pero, ¿qué es el roble?

Roble es un término genérico usado para referirse a muchas de las especies frondosas autóctonas de árboles que forman parte del género *Quercus*. De forma más particular, este estudio se centrará en el *Quercus robur* L., especie forestal longeva, caduca, y de crecimiento lento, propia de climas templados oceánicos, como los propios de las cordilleras húmedas de las regiones más septentrionales de la vertiente atlántica europea, y que incluye a las especies europeas de este género de hojas blandas con borde sinuoso, y de madera dura, noble y muy apreciada en todos los sectores.

El carballo es un árbol que gusta de zonas de pendiente importante y fondos de vaguadas a baja o media altitud. Los suelos sobre los que se asientan son preferentemente profundos y dentro de una homogeneidad silíceo, están originados a

partir de granitos, granodioritas, esquistos y cuarcitas. Los suelos más adecuados para un buen desarrollo son de tipo pardo ácido, rankers criptopodzólicos, y aluviales, siendo los subgrupos más abundantes los subhúmicos e hidromórficos.

El *Quercus robur* L. vive en los pisos colino y montano con ombroclima subhúmedo a hiperhúmedo, requiere una precipitación media anual superior a 600 mm necesitando cierta cantidad de lluvia y humedad, tanto atmosférica como edáfica durante el verano [3]. De forma general al roble le gustan zonas con poca luz, temperaturas moderadas, y suelos moderadamente húmedos, ácidos y pobres en nitrógeno.



Figura 3. A la izquierda de la foto se puede ver un ejemplar adulto de carballo. En la parte derecha se pueden observar en detalle sus hojas y frutos, conocidos en Galicia como landras.

Es difícil encontrar carballeiras puras y habitualmente conviven con abedules, castaños, laureles, arces, fresnos, avellanos o cerezos silvestres dando lugar a una formación arbórea autóctona conocida como popularmente como “fraga”, y que se define científicamente como un bosque caducifolio pluriestratificado [4].

A mayores, en los últimos años, la sensibilidad climática de esta especie forestal la están convirtiendo en un bioindicador de referencia para la detección de los posibles efectos del cambio climático, cobrando así si cabe mayor relevancia. Esta característica, unida a la creciente demanda social por la conservación y recuperación de nuestros bosques de frondosas autóctonos, ha llevado a la Administración al tímido reconocimiento y establecimiento de los “espacios sensibles objeto de planificación especial” en el nuevo Plan Forestal de Galicia, y que suponen unas 340.000 ha, en las

cuales el carballo tiene una presencia muy significativa. Aún así Galicia, con apenas el 15 % de su superficie forestal protegida, presenta el porcentaje más bajo a nivel nacional, en donde por término medio el 39,4 % de toda la superficie forestal está sometida a medidas de protección.

Como dato a tener en cuenta, el *Quercus robur* L. ocupa actualmente en el territorio gallego, unas 17.048 ha, encontrándose en la mayor parte de Galicia, a excepción de algunas zonas de clima mediterráneo [3].

## Breve recorrido histórico por la presencia del roble en Galicia [5]

Galicia, situada en el Noroeste de la Península Ibérica, presenta como vegetación climática o potencial dominante a las formaciones de roble (*Quercus robur* L.).

Como se irá comentando a lo largo de este breve recorrido histórico, las reducciones más importantes del dominio del carballo tuvieron lugar en diferentes momentos de nuestra historia bajo motivaciones diferentes, siempre con un telón de fondo de corte socio-económico y utilitarista.

La presencia de esta especie forestal en territorio gallego data del Cretácico [6, 7], pero no es hasta el cuaternario, hace aproximadamente unos 20.000 años, cuando las diferentes fases de alternancia glacial-interglacial marcan el inicio de la aparición esporádica y posterior diversificación del roble en Galicia como consecuencia directa de la mejora en las condiciones climáticas globales. El comienzo del Holoceno, hace unos 10.000 años, está considerado como el periodo de recuperación de las formaciones boscosas en Galicia empezando a ser cada vez más frecuentes especies termófilas como el roble. A medida que discurre el Holoceno las condiciones de aumento de la humedad y la temperatura ayudan a la expansión y estabilización de las formaciones de roble como parte integrante del bosque atlántico [5]. Así, y desde hace más de nueve mil años, el género *Quercus* reina sobre la geografía gallega, exceptuando del comentario, aquellos lugares en donde la intervención humana ha pautado otras directrices al amparo de diferentes justificaciones socio-económicas. En cualquier caso, son los robles quienes se instalan sobre la casi totalidad del suelo gallego cuando los ecosistemas siguen su evolución natural.

Paralelamente a la mejora de las condiciones climáticas del Holoceno y a la expansión de las formaciones arbóreas, el ser humano empieza a ganar protagonismo como elemento modificador del medioambiente. Así, entre (7.700 y 7.300) BP durante

el Megalitismo, se sospecha que comienzan las labores de deforestación mediante la utilización de fuegos “controlados” para ganar espacios para las todavía incipientes y rudimentarias ganadería y agricultura [8, 9].

Los inicios de la agricultura en Galicia durante el Neolítico, hace apenas 5.000 años, coinciden con el aumento de la población y con el auge de diferentes actividades industriales que se sustentaban en el uso masivo de madera como materia prima básica, bien como combustible bien como elementos estructural. Así durante la Edad del Broce y posteriormente la Edad del Hierro los recursos vegetales eran usados en la elaboración de cerámica, la minería y la metalurgia.

Este uso masivo de madera para sustentar la industria neolítica se extiende en el tiempo y presenta un auge durante la cultura castreña y la romanización, entre 3.500 y 1.500 BP. Durante este periodo de dominación romana se dan enormes avances no sólo en agricultura y ganadería, sino también en infraestructuras como puentes, edificios o vías con el consiguiente aumento en la demanda de madera. En este periodo representado por la cultura castreña a finales de la Edad de Bronce (600-500) a.C., en donde el roble convivía, de la única forma realmente sostenible con el ser humano hasta la fecha, jugando un papel muy importante no sólo como combustible o elemento en la ingeniería, sino también en la alimentación animal y humana a través del consumo de bellotas, comenzó una reducción progresiva con ligeras y a todas luces insuficientes vacilaciones, de su área de distribución natural.



Figura 4. Recreación de la estructura de madera de un galeón.

Durante la Edad Antigua fue la civilización romana [10] quien probablemente comenzó el verdadero desequilibrio de la balanza, causado por una expansión del pastoreo, la agricultura, la metalurgia y la construcción naval que supusieron importantes consumos de leña [11].

Durante el final de la Época Antigua y el comienzo del Medievo el descenso poblacional ayuda a la disminución de la presión sobre los recursos forestales y esto propicia la paulatina recuperación de las superficies forestales [12-14].

A medida que nos acercamos al final del Medievo, siglos XII-XV, una actividad tan agresiva con las superficies arbóreas como la minería va perdiendo fuerza en favor de las ferrerías, la construcción naval y civil, actividades éstas que empiezan a tener al roble como materia prima básica. En este periodo debemos también destacar los procesos que limitan la recuperación de las superficies forestales de frondosas como son la tala para evitar emboscadas durante la reconquista, el auge del ganado ovino que dio lugar a la creación de la Mesta o el desarrollo de la Marina durante el reinado de los Reyes Católicos, y que usaba el roble como materia prima principal en la fabricación de navíos [15, 16]. Paralelamente al auge de estos nuevos procesos industriales consumidores a gran escala de madera de roble, Galicia empieza a ser considerada como un centro productor de madera para la exportación, especialmente a Sevilla y Lisboa en donde se utiliza para la construcción naval en los astilleros y la ingeniería civil y urbanística.

A partir del siglo XVI, inicios de la Edad moderna, como consecuencia del crecimiento poblacional, la expansión de la ganadería y la agricultura, el incremento de las ferrerías, la construcción naval y la exportación de madera, la aparición de las fábricas de curtido y el desarrollo de las ciudades con la consiguiente intensificación de la construcción, la deforestación se agudiza y extiende por todo el territorio gallego y a todas las superficies forestales por igual poniendo en serio peligro de supervivencia muchas de ellas. Como ejemplo a este proceso anárquico de deforestación que estaba poniendo en serio peligro la sostenibilidad de los bosques maderables, en 1.551 en Viveiro (Lugo) el Ayuntamiento elabora una ordenanza que disponía que “debido al desorden existente en la tala de montes y lo “disipados que estaban” nadie podría cortar en las “fraguas” y montes concejiles sin licencia de la justicia y regimiento, excepto en los meses de diciembre, enero y febrero, en los que no se precisaría licencia” [17].

Bajo este legado, se avanza en el período histórico llegando al siglo XVIII con un alto grado de deforestación, constatado en el Catastro de Ensenada, donde se afirma que en 1.752, únicamente el 5 % de la provincia de Pontevedra estaba cubierta de arbolado; de esta superficie el 76 % correspondía a robledales, el 10 % eran castaños, un 2 % pinares y un 12 % otras especies. En el resto de Galicia la superficie ocupada por los bosques era similar [5, 18].

La Desamortización de Mendizábal de 1.837 también propició que muchas masas arbóreas se transformasen en tierras de cultivo y pastos [19]. En esta época, acciones como la expansión del ferrocarril y el empleo del roble para la obtención de traviesas del ferrocarril [20] tuvieron a mayores un impacto muy negativo en las poblaciones de roble de Galicia, especialmente aquellas situadas en la montaña oriental lucense.



Figura 5. Traviesas de tren realizadas a partir de madera de carballo.

Ya en el siglo XIX, conocido como el siglo del pino por las intensas campañas de reforestación que se llevan a cabo con esta conífera, la dependencia de la madera en muchos sectores deja de ser la materia prima base y las superficies arboladas, especialmente las de roble, recuperan un poco su presencia. Aun así en este periodo se desarrollan las “ferrerías”, en las sierras Orientales de Lugo, que consumían unas 30.000 toneladas anuales de castaño y roble [11]. Como curiosidad, la parcela de la que se han extraído las muestras para la realización de este trabajo, se hallaba la ferraría de Loureiro, cuya existencia data de 1752, según los datos del Catastro de Ensenada. Entonces era su propietario Francisco Valcárcel, vecino de Monforte, y fundía al año 550 quintales de hierro. El mineral procedía en su mayor parte de las minas de A Veneira de

Roques. Dejó de fundir a finales del siglo XIX, siguiendo como fragua durante varios años más según se dice en “A producción tradicional do ferro en Galicia: as grandes ferrerías da provincia de Lugo” de Clodio González Pérez [21].

De esta forma se llega a mediados del XIX, a un período de cierta recuperación o latencia, propiciado por el abandono de muchas actividades tradicionales, entre ellas el aprovechamiento del roble para leña, pues gran porcentaje de la población, nutrió un desmesurado éxodo rural a las ciudades y nuevas fuentes de energía derivadas del aprovechamientos de los combustibles fósiles entraban en escena.

Por otro lado y muy en particular en el caso de Galicia, entraríamos de lleno en el período de las grandes repoblaciones mediante la fórmula del consorcio, con especies exóticas y de crecimiento rápido y con unas directrices políticas forestales que han convertido el territorio en un ocupación nada vocacional del terreno.

Desde el siglo XX hasta nuestros días, las formaciones de roble se han adaptado a convivir con especies foráneas como eucaliptos o frondosas. La introducción de estas especies nuevas tiene como objetivo surtir de materia prima a nuevos sectores industriales en expansión. Así tenemos el ejemplo del Eucalipto para alimentar la incipiente industria papelera y especies energéticas de crecimiento rápido para colmar las demandas de biocombustibles forestales.



Figura 6. Uno de los múltiples incendios que azotan Galicia todos los años.

A partir de 1.970 aproximadamente y hasta nuestros días, un nuevo varapalo a las masas forestales a través de los incendios, que vienen afectando en menor medida al roble que a otras especies más pirófitas, lo que en los últimos tiempos y en aras de la prevención, ha catapultado a las masas de *Quercus* a la categoría formaciones arbóreas a favorecer y proteger, pues actúan como verdaderos cortafuegos naturales, lo que unido al pulmón que representan y a la buena prensa que esta especie tiene entre la población, seguramente motivada por la histórica vinculación cultural existente a esta planta, están propiciando la recuperación de los efectivos de roble en nuestro territorio. Sigue pendiente, la aplicación de una silvicultura correcta que revalorice económicamente el producto final, así como una ampliación de usos y una segunda transformación de la madera obtenida, en industrias que tendrían que estarse desarrollando, pues dedicar esta especie únicamente a la conservación de hábitat en espacios naturales protegidos, parece desperdiciar un enorme potencial generador de riqueza.

La silvicultura tradicional de monte bajo que tenía como finalidad el aprovechamiento de leñas, con el consecuente legado nada ventajoso de una selección negativa de la planta, aunque hoy abandonada, ha creado un escenario económico, muy pesimista y precario económicamente hablando, lo que posiblemente justifica y refuerza la idea actual de relegar al roble a su finalidad medioambiental, apartándolo de su vocación productiva.

Habrá que desarrollar trabajos e investigaciones para conseguir un cambio de mentalidad y actitud, demostrando las posibilidades económicas reales de esta especie. Programas de mejora genética, nuevas políticas de fomento, nuevos mercados y precios mínimos en pie, así como usos alternativos a los actuales parecen la clave. Seguramente que los propietarios de las masas reciban no solo restricciones ambientales de conservación, sino retribuciones por el valor real de sus plantas cuando se destinan a un uso social y la aplicación de los métodos existentes de valoración de este tipo de masas, y no la argucia de escabullir la situación argumentando la dificultad de valorar este tipo de activos naturales perfectamente contradicha con iniciativas como el proyecto VANE de Valoración de los activos naturales de España, ayudarían también y agilizarían el proceso [22].



Figura 7. Leña de carballo apilada. Si se observa en detalle se pueden observar el duramen, la albura, cambium y la corteza en los leños.

Por lo tanto, en el futuro más inmediato la búsqueda de soluciones alternativas para la explotación racional y sostenible de las masas de *Quercus robur* L. y el encontrarles ese valor añadido extra son el mejor seguro para su conservación. Cualquier otra estrategia conservacionista ajena a la realidad social, política, económica y ambiental en la que estamos sumergidos y que no pase por poner en valor estas formaciones forestales, está abocada al fracaso. Cabe ilusionarse, aunque posiblemente en vacío, también con las nuevas políticas medioambientales de protección, y se dice en vacío también, porque se acompañan de políticas forestales que destinan Galicia a la producción de pasta, astilla o biomasa, ocupaciones lastimosas y de poca clase para la nobleza del género *Quercus*.

## Importancia global del carballo en la Galicia actual

De todos es bien sabida la dificultad de expresar la importancia que para una sociedad tecnológica puede tener un bien “intangible” como el medioambiente y los bienes y servicios que nos proporciona la naturaleza, y en nuestro caso particular, la superficie forestal. Para tratar de expresar este valor y cuantificarlo recurrimos a los preceptos marcados por el proyecto VANE [22], mediante el cual podemos valorar los activos naturales en euros por hectárea y año ( $\text{€ ha}^{-1} \text{año}^{-1}$ ), y los datos obtenidos tanto en el en el Cuarto Inventario Forestal Nacional (IFN4) [23] como en el Mapa Forestal de España 1:25.000 (MFE25) [24].

Después de una recopilación bibliográfica hemos tratado de recoger en las siguientes tablas la valoración económica de los bienes y servicios prestados por el medio natural, en nuestro caso particular las formaciones puras y mixtas de *Quercus robur* L. presentes en Galicia, expresados en unidades de flujo (€/año). Este proceso nos puede dar una visión más global y cuantificable permitiéndonos visualizar de forma más familiar y en términos monetarios, el bienestar que supone para la sociedad gallega el mantenimiento de las masas forestales de carballo en particular, y de su patrimonio forestal en general.

Así en la Tabla 1 se muestran los bienes y servicios prestados por las formaciones de *Quercus robur* L. presentes en Galicia y que contribuyen a la preservación de la vida y su diversidad, a la función de producción de bienes y servicios, a una función de sumidero de flujos residuales y a la función de producción de utilidad de los diferentes individuos. Estos parámetros son la base de las técnicas de economía ambiental para definir y reconocer las diferentes funciones que la biosfera presta en relación con la actividad económica de la sociedad. En la columna de la izquierda se presenta el método utilizado para realizar esta cuantificación.

Servicios considerados y métodos		
Grupo	Servicio ambiental	Método
Producción de alimentos y materias primas	Producción de madera	Renta a precios de mercado
	Producción de leña	Renta a precios de mercado
	Producción ganadera forestal	Renta a precios de mercado
Provisión de agua	Provisión de agua para uso agrícola	Método del valor residual
	Provisión de agua para uso industrial	Método del valor residual
	Provisión de agua para uso doméstico	Excedente del consumidor
	Provisión de agua para uso energético	Método de los costes evitados
Servicio recreativo	Servicio recreativo	Transferencia a partir de DAP
Caza deportiva	Caza	Renta a precios de mercado
Control de la erosión	Control de la erosión	Método de los costes evitados
Captura de carbono	Captura de carbono por el arbolado	Método de los costes evitados
	Captura de carbono por el matorral	Método de los costes evitados
Conservación diversidad biológica	Conservación de la diversidad biológica	Costes de conservación

Tabla 1. Bienes y servicios prestados por las formaciones de *Quercus robur* L. presentes en Galicia.

En la Tabla 2 se recogen los datos de superficie total de suelo productivo<sup>\*1</sup>, superficie ocupada por las formaciones de carballo<sup>\*2</sup> y la relación porcentual entre superficie ocupada por formaciones de *Quercus robur* L. frente a la superficie total de suelo productivo<sup>\*3</sup>.

	Superficie (ha) <sup>*1</sup>	Superficie <i>Quercus</i> (ha) <sup>*2</sup>	Superficie <i>Quercus</i> /total (%) <sup>*3</sup>
A Coruña	501.586,03	56.209,50	11,60
Lugo	656.842,50	170.274,50	25,92
Ourense	575.264,21	96.464,17	16,77
Pontevedra	296.988,29	50.017,22	16,84
Galicia	2.030.681,03	372.965,39	18,37

Tabla 2. Superficie total productiva (ha) e índices de ocupación (%).

En la Tabla 3 se muestra el valor de producción de servicios de la superficie ocupada por las formaciones de *Quercus robur* L.<sup>\*1</sup> y valor medio de producción de servicios de la superficie ocupada por las formaciones de *Quercus robur* L.<sup>\*2</sup> por provincias. Entre paréntesis se refleja el Valor medio de producción de servicios de las diferentes formaciones de suelo productivo. En color rojo se destacan los valores medio inferiores y en verde los superiores de producción de servicios de las formaciones de *Quercus robur* L.

Provincia de A Coruña		
Formación	Valor (€ año <sup>-1</sup> ) <sup>*1</sup>	Valor medio (€ ha <sup>-1</sup> año) <sup>*2</sup>
Robledales de <i>Quercus robur</i> y masas en mezcla con <i>Pinus pinaster</i> , <i>Eucalyptus</i> spp. y frondosas autóctonas		
Valor de producción de alimentos y materias primas por uso del suelo	6.571.038	(110,24) 120,47
Valor de provisión de agua por uso del suelo	28.354.059	(344,98) 505,24
Valor del servicio recreativo	294.789	(2,19) 4,79
Valor de la caza	31.023	(0,73) 0,56
Valor del control de la erosión	1.026.028	(12,93) 18,04
Valor de la captura de carbono	18.538.657	(322,87) 335,34
Valor de conservación de la diversidad biológica	1.053.330	(15,10) 18,47
<b>TOTAL</b>	<b>55.868.924</b>	<b>(809,04) 1002,91</b>

Provincia de Lugo		
Formación	Valor (€ año <sup>-1</sup> )* <sup>1</sup>	Valor medio (€ ha <sup>-1</sup> año)* <sup>2</sup>
Robledales de <i>Quercus robur</i> y mezclas con <i>Pinus pinaster</i> y frondosas autóctonas		
Valor de producción de alimentos y materias primas por uso del suelo	14.870.957	(109,95) <b>96,10</b>
Valor de provisión de agua por uso del suelo	22.765.097	(117,86) <b>133,36</b>
Valor del servicio recreativo	38.205	(0,55) <b>0,21</b>
Valor de la caza	101.702	(0,67) <b>0,60</b>
Valor del control de la erosión	6.216.893	(49,72) <b>35,08</b>
Valor de la captura de carbono	24.426.637	(169,29) <b>140,04</b>
Valor de conservación de la diversidad biológica	3.211.836	(18,88) <b>18,49</b>
<b>TOTAL</b>	<b>71.631.327</b>	<b>(466,93) 423,88</b>

Provincia de Ourense		
Formación	Valor (€ año <sup>-1</sup> )* <sup>1</sup>	Valor medio (€ ha <sup>-1</sup> año)* <sup>2</sup>
Robledales de <i>Quercus robur</i> y mezclas con <i>Pinus pinaster</i> y frondosas autóctonas		
Valor de producción de alimentos y materias primas por uso del suelo	4.918.182	(38,67) <b>51,43</b>
Valor de provisión de agua por uso del suelo	2.497.552	(21,83) <b>26,85</b>
Valor del servicio recreativo	49.060	(1,54) <b>0,49</b>
Valor de la caza	52.125	(0,58) <b>0,54</b>
Valor del control de la erosión	1.534.521	(16,84) <b>18,77</b>
Valor de la captura de carbono	11.972.059	(102,07) <b>126,62</b>
Valor de conservación de la diversidad biológica	1.582.661	(16,70) <b>16,53</b>
<b>TOTAL</b>	<b>22.606.160</b>	<b>(195,80) 241,23</b>

Provincia de Pontevedra		
Formación	Valor (€ año <sup>-1</sup> )* <sup>1</sup>	Valor medio (€ ha <sup>-1</sup> año)* <sup>2</sup>
Robledales de <i>Quercus robur</i> y mezclas con <i>Pinus pinaster</i> y <i>Eucalyptus</i> spp.		
Valor de producción de alimentos y materias primas por uso del suelo	5.830.996	(116,01) <b>144,38</b>
Valor de provisión de agua por uso del suelo	17.521.077	(279,59) <b>340,43</b>
Valor del servicio recreativo	54.878	(2,92) <b>1,14</b>
Valor de la caza	10.504	(0,48) <b>0,21</b>
Valor del control de la erosión	137.919	(2,42) <b>2,98</b>
Valor de la captura de carbono	14.443.827	(284,59) <b>320,88</b>
Valor de conservación de la diversidad biológica	1.016.341	(16,62) <b>19,16</b>
<b>TOTAL</b>	<b>39.015.542</b>	<b>(702,64) 829,18</b>

Tabla 3. Valores de producción (€) de las masas de *Quercus*.

La Tabla 4 es un resumen en donde se recoge el valor de producción de servicios de la superficie total de suelo productivo<sup>1</sup>, valor de producción de servicios de las formaciones de *Quercus robur* L.<sup>2</sup>, y relación porcentual entre el Valor de producción

de servicios de las formaciones de *Quercus robur* L. frente al Valor de producción de servicios de la superficie total de suelo productivo<sup>\*3</sup>.

	Millones de € año <sup>-1*1</sup>	Millones de € año <sup>-1 Quercus*2</sup>	Valor Quercus total <sup>-1 (%)</sup> *3
A Coruña	498.640.000	55.868.924	11,40
Lugo	313.020.000	71.631.327	22,88
Ourense	102.500.000	22.606.160	22,05
Pontevedra	217.600.000	39.015.542	17,93
Galicia	1.131.760.000	189.121.953	16,71

Tabla 4. Valores de producción totales (€) de las masas de *Quercus*.

De forma general, hacer una reflexión sobre el montante económico anual estimado que las masas de *Quercus* aportan a la economía gallega en forma de servicios, y que se acerca a los 190 millones de €. En este dato se deberían incluir parámetros como que:

- La mayor parte de las formaciones de *Quercus* no son puras.
- La mayor parte de estas formaciones están reconocidas como “espacios sensibles objeto de planificación especial” debido a su interés ambiental y falta de gestión y de cuidados tradicional.
- A partir de estas formaciones se pueden extraer de forma directa o indirecta diferentes productos como madera para construcción, muebles o combustible, o materias primas para la alimentación animal y humana.

Por lo tanto, la reflexión sería que esta cuantificación se quedaría todavía pequeña mostrando todavía más la importancia de estas masas forestales autóctonas.

Por otra banda no se debe olvidar que en procesos de estudio como los recogidos en las tablas anteriores no sólo se cuantifican directamente los beneficios aportados por los bienes y servicios que nos proporciona la naturaleza, sino también, y de manera indirecta y preventiva, aquellos relacionados con actividades negligentes estableciendo un marco común de responsabilidad con el fin de prevenir y reparar los daños causados al medioambiente, y que se recoge en nuestro ordenamiento jurídico a través de la Ley 26/2007, de 23 de octubre, de valoración de la Responsabilidad Medioambiental y que emana de la Directiva 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de Abril de 2004, sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y reparación de daños medioambientales [25].



Figura 8. La biodiversidad en Galicia depende de manera muy importante de unas masas forestales sanas.

Fuera de este escenario económico siempre importante pero frío, el medio ambiente en general y la naturaleza en particular, necesitan para su protección y conservación de acciones coordinadas y globales. A continuación, y de forma resumida, se presentan algunos de los principales actos legislativos y Convenios Internacionales suscritos por España y que reiteradamente se incumplen o se cumplen de manera poco comprometida [26]:

- BOE número 235, de 1 de octubre de 1986. Instrumento de ratificación del Convenio relativo a la conservación de la vida silvestre y del medio natural en Europa, hecho en Berna el 19 de septiembre de 1979 [27].

- BOE número 36, de 11 de febrero de 1997. Instrumento de ratificación del Convenio de las Naciones Unidas para la lucha contra la desertificación, 1994, hecho en París el 17 de Junio de 1994 [28].

- Ley 10/2006, de 28 de Abril, por la que se modifica la Ley 43/2003, de 21 de noviembre, de Montes. Actualización del régimen jurídico regulador de los espacios forestales de acuerdo con la nueva concepción del medio ambiente consagrada por la Constitución Española y con los principios de gestión forestal sostenibles que deben informar la ordenación y conservación de los montes españoles [29].

- Ley 42/2007, de 13 de diciembre, del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad. Garantizar por parte de las Administraciones competentes que la gestión de los recursos

naturales se produzca con los mayores beneficios para las generaciones actuales, sin merma de su potencialidad para satisfacer las necesidades y aspiraciones de las generaciones futuras, velando por el mantenimiento y conservación del patrimonio, la biodiversidad y los recursos naturales existentes en todo el territorio nacional, con independencia de su titularidad o régimen jurídico, atendiendo a su ordenado aprovechamiento y a la restauración de sus recursos renovables [30].

- Ley 45/2007, de 13 de diciembre, para el desarrollo sostenible del medio rural. Acciones y medidas multisectoriales y medioambientales que se puedan aplicar a la nueva realidad de un medio rural económicamente cada vez más diversificado y al que se le reconoce una importante multifuncionalidad para la sociedad en su conjunto [31].

- Orden ARM/2444/2008, de 12 de Agosto. Aprobación del Programa de Acción Nacional de Lucha contra la Desertificación en cumplimiento de la Convención de Naciones Unidas de Lucha contra la Desertificación [32].

- Reglamento (UE) número 995/2010 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de octubre de 2010. Establecimiento de las obligaciones de los agentes que comercializan madera y productos de la madera [33].

- Ley 2/2011, de 4 de Marzo de Economía Sostenible. Se marca la estrategia de recuperación de la economía española promoviendo la renovación del modelo productivo que se puso en marcha en 2004 [34].

- Real Decreto 1274/2011, que aprueba el Plan Estratégico del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad 2011-2017. Reafirmar el Convenio de Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica, reconociendo que la conservación de la biodiversidad es un interés común de toda la humanidad y tiene una importancia crítica para satisfacer sus necesidades básicas. Que la biodiversidad está estrechamente ligada al desarrollo, la salud y el bienestar de las personas y constituye una de las bases del desarrollo social y económico. Y de este modo, se puede afirmar que la biodiversidad es fundamental para la existencia del ser humano en la Tierra y que constituye un componente clave de la sostenibilidad [35].

- Ley 21/2013, de 9 de diciembre, de evaluación ambiental. Mediante la cual se promueve la evaluación de proyectos como garantía para una adecuada prevención de los impactos ambientales concretos que se puedan generar, al tiempo que establece mecanismos eficaces de corrección o compensación [36].

- Real Decreto 416/2014, de 6 de Junio, por el que se aprueba el Plan sectorial de turismo de naturaleza y biodiversidad 2014-2020. Promoción de la utilización ordenada de los recursos para garantizar el aprovechamiento sostenible del patrimonio natural y la integración de los requerimientos de la conservación, uso sostenible, mejora y restauración del patrimonio natural y la biodiversidad en las políticas sectoriales. En este sentido, el Plan estratégico del patrimonio natural y de la biodiversidad 2011-2017, aprobado mediante el Real Decreto 1274/2011, de 16 de septiembre, profundiza y consolida el concepto de la integración sectorial como vía para avanzar en su conservación y uso sostenible. La tercera meta de este Plan estratégico busca fomentar la integración de la biodiversidad en las políticas sectoriales, y tiene vinculado un objetivo concreto dedicado a promover la sostenibilidad del turismo de naturaleza [37].

## La biomasa

Desde hace aproximadamente 1.500.000 años, cuando se cree que el hombre aprende a “manejar” el fuego, la biomasa de origen forestal ha constituido una fuente tradicional de energía para la humanidad. En los últimos años, y coincidiendo con la crisis económica que estamos viviendo, la biomasa forestal, lejos de ser una materia prima “postergada”, ha pasado a cubrir las necesidades más básicas para una cuarta parte de la población mundial, y se posiciona como un referente futuro de interés en el campo de las energía renovables tanto por la preocupación social que el uso masivo de los combustibles fósiles está generando sobre el clima, como por la reducción de la dependencia energética que el uso de este tipo de fuentes combustibles podría suponer a nivel global. Como reseña que permita reflexionar sobre este planteamiento, decir que en Galicia la dependencia energética exterior alcanza el 83,6 %, dato que pone de manifiesto lo insostenible del modelo energético actual, y que con la introducción racional de la biomasa en la oferta energética se podría ir corrigiendo ayudando a una mejor diversificación de las fuentes de energía primaria, una mayor racionalización y eficiencia en el consumo energético global, y una concienciación global en el respeto al medio ambiente.

## Pero ¿qué es realmente la biomasa forestal?

Hoy en día el sector energético entiende por biomasa la fracción biodegradable de los productos, desechos y residuos de origen biológico procedentes de actividades agrarias (incluidas las sustancias de origen vegetal y de origen animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, incluidas la pesca y la acuicultura, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales (directiva 2009/28/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 23 de Abril de 2009) [38]. Quedan fuera de esta definición los combustibles fósiles y las materias orgánicas derivadas de éstos, como los plásticos y la mayoría de los productos sintéticos, ya que, aunque aquéllos tuvieron un origen biológico, su formación tuvo lugar en tiempos remotos durante un periodo de tiempo considerable. Por lo tanto para considerar cualquier material como biomasa debe englobar los términos de orgánico y renovable, denominándose así biomasa forestal como aquella generada en los montes a partir de todos los componentes arbóreos, excepto tocón y raíces, en una superficie dada [39].



Figura 9. Diferentes presentaciones de la biomasa forestal. De izquierdad a derecha: leña, astilla, pellets y briquetas.

Así, los países de la Unión Europea han incrementado en los últimos años el uso de los residuos de la biomasa con fines energéticos con la doble intención de cumplir los objetivos energéticos establecidos y ratificados en el Protocolo de Kioto relacionados con las limitaciones sobre la emisión de gases de efecto invernadero (GEI) y con la reducción de la dependencia energética foránea. Dentro de esta nueva política energética europea destacar la Directiva 2009/28/CE del Parlamento europeo y del Consejo, de 23 de Abril, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables, y que establece que cada Estado miembro elaborará un Plan de Acción Nacional en materia de Energías Renovables (PANER) para conseguir los objetivos nacionales fijados en la propia Directiva. En España el PANER 2011-2020 [40] propone el

uso de biomasa para la producción de electricidad como la alternativa más ambiciosa dentro de los planes de desarrollo de este recurso en la UE.

Aún en las sociedades más desarrolladas, en donde el uso de biomasa es una fuente de energía secundaria, el tratamiento silvícola de las masas forestales cumple un doble objetivo, primero y desde el punto de vista económico abre la posibilidad de producir materia prima de alta calidad tanto para la industria de la transformación de la madera como para el sector de las energías renovables, y segundo, desde el punto de vista social y ambiental, el mantenimiento de superficies forestales saneadas genera enormes beneficios sociales y ambientales. De forma más concreta podemos decir que:

- Extender la utilización de biomasa forestal como fuente de energía primaria en lugar de los combustibles fósiles usados tradicionalmente genera ventajas ambientales directas como la reducción de las emisiones de óxidos de azufre y partículas, reducción de las emisiones mínimas de contaminantes como el CO, HC, o NOx, y mejora del balance de emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera.
- Además, las labores silvícolas centradas en la reordenación y conservación de formaciones forestales favorecen la retirada de los residuos forestales ayudando a la prevención de incendios forestales y mejorando las labores de extinción de los mismos, y en caso de accidente ambiental se consigue una mejor regeneración de la masa forestal mejorando el crecimiento del arbolado y de la calidad del mismo.

Pero estas posibilidades deben ser analizadas en un contexto más general en el que aparecen una serie de inconvenientes que deber ser tenidos en cuenta a la hora de plantearse la utilización de la biomasa como materia prima para la generación energética. Así podemos destacar su baja densidad como recurso energético primario, las complejas labores de logística para su manejo y extracción, y los turnos de corta que aseguren la sostenibilidad del proceso y que muchas veces son dependientes de variables poco controlables como la climatología, plagas o incendios forestales.

Los aspectos clave a tener en cuenta a la hora de diseñar un proceso de explotación energético utilizando como materia prima la biomasa forestal son:

- Aspectos medioambientales relacionados con el mantenimiento de la biodiversidad y las funciones recreativas y ambientales que generan las formaciones forestales para la sociedad.
- Aspectos productivos y de explotación que definen la sostenibilidad del proceso. Entre ellos destacar la cantidad de biomasa potencialmente extraíble

depende del tipo de superficie forestal, especialmente edad, tipo de especies presentes y condicionantes climatológicos y medioambientales.

- Y aspectos económicos y responsables de la viabilidad del proceso. El principal obstáculo con el que se encuentran las iniciativas relacionadas con la industria energética de la biomasa forestal son los elevados costes de su recolección debido a lo disperso de la localización de la materia prima y a las dificultades logísticas y operativas del trabajo de extracción y recolección en los montes. En zonas como Galicia, en donde su compleja orografía dificulta aún más estos procesos, los costes relacionados con la extracción, transporte y procesado de la biomasa se mueven entre los (0,03 y 0,06) € kg<sup>-1</sup>. Actualmente, se considera como umbral de viabilidad razonable para la generación eléctrica los 0,02 € kg<sup>-1</sup> aproximadamente. Sin embargo, otras cuestiones más globales como cuestiones de tipo ambiental global, la mejora en las labores de prevención y extinción de incendios forestales, colaborar en la mejora de la autosuficiencia energética y la generación de empleo incrementando la actividad económica y el bienestar de las zonas rurales gallegas, son aspectos a valorar y que deberían ser suficientes para lograr el apoyo público necesario e impulsar definitivamente el uso local de la biomasa forestal como fuente de energía renovable primaria adicional.

## Galicia y la madera de *Quercus*: aprovechamiento de la leña

La historia de la utilización de la leña viene vinculada y perfectamente pareja a la historia de la evolución de la propia especie humana, y salvando un par de siglos en los que los combustibles fósiles han desplazado su uso como principal fuente de energía para el calor de los hogares, siempre esta encomienda le ha correspondido en exclusiva. Además los nuevos tiempos apuntan a que la leña ha comenzado a ganar terreno otra vez y que en un futuro próximo, coliderará el abastecimiento energético de las calderas.

Según la Real Academia Española, leña es la parte de los árboles y matas que, cortada y hecha trozos, se emplea como combustible.

En Galicia existe toda una cultura alrededor de la leña de carballo, siendo los ejemplares mejores, trasmochados (descabezados) periódicamente, con la finalidad precisamente de que en su rebrote generasen nuevas leñas. Este tipo de

aprovechamiento denominado monte bajo, actualmente en desuso y tremendamente discutido, además de describir la importancia que para esta Comunidad ha tenido el recurso, y sin obviar la selección genética negativa que supuso este tipo de tratamiento cultural, puede igualmente ser una de las pistas a la hora de definir una alternativa silvícola actualizada que revalorice definitivamente un producto ya en alza.

Si hacemos un recorrido por la situación actual del sector de producción de leñas en España, habría que comenzar asumiendo un punto de partida un tanto caótico, en un mercado deslavazado y obsoleto en gran medida, pero con un enorme potencial de futuro, en esta apuesta generalizada por la sustitución de los combustibles fósiles, por motivaciones ya no sólo ambientales, si no también económicas, que llegan inexorablemente impuestas por la crisis de un sistema económico en plena transformación. Un mercado donde se trabaja con un amplio abanico de sistemas de aprovechamiento y un elevado número de especies forestales, seguramente motivado por la particular situación geográfica de la Península, su variada orografía y sus distintas regiones bioclimáticas, que hacen de ella, el destino del ochenta por ciento de la diversidad del viejo continente.

La utilización de la leña como combustible tiene la ventaja de ser un hecho renovable y limpio, pues el dióxido de carbono que se emite a la atmósfera durante la combustión, al combinarse, mediante la acción del calor, sus tres componentes principales, carbono, hidrógeno y oxígeno, es el mismo que extrae del ambiente y fija la madera durante su crecimiento. De este modo, se mantiene un equilibrio natural que sí se altera con el empleo de combustibles fósiles, ya que incorporan CO<sub>2</sub> que no estaba en superficie. Se puede señalar que el empleo de un kilogramo de leña evita la emisión de 1,34 kg de CO<sub>2</sub> a la atmósfera y añadir a lo anterior, que produce menos emisiones contaminantes que el resto de combustibles debido a su bajo contenido en azufre y nitrógeno.

Otra ventaja añadida del uso de madera en forma de leña tiene relación con su baja conductividad térmica, y que hace que la temperatura en las zonas interiores a la zona en combustión sea prácticamente la temperatura ambiente. Dicho de otro modo, sólo se va viendo afectada por el fuego aquella parte en ignición, resultando además, que esas mismas partes ya quemadas actúan de fuera adentro como una protección contra el fuego, ya que la carbonización que se produce impide por una lado la salida de gases y por el otro, la penetración del calor y del oxígeno necesario para seguir ardiendo. Como además la dilatación térmica que sufre durante el proceso de quemado es

insignificante, la convierten en un material idóneo estructuralmente hablando. Si además tenemos en cuenta que interactúa con el entorno (cediendo y captando humedad), se puede considerar un material “vivo”, que se presenta por eso mucho más confortable que otras alternativas como el hormigón o el acero. Esta propiedad haría que ante un incendio, una estructura de madera tardará más en colapsar que una de otro tipo y ya que los árboles al crecer se ven fundamentalmente e históricamente sometidos a la pequeña compresión de su peso propio y a enorme flexión del viento, la madera está fundamentalmente preparada para soportar flexión, resultando las cubiertas, los lugares más adecuados para su utilización, por esta triple capacidad de aguante en caso de incendio, excelente comportamiento a flexión respecto a otros esfuerzos y mayor grado de confort que otros materiales.

Por otro lado es una materia prima que existe en España, y muy particularmente en Galicia, de forma natural y abundante. Quizás el mayor problema de este tipo de fuente energética radique a día de hoy, en los elevados costes que supone su aprovechamiento en relación a los bajos ingresos que genera y en la poca tradición silvícola para producir madera y leña de calidad, en el primer caso por los turnos elevados que implica y en el segundo por no resultar en nuestro tiempo económicamente viable, ni los trabajos en monte, ni un correcto secado de la misma. Pero si se consiguiese un modelo de aprovechamiento eficaz, pues el recurso energéticamente lo es, España y en particular Galicia, serían lugares que podrían tener una fuerte oferta de este tipo de producto, presentándose probablemente entonces el uso de este recurso, como una nueva alternativa económica real y un nuevo aliciente a la hora de fijar población en el medio rural. Considerando que 4 kg de madera equivalen energéticamente a 1 l de gasóleo y atendiendo a sus respectivos valores de mercado, el uso de la madera como combustible, supondría un ahorro de entre el 40 y el 50 % anual en una vivienda unifamiliar que estuviese empleando unos 1.200 l de gasóleo al año. La eficiencia energética de la naturaleza del recurso parece pues suficientemente testada.

## La producción de leñas en España y en Galicia

Si observamos los datos de la producción de leñas por Comunidades Autónomas recogidos en la Figura 10, vemos que Galicia con 250.000 toneladas anuales, casi un 30 % del total de leña generada en España, lidera ampliamente el sector y que en el resto de las comunidades de clima atlántico del país, curiosamente, el aprovechamiento

carece prácticamente de interés en nuestros días, así que Galicia, podría abanderar este mercado incipiente y crear una riqueza muy necesaria para el entorno [41].

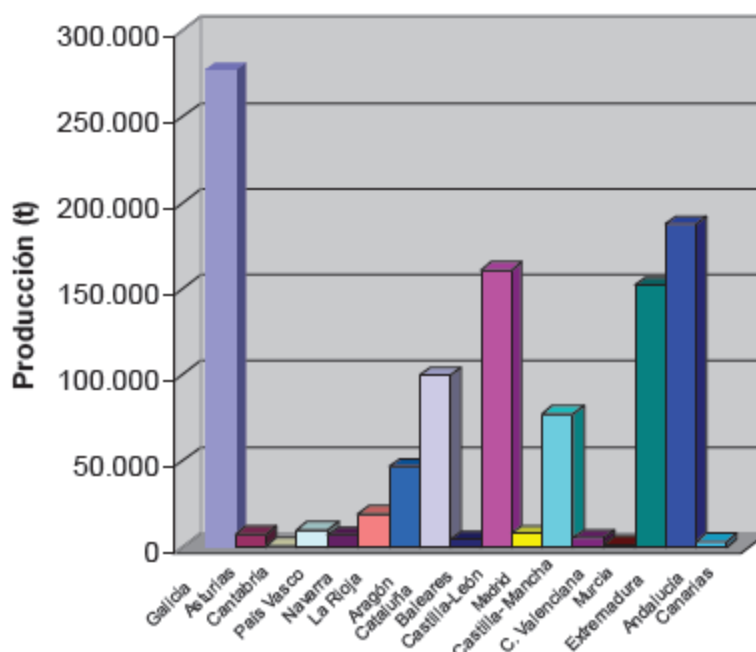


Figura 10. Producción de leña por Comunidades Autónomas [41].

Por otro lado según el "CIS Madeira", después de encuestar telefónicamente a 60 empresas y de visitar 29 de éstas, las dedicadas exclusivamente a la leña representan el 15 % del total de las que incluyen este tipo de producción en su actividad (Figura 11), siendo lo más habitual, negocios que procesan menos de quinientas toneladas, o entre quinientas y mil, hasta un máximo de tres mil quinientas, por encima del cual, apenas hay actividad empresarial (Figura 12).

De lo anterior se deriva que la leña es fundamentalmente una actividad complementaria dentro de la empresa (en muchos casos una forma de eliminar subproductos forestales o del aserrado) y que el futuro debería dirigirse hacia la especialización del sector.

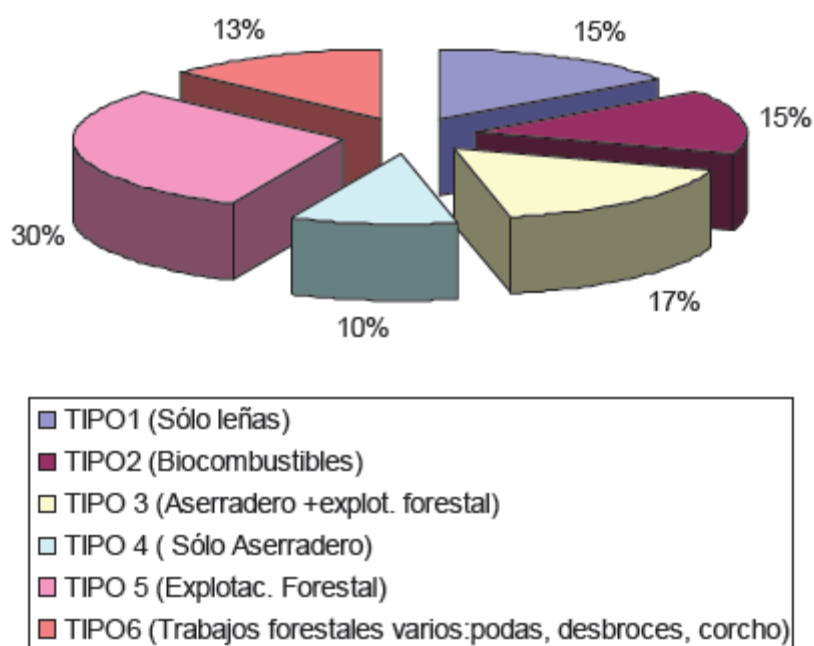


Figura 11. Dedicación de las empresas en el sector forestal [42].

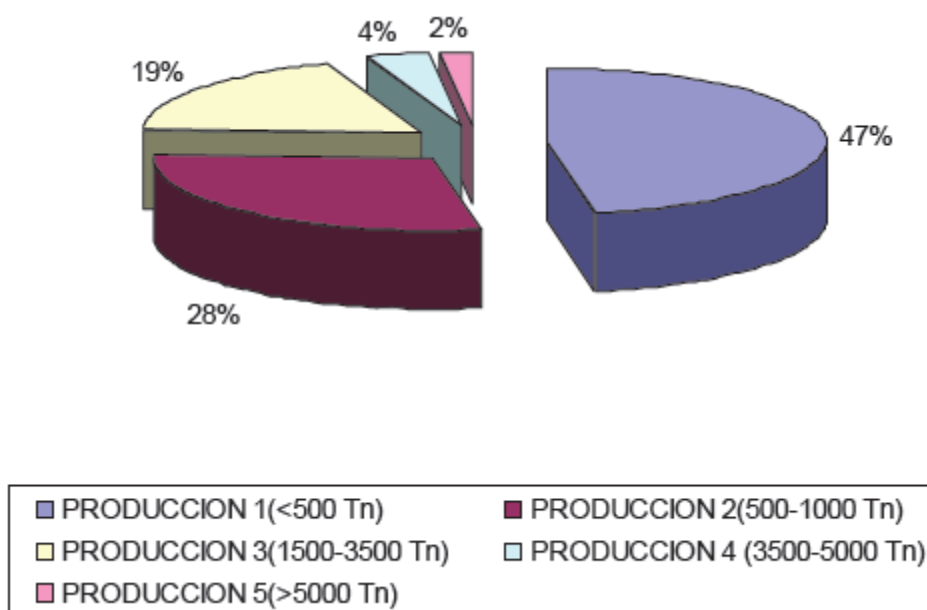


Figura 12. Volúmenes de producción [41].

A la citada característica de pequeña producción de nuestras empresas de leñas, habrá que añadir el escaso grado de mecanización, la inexistencia de personal especializado, los escasos controles de calidad, la poca transparencia del sector, el

nivel poco exigente de los clientes, los canales de distribución y marketing obsoletos y la variopinta calidad de la materia prima.

Ante este panorama, un posible modelo de futuro apuntaría como se ha dicho, a la especialización, pero también a la automatización de los procesos productivos y a la búsqueda de nuevos canales de distribución y marketing, embebidos en las nuevas tecnologías de la comunicación y de la información y todo ello, bajo la oferta de un producto optimizado y mejorado, para cuya definición, trabaja esta Tesis.

La casuística descrita para España es extensible y fiel reflejo de la situación concreta de una Galicia, que por estadística, abandera la precaria utilización del recurso.

## Principales tipos de leñas

Las leñas se pueden clasificar en tres grandes grupos en función de su comportamiento durante el proceso de combustión en:

- Leñas blandas, bajas en calorías y generan combustiones rápidas.
- Leñas duras, altas en calorías, combustiones duraderas y producen más calor.
- Leñas resinosas.

En la Figura 13 podemos ver un esquema sencillo en donde se clasifican diferentes especies forestales en función del tipo de leña que generan y las principales características de las mismas.

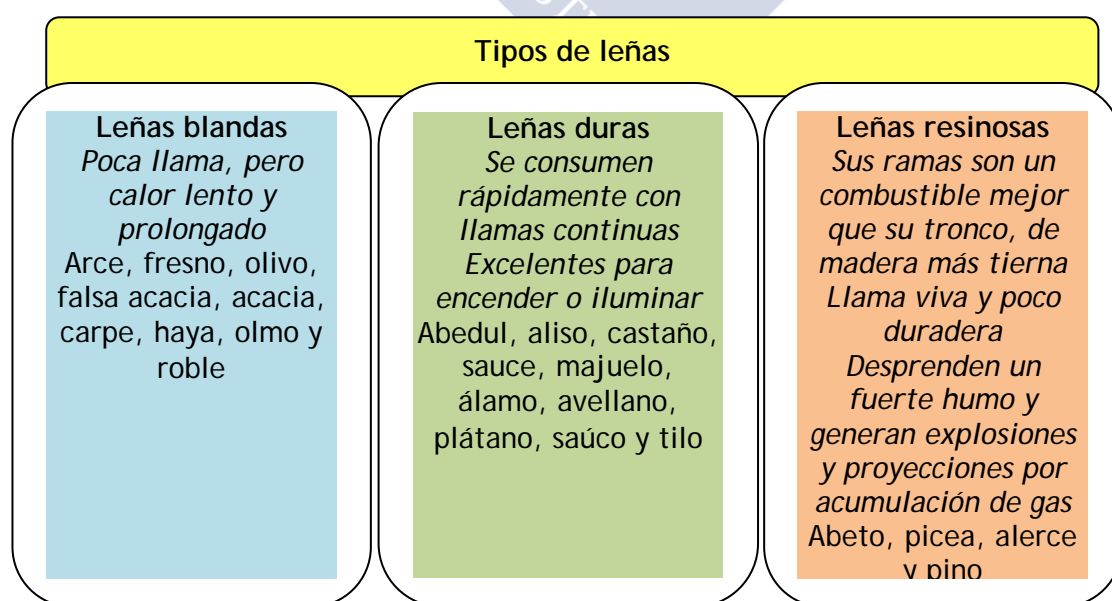


Figura 13. Tipos de leña.

Como curiosidades que complementan la Figura anterior comentar que:

- La madera de coníferas no deja salir fácilmente el gas que se forma en el interior del leño. Por lo tanto pueden producirse explosiones y proyección de astillas ardientes a varios metros, con mayor probabilidad que con la leña de frondosas, resultando peligroso en chimeneas abiertas. En general, cuanto más virulento sea el fuego y más calor se genere en menos tiempo, mayor riesgo también de acumulación de gas.
- En el sur de España, se emplea fundamentalmente la leña de encina y en menor medida el olivo, mientras que en el norte, el roble y la haya son las maderas más consumidas.
- De un olor muy agradable, gran durabilidad y elevado poder calorífico, el olivo y el naranjo son combustibles muy demandados en la zona del Levante español.
- El abedul arde bien y rápido. Se emplea para encender e iluminar y por el atractivo de su corteza blanca.
- Haya, arce, fresno y árboles frutales se emplean principalmente porque calientan mucho. De secado rápido y de fácil obtención. Hay que guardarlas bajo algún abrigo inmediatamente después de secadas y rajadas, porque se pudren muy pronto y pierden su poder calorífico. Son fáciles de prender y ofrecen lumbres dinámicas y de llamas muy luminosas.
- Roble, carpe y cerezo. Se consumen lentamente, se ponen negros y se carbonizan. Son excelentes productores tanto de leña como de carbón de leña. Es un excelente combustible, pero, al contrario que las demás maderas, tienen que estar sin cubrir dos años para que la lluvia arrastre y elimine los taninos que contiene; después, se coloca bajo algún tipo de abrigo otro año o dos antes de utilizarla. La proporción de albura (que arde con demasiada rapidez) en las ramitas pequeñas es importante, pero aparte de eso, el roble es una leña de combustión lenta, que proporciona un fuego tranquilo y buenas brasas. Ideal para hacer barbacoas y para su utilización en la modalidad de fuego continuo.
- Tilo, castaño y álamos producen llamas bellas y armoniosas, pero vivas y pocas brasas. Arden rápidamente y lo mejor es utilizarlas para avivar el fuego.
- Los álamos y chopos producen cenizas abundantes y volátiles.
- La robinia o falsa acacia y la acacia producen importantes proyecciones de chispas durante su combustión.

## Pero, ¿existe la leña ideal?

Al aire libre casi cualquier leña seca arde bien, pero cuando se trata de leña para fuegos cerrados, se elegirán maderas duras y con un secado de más de 8 meses (lo ideal 2 años). No se emplearán maderas que anteriormente hayan sido sometidas a tratamientos químicos (traviesas del ferrocarril y aglomerados), porque ensucian los tiros y pueden producir emanaciones tóxicas.

La leña de resinosas aunque desprenden mucho calor, no se empleará preferentemente, ya que se consume con rapidez, proyecta brasas, y las resinas que contiene ensucian las chimeneas.

La madera independientemente del tipo, ha de estar bien seca. Para ello han de hacerse unas hendiduras en los troncos grandes (favorecen el secado) y se cubrirá la leña al resguardo de la lluvia, pero manteniendo una correcta ventilación, durante un período mínimo de dos años después de apearla. Cuanto más se troceen los leños en sentido axial, mayor superficie de madera quedará expuesta y antes secarán.

La madera bien seca es más ligera y al golpearla tendrá un sonido más claro. La albura (tras la corteza, la parte que primero entre en ignición y quien mantiene buena parte de la combustión) puede llegar a contener más del 75 % de agua. Un mayor contenido de agua, influye en el aumento de humos y en la disminución de la llama, ya que parte del calor se emplea en evaporar precisamente la humedad

Por último añadir que en el caso particular de la encina y el roble, ha de dejarse la leña un año al aire libre para que pierda el tanino y a continuación guardarla varios años a cubierto.

## Normalización de leñas

La leña es un tipo de biomasa y de su Normalización se encarga en Europa el CEN (Comité Europeo de Normalización-Comité Técnico 335 Solid Bifuels) [43] y en España AENOR (Asociación Española de Certificación y Normalización-Comité Técnico 164 Combustibles Sólidos) [44].

Los parámetros de calidad de las leñas (Tabla 5) se establecen con la CEN/EN 14961-1:2010 [45] de Especificaciones por un lado normativas (origen, forma comercializada, dimensiones L y D, humedad y tipo de madera) y por otro informativas (densidad energética, volumen m<sup>3</sup> sólido, a granel o suelto, proporción de trozas

partidas, superficie de corte y presencia de podredumbres). Las Normas europeas son de obligado cumplimiento. Las encarga la Comisión Europea y han sido elaboradas mayoritariamente por países del norte de Europa, sin apenas participación española:

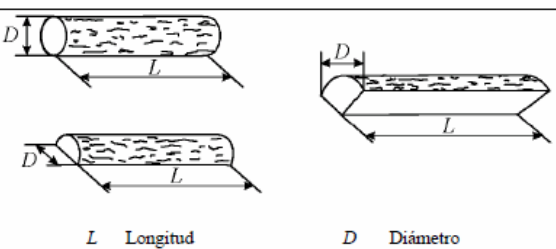
Tabla maestra			
<b>Origen:</b> De acuerdo con el apartado 6.1 y con la tabla 1		Biomasa leñosa (1.1) Indicar las especies leñosas	
<b>Forma comercializada</b>		Troncos de madera, leña	
Normativa	<b>Dimensiones (cm)</b>		
	<b>Longitud (L)</b> (longitud máxima de un solo corte) cm		
	L 20-	< 20 cm	 <p style="text-align: center;">L Longitud                      D Diámetro</p> <p style="text-align: center;"><b>Figura 4 – Ejemplos</b></p>
	L 20	20 cm ± 2 cm	
	L 25	25 cm ± 2 cm	
	L 30	30 cm ± 2 cm	
	L 33	33 cm ± 2 cm	
	L 40	40 cm ± 2 cm	
	L 50	50 cm ± 4 cm	
	L 100	100 cm ± 5 cm	
L 100+	indicar el valor máximo		
<b>Diámetro (D)</b> (diámetro máximo de un solo corte), cm			
D 2-	$D < 2$ cm madera para encendido (astillas)		
D 10	$2 \text{ cm} \leq D \leq 10$ cm		
D 12	$4 \text{ cm} \leq D \leq 12$ cm		
D 15	$10 \text{ cm} \leq D \leq 15$ cm		
D 20	$10 \text{ cm} \leq D \leq 20$ cm		
D 25	$10 \text{ cm} \leq D \leq 25$ cm		
D 35	$20 \text{ cm} \leq D \leq 35$ cm		
D 35+	$D > 35$ cm, indicar el valor máximo		
<b>Humedad, M</b> (% en masa según se recibe) CEN/TS 15149-1, CEN/TS 15149-2			
M10	$\leq 10\%$		
M15	$\leq 15\%$		
M20	$\leq 20\%$		
M25	$\leq 25\%$		
M30	$\leq 30\%$		
M35	$\leq 35\%$		
M40	$\leq 40\%$		
M45	$\leq 45\%$		
M55	$\leq 55\%$		
M55+	$> 55\%$ (indicar el valor máximo)		
<b>Volumen o peso, m<sup>3</sup> apilados o sueltos o kg según se recibe</b>		En la venta al por menor, se indica la unidad de medida de volumen y/o de masa que se utiliza (m <sup>3</sup> apilados, m <sup>3</sup> suelto, kg y/o masa de troncos de madera embalados)	
Informativa	<b>Densidad energética, E<sup>b</sup></b> (kWh/kg o kWh/m <sup>3</sup> suelto o apilado)		Se recomienda indicarla en la venta al por menor
	<b>Proporción en volumen de troncos partidos</b>		No partidos (= principalmente rollizos) Partido: más del 85% en volumen de troncos partidos Mezcla: mezcla de troncos partidos y rollizos
	<b>Superficie de corte</b>		Se señala si la superficie de corte de las trozas es lisa <sup>a</sup> y regular <sup>a</sup> o si los extremos de los troncos son irregulares
	<b>Moho y pudrición</b>		Se debería indicar si existe una cantidad significativa de moho y pudrición (más del 10% en masa)  En caso de duda, se podría utilizar la medida de la densidad de partícula o el poder calorífico inferior como indicador
<sup>a</sup> La utilización de motosierra se considera que produce una superficie lisa y regular.			
<sup>b</sup> La densidad energética puede calcularse de acuerdo al anexo D a partir de la densidad a granel y el poder calorífico neto del combustible seco. Ejemplo: Para una leña con un poder calorífico neto en base seca, E, de 5,3 kWh/kg y un contenido de humedad real de M <sub>w</sub> , de 15% en masa, el poder calorífico neto según se recibe E <sub>w</sub> es 4,43 kWh/kg. Para una densidad a granel BD de 410 kg/m <sup>3</sup> apilados, la densidad energética según se recibe es de 1 800 kWh/m <sup>3</sup> apilados.			

Tabla 5. Especificación de las propiedades de las trozas.

TIPO BIOMASA	% en base húmeda					
	Humedad	Cenizas	Volátiles	Azufre	PCI (Kcal Kg <sup>-1</sup> )	Densidad media (Kg m <sup>-3</sup> )
Leñas	20-30	1,2	N.D.	0,02	3.000-3.400	380

Tabla 6. Características generales de las leñas. CENER Centro Nacional de Energías Renovables.

De todo lo anterior se deduce que la leña ideal para su uso como combustible debería tener una combustión lenta y gradual, liberar progresivamente el poder calorífico que encierra, generar pocas cenizas y escorias, y no generar humos con una carga contaminante que pudiese provocar daños a la salud de las personas o al medioambiente. A mayores de la forma, dimensiones y composición, pero también de la manera de quemarla, dependerá un aumento en la eficiencia y en la eficacia del recurso.

## Ventajas e inconvenientes del uso de leña frente a los combustibles fósiles tradicionales

Las ventajas más reseñables deben analizarse en dos escenarios muy bien definidos: el económico y el medioambiental y de salud pública. Así y desde el punto de vista económico:

- Es más barata que los combustibles tradicionales como el gasoil, propano y/o gas natural.
- Colabora en la reducción de la dependencia tanto de fuentes energéticas foráneas como en el proceso de oscilación de los precios de los combustibles en el mercado.
- Colabora directa e indirectamente en la creación de economías de escala que generan riqueza en la zona de producción.
- Reduce los costes en campañas de prevención y lucha contra incendios forestales.
- Aumenta el valor de los bienes y servicios que presta el medio forestal.

Y desde el punto de vista medioambiental y de salud pública:

- Produce menos contaminantes (CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y dioxinas).

- Genera una cantidad apreciable de cenizas de origen vegetal ricas en calcio y potasio y no tóxicas que se pueden aprovechar como abono o suplemento mineral de animales.
- No se necesita talar árboles completos, simplemente partes o ramas que podrían proceder de una acción silvícola racional y sostenible que combine la producción de leñas con otro tipo de aprovechamiento (maderero, silvopastoral, micológico, etc), redundando siempre en la idea de la multifuncionalidad y la multiproducción del monte.
- El dióxido de carbono generado al quemarse la madera no supone un incremento en el existente de forma natural en la troposfera mejorando el balance de este colaborando en el cumplimiento de los acuerdos firmados y ratificados por nuestro País en el Protocolo de Kyoto.

Los principales inconvenientes, y como ya se expuso anteriormente comunes a casi todas las fuentes de biomasa de origen forestal radican en los aspectos económicos y responsables de la viabilidad del proceso, se centran en los elevados costes de su recolección y extracción.



## Bibliografía

- [1] Mateos Sánchez, E., Edeso Fito, J. M., Bastarrika Izaguirre, A., Torre tojal, L. Estimación de la Biomasa Residual Procedente de la Gestión Forestal en Bizkaia. In: Lurralde. Investigación y Espacio. Instituto Geográfico Vasco Andrés de Urdaneta. San Sebastián-Donostia; 2012.
- [2] MIRAMONTES CARBALLADA, ÁNGEL y ALONSO LOGROÑO, M<sup>a</sup>. PILAR. La influencia del monte arbolado en las empresas transformadoras de la madera en Galicia. Estudios Geográficos Vol. LXXIV; 2013; 274 pp. 153-191.
- [3] Díaz-Maroto, I. J. & Silva-Pando, F. J. Cuadernos de la S.E.C.F. 1995;1:211-9.
- [4] Antonio Martínez Cortizas, Augusto Pérez Alberti. Atlas Climático de Galicia. Consellería de Medio Ambiente. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela; 1999.
- [5] Manuel Valdés, C., Gil Sánchez, L., Tercer Inventario Forestal Nacional 1997-2006. La Transformación Histórica del Paisaje Forestal de Galicia. Ministerio de Medio Ambiente. Madrid; 2001.
- [6] ALLEN J.R.M., HUNTLEY B., WATTS W.A. J. Quaternary Sci. 1996;11:125-147.
- [7] PEÑALBA, M.C. J. Ecol. 1994;82:815-832.
- [8] Santos Fidalgo, L., Vidal Romaní, J. R., Jalut, G. Caderno do laboratorio xeolóxico de Laxe. 1977;22:99-119.
- [9] Vázquez Varela, J. M., García Martínez, M. G. Megalitismo: economía, sociedad y religión, en Galicia. Historia, vol. I, Hércules. La Coruña. 1991.
- [10] VILLARES, R.; A Historia. Biblioteca Básica da Cultura Galega. Ed. Galaxia. Vigo. 1992.
- [11] GUITIÁN RIVERA, L.; Sistemas de utilización del espacio y evolución del paisaje vegetal en las Sierras Orientales de Lugo. In: PÉREZ ALBERTI, A.; GUITIÁN RIVERA, L.; Ramil, P. editores. La evolución del paisaje en las montañas del entorno de los Caminos Jacobeos. Cambios ambientales y actividad humana. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela; 1993.
- [12] Törnqvist, T. E., Janssen, C. R., Pérez Alberti, A. Cuadernos de Estudios Gallegos; 1989;103:175-198.
- [13] Ramil Rego, P., Aira Rodríguez, M. J. Revista Biol. 1994;15:3-13.
- [14] Muñoz Sobrino, C., Ramil Rego, P., Rodríguez Guitián, M. Vegetation History and Archeobotany; 1997;6:215-233.

- [15] ARANDA, G. DE. Los bosques flotantes: historia de un roble del siglo XVIII. Colección Técnica ICONA. Madrid; 1990.
- [16] DÍAZ-MAROTO, I.J., VILA-LAMEIRO, P., SILVA-PANDO, F.J. Ann. For. Sci. 2005;62:737-749.
- [17] Saavedra Fernández, P. Economía, política y sociedad en Galicia: la provincia de Mondoñedo, 1480-1830. Consellería de Presidencia-Xunta de Galicia. Madrid; 1985.
- [18] RUIZ, P. Notas para una historia del pino en Galicia. Ministerio de Cultura, Dirección General del Patrimonio Artístico, Sección General de Archivos. Madrid; 1980.
- [19] MUÑOZ, G. Crónica sobre bosques y montes de la Península Hispánica. Fundación Conde del Valle de Salazar, E.T.S.I. de Montes. Madrid; 1983.
- [20] DÍAZ-MAROTO, I.J. Estudio ecológico y dasométrico de las masas de carballo (*Quercus robur* L.) en el noroeste de la Península Ibérica. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid; 1997.
- [21] González Pérez, C. A producción tradicional do ferro en Galicia: as grandes ferrerías da provincia de Lugo. Servizo de Publicacións. Deputación Provincial de Lugo; 1994.
- [22] [http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-la-biodiversidad/valoracion-y-aspectos-economicos-de-la-biodiversidad/cb\\_vae\\_valoracion\\_activos\\_naturales.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-la-biodiversidad/valoracion-y-aspectos-economicos-de-la-biodiversidad/cb_vae_valoracion_activos_naturales.aspx)
- [23] Cuarto Inventario Forestal. Galicia. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino ORGANISMO AUTONOMO PARQUES NACIONALES; 2011.
- [24] [http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/mapa-forestal-espana/mfe\\_25.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/desarrollo-rural/temas/politica-forestal/inventario-cartografia/mapa-forestal-espana/mfe_25.aspx)
- [25] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV:I28120>
- [26] [http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/legislacion/legislacion\\_areas\\_norativa\\_internacional.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/legislacion/legislacion_areas_norativa_internacional.aspx)
- [27] <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1986-25961>
- [28] <http://www.boe.es/boe/dias/1997/02/11/>
- [29] [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2006-7678](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2006-7678)
- [30] [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2007-21490](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2007-21490)
- [31] <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-21493>

- [32] <http://www.boe.es/boe/dias/2008/08/19/pdfs/A34836-34837.pdf>
- [33] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2010:295:0023:0034:ES:PDF>
- [34] <http://www.boe.es/boe/dias/2011/03/05/pdfs/BOE-A-2011-4117.pdf>
- [35] [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-15363](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-15363)
- [36] [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-12913](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2013-12913)
- [37] [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6432](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6432)
- [38] <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:ES:PDF>
- [39] Tolosana, E. Manual Técnico para el Aprovechamiento y Elaboración de Biomasa Forestal. Mundi Prensa-Fundación Conde del Valle de Salazar. Madrid; 2009.
- [40] <http://www.minetur.gob.es/energia/desarrollo/EnergiaRenovable/Paginas/paner.aspx>
- [41] [http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf\\_AEA%2FAEA\\_2006.pdf](http://www.magrama.gob.es/ministerio/pags/Biblioteca/Revistas/pdf_AEA%2FAEA_2006.pdf)
- [42] <http://www.cismadeira.com/ingles/services/services.html>
- [43] <http://standards.cen.eu/dyn/www/f?p=204:105:0::::>
- [44] <http://www.aenor.es/aenor/normas/ctn/fichactn.asp?codigonorm=AEN/CTN%20164#.VYmDyPntlBc>
- [45] [http://www.infobio.ru/sites/default/files/Alakangas\\_Pellet\\_standard\\_EN14961-1.pdf](http://www.infobio.ru/sites/default/files/Alakangas_Pellet_standard_EN14961-1.pdf)





**Capítulo 1**  
Bases teóricas y conceptuales  
de la investigación





# Capítulo 1. Bases teóricas y conceptuales de la investigación

Denominación	Pág.
1.1. Objetivos de la investigación	43
1.2. Bases conceptuales de la investigación	43
1.2.1. ¿Por qué se propone el <i>Quercus robur</i> como especie para este estudio?	43
1.2.2. ¿Qué nueva visión se plantea para la explotación energética racional y sostenible del roble?	45
1.2.3. ¿Por qué aplicar las técnicas silvícolas frente a las políticas de tala y repoblación que se están implantando con las especies energéticas foráneas?	46
1.2.4. ¿Qué parámetros se van a analizar en este estudio?	47
1.3. Bases teóricas de la investigación	48
1.4. Bibliografía	52



## 1.1. Objetivo de la investigación

El principal objetivo que se planteó en el inicio de esta investigación fue una caracterización energética lo más completa posible del *Quercus robur* L. La intención de esta propuesta era crear una base de datos sólida que nos permitiese analizar desde un punto de vista científico la posibilidad de explotar energéticamente esta especie forestal de manera racional y sostenible mediante técnicas silvícolas como alternativa a la implantación de cultivos energéticos con especies foráneas.

Esta caracterización energética sería fundamental para alcanzar otros objetivos secundarios igualmente importantes, y que van desde el diseño de políticas forestales locales ajustadas a la realidad gallega hasta el saneamiento integral de gran parte de nuestras masas forestales pasando por la recuperación integral del valor del monte o el desarrollo de iniciativas que permitan un impulso en el desarrollo económico del sector agroforestal en Galicia, pero que por su enorme complejidad superaban el planteamiento de esta investigación.

## 1.2. Bases conceptuales de la investigación

De forma habitual los trabajos de investigación nacen de unas inquietudes que pueden tener orígenes diferentes, desde preocupaciones sociales hasta intereses personales pasando por necesidades económicas o planteamientos éticos. En este caso concreto, el trabajo de investigación aquí propuesto, parte de unas premisas que denominamos bases conceptuales y que tratan de explicar el por qué del mismo. A continuación y de forma resumida expondremos estas inquietudes con el objetivo de explicar el por qué de esta Tesis Doctoral.

### 1.2.1. ¿Por qué se propone el *Quercus robur* como especie para este estudio?

Lo que debería ser una pregunta de trámite se convierte en la razón de esta investigación. La investigación actual en el campo de los biocombustibles forestales sólidos está dirigida principalmente hacia los estudios de introducción y explotación de especies “energéticas” foráneas de crecimiento rápido seleccionadas o modificadas genéticamente como *Paulownia* o Chopo, mientras que en este estudio se elige, en contra de las opiniones de la mayoría de la comunidad científica, el roble.

Aunque conscientes de que las especies energéticas foráneas de crecimiento rápido aseguran una producción de madera superior a la del roble, no se deben, no se pueden, y en este caso no se quieren, obviar otras variables de interés general y que se expusieron en el prólogo, y que ponen de manifiesto la enorme importancia que las formaciones de *Quercus robur* tienen para Galicia, bien como formaciones de robledales homogéneas, o bien como mezcla con otras especies como *Pinus pinaster*, *Eucalyptus globulus* u otras frondosas autóctonas. En la actualidad, con apenas 370.000 ha ocupadas [1], las formaciones de roble generan anualmente 189.000.000 € para la economía gallega [2]. Pero esta cifra no debe ser tomada como un dato estadístico más, esta cifra debe contextualizarse dentro del enorme impacto que esta especie forestal tiene en variables tan importantes y difícilmente cuantificables como el control de la erosión, captura del carbono o conservación de la biodiversidad biológica, variables que día a día van ganando peso en las políticas ambientales a nivel mundial y que pueden suponer una enorme riqueza para Galicia de ser capaz de mantener este patrimonio forestal en condiciones idóneas. No debemos olvidar que de forma indirecta estas variables están íntimamente ligadas a la conservación y productividad del suelo, la supervivencia de muchos ecosistemas sensibles, el mantenimiento de recursos hídricos estratégicos o forman parte de nuestra tradición más arraigada como una herencia sentimental difícilmente traducible a euros, variables todas ellas en las que las especies foráneas no aportan nada significativo.



Figura 14. Nuevas propuestas forestales en Galicia: eucalipto, *Paulownia* y chopo.

Si estas razones no fuesen suficientes, los aproximadamente 20.000 años que esta especie forestal ha tenido para adaptarse al medio gallego y convertirse casi, y desde un punto de vista positivo, en una especie invasiva, hace de ella la más idónea para explotarla en diferentes campos, desde el de producción de madera de alta calidad, como madera noble reconocida, hasta materia prima para biocombustibles pasando por generadora de productos de calidad para la alimentación animal.

Todas estas razones hacen que este estudio adquiriera un peso social, económico y ambiental enorme. Además, y en estos momentos en que la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) ha declarado a los suelos y toda su cobertura vegetal como un bien de la humanidad y algo que debe ser protegido y preservado para las generaciones venideras como un patrimonio escaso y muy importante para la supervivencia de la especie humana, diferentes estudios científicos ponen de manifiesto las bondades de esta especie a la hora de generar suelos productivos sostenibles frente a especies foráneas de crecimiento rápido que estresan a las comunidades microbianas responsables de la productividad de los mismos poniendo en serio peligro la sostenibilidad de cualquier proceso productivo, facilitando los procesos erosivos y provocando la futura pérdida de un bien común difícilmente recuperable como es el suelo.

#### **1.2.2. ¿Qué nueva visión se plantea para la explotación energética racional y sostenible del roble?**

Realmente lo que se propone es la aplicación de técnicas silvícolas a masas de roble que aseguren una oferta sostenible de materia prima para la elaboración de biocombustibles sólidos como astillas o pellets y sobre todo leñas ayudando a desligar los grandes capitales y su férreo control del suministro energético a pequeña escala, pues no se necesitaría una segunda transformación evitando comprometer sus demás funciones medioambientales, económicas y sociales. Esta propuesta no es novedosa ya que desde hace siglos los propietarios de los robledales en Galicia sometían a estas formaciones a desmoches periódicos para la obtención de madera que sería posteriormente utilizada como elemento combustible de uso diario a la vez que seguían siendo fuente de materia prima para la alimentación, tanto de la ganadería porcina como para uso humano en forma de harina. Además este proceso de desmoche continuado saneaba las formaciones de roble y mejorando la productividad de las mismas. En este trabajo se plantea un proceso de silvicultura periódico para la extracción de residuos forestales de las formaciones de roble y el uso local de los mismos como biocombustible directo o procesado. Para ello se debe caracterizar energéticamente de forma rigurosa esta especie forestal en base a diferentes parámetros físicos, químicos, biológicos y bioclimáticos que permitan tomar decisiones, desde aceptar el fracaso de la posibilidad de usar esta especie para el objetivo

marcado, hasta actuar sobre los turnos de corta más adecuados, la selección de los mejores lugares para repoblaciones futuras, las edades de desmoche más apropiadas o el mejor momento del año para realizar estas labores silvícolas.

Además, y es un punto clave del estudio, la utilización de los restos forestales extraídos de los robledales se utilizará como biomasa a nivel local ya que el transporte de este material lejos de la zona de producción encarecería mucho el biocombustible extraído. Por lo tanto, y dentro de la logística del proceso, tanto la lejanía de las formaciones de roble de los grandes núcleos urbanos considerados como principales centros consumidores, como la cantidad de biomasa producible por ha y año, aconsejan un consumo a nivel local y en pequeñas poblaciones.

### 1.2.3. ¿Por qué aplicar las técnicas silvícolas frente a las políticas de tala y repoblación que se están implantando con las especies energéticas foráneas?

A la vista de los datos del IV Inventario Forestal Nacional (IV IFN) [1] y los compromisos adquiridos internacionalmente por España en lo relativo a la conservación de la vida silvestre y del medio natural en Europa [3-6], la necesidad de una política forestal basada en la silvicultura se hace incuestionable para poder preservar y obtener el máximo rendimiento global de un patrimonio forestal actualmente envejecido y con un estado de salud poco alentador.

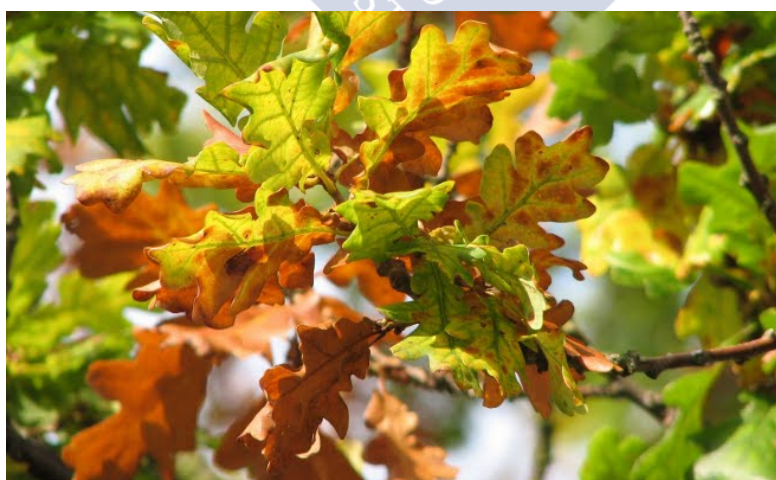


Figura 15. El carballo está considerado últimamente como un bioindicador de referencia en estudios de impacto del cambio climático sobre la biodiversidad. Desde 2011 el Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario (NEIKER-TECNALIA) estudia la progresiva mediterraneización de los bosques del País Vasco como consecuencia de la modificación variables bioclimáticas claves como la humedad y la temperatura y que podría generar la desaparición del hábitat de esta especie en el 2080 [7].

Conscientes de la importancia que los sistemas forestales saneados y ordenados tienen a la hora de generar beneficios económicos, sociales, y ambientales esenciales para la humanidad tales como el mantenimiento de la biodiversidad y las funciones del ecosistema o la protección del sistema climático, la mejor vía de actuación como eje central de una política forestal racional sería la explotación de las formaciones de roble mediante técnicas silvícolas. Este tipo de actuaciones, ya no sólo con el roble, aumentaría el valor productivo de las formaciones forestales gallegas a la vez que aseguraría la persistencia de nuestro valioso patrimonio forestal.

Además la preocupación y sensibilización de la sociedad actual por los problemas relacionados con la conservación del patrimonio natural y de la biodiversidad se ha incrementado haciendo que el medioambiente se convierta en eje central de las políticas de todos los Gobiernos. La globalización de los problemas ambientales y la creciente percepción de los efectos del cambio climático, el previsible agotamiento de muchos recursos naturales, la desaparición, en ocasiones irreversible, de gran cantidad de especies de la flora y la fauna silvestres, y la degradación progresiva de espacios naturales de interés, se han convertido en motivo de seria preocupación para los ciudadanos, que reivindican su derecho a un medio ambiente de calidad que asegure no sólo su salud y su bienestar, sino también el de las generaciones venideras como la mejor herencia posible.

Otro hecho a tener en cuenta en el momento actual de crisis económica es la importancia que el medio rural está alcanzando en España y la importancia socio-económica que puede tener en un futuro inmediato. Así se está observando como en Europa el aumento de la intensidad en el desarrollo económico del sector rural está convirtiéndose en un elemento tractor muy importante para la economía. Por lo tanto la aplicación de políticas de modernización de nuestra economía pasan necesariamente por una mejora del tejido productivo rural dentro de las premisas de la racionalidad y la sostenibilidad, y es aquí en donde las políticas silvícolas tienen una enorme relevancia [8-12].

#### 1.2.4. ¿Qué parámetros se van a analizar en este estudio?

Partiendo del objetivo principal, la caracterización energética del *Quercus robur*, los parámetros que se van a analizar en este estudio se pueden dividir en tres grandes grupos: energéticos, propios y medioambientales. La caracterización y cuantificación

detallada de estos parámetros tiene como objetivo analizar la dependencia de las propiedades energéticas del roble introduciendo variables del medio en el que se desarrolla y que puedan tener una influencia sobre el mismo.

### 1.3. Bases teóricas de la investigación

El planteamiento conceptual propuesto en este estudio, y en base a los diferentes parámetros mencionados en el punto anterior, se puede diseñar y desarrollar de la siguiente manera:

1. Como ya se enunció anteriormente, el pilar de la investigación es caracterizar energéticamente y de la forma lo más detallada posible el *Quercus robur*. Para ello se recurre en primer lugar a la determinación de los parámetros energéticos básicos. Estos parámetros, o propiedades energéticas, son los responsables de las características propias y diferenciadoras de un material, y que van a definir a la postre su potencialidad para generar energía, tanto de forma directa como indirecta. Así se pueden destacar:
  - a. El **poder calorífico** o cantidad de energía liberada por la combustión de una unidad de masa de combustible ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ), parámetro clave a la hora de cuantificar los recursos energéticos presentes en las formaciones de roble para desarrollar una explotación sostenible y racional de los mismos. Este parámetro también será clave en el proceso tecnológico a la hora de seleccionar y dimensionar las calderas, hornos o estufas.
  - b. **Humedad propia** de la muestra (%), parámetro variable a lo largo del año y fundamental tanto en la determinación del poder calorífico inferior (PCI) como en el diseño de los sistemas para el procesamiento y almacenamiento de la biomasa.
  - c. **Densidad** ( $\text{kg m}^{-3}$ ), su determinación es muy importante en las labores de logística, especialmente en temas de logística como la selección del proceso de transporte más eficiente, el mejor formato de almacenamiento o en estudios de conductividad térmica específica.
  - d. **Porcentaje en cenizas, volátiles, y carbón fijo**, parámetros necesarios tanto para certificar energéticamente la biomasa obtenida de las formaciones de roble como para tener una referencia clara de su comportamiento como combustible en calderas convencionales, es decir, su rendimiento, y

adelantarnos a posibles problemas de uso y mantenimiento como la formación de cristales de hollín, exceso de cenizas, limpieza de calderas, pérdidas de intercambio, o problemas de corrosión.

e. **Composición elemental** o porcentaje de carbono (C), hidrógeno (H), oxígeno (O), nitrógeno (N) y azufre (S), elementos necesarios tanto para la determinación detallada del poder calorífico como para recabar información indirecta sobre la composición de los gases de combustión generados en el interior de la caldera minimizando así la posibilidad de generar gases corrosivos que ataquen a los calentadores, emisiones nocivas de  $\text{NO}_x$ , HCN,  $\text{NO}_2$ , o  $\text{SO}_x$  o evitar la formación de dioxinas y furanos.

f. **Estabilidad térmica** ( $^{\circ}\text{C}$ ), o temperatura máxima soportada por un material en las condiciones más adecuadas para la menor pérdida de masa. Este parámetro es de especial interés ya que reproduce de forma bastante fiel el comportamiento que un biocombustible va a tener en el interior de una caldera aportando información valiosa sobre el rendimiento de la misma o sobre la fusión y generación de cenizas.

Esta parte de la investigación, básica para tratar de encontrar un equilibrio entre la capacidad energética, la estabilidad térmica y la generación de subproductos, se llevará a cabo en los laboratorios del Grupo de Investigación Propiedades Termofísicas de Fluidos y Biomateriales, y en la Red de Infraestructuras de Apoyo a la Investigación y al Desarrollo Tecnológico (RIAIDT) de la USC. Además, y tal como se ha ido adelantando, la determinación de estas propiedades es la base para la caracterización energética de un material combustible, es decir, el primer paso para su homologación y la certificación de la madera de carballo como un producto de calidad para su uso directo. Este punto es de vital interés para darle valor al producto, garantizar su calidad, y dar confianza al consumidor, y en esta Tesis estamos determinando estos parámetros de forma científica.

2. Pero para poder llevar a cabo esta primera etapa debemos diseñar un proceso de muestreo suficientemente representativo. Este proceso nos va a permitir obtener unas conclusiones globales de masas arboladas a partir de un número pequeño de muestras obtenidas de individuos "tipo" y que son característicos a la hora de representar la formación forestal. Para ello se decidió agrupar las muestras en diferentes categorías:

- a. En función del diámetro del tronco o fuste medido a 1 m del suelo, parámetro normalmente muy relacionado con la edad del individuo y por lo tanto del roble en conjunto, en Grupo 1 de (5 a 15) cm, Grupo 2 de (15 a 25) cm y Grupo 3 de (25 a 35) cm. Este número es el que se recoge como primer carácter en la denominación de las muestras.
  - b. Dentro de cada Grupo, y en función de su origen, en dos categorías, en brinzal o planta que nace de la semilla caída de los árboles en los rodales de los montes (B), y en chirpial o pie joven procedente de brote de la cepa o raíz de un árbol (C). Segundo carácter en la denominación de la muestra.
  - c. A su vez dentro de estas categorías, y en base al cuidado al que la formación arbolada estuvo y está sometida, en dos subcategorías, en silvicultura o aquellas masas que han estado y están sometidas a mantenimientos silvícolas (S), y en no silvicultura o aquellas que no han estado sometidas a este tipo de mantenimientos (S<sub>NO</sub>). Tercer carácter en la denominación de la muestra.
  - d. Y dentro de estas subcategorías dos clases basadas en su orientación solar, en solana o aquellas que crecen en las laderas y que reciben mayor cantidad de radiación solar (S), y en umbría o aquellas que en comparación con las anteriores reciben menor cantidad de radiación solar (U). Cuarto carácter en la denominación de la muestra. Entronca este punto con una de las motivaciones más vinculadas al carácter costumbrista del saber popular, que desde un punto de vista emotivo y no tan científico, también ha motivado esta Tesis. La creencia de que la leña obtenida en laderas orientadas al Norte es mucho peor que la extraída en pendientes orientadas al Sur, desde un punto de vista estrictamente energético, cuando es empleada como leña.
3. A continuación se analiza la relación entre los parámetros energéticos y lo que denominamos parámetros propios [13]. Esta parte del estudio descartaría o reafirmaría las creencias “populares” que hay robles más o menos eficientes energéticamente en función de su localización, edad u origen. Así se tendrá en cuenta:
- a. La edad del individuo, parámetro con una enorme influencia en la distribución de la lignina, celulosa y hemicelulosa en la madera extraíble, y por lo tanto a tener en cuenta en la determinación del poder calorífico ya que los árboles a medida que envejecen sustituyen en los tejidos parte de

su celulosa (un carbohidrato con un poder calorífico de  $16.100 \text{ kJ kg}^{-1}$ ) por lignina mediante el engrosamiento de la pared celular (un polímero aromático con un poder calorífico de  $24.500 \text{ kJ kg}^{-1}$ ).

b. La proporción de duramen, albura, cambium y corteza en cada individuo, variables dependientes de la edad del individuo de la edad del individuo [14] y que influyen en la densidad y la humedad de la madera, y por lo tanto probablemente en el poder calorífico.

c. La situación de las formaciones (solana o umbría), y que tradicionalmente hace que la madera de los robles procedentes de umbría sean utilizados con reticencia para su uso como biocombustible.

d. El origen del individuo (brinzal o chirpial), que mantenimiento histórico ha recibido la formación (silvicultura o no silvicultura) y una cuantificación aproximada de la cantidad de biomasa extraíble ( $\text{kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ ).

4. Para finalizar con el estudio, se determinan los parámetros medioambientales de las zonas de explotación utilizando los datos de las principales variables meteorológicas: temperatura, humedad, precipitación, déficit hídrico, evapotranspiración, evapotranspiración potencial, y las diferentes intensidades bioclimáticas. Todas estas variables se analizan conjuntamente y se recogen en forma de diagramas ombrotérmicos o bioclimáticos para su más fácil comprensión.



## 1.4. Bibliografía

- [1] Cuarto Inventario Forestal. Galicia. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino ORGANISMO AUTONOMO PARQUES NACIONALES; 2011.
- [2] [http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-la-biodiversidad/valoracion-y-aspectos-economicos-de-la-biodiversidad/cb\\_vae\\_valoracion\\_activos\\_naturales.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/temas/conservacion-de-la-biodiversidad/valoracion-y-aspectos-economicos-de-la-biodiversidad/cb_vae_valoracion_activos_naturales.aspx)
- [3] <http://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-1986-25961>
- [4] [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-15363](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2011-15363)
- [5] [http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/legislacion/legislacion\\_areas\\_normativa\\_internacional.aspx](http://www.magrama.gob.es/es/biodiversidad/legislacion/legislacion_areas_normativa_internacional.aspx)
- [6] <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=URISERV:I28120>
- [7] <http://www.neiker.net/>
- [8] [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2006-7678](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2006-7678)
- [9] [https://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2007-21490](https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2007-21490)
- [10] <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2007-21493>
- [11] <http://www.boe.es/boe/dias/2011/03/05/pdfs/BOE-A-2011-4117.pdf>
- [12] [http://www.boe.es/diario\\_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6432](http://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6432)
- [13] Bergman, Richard, Cai, Zhiyong, Clausen, Carol A., Dietsberger, Mark A., Falk, Robert H., Frihart, Charles R., Glass, Samuel V., Hunt, Christopher G., Ibach, Rebecca E., Kretschmann, David E., Lebow, Stan T., Rammer, Douglas R., Ross, Robert J., Stark, Nicole M., Wacker, James P., Wang, Xiping, Wiedenhoef, Alex C., Wiemann, Michael C. and Zelinka, Samuel L. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPL-GTR-190. Forest Service. Forest Products Laboratory. USDA. Madison, Wisconsin; 2010.
- [14] BARRIO ANTA, M., DÍAZ-MAROTO HIDALGO, I.J., ÁLVAREZ GONZÁLEZ, J.G. y VILA LAMEIRO, P. 2005. El problema de la regeneración de robles caducifolios y marcescentes en el Noroeste Peninsular. En: ACTAS DE LA III REUNIÓN SOBRE REGENERACIÓN NATURAL-IV. REUNIÓN SOBRE ORDENACIÓN DE MONTES. CUAD. SOC. ESP. CIEN. FOR. 2005;15 pp 95-100.



# Capítulo 2

## Trabajo experimental





## Capítulo 2. Trabajo experimental

Denominación	Pág.
2.1. Trabajo experimental	57
2.1.1. Selección de la zona de muestreo	57
2.1.2. Descripción de la zona de muestreo	58
2.1.3. Trabajo de campo: procedimiento experimental	61
2.1.4. Trabajo de laboratorio	64
2.1.4.1. Preparación de las muestras	64
2.1.4.2. Determinación de la composición elemental	66
2.1.4.3. Determinación del carbono fijo, volátiles y cenizas	66
2.1.4.4. Experiencias calorimétricas: determinación del poder calorífico	68
2.1.4.4.1. ¿Qué es una experiencia calorimétrica?	68
2.1.4.4.2. Pero, ¿qué es un sistema calorimétrico?	68
2.1.4.4.3. Generalidades del sistema calorimétrico o calorímetro	70
2.1.4.4.4. Descripción de los componentes del sistema	71
2.1.4.4.5. ¿Y el poder calorífico?	73
2.1.4.4.6. Cálculo de poderes caloríficos a volumen constante	75
2.1.4.4.7. Calibrado del calorímetro	76
2.1.4.4.8. Determinación del poder calorífico: desarrollo de un experimento	76
2.1.4.4.9. Representación de los resultados	80
2.1.4.5. Análisis termogravimétrico: TGA	82
2.1.4.5.1. Generalidades de la técnica	82
2.1.4.5.2. Descripción del equipo	83
2.1.4.5.3. Calibrado de la TGA	84
2.1.4.5.4. Realización de una experiencia de termodegradación: desarrollo de un experimento	85
2.1.4.5.5. Interpretación de los resultados	86
2.1.4.5.6. Análisis de la cinética de degradación térmica	91
2.2. Bibliografía	98



## 2.1. Trabajo experimental

### 2.1.1. Selección de la zona de muestreo

La selección de la zona de muestreo (Figura 16), en plena Ribeira Sacra, con coordenadas geográficas  $42^{\circ}34'01,90''$  N de latitud y  $7^{\circ}20'28,75''$  O de longitud y una altitud de 522 m, conjugó parámetros personales (propiedad de la familia del Doctorando), ambientales (una fraga con una carballeira estable, con escasa acción antrópica, y necesidad de clareo y ordenación), y sociales (permisos de corta, facilidad de acceso a muestras, y colaboración vecinal).



Figura 16. Localización de la zona de estudio utilizando Google Earth con su posición en coordenadas UTM 29T (638853, 4710960). Al final de la serie de fotografías de la localización se muestra un detalle de la zona de muestreo.

### 2.1.2. Descripción de la zona de muestreo

La zona de muestreo tiene unas condiciones climáticas típicas de un clima mediterráneo subhúmedo de tendencia atlántica y las especies forestales más abundantes en ella son *Quercus robur* L. (roble), *Pinus pinaster* Ait. (subespecie atlántica o pino marítimo), *Pinus sylvestris* L. (pino rojo), *Pinus radiata* D. Don (pino de Monterrey), *Acer pseudoplatanus* L. (falso plátano-pradairo) y *Castanea sativa* Miller. (castaño). Esporádicamente se presentan algunas formaciones o pies aislados de acacias, *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. (aliso), *Quercus pirenaica* Willd. (melojo-rebollo), *Betula pubescens* Ehrh. (abedul), *Corylus avellana* L. (avellano), *Ilex aquifolium* L. (acebo), *Ulmus minor* Mill. (olmo común) y *Salix atrocinerea* Brot. (sauce negro-salgueiro) [1].

Las características más importantes del ambiente físico de la zona se recogen en la Tabla (7) y se representan gráficamente en forma de diagrama bioclimático [2] en la Figura (17).

Los datos presentados en la Tabla 17 son la base para la elaboración del diagrama bioclimático de la zona de trabajo, y se han obtenido como resultado medio de los años en los que se llevó a cabo el trabajo experimental. La razón de esta decisión ha sido la dificultad de encontrar una serie de datos estable en el tiempo. Esta circunstancia tiene su origen en que muchas de las estaciones se están renovando y esto provoca la pérdida de datos.

Los valores han sido obtenidos de la base de datos de METEOGALICIA [3], y más concretamente de la estación de Conchada (Quiroga). El motivo para elegir esta estación fueron que está cercana a la zona de muestreo, aproximadamente a 6 km, a una altitud de 697 metros, y que cuenta con los sistemas de medición básicos que nos permiten generar el diagrama bioclimático. En esta Tabla se utilizan las siguientes abreviaturas TM (temperatura media, °C), P (precipitación, mm), D (disponibilidad hídrica, mm), H (humedad, %), I (insolación, %), HS (horas de sol mes<sup>-1</sup>), ETP (evapotranspiración potencial, mm), e (evapotranspiración residual, mm), IBP (intensidad bioclimática potencial, bcu), IBL (intensidad bioclimática libre o intensidad climática en un periodo sin limitación hídrica, bcu), bcu (unidades bioclimáticas).

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
TM	5,8	5,7	8,3	11,1	14,0	16,3	17,7	18,5	17,8	14,4	8,5	5,9
P	104	92	58	74	51	29	23	21	34	78	101	74
D	204	192	158	174	151	103	23	21	34	78	119	174
H	83	76	66	75	72	70	72	69	69	70	84	86
I	33	40	48	44	58	56	58	61	58	55	28	31
HS	94,0	119,0	167,1	173,1	259,1	251,6	263,5	260,3	217,3	187,1	80,0	86,8
ETP	16	16	33	51	77	93	104	102	85	60	27	16
e	3,3	3,3	6,6	10,2	15,4	18,6	20,8	20,5	17,1	12,0	5,4	3,3
IBP			0,17	0,73	1,31	1,75	2,03	2,19	2,06	1,39	0,21	
IBL			0,17	0,73	1,31	1,75	0,05	0,01	0,51	1,39	0,21	
IBF	-0,35	-0,36										-0,31

Tabla 7. Principales parámetros climáticos de la zona de muestreo. Resultados medios de los años 2011, 2012 y 2014 [3].

A partir de los datos presentados en la Tabla anterior podemos deducir que las condiciones climáticas de la zona:

- Dan lugar a un clima intermedio entre el oceánico-continental y el mediterráneo subhúmedo de tendencia atlántica generado por la cercanía de los valles de los ríos Sil y Lor, y que configura este microclima característico.

- Las precipitaciones no son especialmente abundantes, entre 700 y 800 mm anuales, e irregulares a lo largo del año como consecuencia de las formaciones montañosas del norte que dificultan la entrada de las borrascas atlánticas.

- La zona de muestreo presenta gran variedad botánica ya que es una zona de frontera entre la región eurosiberiana y la mediterránea, conformando una flora y vegetación atlántica que domina sobre la mediterránea, generando las condiciones ideales para el desarrollo de los bosques caducifolios húmedos.

- Las temperaturas suaves a lo largo del año, con una temperatura media de 12 °C, aseguran una “potencialidad productiva” aceptable por parte de las formaciones vegetales desde Marzo a noviembre, estando únicamente limitada desde diciembre a

febrero debido al descenso de las temperaturas. La Intensidad Bioclimática Libre (IBL) es el parámetro elegido para obtener este tipo de conclusiones.

- Los meses de verano, y como consecuencia directa de la baja pluviosidad, la IBL es prácticamente cero.
- Estas características climáticas favorecen una elevada tasa de generación de residuos forestales.

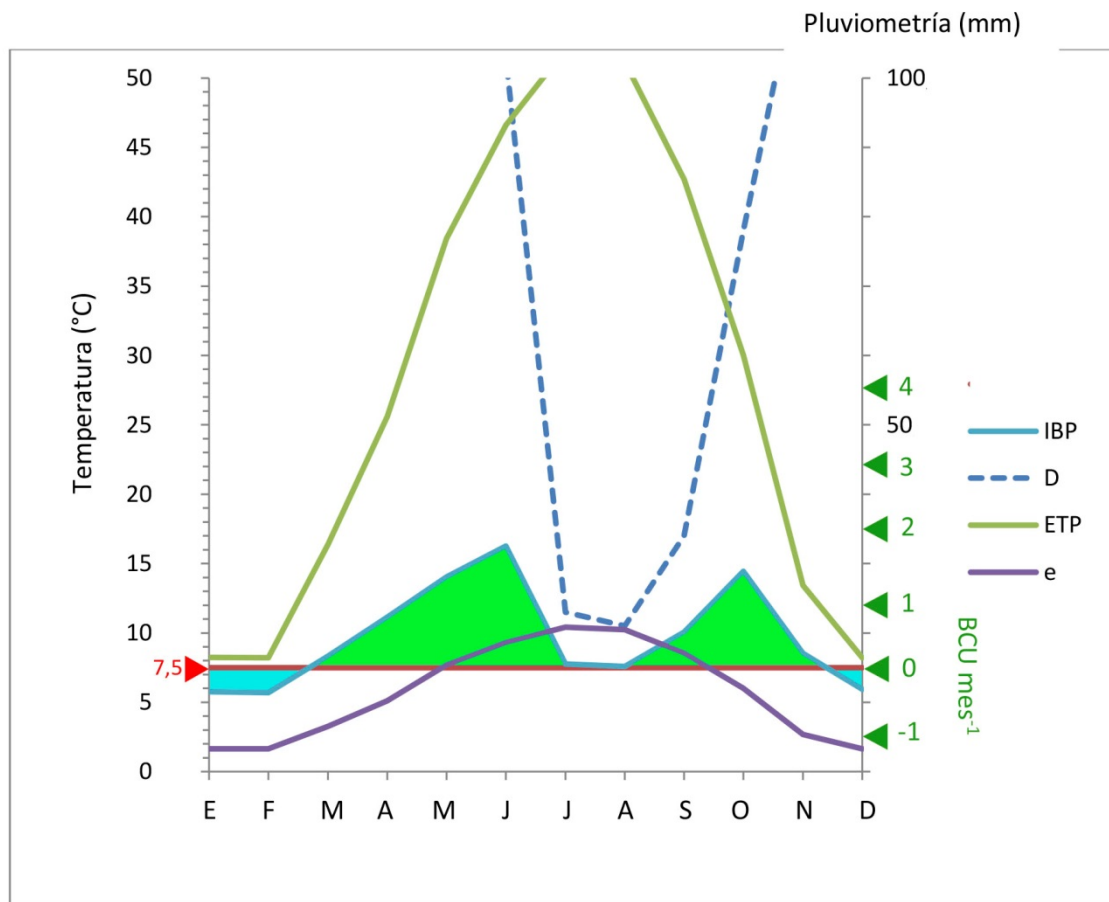


Figura 17. Diagrama bioclimático de la zona de muestreo. Se analizan conjuntamente la temperatura (T), la disponibilidad hídrica (D), evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración potencial residual (e), la intensidad bioclimática potencial (IBP). El 7,5°C representa la temperatura mínima para que los vegetales tengan actividad vegetativa, las BCU son unidades bioclimáticas mes<sup>-1</sup>. El área coloreada de verde representa la potencialidad productiva y la coloreada en azul el parón vegetativo causado por las bajas temperaturas en invierno. Durante los meses de Julio y Agosto la dependencia de las lluvias es clave en el proceso productivo de los vegetales de la zona.

Este tipo de diagramas son de enorme utilidad para obtener una idea global de la influencia de estos parámetros climatológicos en la actividad vegetativa de las formaciones vegetales y por lo tanto de su potencialidad productiva [4].



Figura 18. Vista general de la estación meteorológica de Conchada (Quiroga, Lugo) situada a escasos 7 km de la zona de muestreo y con unas condiciones similares a la zona de muestreo [3].

### 2.1.3. Trabajo de campo: procedimiento de muestreo

La metodología utilizada en esta investigación para la recogida, transporte y preparación de muestras se empezó a desarrollar en el Grupo de Investigación TERBIPROMAT a finales de los años 90 con el objetivo de asegurar la veracidad, reproducibilidad y representatividad de las determinaciones, y después de más de 20 años y cerca de 30 artículos nacionales e internacionales [5-9], se muestra como apropiada para desarrollar estudios como el propuesto en esta Tesis Doctoral.

En la propuesta del estudio, tal y como se comentó en el Capítulo 1, se diseñó un proceso de muestreo en el que categorizamos individuos “tipo” característicos de las diferentes formaciones de carballo de la zona, y extrapolables al resto de la geografía gallega, para obtener conclusiones globales sobre el comportamiento energético de masas arboladas de esta especie a partir de un número pequeño de muestras. Para la realización del estudio se tomaron las diferentes muestras en dos periodos del año principales:

- Marzo-Abril, coincidiendo con el final del invierno y el periodo en el que los árboles están al final de su parón vegetativo. En este momento la humedad de constitución del árbol debe ser la más baja y por lo tanto su poder calorífico máximo. En este momento el porcentaje relativo de madera de invierno respecto de la de primavera-verano es mayor que en las muestras tomadas en el siguiente período (Junio-Julio), lo que debería implicar un leve aumento en la densidad de la

madera analizada, pues solamente el anillo del último año contribuye a esto, con el consiguiente aumento en el poder calorífico. En este momento la humedad de constitución del árbol debe ser la más baja y por lo tanto su poder calorífico máximo.

- Junio-Julio, coincidiendo con el final del verano y el periodo de mayor producción vegetativa. En este momento abundan las partes verdes en el árbol, su copa es máxima y su humedad mayor. Esto implica un aumento en el tamaño de los vasos que se han desarrollado hasta el momento, esto es, en la porosidad de la madera, que una vez seca, tendrá una densidad real menor respecto a la formada de cara al invierno y que aparece en mayor proporción en las muestras tomadas en Marzo-Abril. Por esta razón, los valores de poder calorífico en la madera de Junio-Julio, bajan un poco.

Para llevar a cabo la recogida de la muestra, y dentro de la zona de estudio de unas 10 ha aproximadamente, se selecciona una parcela de 1 ha y en ella un individuo representativo de cada clase. Para seleccionar este individuo "tipo" se recurre a unos parámetros básicos de selección:

- La altura media del individuo debe ser representativa de la formación forestal de la zona. Para ello se utiliza un hipsómetro SUUNTO PM-5/1520.
- La localización de este individuo debe estar en el centro de la formación con la intención de eliminar el "efecto borde". Los árboles que limitan perimetralmente una formación forestal, y debido principalmente a su mayor exposición al sol en determinados momentos del día, poseen peculiaridades que los hacen inadecuados para el estudio como una mayor cantidad de ramas, una distribución diferencial de las mismas, menor altura proporcional media respecto de sus diferentes dimensiones o más masa verde en determinados momentos del año.
- La edad debe estar en el rango propio de la clase marcada. Esta decisión se toma en función del grosor del tronco.
- Que el individuo seleccionado no esté enfermo o que presente anomalías o irregularidades que lo diferencien del resto de los individuos de su clase y de la formación forestal a estudiar.

Una vez seleccionado el árbol se apea y desrama con la ayuda de una motosierra y otros útiles propios de labores silvícolas (rastrillo, picos, palas, desbrozadora, hoces, etc.) con el objetivo secundario de cuantificar los residuos forestales generables en los futuros procesos de clareo y ordenación. A pesar que estos datos sólo los utilizamos

como una referencia en este trabajo, ya que se tomó la decisión de realizar los estudios en el tronco (fuste) a una altura siempre igual de 1,3 m, diámetro normal, habitual en las mediciones dasométricas para centrarnos en la madera más adecuada para producir leña, los valores medios de producción de residuos forestales por árbol adulto son del orden de los 200 kg. Estos valores serían para un individuo de unos 20 cm de diámetro incluida la raíz. Estos valores deben tomarse con mucha bondad ya que entre individuos similares puede haber diferencias de un 20 % [10, 11]. Para la cuantificación de los residuos forestales se extiende en el suelo una lona sobre la que se depositan los restos de la corta, y utilizando un dinamómetro de gran capacidad y precisión PROMAN (de 0 a 200 kgf) se pesan.

Una vez desramados se trocea el tronco “en rodajas” perpendiculares a su eje mayor y se extrae una muestra de aproximadamente unos 10 kg. Esta muestra se introduce en un saco de polietileno y se cierra herméticamente para su traslado posterior al laboratorio. La intención de este proceder es evitar en medida de lo posible la pérdida de humedad, un parámetro importante a la hora de determinar su poder calorífico inferior. En este estudio, y debido al objetivo marcado, veremos como este parámetro pasa a ser orientativo.



Figura 19. Durante el trabajo de campo el material básico empleado ha sido la motosierra, aunque también de forma puntual y como apoyo a las labores necesarias hayan podido utilizarse, picos, hachas, tijeras de poda, rastrillos, dinamómetro, EPI´s etc.

## 2.1.4. Trabajo de laboratorio

### 2.1.4.1. Preparación de las muestras

Una vez en el laboratorio, las muestras son sometidas a una serie de medidas dendrométricas con el objetivo de determinar su área total y la proporción de duramen, albura y corteza de cada una de ellas y ver como ésta varía con las diferentes clases estudiadas y si podría afectar a otras propiedades que vamos a estudiar. En la Tablas 15 y 16 se recogen los valores de estas mediciones.

Posteriormente se trocean con la ayuda de un hacha con el fin de favorecer el proceso de secado.

Una parte pequeña de la muestra se separa, se trocea con la ayuda de un hacha y una tijera de poda y con ella se determina la densidad real utilizando una balanza Mettler Toledo XS 104 (Figura 21) con una sensibilidad de 0,1 mg con un kit de densidad XS [12]. Se determinan por separado la densidad de las diferentes partes de la madera: duramen, albura y corteza. Los resultados de estas medidas se recogen en la Tabla 17.



Figura 20. Detalle de la balanza científica Mettler XS104 con el kit para la determinación de densidades.

El resto de la muestra se pesa con una balanza SALTER AND EP 22KA con una sensibilidad de 0,1 g y posteriormente se introduce en un arcón desecador de convección natural DRY-BIG 220 III a 105 °C hasta peso constante. Este arcón desecador tiene una capacidad de 400 litros y un rango de temperatura desde (40 hasta 250) °C,

con una homogeneidad de  $\pm 1,5$  °C y una estabilidad de  $\pm 0,5$  °C. Una vez pasado este periodo se determina la pérdida de peso [13-14] por diferencia de pesada.

En este estudio la determinación de la humedad no deja de ser un parámetro orientativo ya que los cálculos de poder calorífico se van a hacer sobre base seca, y al (10, 15 y 20) % de humedad. Estos datos de humedad son por otro lado determinantes en estudios de formaciones forestales con el objetivo de determinar índices de riesgo para prevenir y luchar eficazmente contra los incendios forestales [15-18] o para estudios de pérdida de humedad en cabeceras de plantas de procesado o generación energética a partir de biomasa forestal [5-9].



Figura 21. A la izquierda molino Retsch SM-1 y a la derecha molino IKA A 11. El proceso de doble molienda es imprescindible para preparar las muestras para la parte analítica.

Una vez determinada la humedad, las muestras se trituran en un molino de cuchillas RETSCH SM-1, especial para materiales fibrosos blandos y semiduros, provisto de dos tamices intercambiables de (2 y 10) mm de luz. Este molino, Figura 21 izquierda, se utiliza para triturar las muestras de residuos forestales ya secas hasta convertir la leña en finas astillas. Esta muestra se sube al laboratorio de calorimetría y se somete a otro proceso de molienda más fino con un molino de análisis IKA A 11 basic. Este molino es útil para desmenuzar muestras por impacto para materiales duros, quebradizos o frágiles mediante el empleo de un batidor de acero inoxidable. Este batidor puede utilizarse hasta una dureza Mohs de 6. Su interior es un recipiente de Tefcel (ETFE, reforzado con fibra de vidrio) con entrada de acero inoxidable (AISI 316L) y un volumen

útil de 80 ml. La razón de esta doble molienda es homogeneizar más la muestra antes de su estudio energético.

Ahora ya tenemos las muestras listas para su análisis. Una parte se utiliza para el análisis elemental, otra en la determinación del carbono fijo, los volátiles y las cenizas, y otra en las experiencias calorimétricas y de termogravimetría (TGA).

#### 2.1.4.2. Determinación de la composición elemental

Las determinaciones de la composición elemental (C, H, O, N y S) de las diferentes muestras fueron realizadas en la Unidad de Análisis Elemental de la USC [19]. Esta unidad forma parte de la red de infraestructuras de apoyo a la investigación y desarrollo tecnológico de la USC (RIAIDT). Para realizar las determinaciones se utilizaron un:

- Analizador Elemental FISIONS modelo EA 1108 para la determinación del C, H, N y S a partir de muestras de (1 a 10) mg, con una precisión < 0,3 % absoluto y una reproducibilidad < 0,2% absoluto.
- Analizador Elemental CARLO ERBA modelo EA 1108 para la determinación de O a partir de muestras de (1 a 10) mg, con una precisión < 0,3 % absoluto y una reproducibilidad < 0,2% absoluto.
- Analizador Elemental THERMO FINNIGAN modelo FLASH 1112 para C, H, N, O y S a partir de muestras de (2 a 20) mg, con una precisión < 0,3 % absoluto y una reproducibilidad < 0,2% absoluto.

#### 2.1.4.3. Determinación del carbono fijo, los volátiles y las cenizas

Para la determinación del carbono fijo, volátiles y cenizas recurrimos a la normativa ASTM International (American Society for Testing and Materials) [20-22]. Así para la:

- Determinación de las cenizas seguimos las pautas marcadas en la norma ASTM D 1102-84 (2007) [20]. Este método de ensayo determina la cantidad de cenizas, expresada como el porcentaje de residuo que queda después de la oxidación seca, de (580 a 600) °C, de madera o productos derivados de madera. Para ello se introducen 2 g aproximadamente de muestra picada en un crisol de porcelana. Crisol y muestra se introducen en una estufa a 105 °C hasta peso constante, aproximadamente 1 h. A continuación se introducen en un horno de mufla eléctrico SELECTA SELEC HORN a (580-600) °C, Figura, hasta peso constante unas 3 h. Pasado

este tiempo se sacan las muestras y se introducen en un desecador a enfriar y se van pesando a intervalos de 30 minutos hasta peso constante. Por diferencia de pesadas se calcula el porcentaje de cenizas. El horno de mufla con el que trabajamos tiene las características siguientes:

- o Un máximo de temperaturas regulables hasta 1.150 °C con una precisión de selección de  $\pm 1$  °C del valor seleccionado.
- o Controlador electrónico digital de temperatura y tiempo.
- o Hasta 6 rampas de temperatura programables.

- Determinación de los volátiles seguimos las pautas marcadas en la norma ASTM D 872-82 (2006) [21]. El procedimiento utilizado es similar al anterior con la salvedad que la temperatura del horno de mufla es cercana a los 950 °C y el tiempo de residencia en el mismo de unos 5 minutos.

- Determinación del carbono fijo [22], se realiza a partir de los resultados de cenizas y volátiles utilizando la siguiente expresión:

$$\text{Carbono fijo} = 100 - \text{humedad (\%)} - \text{volátiles (\%)} - \text{cenizas (\%)} \quad (1)$$



Figura 22. Vista general del horno de mufla SELECTA SELECT HORN.

#### 2.1.4.4. Experiencias calorimétricas: determinación del poder calorífico

##### 2.1.4.4.1. ¿Qué es una experiencia calorimétrica?

El fundamento teórico de cualquier experiencia calorimétrica de combustión es determinar la variación de energía que acompaña a una reacción de combustión bajo condiciones determinadas y con estados bien definidos ( $p$ ,  $V$ ,  $T$ , composición y masa) asumiendo que la energía interna de un estado bien definido no varía con el tiempo [23]. Así tenemos que toda experiencia calorimétrica consta de 3 fases principales [24]:

- Fase Calorimétrica, en la que se determina la variación exacta de la energía de la reacción, en nuestro caso liberada.
- Fase Química, caracterización precisa de los estados inicial ( $E_0$ ) y final ( $E_f$ ) de la reacción.
- Fase Conversión resultados a valores de energía standard [25-26] de combustión a 295,15 K (temperatura a la que ocurre el proceso isotérmico de la bomba). Esto se hace porque la variación energética ha de corresponder a unas condiciones estándar, con la totalidad de los reactivos y de los productos en sus estados estables (gaseoso, líquido o sólido) a la temperatura de referencia escogida (295,15 K) y presión de 1 atmósfera. Interesa hacer esta corrección para que los datos obtenidos puedan ser contrastados por otros investigadores.

Por lo tanto, en una experiencia calorimétrica se determina la variación de energía que acompaña a una determinada reacción, en nuestro caso, de combustión.

##### 2.1.4.4.2. Pero, ¿qué es un sistema calorimétrico?

Para poder determinar el poder calorífico de una muestra de combustible, en este caso biomasa forestal, recurrimos a un sistema calorimétrico o calorímetro. Es decir, un sistema termodinámico con unos límites controlados a través de los cuales se intercambia determinada cantidad de energía con los alrededores.

Un sistema calorimétrico se puede entender como constituido por dos partes principales:

- Una parte inalterable, y común a todas las experiencias a realizar, constituida por el calorímetro propiamente dicho y los elementos que se utilizan reiteradamente en cada experimento como la cantidad de agua, el oxígeno, el

hilo de algodón y la cámara de combustión o bomba. Su energía equivalente o capacidad calorífica, es constante, aunque puede experimentar pequeñas variaciones debidas a cambios de temperatura.

- Una parte variable, constituida por la muestra que se quiere analizar y aquellos elementos "extra" que podamos utilizar como crisoles desechables, facilitadores de la combustión, o cápsulas de melinex. Las energías equivalentes de sus estados inicial y final son calculadas como la suma de las capacidades caloríficas del contenido de la bomba antes y después de cada experiencia.

De manera más concreta nuestro calorímetro se puede definir como:

- isoperiférico de líquido agitado, porque entre la cámara de reacción, también llamada bomba calorimétrica u obús, hay una cantidad de agua a temperatura casi constante sometida a una agitación constante.
- de bomba estática porque la reacción de combustión se da en el interior de un cilindro metálico de gruesas paredes y herméticamente cerrado.
- en atmósfera de oxígeno, porque la reacción se produce en una atmósfera saturada de oxígeno puro C45 de Carbuos Metálicos con una pureza de 99,995 %.

Por lo tanto podemos definir la técnica calorimétrica como una técnica experimental que detecta directamente el flujo de calor o el gradiente de temperatura de un sistema cuando tiene lugar un proceso físico-químico de naturaleza endo o exotérmica, es decir, una medición cuantitativa de un intercambio de calor.

La calorimetría se utiliza con éxito como una herramienta analítica complementaria desde 1.760 [27-31] estudiando diferentes procesos termodinámicos a través de la medida de la transformación de diferentes "energías" en calor. De forma más particular en nuestro caso la calorimetría de combustión en bomba permite evaluar la variación de energía en una reacción de combustión en la que se rompe el esqueleto carbonado de un compuesto cuando se quema en una atmósfera de oxígeno. Si la experiencia calorimétrica se realiza en condiciones perfectamente definidas puede calcularse la variación de la energía que se produce en la misma, es decir, en nuestro caso el poder calorífico o energía contenida en una unidad de masa de combustible ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ).

De manera más concreta, el sistema calorimétrico utilizado en este estudio realiza una medida de la variación de energía de una reacción de combustión en la cual se produce la rotura del esqueleto carbonado de un compuesto en atmósfera de oxígeno, o

dicho de otra manera, determina la energía asociada a una reacción cuando ésta se produce en unas condiciones preestablecidas.

#### 2.1.4.4.3. Generalidades del sistema calorimétrico o calorímetro

Para la determinación del poder calorífico se utilizó un sistema calorimétrico, o calorímetro, IKA C 5000 control (Figura 23). Este equipo, que goza de reconocimiento internacional por su fiabilidad y posibilidades que presenta, se utiliza de manera habitual en empresa y/o investigación para determinaciones rutinarias del poder calorífico de muestras sólidas y líquidas.

Entre sus principales características destacar [32]:

- La total automatización de las mediciones, proceso tedioso y que ocupa mucho tiempo de dedicación en los calorímetros convencionales.
- Posee un sistema de llenado y evacuación de oxígeno integrado.
- Un depósito de agua y un sistema de refrigeración C 5001 para refrigerar el circuito del agua de la célula de medición. El proceso de llenado y vaciado de agua de la célula de medición es automático.
- Puede trabajar según el principio adiabático, isoperibólico o dinámico (como el método adiabático pero en menor tiempo).
- La medición y cálculo del poder calorífico la realiza según DIN 51900, ISO 1928, ASTM D240, ASTM D4809, ASTM D5865, ASTM D1989, ASTM D5468 y ASTM E711.
- Posee un campo de medición de 40.000 J, equivalente a un incremento de temperatura aproximado en el interior de la cámara de combustión de 4 K.
- Es modulable, es decir, se pueden acoplar diferentes células de medición.



Figura 23. Vista general del sistema calorimétrico IKA C5000 control. En la imagen se pueden ver claramente diferenciados los 3 elementos básicos: controlador (izquierda y de color azul), célula de medición (centro de color blanco y con la bomba calorimétrica colocada en su soporte) y sistema de refrigeración C5001 (derecha y de color azul).

#### 2.1.4.4. Descripción de los componentes del sistema

El sistema calorimétrico [32] está formado por 3 elementos principales (Figura 23):

- El controlador que funciona como unidad central de mando (parte izquierda de la Figura 23 en color azul y más en detalle en la Figura 24), operación e indicación de todos los componentes del sistema. Todos los parámetros del experimento y de operación se introducen a través de su consola de mando (Figura 24 derecha). Durante la determinación del poder calorífico, controla, regula y visualiza todas las fases del desarrollo de la medición, desde el diálogo con el operador hasta la comunicación con los diferentes equipos periféricos (impresora, balanza, gradilla de muestras, PC externo, etc.) pasando por la ejecución y supervisión automática de los experimentos o el almacenamiento y tratamiento de datos.



Figura 24. Detalle de la consola de mando en donde se pueden observar los principales parámetros de control en la pantalla antes del experimento: el método de trabajo, el número de experimento asignado por el equipo, la fecha y hora, peso de la muestra, peso y energía sustancias auxiliares, denominación de la muestra por parte del operador, usuario, elección de calibrado, menú de escritura, OK, parada, panel control general con numeración, flechas control, y otros botones de control múltiple para el menú de ayuda.

- La célula de medición (Figura 23 centro en color blanco). En ella tiene lugar la combustión de la muestra de combustible en condiciones perfectamente definidas: métodos de medición adiabático, isoperibólico o dinámico. Los principales componentes de la célula de medición son el obús o cámara de reacción, la vasija interior con envoltura de agua, agitador magnético para distribuir homogéneamente el calor en la vasija interior, circuito interno de agua con bomba, depósito y empalme a la unidad de refrigeración externa, sistema calefactor-regulador de temperatura y dispositivo de llenado y evacuación de oxígeno.

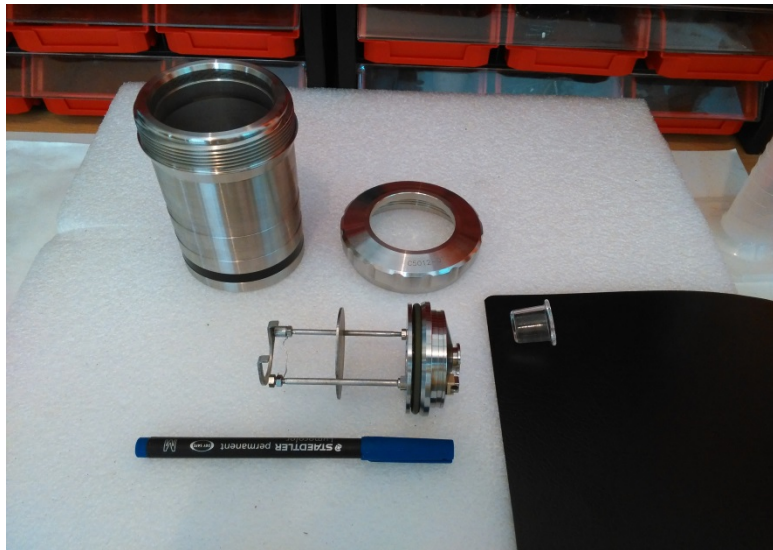


Figura 25. Detalle de la bomba calorimétrica. En la fotografía se pueden observar las partes principales: lo que denominamos cuerpo (superior izquierda), la cabeza (inferior en el centro) con el soporte del crisol, el filamento de platino y la chapa protectora, y la rosca exterior (superior derecha) encargada de unir cabeza y cuerpo durante las experiencias calorimétricas. El material del que está hecha la bomba es acero inoxidable Carpenter 20cb-3, aleación resistente a mezclas ácidas como las de ácido nítrico y sulfúrico predominantes en la combustión de las muestras utilizadas en este estudio. Sobre fondo negro podemos ver el crisol de cuarzo.

- El sistema de refrigeración C5001 (Figura 23 derecha en color azul). Tiene como misión principal refrigerar el circuito del agua de la célula de medición. El circuito está formado por un intercambiador de calor, un compresor con licuador y evaporador, y un ventilador que aspira el aire refrigerante a través del fondo del aparato y del panel posterior y lo expulsa otra vez a través de las salidas del panel posterior evacuando así el calor del aparato.

#### 2.1.4.4.5. ¿Y el poder calorífico?

Entendemos por poder calorífico la cantidad de energía liberada por la combustión de una unidad de masa de combustible. Pero dependiendo de las condiciones en que se realice la combustión (Norma Internacional ISO) [33] tenemos un:

- Poder calorífico superior a volumen constante. Es la cantidad de calor desprendida por la combustión de la unidad de masa de combustible, en atmósfera de oxígeno, en el interior de una bomba calorimétrica en las condiciones normalizadas. Los productos originados en la combustión son: oxígeno, dióxido de carbono, dióxido de azufre, nitrógeno, todos ellos en fase

gas, junto con agua en fase líquida en equilibrio con su vapor y saturada de dióxido de carbono, con una fase sólida constituida por cenizas.

- Poder calorífico inferior a volumen constante. Es el calor que se desprende cuando la unidad de masa de combustible, se quema en atmósfera de oxígeno, en condiciones de volumen constante. Los productos formados en la combustión son oxígeno, dióxido de carbono, dióxido de azufre, nitrógeno, agua en fase gaseosa y cenizas en fase sólida, todo ello en condiciones estándar.
- Poder calorífico a presión constante. Es el calor que se desprende si una unidad de masa de combustible, se quema en atmósfera de oxígeno, en las condiciones de presión constante. Los productos que se generan en la combustión están formados por oxígeno, dióxido de carbono, dióxido de azufre, nitrógeno, agua todo ello en fase gaseosa y cenizas en fase sólida, todo ello en condiciones estándar.

Cuando se quema un combustible que contiene hidrógeno, se forma invariablemente agua, y si ésta se condensa, tal como ocurre en los calorímetros, su calor latente de vaporización, juntamente con el calor liberado durante su enfriamiento desde el punto de condensación hasta la temperatura final de ensayo, incrementa el calor cedido por el combustible. En una combustión industrial, este calor no toma parte en elevar la temperatura de la llama ni de los gases de combustión, ya que el agua se expulsa en forma de vapor. El poder calorífico, tal como se determina en bomba calorimétrica, corresponde pues al denominado Poder Calorífico Superior (PCS).

En aplicaciones industriales y/o domésticas se utiliza el PCS, que como se ve puede medirse directamente, y representa la energía total disponible en el combustible. Cuando se trata de biomasa forestal, es preferible utilizar el Poder Calorífico Inferior (PCI), que nos indicaría el funcionamiento real de la caldera.

Interesa además especificar el contenido en humedad de la muestra, a la hora de expresar su poder calorífico, y así distinguiremos entre poder calorífico sobre muestra bruta y poder calorífico sobre muestra seca, aplicables ambos a los poderes caloríficos superior o inferior.

2.1.4.4.6. Cálculo de poderes caloríficos a volumen constante [23]

Si quemamos una muestra que contiene  $W$  por ciento humedad, nos encontraremos para una masa de 1 Kg, con  $\left[1 - \frac{W}{100}\right]$  de combustible seco, los cuales por combustión completa y posterior condensación del agua formada, nos aportarán  $(PCS)_s \cdot \left[1 - \frac{W}{100}\right] Kcal$ ; llegando entonces a una primera relación entre poderes caloríficos que podemos expresar:

$$(PCI)_b = (PCS)_s \left(1 - \frac{W}{100}\right) \quad (2)$$

representando los subíndices, b y s, muestra bruta y seca.

Tomando para el calor de vaporización del agua el valor de  $585 \text{ cal g}^{-1}$ , y teniendo en cuenta que la cantidad de agua formada en la combustión será nueve veces superior al contenido en hidrógeno total del combustible, tendremos:

$$(PCI)_b = (PCS)_b - 5,85(W + 9H_b) \quad (3)$$

Para determinar  $W$ , partimos del hecho de que el agua higroscópica se pierde entre  $100$  y  $105 \text{ }^\circ\text{C}$ , con lo cual bastará colocar en horno o estufa de secado un peso conocido de muestra y mantenerlo a esa temperatura el tiempo necesario para que dos pesadas sucesivas no registren pérdida de peso; en cuyo caso se considera que la muestra está desecada.

Si nos referimos a muestra seca  $W=0$ , y entonces:

$$(PCI)_s = (PCS)_s - 5,85 \cdot (9H_s) \quad (4)$$

o lo que es lo mismo

$$(PCI)_s = (PCS)_s - 52,65H_s \quad (5)$$

Podemos ahora obtener otras relaciones entre los poderes caloríficos definidos:

Sustituyendo (2) en (3), tenemos:

$$(PCI)_b = (PCS)_s \left[1 - \frac{W}{100}\right] - 5,85(W + 9H_b) \quad (6)$$

y llamando coeficiente de humedad  $K$ , a la relación:

$$K = \left[1 - \frac{W}{100}\right] \quad (7)$$

tendremos:

$$(PCI)_b = (PCS)_s K - 5,85(W + 9H_b) \quad (8)$$

Otra expresión, muy útil, puede obtenerse teniendo en cuenta que

$$H_b = H_s K \quad (7)$$

Sustituyendo en (3) y operando, llegamos a:

$$(PCI)_b = (PCI)_s K - 5,85W \quad (9)$$

#### 2.1.4.4.7. Calibrado del calorímetro

El proceso de calibración realizado con ácido benzoico certificado y suministrado por la casa IKA, es la garantía para la obtención de unos resultados de medición exactos y reproducibles. Este proceso, que se hace de la misma manera que cualquier experiencia calorimétrica pero usando ácido benzoico en vez de una muestra de combustible cualquiera [32, 40-46], debe realizarse antes de la primera medición y de manera periódica o después de trabajos de mantenimiento en el equipo y/o de sustitución de piezas.

El calibrado debe realizarse en el método de trabajo en el que se estén realizando las mediciones (adiabático, isoperibólico o dinámico) y con cada una de las bombas calorimétricas.

El objetivo del calibrado es quemar una determinada cantidad de sustancia de referencia en la bomba calorimétrica en condiciones de experimento. Como se conoce el poder calorífico de la sustancia, al producirse su combustión es posible calcular la capacidad térmica del equipo (parte invariable) basándose en el aumento de temperatura del sistema calorimétrico. Por lo tanto lo que estamos haciendo es cuantificar la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura del sistema calorimétrico en 1 K.

#### 2.1.4.4.8. Determinación del poder calorífico: desarrollo de un experimento

Como ya hemos visto, en nuestro calorímetro vamos a provocar la combustión de la muestra en unas condiciones perfectamente definidas. De forma muy general se puede explicar el proceso de la siguiente manera [32]:

1. Cargamos la muestra de combustible, previamente pesada en una balanza de precisión Mettler Toledo XS 104, en el soporte interior de la bomba calorimétrica. Para ello se introduce la muestra en un crisol de cuarzo. La muestra, de 0,5 g

aproximadamente, puede encontrarse en forma de polvo, astilla fina, o como una pastilla previamente prensada en una prensa de pastillas.

2. A continuación la muestra de combustible se pone en contacto con el hilo de platino de la cabeza de la bomba a través de un hilo de algodón con una energía de combustión de  $50 \text{ J unidad}^{-1}$  [32]. En la Figura de la derecha se observa la cabeza de la bomba en el soporte del calorímetro con el hilo de algodón atado al cable de platino y en contacto con las muestras depositadas en el crisol de cuarzo.

3. En el interior de la bomba se introducen 5 ml de agua destilada con el objetivo de saturar las superficies inferiores y asegurar así que el agua que se produce en la combustión lo hace en estado líquido consiguiendo un estado definido que nos permite, en caso necesario, registrar a mayores cuantitativamente los ácidos formados por titración con NaOH 0,1 M y rojo de metilo al 0,1 % [34-36].

4. Con la intención de optimizar el desarrollo de la combustión, se introducen en el interior de la bomba 30 bar de  $\text{O}_2$  puro (99,995 %).

5. A continuación se provoca la combustión de la muestra y se mide el aumento de temperatura. El poder calorífico específico de la muestra se obtiene a partir de:

- El peso de la muestra de combustible.
- La capacidad térmica del sistema calorimétrico. Su determinación, que se hace regularmente, se hace a través de un proceso de calibración del que hablaremos más adelante.
- Del aumento de la temperatura del agua en la vasija interior de la célula de medición.

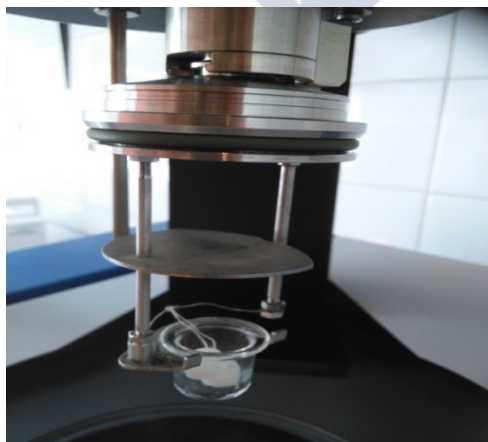


Figura 26. Detalle de la colocación del hilo de algodón en la cabeza de la bomba. Este hilo, atado al filamento de platino, facilita la combustión de la muestra funcionando como una mecha. En la Figura se puede observar la placa de protección que tienen los electrodos de la cabeza.

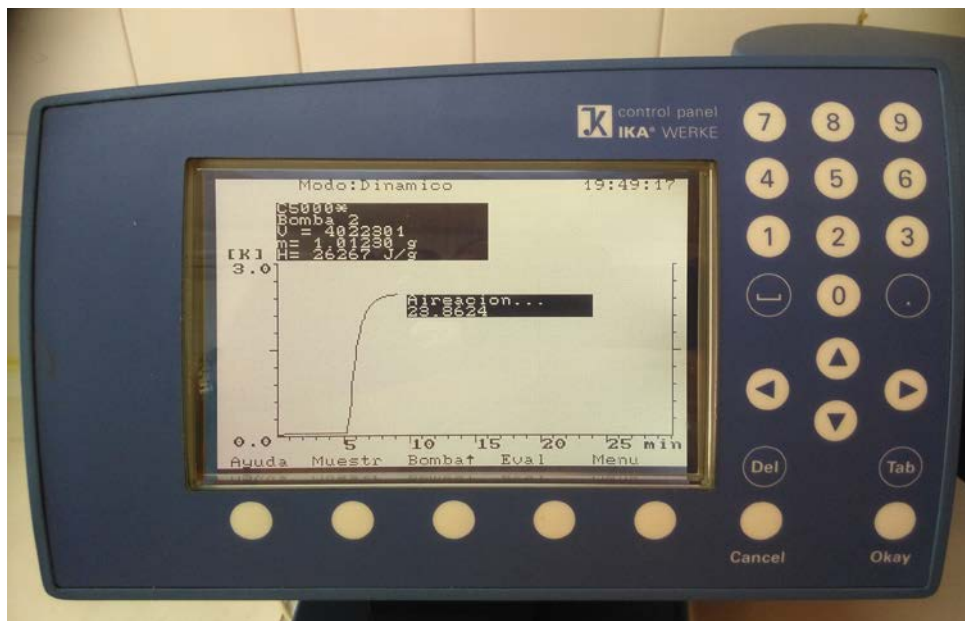


Figura 27. En la consola del controlador, una vez finalizada la experiencia, puede observarse dato obtenido del poder calorífico. Además, y de forma sencilla, se recoge la gráfica temperatura-tiempo.

Por lo tanto para una determinación precisa del poder calorífico de una sustancia combustible se exige que la combustión se desarrolle en unas condiciones perfectamente definidas según unas normas preestablecidas que parten de los siguientes supuestos:

- Antes de la combustión la temperatura del combustible debe ser de 22 °C.
- Tanto el agua propia del combustible antes de la combustión como el agua que se forma al quemarse los compuestos hidrogenados del combustible debe encontrarse en estado líquido después de la combustión.
- No se produce oxidación del nitrógeno del aire.
- La composición de los productos de combustión gaseosos es oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y dióxido sulfuroso.

Pero es habitual que se formen durante combustión otro tipo de productos a mayores de los que suponen las normas. Es por esta razón, que se debe realizar un análisis químico previo a la muestra y otro a los productos generados en la combustión con el objetivo de realizar una corrección de los resultados [34-39]. Ahora ya podemos determinar el poder calorífico normalizado a partir del poder calorífico medio determinado en el calorímetro y los datos de la analítica.

El sistema calorimétrico IKA determina [32]:

- Por un lado el poder calorífico  $H_0$  (Poder calorífico superior a volumen constante), o cociente entre la cantidad de calor liberada en caso de una combustión completa y el peso de la muestra asumiendo que el agua que se forma antes de la combustión de los compuestos hidrogenados del combustible va a estar en estado líquido después de la combustión con una temperatura de referencia de 22 °C.
- Y por otro el valor calorífico  $H_u$  (Poder calorífico inferior a volumen constante) o el valor del poder calorífico menos la energía de condensación del agua contenida en el combustible y formada por la combustión. Es el valor de referencia desde el punto de vista técnico.

Pero tal y como comentamos antes, y debido a que durante un experimento de combustión se origina calor procedente de energía de "extraños", debemos realizar unas correcciones básicas:

- Corrección por el uso de medios de ignición. En este punto se incluye el calor de combustión del hilo de algodón y la energía eléctrica generada para provocar la ignición de la muestra.
- Corrección por el posible uso de sustancias auxiliares facilitadoras de la combustión. Sólo en caso de muestras poco inflamables o difícilmente se combustibles se recurre al uso de este tipo de sustancias. En nuestro la sustancia utilizada es el ácido benzoico certificado por el National Bureau of Standards (NBS-Standard Sample 39) [32, 40-46] con un poder calorífico certificado de  $26.460 \text{ J g}^{-1}$ .
- Corrección de ácido [34-36]. Debido a que la mayoría de las sustancias contienen azufre y nitrógeno, durante la combustión se forman  $\text{SO}_2$ ,  $\text{SO}_3$ , y  $\text{NO}_x$ . Estas sustancias en combinación con el agua de la combustión y la humedad dan lugar a ácido sulfúrico y nítrico mayoritariamente, así como calor de solución. Este calor de solución debe ser corregido para obtener el valor calorífico normalizado según la norma DIN 51900 [47].
- Corrección por restos de cenizas. Para ello se seca en una estufa de convección el crisol y se pesa [34-39], por diferencia de pesadas obtenemos el porcentaje de cenizas generado en la combustión. Si la experiencia calorimétrica se desarrolla correctamente la presencia de cenizas es

despreciable. Por este motivo no se contempla en el método dinámico ni en la Figura 28.

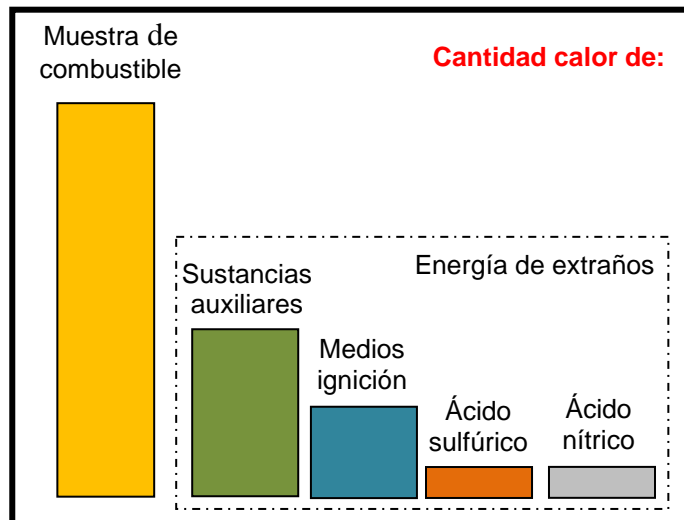


Figura 28. En la figura se recoge de manera esquemática los diferentes elementos responsables en la cuantificación del calor de combustión obtenido en cada experiencia calorimétrica. El valor final del poder calorífico de la muestra de combustible se obtiene mediante una corrección automática que realiza el equipo previa introducción del protocolo de trabajo por parte del operador.

En la Figura anterior se recoge de manera esquemática el calor de combustión de la muestra y la energía de extraños, y que puede fluctuar considerablemente en relación al calor de combustión de la muestra de combustible.

#### 2.1.4.4.9. Representación de los resultados

A medida que la experiencia va avanzando, en la consola se va realizando una representación gráfica de la misma en donde se muestra la variación de la temperatura, (T), frente al tiempo, (t). Todas las experiencias llevadas a cabo en este trabajo, al igual que las revisadas en la bibliografía [48], se pueden dividir en tres periodos principales tal y como se puede ver en la Figura 29:

- Periodo inicial (AB), se caracteriza porque el cambio de temperatura del calorímetro es debido a la transferencia de calor desde la camisa, con una temperatura mayor que la del calorímetro, y a la energía de agitación.
- Periodo principal (BC), en el cual tiene lugar la mayor parte del incremento de temperatura causado por la combustión que se produce dentro de la bomba.

- Periodo final (CD), en el que al igual que en el periodo inicial, el incremento de temperatura es debido a la energía de agitación y a la transferencia de calor entre la camisa y el calorímetro.

Los tramos (AB) y (CD), que corresponden a los periodos inicial y final respectivamente, son curvas en las que la variación de la temperatura en función del tiempo se puede aproximar, a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{dT}{dt} = k(T_{\infty} - T) \quad (9)$$

donde  $T_{\infty}$  es la temperatura a la que llegaría el calorímetro en un tiempo infinito si la velocidad de agitación se mantuviese constante, y recibe el nombre de temperatura de convergencia del calorímetro y  $k$  es la constante de enfriamiento o gradiente de temperatura cuando  $T_{\infty} - T$  es igual a 1 K, siendo sus dimensiones de tiempo<sup>-1</sup>.

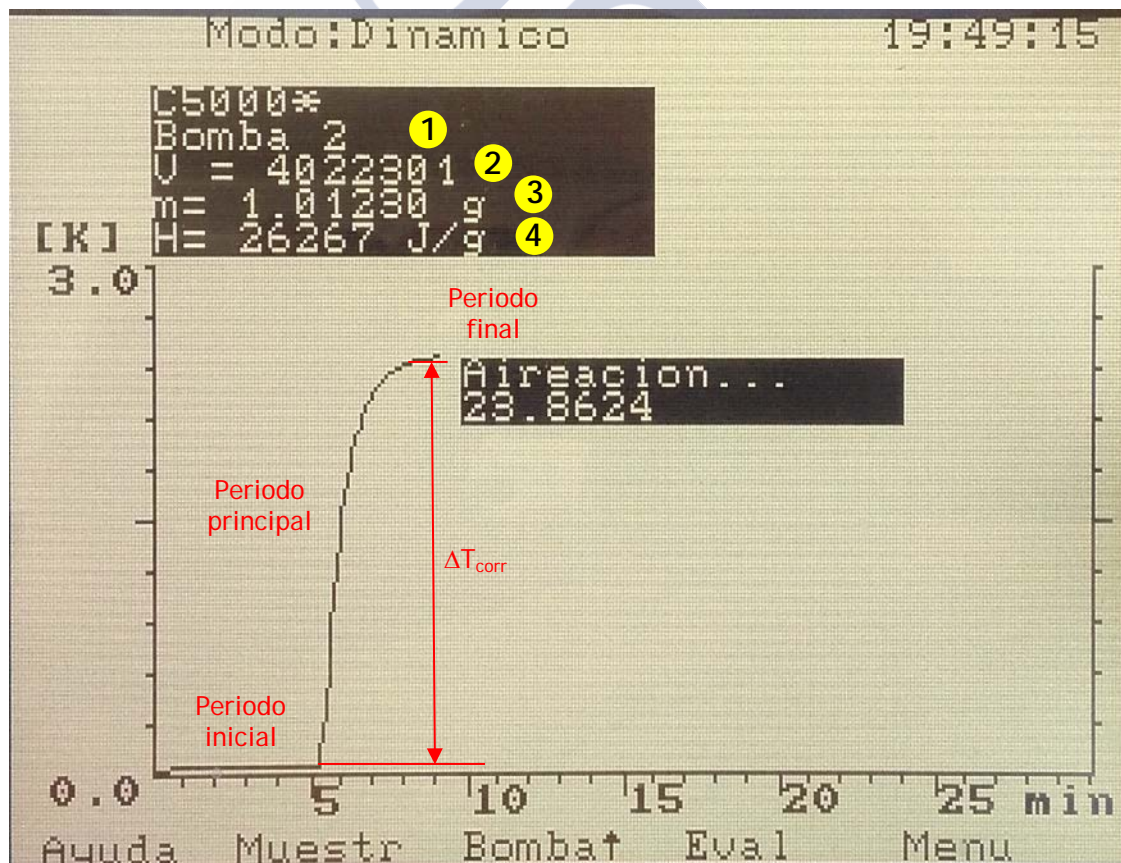


Figura 29. En la consola del controlador, una vez finalizada la experiencia, puede observarse la identificación de la bomba calorimétrica (1), la denominación automática de la muestra y que el equipo guarda en su base de datos (2), la masa de la muestra (3) y el valor obtenido del poder calorífico (4). Además, y de forma sencilla, se recoge la gráfica temperatura-tiempo en donde se pueden observar los tres periodos (inicial, principal y final), y la  $\Delta T_{corr}$ , valor que el calorímetro usa como referencia para el cálculo del poder calorífico [23, 49-51].

En la Figura 29 se observa una gráfica obtenida en una experiencia calorimétrica. Estas gráficas son similares a las extraídas en la bibliografía.

#### 2.1.4.5. Análisis termogravimétrico: TGA

##### 2.1.4.5.1. Generalidades de la técnica

La termogravimetría (TGA o TG), es una rama del análisis térmico, que estudia el cambio de masa de una muestra en función del tiempo (método isoterma), o en función de la temperatura (método dinámico). Este cambio puede ser debido a reacciones químicas, procesos de descomposición, evolución de disolventes, transiciones de Curie u oxidaciones. Por este motivo esta técnica es utilizada habitualmente para caracterizar la descomposición y la estabilidad térmica de materiales bajo determinadas condiciones y/o para examinar las cinéticas de los procesos físico-químicos que ocurren en la muestra.

Aunque no en todos los acontecimientos térmicos se produce necesariamente un cambio en la masa de la muestra, y como ejemplo tenemos una cristalización o una transición vítrea, existe un gran número de procesos en los que sí se experimenta una pérdida de masa considerable. Así tenemos casos como el de la absorción, oxidación y/o reducción. Este cambio de masa depende de las condiciones experimentales empleadas como la masa, volumen y estado físico de la muestra, la forma y naturaleza del horno, la presión atmosférica o la velocidad de calentamiento. Por lo tanto, las condiciones experimentales deben ser prefijadas y mantenidas a lo largo de toda la investigación para garantizar la reproducibilidad del método.

Una curva termogravimétrica representa generalmente el cambio de masa, expresado en porcentaje, frente al tiempo o a la temperatura, en función del tipo de ensayo. La reacción está caracterizada por dos temperaturas,  $T_i$  y  $T_f$ , que se denominan temperaturas de descomposición inicial y final, respectivamente, y sus valores no tienen un significado absoluto ni tampoco el intervalo  $(T_i, T_f)$ , ya que dependen de las condiciones de trabajo.

El análisis termogravimétrico se presenta como una opción adecuada para la caracterización de las fracciones lábiles y estables de biocombustibles aportando información valiosa tanto sobre su "durabilidad" en una caldera convencional como de las cenizas y escorias que éste puede generar. Esta información nos permite tener una

idea clara no sólo de la cantidad de productos de deshecho producidos sino también de las necesidades de combustible, y por lo tanto y de forma indirecta, del rendimiento de las instalaciones de calefacción y ACS (Agua Caliente Sanitaria).

#### 2.1.4.5.2. Descripción del equipo

El sistema de análisis térmico TGA7 de Perkin Elmer [50] con el que trabajamos en este estudio nos permite cuantificar el cambio de masa que experimenta una muestra de biomasa en función de la temperatura o del tiempo. El equipo está compuesto por un analizador termogravimétrico, un controlador del sistema y un registro gráfico (Figura 30). De forma más detallada el analizador se compone de dos elementos [52]:

- Una microbalanza electrónica, basada en el sistema de balance nulo, para lo que utiliza un motor de torsión servo-controlado que compensa los cambios de masa que se van generando durante el experimento. Así, la potencia eléctrica necesaria para mantener el sistema en el balance nulo es directamente proporcional al cambio de masa de la muestra. Es extremadamente sensible, pudiendo detectar variaciones de hasta  $0,1 \mu\text{g}$  con una capacidad máxima de muestra de 130 mg. Cuando se coloca la muestra en el portamuestras, su soporte se desvía y un detector de desviación mide su posición por medio de un sensor óptico. Para que el soporte retorne a su posición original se necesita un suministro de corriente eléctrica, y esta cantidad de corriente necesaria para este proceso nos permite conocer la variación de la masa de la muestra.
- Un horno con un rango muy amplio de temperaturas, desde temperatura ambiente hasta  $900 \text{ }^\circ\text{C}$ , y con velocidades de calentamiento muy distintas, entre ( $0,1 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $200 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ ), en incrementos de  $0,1 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ . Este horno de pequeño tamaño está recubierto de platino para favorecer que los calentamientos y enfriamientos sean lo más rápidos posible (hasta  $200 \text{ }^\circ\text{C min}^{-1}$ ) y que los tiempos entre ensayos se acorten. Esto es posible gracias a un calentador y un termostato, que detecta su propia temperatura y suministra energía suficiente para calentar la muestra con gran precisión y sensibilidad en el control de la temperatura. Las medidas de temperatura en el interior del horno a lo largo de todo el ensayo están controladas por un termopar de cromel-alumel situado en la base del horno.



Figura 30. Foto TG. A la izquierda se puede observar en detalle la TG con el horno abierto y con el ordenador, y a la derecha la cápsula de aluminio abierta en donde se introduce la muestra colgando de la balanza.

#### 2.1.4.5.3. Calibrado de la TGA

El calibrado de la termobalanza se realiza siguiendo de manera rigurosa las instrucciones suministradas por Perkin-Elmer en la rutina Calibration Program [52] con sus patrones de calibrado. Para realizar un calibrado completo del equipo hay que realizar tres calibrados "parciales":

- Un calibrado del horno, realizado automáticamente por el equipo entre el límite de las dos temperaturas a las que se van a realizar los experimentos.
- Un calibrado de la temperatura, consistente en utilizar las temperaturas de los puntos de Curie (temperatura por encima de la cual un material ferromagnético pierde su magnetismo, convirtiéndose en paramagnético) de distintos metales y aleaciones. En este trabajo se emplearon específicamente dos aleaciones, el alúmel ( $T_c=163\text{ }^\circ\text{C}$ ) y el perkalloy ( $T_c=596\text{ }^\circ\text{C}$ ).
- Un calibrado en peso utilizando un patrón de 100 mg suministrado por la casa.

#### 2.1.4.5.4. Realización de una experiencia de termodegradación: desarrollo de un experimento

Antes de comenzar con el experimento debemos abrir los gases que se van a utilizar, en nuestro caso aire sintético Zero para el horno y nitrógeno Premier como purga. A continuación, se enciende la campana extractora de gases conectada al horno y el compresor, responsable del funcionamiento del sistema neumático que controla la apertura y cierre del horno.

Introducimos en el diálogo de trabajo la denominación de la experiencia y el protocolo de operación, principalmente el método (dinámico o isoterma) la velocidad de calentamiento y rango de temperaturas. Ahora ya estamos en disposición de iniciar el procedimiento experimental. Así y de forma muy resumida:

1. Leemos el cero e introducimos unos 3 mg de muestra en forma de polvo en el plato de la termobalanza. Cuanto más fina sea la muestra mejor representatividad y reproducibilidad vamos a obtener. Mandamos el horno a 50 °C mientras estamos preparando el experimento para asegurarnos de mantener las condiciones de inicio lo más estables posibles.
2. Cerramos el horno con la muestra en el interior y comprobamos el peso de la misma. Una vez estabilizado este peso comenzamos con la experiencia de termodegradación.
3. Reajustamos los ejes para trabajar en ordenadas con masa en % y en abscisas con temperatura de (50 a 800) °C.

En este estudio se realizó también un experimento isoterma a 600 °C con una de las muestras con el objetivo de reproducir las condiciones de trabajo en una caldera. Para ello se repite el procedimiento experimental anteriormente comentado con las modificaciones puntuales en la velocidad de calentamiento, de 200 °C min<sup>-1</sup>, y en la temperatura máxima, de 600 °C. Con este tipo de experimentos tratamos de cuantificar el tiempo de degradación del combustible y que podría ayudar a valorar las cantidades necesarias de combustible en una caldera convencional.

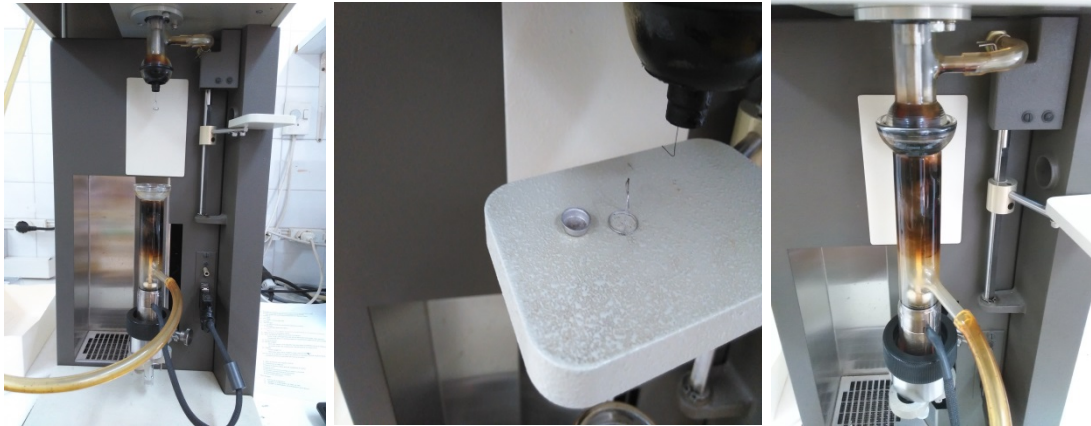


Figura 31. Foto TG. Se puede observar en detalle la TG con el horno abierto (izquierda), y la cápsula de aluminio abierta en donde se introduce la muestra (centro), y la TG con el horno ya cerrado (derecha).

#### 2.1.4.5.5. Interpretación de los resultados

En termogravimetría existen numerosos factores que pueden afectar a la naturaleza, precisión y exactitud de los resultados obtenidos, destacando de forma importante aquellos debidos a la naturaleza dinámica del cambio de temperatura que sufre la muestra a lo largo del experimento. Entre estos factores se deben destacar:

- La velocidad de calentamiento, con una gran influencia en la forma del termograma, principalmente en lo que se refiere a la determinación de las temperaturas inicial,  $T_i$ , y final,  $T_f$ , de la reacción.
- La atmósfera del horno.
- La masa de la muestra [53, 54], por ser los que más modifican las curvas termogravimétricas.

Como ya se ha comentado anteriormente, una curva termogravimétrica (TG) representa el cambio de masa que experimenta una muestra frente a la temperatura o al tiempo. En la Figura 32 se muestra una curva termogravimétrica de un único escalón. En ella la reacción se distingue por dos temperaturas características,  $T_i$  y  $T_f$ . De forma más concreta se puede decir que  $T_i$  es la temperatura previa a la descomposición, o dicho de otra manera, la temperatura más baja a la cual la aparición (onset) de un cambio de masa es detectable, bajo unas determinadas condiciones experimentales. De la misma manera  $T_f$  es la temperatura final o temperatura más baja a la que el proceso de pérdida de masa ha acabado.

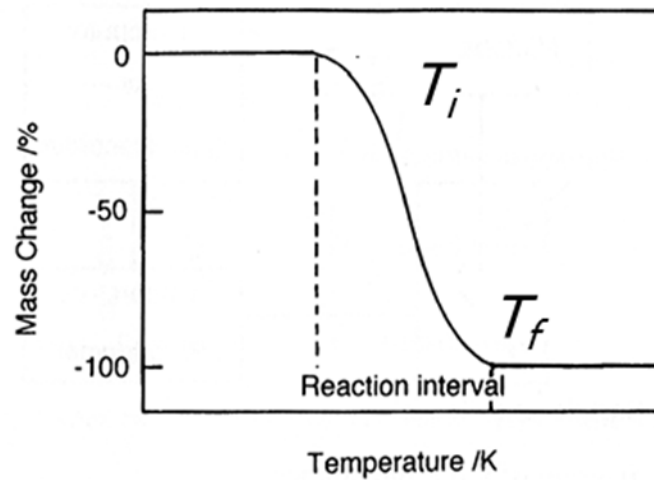


Figura 32. Curva típica de un proceso de termodegradación con un único escalón de descomposición [55].

La pérdida porcentual de masa,  $M_L$ , que se define como positiva, viene dada por la expresión:

$$M_L = \frac{m_i - m_f}{m_i} 100 \quad (10)$$

en donde  $m_i$  y  $m_f$  son las masas correspondientes a las temperaturas  $T_i$  y  $T_f$ . Después de la reacción de descomposición aparece un residuo que puede ser cuantificado a través de la siguiente expresión:

$$R = \frac{m_f}{m_i} 100 \quad (11)$$

La derivada de un termograma (DTG) es una función muy utilizada ya que nos permite conocer la velocidad de pérdida de masa y la temperatura a la cual la velocidad del proceso de termodegradación es máxima.

La velocidad de pérdida de masa se puede expresar matemáticamente como función del tiempo:

$$\frac{dm}{dt} = f(t) \quad (12)$$

o, menos frecuentemente, como función de la temperatura:

$$\frac{dm}{dT} = f(T) \quad (13)$$

En cualquiera de los casos, se obtienen una serie de picos cuyas áreas son proporcionales al cambio total de masa. La meseta que se puede observar en la curva

original corresponde a la zona horizontal de la curva derivada en la que  $\frac{dm}{dT} = 0$ . En la curva derivada se obtiene un máximo cuando la curva original tiene un punto de inflexión.

Tanto la curva original como la derivada ofrecen la misma información si se obtienen bajo las mismas condiciones experimentales [56]. Sin embargo, Newkirk [56] encontró diferencias entre ambas destacando que la curva derivada es más precisa ya que muestra el onset de la reacción acompañado de una pequeña pérdida de masa y, permitiendo además determinar de modo exacto la temperatura de la reacción de forma mejorada. Este último punto está considerado por algunos autores como la ventaja más relevante del método.

Los principales tipos de curvas termogravimétricas se pueden observar en la Figura 33. Así tenemos los de:

- Tipo (i), la muestra no sufre descomposición con pérdida de productos volátiles en el rango de temperatura mostrado, y puede ser típico en reacciones de transición de fase, fundido, o polimerización.
- Tipo (ii), caracterizado por una rápida pérdida de masa inicial. Típico de procesos de desorción o secado.
- Tipo (iii), una descomposición de la muestra en un proceso simple. La curva se puede utilizar para definir los límites de estabilidad del reactante, determinar la estequiometría e investigar la cinética de las reacciones.
- Tipo (iv), típica de una descomposición multietapa con intermedios relativamente estables. En ella se pueden definir los límites de estabilidad del reactante e intermedios, y de forma más compleja la estequiometría la reacción.
- Tipo (v), representa también una descomposición multietapa, pero en ella los productos intermedios no son estables, y ofrece poca información de la estequiometría de la reacción.
- Tipo (vi), se observa una ganancia de masa como consecuencia de la reacción de la muestra con la atmósfera que la rodea.
- Tipo (vii), el producto de una reacción de oxidación se descompone a temperaturas más elevadas:  $2 Ag + \frac{1}{2} O_2 \rightarrow Ag_2O \rightarrow 2Ag + \frac{1}{2} O_2$

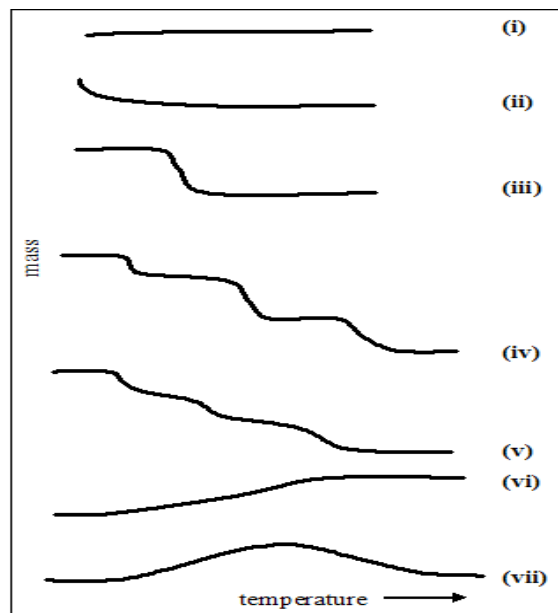


Figura 33. Principales tipos de curvas termogravimétricas [57].

En nuestro caso particular, como se verá más adelante, hemos obtenidos curvas de termodegradación con más de un escalón, y en las que las temperaturas de inicio y final de los procesos principales de descomposición no están claras. Es decir, curvas de tipo V. En estos casos, para una determinación más precisa de los intervalos de temperaturas en los que se producen los procesos de termodegradación, es más habitual recurrir a analizar las curvas derivadas y, posteriormente, sobre la curva original obtener la pérdida de masa asociada a los mismos.

El estudio de las diferentes muestras de biomasa se realizó mediante ensayos dinámicos. Con cada muestra se realizaron 3 experiencias. Antes de introducir las muestras en la TG, entre (2 y 5) mg, y tal y como se comentó en el punto, se secaron y molieron hasta alcanzar una textura pulverulenta gruesa. Los experimentos dinámicos se llevaron a cabo a las velocidades de calentamiento de  $10^{\circ}\text{C min}^{-1}$ , en un intervalo de temperaturas de  $(50^{\circ}\text{C a } 800^{\circ}\text{C})$ , y con un flujo de aire de  $14 \text{ ml min}^{-1}$  y de nitrógeno de  $25 \text{ ml min}^{-1}$ . El porcentaje de biomasa quemada fue calculado a partir de las curvas de termodegradación y expresado como peso total porcentual perdido ( $m_{\text{TOTAL}}$ ) asociado a una descomposición térmica entre las temperaturas  $T_i$  y  $T_f$  [58]. Además, se llevó a cabo un estudio de la cinética de degradación, para lo cual fue necesario realizar diferentes experimentos a diferentes velocidades de calentamiento ( $10, 20, 30, 40$  y  $50^{\circ}\text{C min}^{-1}$ ). Debido a la similitud de los resultados el estudio cinético se hizo únicamente en una de

las muestras estudiadas anteriormente (1BS<sub>NO</sub>U) con la intención de calcular la energía de activación del proceso de degradación térmica, que es otra manera de caracterizar la estabilidad térmica de un combustible.

A partir de la pérdida de masa asociada al proceso de degradación en atmósfera de aire, se puede determinar la durabilidad del material combustible que se ha quemado durante el ensayo. Como se verá más adelante, en el análisis de los resultados obtenidos se observó en muchos casos más de un escalón de termodegradación (varios picos en la curva derivada) lo que se puede asociar a los diferentes contenidos de celulosa y lignina de la madera y que tienen una diferente estabilidad térmica por ir asociados a diferentes intervalos de temperaturas de combustión,  $\Delta m_1$ ,  $\Delta m_2$  y  $\Delta m_3$  en nuestro caso.

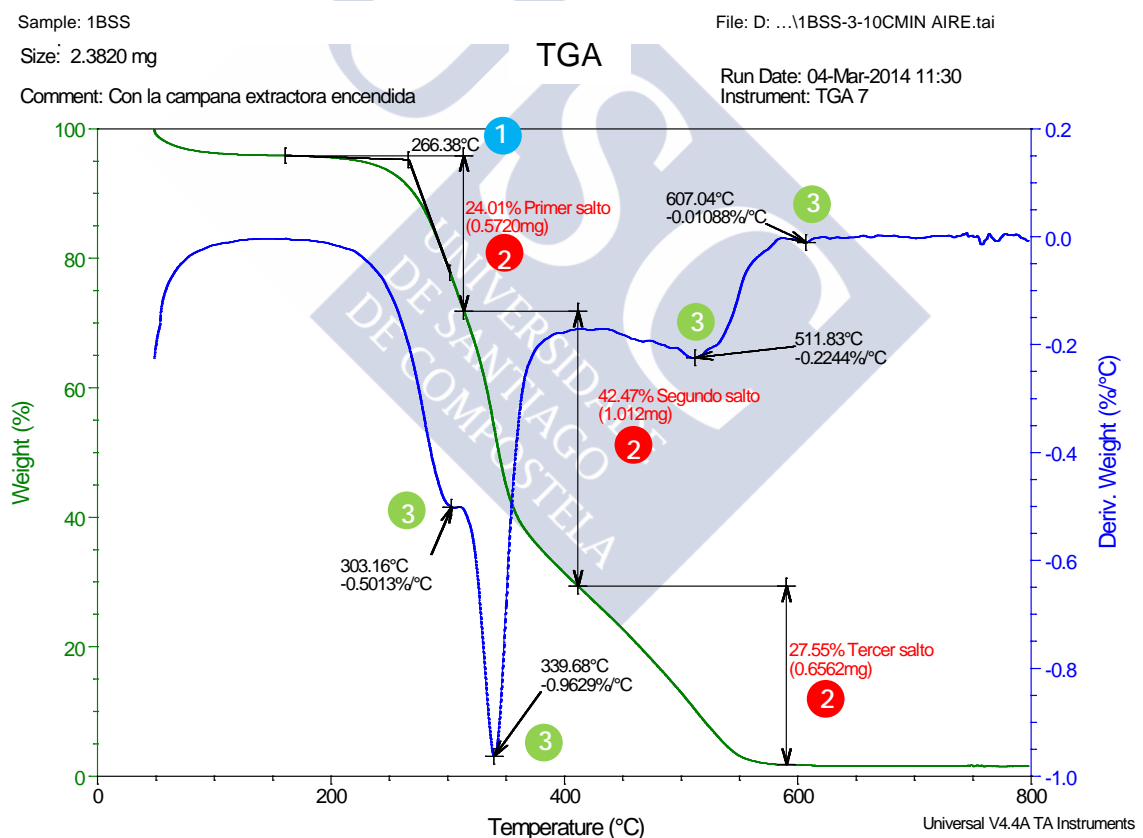


Figura 34. Puntos básicos para el análisis de una curva termogravimétrica típica (TG) y su derivada (DTG) para una muestra de biomasa 1BSS del muestreo de Marzo-Abril.

En la Figura 34 se muestran los puntos básicos para el análisis de una curva termogravimétrica típica en verde (TG) y su derivada en azul (DTG) para una de las muestras estudiadas (1BSS). En ella se puede analizar la pérdida de peso de la muestra

de biomasa debida al calentamiento frente a la temperatura. Así tenemos en la parte superior la Temperatura del ON SET ( $T_{ONSET}$ ) las pérdidas porcentuales de masa  $\Delta m_1$ ,  $\Delta m_2$ ,  $\Delta m_3$ ,  $\Delta m_4$  (%) y las temperaturas de los picos  $T_{PICO1}$ ,  $T_{PICO2}$ ,  $T_{PICO3}$ ,  $T_{PICO4}$  que se usan de referencia para los cálculos de pérdida de masa ( $\alpha$ ). Todas ellas presentaron curvas TG de perfiles similares, con varios escalones de degradación poco definidos (curvas tipo V) y cuya interpretación se hace más sencilla con la ayuda de las curvas derivadas (DTG).

#### 2.1.4.5.6. Análisis de la cinética de degradación térmica

A la hora de caracterizar la degradación térmica de un material, a menudo se habla en términos de la conversión, que se define como:

$$\alpha = \frac{m_0 - m}{m_0 - m_\infty} \quad (14)$$

Teniendo en cuenta que el análisis termogravimétrico relaciona la conversión con el tiempo y/o la temperatura, se puede diseñar un modelo cinético que describa la degradación térmica del sistema. El modelo matemático que se ha tenido en cuenta expresa la velocidad de reacción de la siguiente manera:

$$\frac{d\alpha}{dt} = kf(\alpha) \quad (15)$$

Donde  $\alpha$  es el grado de conversión,  $k(T)$  la constante de velocidad y  $f(\alpha)$  es una función que depende del mecanismo de descomposición.

El cambio de masa es función de la temperatura y su efecto se introduce a través de la ecuación de Arrhenius:

$$k = Ae^{-\frac{E}{RT}} \quad (16)$$

Donde A es un factor preexponencial, E es la energía de activación y R es la constante de los gases.

Combinando estas dos ecuaciones, la expresión de la velocidad de la reacción puede escribirse como:

$$\frac{d\alpha}{dt} = Ae^{-\frac{E}{RT}} f(\alpha) \quad (17)$$

Si la temperatura de la muestra se modifica de forma constante, es decir, si estamos trabajando en un régimen dinámico, la variación en el grado de conversión puede ser analizada como función de la temperatura que, a su vez, depende del tiempo. En estos casos, la ecuación de la velocidad se escribe de la siguiente manera:

$$\frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\alpha}{dT} \frac{dT}{dt} = \beta \frac{d\alpha}{dT} \quad (18)$$

En la que  $\beta$  es la velocidad de calentamiento.

Si despejamos  $d\alpha/dT$ :

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{1}{\beta} \frac{d\alpha}{dt} \quad (19)$$

La combinación de las expresiones (17) y (19) conduce a:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} f(\alpha) \quad (20)$$

Separando variables en esta ecuación e integrando desde una temperatura inicial  $T_0$  correspondiente a una conversión  $\alpha_0$ , hasta una temperatura final  $T_p$  con una conversión  $\alpha_p$ , obtenemos:

$$\int_{\alpha_0}^{\alpha_p} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_{T_0}^{T_p} e^{-\frac{E}{RT}} dT \quad (21)$$

Para temperaturas iniciales bajas es razonable suponer que  $\alpha_0=0$  y, admitiendo que no existe reacción alguna entre 0 y  $T_0$ , se puede definir la función integral de conversión  $g(\alpha)$  como:

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha_p} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_0^{T_p} e^{-\frac{E}{RT}} dT \quad (22)$$

donde A, E y  $g(\alpha)$  o  $f(\alpha)$  han de ser obtenidas experimentalmente.

Como ya se comentó antes se ha llevado a cabo el estudio cinético de las muestras de biomasa forestal (1BS<sub>NO</sub>U) por métodos dinámicos diferenciales e integrales, cuya diferencia radica en que los primeros se basan en la ecuación general de la velocidad y los segundos en su forma integrada. Se ha seleccionado sólo esta muestra debido a la semejanza entre los datos obtenidos en el análisis termogravimétrico previo para todas las muestras analizadas.

### Método de Kissinger

El análisis de los cambios de masa, producidos como consecuencia de variaciones en la velocidad de calentamiento, es la base de los métodos diferenciales más poderosos para el estudio y determinación de parámetros cinéticos. Uno de los más utilizados es el método de Kissinger [59], que utiliza el punto de inflexión del termograma para la determinación de la energía de activación.

Kissinger diferenció la ecuación general de velocidad y obtuvo:

$$\frac{d^2\alpha}{dt^2} = \frac{E\beta}{RT^2} \frac{d\alpha}{dt} + A e^{-\frac{E}{RT}} \frac{df(\alpha)}{dt} \frac{d\alpha}{dt} = \left[ \frac{E\beta}{RT^2} + A e^{-\frac{E}{RT}} \frac{df(\alpha)}{dt} \right] \frac{d\alpha}{dt} \quad (23)$$

Particularizando la ecuación anterior para el punto de inflexión a la temperatura  $T_m$  a la cual ocurre la máxima degradación, i. e.:  $\frac{d^2\alpha}{dt^2} = 0$ ,

$$0 = \frac{E\beta}{RT_m^2} + A e^{-\frac{E}{RT_m}} f'(\alpha_m) \quad (24)$$

Reordenando y tomando logaritmos, la ecuación adopta la forma:

$$\ln\left(\frac{\beta}{T_m^2}\right) = -\frac{E}{RT_m} + \ln\left[f'(\alpha_m) \frac{AR}{E}\right] \quad (25)$$

El método de Kissinger, puede utilizarse independientemente de la conversión, con lo que no es necesario conocer el orden de reacción,  $n$ , para determinar la energía de activación de descomposición. Si consideramos que el comportamiento general de la degradación obedece a una función tipo  $f(\alpha)=(1-\alpha)^n$ , que es la función típicamente usada para la cinética de degradación de biomasa [60] y repitiendo el proceso matemático anterior, se obtiene:

$$\frac{d\alpha}{dT} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} f(\alpha) = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} (1-\alpha)^n \quad (26)$$

Volviendo a derivar:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\alpha}{dT^2} &= \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} \frac{E}{RT^2} (1-\alpha)^n - \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} (1-\alpha)^{n-1} n \frac{d\alpha}{dT} = \\ &= \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} \frac{E}{RT^2} (1-\alpha) - \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} \frac{(1-\alpha)^n}{(1-\alpha)} n \frac{d\alpha}{dT} \quad (27) \\ &= \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT}} (1-\alpha)^n \left[ \frac{E}{RT^2} - \frac{n}{(1-\alpha)} \frac{d\alpha}{dT} \right] \end{aligned}$$

Con lo que:

$$\frac{d\alpha^2}{dT^2} = \frac{d\alpha}{dT} \left[ \frac{E}{RT^2} - \frac{n}{(1-\alpha)} \frac{d\alpha}{dT} \right] \quad (28)$$

En el punto de inflexión se anula la segunda derivada, y a la temperatura de degradación máxima, se obtiene:

$$\frac{E}{RT_m^2} = \frac{n}{1-\alpha_m} \frac{d\alpha}{dT_m} \quad (29)$$

de modo que para conocer E deberíamos conocer n, ya que  $d\alpha/dT_m, \alpha_m$  y  $T_m$  son datos experimentales evaluables a partir de ensayos termogravimétricos.

Combinando las ecuaciones (26) y (29) para  $\alpha_m$ :

$$\frac{E}{RT_m^2} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT_m}} (1-\alpha_m)^n \frac{n}{1-\alpha_m} = \frac{A}{\beta} e^{-\frac{E}{RT_m}} n (1-\alpha_m)^{n-1} \quad (30)$$

Como para un valor determinado de n,  $(1-\alpha_m)$  es constante, tenemos que despejando  $\frac{\beta}{T_m^2}$  y tomando logaritmos:

$$\ln \left( \frac{\beta}{T_m^2} \right) = \ln \left[ \frac{AR}{E} n (1-\alpha)^{n-1} \right] - \frac{E}{RT_m} \quad (31)$$

De esta forma, una representación de  $\ln (\beta/T_m^2)$  frente a  $1.000/T_m$ , conduce al valor de E sin un conocimiento previo del mecanismo de reacción siempre que esta sea de orden n. Criado y Ortega [61] determinan la influencia de la cinética de la reacción y el error en el cálculo de la energía de activación utilizando este método.

En el presente trabajo se ha empleado el método de Kissinger para analizar la cinética de degradación de la biomasa pero, en nuestro caso, dado que la curva presenta varios escalones correspondientes a los diferentes tipos de material

degradado, se han calculado las energías de activación correspondiente a cada escalón de degradación [62].

### Métodos de isoconversión

Los métodos de isoconversión se basan en el principio de isoconversión que establece que la velocidad de reacción, a un valor de la conversión constante, sólo es función de la temperatura. En este trabajo se utilizarán los métodos de Flynn-Wall-Ozawa, y el método de Friedman.

### Método de Flynn-Wall-Ozawa [63, 64]

Se trata de integrar:

$$g(\alpha) = \int_0^{\alpha_p} \frac{d\alpha}{f(\alpha)} = \frac{A}{\beta} \int_0^T e^{-\frac{E}{RT}} dT \quad (32)$$

Para ello se introduce la variable:

$$x = \frac{E}{RT} \quad (33)$$

Despejando T y diferenciando:

$$T = \frac{E}{Rx} \text{ y } dT = -\frac{E}{Rx^2} dx$$

y cambiando los límites de integración:  $\begin{cases} T \rightarrow 0 \Rightarrow x \rightarrow \infty \\ T \rightarrow T \Rightarrow x \rightarrow \frac{E}{RT} \end{cases}$  se obtiene:

$$g(\alpha) = \int_{\infty}^x \frac{A}{\beta} \left( -\frac{E}{R} \right) \frac{e^{-x}}{x^2} dx = \frac{AE}{\beta R} p(x) \quad (34)$$

donde  $p(x) = \int_{\infty}^0 \frac{e^{-x}}{x^2} dx$ .

Esta nueva integral puede ser evaluada para varios valores de x y en la bibliografía existen varias aproximaciones [65, 66].

Una de las series más comúnmente utilizadas para la estimación del polinomio es la expansión de Schlömilch, utilizada con buenos resultados por Doyle [67].

$$p(x) = \frac{e^{-x}}{(1+x)x} = \left( 1 - \frac{1}{x+2} + \frac{2}{(x+2)(x+3)} - \frac{3}{(x+2)(x+3)(x+4)} + \dots \right) \quad (35)$$

Doyle considera suficiente tomar sólo los dos primeros términos de cada serie, con lo que:

$$p(x) = \frac{e^{-x}}{x(x+2)} \quad (36)$$

y comprobó que para  $x > 20$  y tomando logaritmos podía expresar  $p(x)$  como:  $\log p(x) \approx -2.315 - 0.457x$ .

Flynn y Wall, por un lado, y Ozawa por otro, desarrollaron un método en el que usaban la aproximación de Doyle para, sin necesidad de conocer el orden de reacción, poder determinar la energía de activación. Según esto, la ecuación (34) se transforma en:

$$g(\alpha) = \frac{AE}{\beta R} \frac{e^{-x}}{x(x+2)} \quad (37)$$

Si tomamos logaritmos y reordenamos:

$$\log \beta = \log \frac{AE}{Rg(\alpha)} - 2.315 - \frac{0.457E}{RT} \quad (38)$$

El valor de E se obtiene a partir del ajuste de los datos del  $\log \beta$  frente a  $1/T$ , a un valor constante de  $\alpha$ .

### Método de Friedman [60, 68]

Tomando logaritmos neperianos en la ecuación (20), se obtiene:

$$\ln \left[ \beta \frac{d\alpha}{dT} \right] = \ln A + \ln [f(\alpha)] - \frac{E}{RT} \quad (39)$$

Esta ecuación es la base del método de Friedman, que es un método de isoconversión diferencial. Debido a que este método emplea valores de la velocidad de degradación instantáneos, es muy sensible al ruido experimental, y tiende a ser numéricamente inestable, especialmente cuando la velocidad de degradación se estima por derivación numérica de los datos experimentales [69].

Numerosos investigadores [70-72] han demostrado la validez de este modelo para estimar de modo preciso la energía de activación del proceso de degradación térmica,

debido a que no incluye ninguna aproximación matemática y la estimación de  $E$  es independiente de  $f(\alpha)$ .

El valor de  $E$  se obtiene a partir del ajuste de los datos del  $\ln(\beta \cdot d\alpha/dT)$  frente a  $1/T$  a un valor constante de  $\alpha$ .

Tanto el método de Flynn-Wall-Ozawa como el de Friedman, son métodos de isoconversión. Ello significa que las ecuaciones anteriores se aplican para un valor de la conversión dado, de manera que, haciendo un análisis similar en un amplio rango de conversiones, se pueden obtener diferentes valores para las energías de activación y, en el caso en que sea razonable, obtener la energía de activación del proceso de degradación como el valor medio de los obtenidos para un intervalo dado de conversiones.

El método de Flynn, igual que el de Friedman, es un método de isoconversión, pero integral. La ecuación que emplea Flynn para el análisis de la cinética se obtiene asumiendo que la energía de activación es constante. Esta consideración introduce algún error sistemático en la estimación de  $E_{\alpha}$ , si esta varía con  $\alpha$ . Este error no aparece en el método de Friedman. Por este motivo, se puede estimar el error sistemático de un método integral de isoconversión comparándolo con el método de Friedman. Según varios autores, la diferencia entre las energías de activación determinadas por métodos diferenciales y por métodos integrales, no excede, en general, del 10 % [69].



## 2.2. Bibliografía

- [1] Antonio Martínez Cortizas y Augusto Pérez Alberti. Atlas Climático de Galicia. Xunta de Galicia. Santiago de Compostela; 1999.
- [2] Montero de Burgos, J. L., González Rebollar, J. L. Diagramas Bioclimáticos. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza. Madrid; 1973.
- [3] <http://www2.meteogalicia.es/galego/observacion/estacions/estacionsinfo.asp?nest=10100&red=102&idprov=1>
- [4] Núñez Fernández, Olga. Aplicación de un procedimiento experimental basado en la calorimetría y el análisis térmico para el estudio de la productividad y sostenibilidad en suelos. Tesis Doctoral. Santiago de Compostela; 2011
- [5] Lisardo Núñez-Regueira, J.A. Rodríguez-Añón, J. Proupín, and A. Romero-García. *Bioresource Technology*. 2002;82:5-13.
- [6] Lisardo Núñez-Regueira, J.A. Rodríguez-Añón, J. Proupín, and A. Romero-García. *Bioresource Technology*. 2003;88:121-130.
- [7] L. Núñez-Regueira, J. Proupín-Castiñeiras and J. A. Rodríguez-Añón. *Thermochimica Acta*. 2004;420:29-31.
- [8] L. Núñez-Regueira, J. A. Rodríguez-Añón, J. Proupín, B. Mouriño, R. Artiaga-Díaz. *Journal of Thermal analysis and Calorimetry*. 2005;80:457-464.
- [9] J. A. Rodríguez-Añón, J. Proupín-Castiñeiras, M<sup>a</sup> Villanueva-López, and B. Mouriño-Carballido, *Thermochimica Acta*. 2007;458:5-10.
- [10] [http://www.usc.es/uxfs/IMG/Herramientas\\_selvicolas\\_para\\_la\\_gestion\\_forestal\\_sostenible\\_en\\_galicia.pdf](http://www.usc.es/uxfs/IMG/Herramientas_selvicolas_para_la_gestion_forestal_sostenible_en_galicia.pdf)
- [11] Montero, G. Ruiz-Peinado, R., Muñoz, M. Producción de Biomasa y Fijación de CO<sub>2</sub> por los bosques españoles. Monografías INIA, Serie Forestal, nº 13; 2005.
- [12] Blake G. R., Hartge K. H. Particle density. In: Klute, A. Editors. *Methods of Soil Analysis, Part 1 Physical and Mineralogical Methods*, second ed. American Society of Agronomy, Inc. and Soil Science Society of America, Inc. Madison. WI; 1998.
- [13] Lamprecht, I. Combustion calorimetry. In: Kemp, R.B. Editors. *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*. Elsevier. Amsterdam; 1999.
- [14] *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*. Serie P.K. Gallagher, Vol. 4, R. B. Kemp, Cap. 4, 14, Elsevier, Amsterdam; 1999.
- [15] Lisardo Núñez-Regueira, J. Rodríguez-Añón, J. Proupín, Antonina Vilanova Diz, *Thermochimica Acta*. 2002;394:279-289.

- [16] L. Núñez-Regueira, J. A. Rodríguez-Añón and J. Proupín-Castiñeiras. *Thermochimica acta*. 2004;422:81-87.
- [17] L. Núñez Regueira, J. A. Rodríguez Añón, J. Proupín Castiñeiras, A. Vilanova Diz, *Thermochimica Acta*. 2002;394:267-278.
- [18] L. Núñez Regueira, J. A. Rodríguez Añón, J. Proupín Castiñeiras, A. Vilanova Diz, A. Romero García, *Thermochimica Acta*. 2002;394:291-304.
- [19] <http://www.usc.es/gl/investigacion/riaidt/analise/equipamento.jsp>
- [20] Standard Test Method for Ash in Wood. ASTM D1102-84; 2007.
- [21] Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels. ASTM E872-82; 2006.
- [22] K. W. Ragland, D. J. Aerts and A. J. Baker, *Bioresource Technology* 1991;37:161-168.
- [23] Vilanova Diz, Antonina. Valoración energética de biomasa residual procedente de las explotaciones de pino de Galicia. Tesis Doctoral. Santiago de Compostela; 2003.
- [24] Sunner S.; *Combustion Calorimetry*, Vol. 1, Cap. 2, 13. In: S. Sunner and M. Mansson, Editors. Pergamon Press, Oxford; 1979.
- [25] Cox J. D.; Pilcher G.; *Thermochemistry of Organic and Organometallic Compounds*. Academic Press, London and New York; 1970.
- [26] Mansson M.; Hubbard W. N.; *Combustión Calorimetry*, Cap. 5. Sunner S. and Mansson M., Editors. Pergamon Press, Oxford; 1979.
- [27] Armstrong G.T.; *J. Chem. Educ.* 1964;41:297-307.
- [28] Kleiber, M.; *The Fire Of Life*. John Wiley, New York; 1961.
- [29] Thompson B.; *Phil. Mag.* 1813;(1),41:285.
- [30] Davy H.; *Phil. Trans.* 1817;107, 45:77.
- [31] Partington J.R.; *A History of Chemistry*. Vol. 3. MacMillan & Co, Londres; 1962.
- [32] [http://www.ika.com/ika/product\\_art/manual/ika\\_c\\_5000\\_english.pdf](http://www.ika.com/ika/product_art/manual/ika_c_5000_english.pdf)
- [33] Norme Internationale ISO 1928; 1976.
- [34] Jessup A.S. J.; *Res. Nat. Bur. Stand.* 1937;18:115.
- [35] Mehta R.K.S.; *J. Sci. Ind. Research.* 1954;1313:195.
- [36] Fujiwara S.; Narasaki J.; *Anal. Chem.* 1968;40:2031-2033.
- [37] Hubbard W.N.; Scott D.W.; Waddington G.; *Experimental Thermochemistry*. Vol. 1, Cap. 5. Rossini F.D. Editors. Interscience Publishers. Inc. New York; 1956

- [38] Prosen E.J.; *Experimental Thermochemistry*. Vol. 1, Cap. 6, Rossini F.D. Editors. Interscience Publishers Inc. New York; 1956.
- [39] Churney K.L., Domalsky E.S., Ledford A.E., Colbert J.C., Bruce S.S., Buckley T.J. Paule R.C.; Reilly M.L.; "Assesing the credibility of the calorific value of municipal waste". U.S. Departament of Commerce, National Bureau Standards, Washington; 1984
- [40] Svyetolavskii W., Popov M.J., *Russ. Phys. Chem. Soc.* 1914;46:935.
- [41] Svyetolavskii W., Popov M., Pakovich I.J. *Russ. Phys. Chem. Soc.* 1914;46:1293.
- [42] Svyetolavskii W. *J. Amer. Chem. Soc.* 1917;39:2595.
- [43] Verkade P.E. *Chem. Weekblad.* 1922;19:389.
- [44] Premier Rapport De La Commission Permanente De Termochimie. Union International de Chimie, Paris;1934.
- [45] Weaver E.R.; *J. Am. Chem. Soc.* 1913;35:1309.
- [46] Jessup A.S.; *J. Res. Nat. Bur. Stand.* 1940;25:747.
- [47] International Standards for Determining the gross calorific value of solid and liquid fuels using the isoperibol or static-jacket calorimeter, and calculation of net calorific value DIN 51900; 2000.
- [48] Cox J.D., Pilcher G. *Thermochemistry of Organic and Organometallic Compounds*. Cap. 3, Academic Press. London: 1970.
- [49] White W.P. *The Modern Calorimetry*. Reinhold Publishing Corporation, New York; 1928.
- [50] Coops J., Jessup R.S., Van Nes K., *Experimental Thermochemistry*. Vol. 1, Cap. 3. Rossini F.D. Editors. Interscience. Publishers Inc. New York; 1956.
- [51] Coops J., Van Nes K. *Rec. Trav. Chim. Pay Bas.* 1947;66:131.
- [52] Users Manual, 1200 Series TGA7. Thermal Analysis System. The Perkin Elmer Corporation; 1993.
- [53] Wendlandt, W. W. and Simons, E. L. *Thermochimica Acta.* 1972;3:171-175.
- [54] Criado, J. M. and Morales, J. *Thermochimica Acta.* 1978;23:257-261.
- [55] Hatakeyama, T. and Quinn, F. X. *Thermal Analysis*. John Wiley & Sons. Chichester; 1994.
- [56] Nerwick, E. and Simons, E. L. *Talanta.* 1966;13:1401-1404.
- [57] Hatakeyama, T. *Handbook of Thermal Analysis*. John Wiley & Sons, New York; 1998.

- [58] Salgado, J., Mato, M. M., Vázquez-Galiñares, A., Paz-Andrade, M., Carballás, T. *Thermochimica Acta*. 2004;410:141-148.
- [59] H. E. Kissinger, *Anal. Chem.* 1957;29:1702
- [60] Fasina, O. and Littlefield, B. *Fuel Processing Technology*. 2012;102:61-66
- [61] Criado, J. M. and A. Ortega, J. *Non-Crystalline Solids*. 1986;87:302-311.
- [62] Sasnal, S., Goud, V., Mohanty, K. J. *Therm. Anal. Calorim.* 2013;111:1649-1655.
- [63] Flynn, J. H. and Wall, L. A. *J. Res. Nat. Bur. Standars A Physics. Chem.* 1966;70A:487-523.
- [64] Ozawa, T. *Bull. Chem. Soc.* 1965;38:1881-1886.
- [65] Brown, M. E., Dollimore D. and Galwey, A. K. *Reaction in the Solid State* Comprehensive Chemical Kinetics, vol. 22, Elsevier, Amsterdam; 1980.
- [66] Kassman, A. J. *Thermochim. Acta*. 1985;84:89-99.
- [67] Doyle, C. D. *Nature*. 1965;207:290-291.
- [68] Friedman, H. *Journal of Polymer Science*. 1964;Part C 6:183-195
- [69] Vyazovkin, S. *Journal of Computational Chemistry*. 2001;22(2):178-183.
- [70] Vyazovkin, S. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*. 2006;83:45-51.
- [71] Dahyia, J. B., Kumar, K., Muller-Hagedorn, M., Bockhorn, H. *Polymer International*. 2008;57:722-729.
- [72] Brown, M. E., Maciejewski, M., Vyazovkin, S., Nomen, R., Sempere, J., Burnham, A., Opefermann, J., Strey, R., Anderson, H.L., Kemmler, A., Keuleers, R., Janssens, J., Dessenyn, H.O., Li, C., Tang, T.B., Roduit, B., Malek, J., Mitsuhashi, T. *Thermochimica Acta*. 2000;355:125-143.





**Capítulo 3**  
Presentación y discusión de  
los resultados





## Capítulo 3. Presentación y discusión de los resultados

Denominación	Pág.
3.1. Poderes caloríficos	107
3.2. Termogramas	116
3.3. Carbono fijo, cenizas y volátiles	128
3.4. Análisis elemental	130
3.5. Variables estructurales propias	131
3.6. Otras propiedades de interés	133
3.7. Bibliografía	138





Antes de abordar de forma minuciosa el estudio de los factores analizados y su influencia en el poder calorífico de la leña de roble, de forma global podemos adelantar, y con la intención de centrar la discusión de los resultados, que tanto la influencia de los factores ambientales como la de las variables dendrométricas es poco importante. Seguramente la genética, y en particular el individuo concreto en estudio, afecten de una manera mucho más determinante en el valor del poder calorífico.

Además la humedad edáfica y la fertilidad del suelo, aunque no son objeto de este trabajo, y en base a su influencia sobre la calidad de la madera [1], seguramente impliquen variaciones considerables en el rendimiento energético de la madera de *Quercus robur* L. puesto que tienen una influencia importante en el peso específico.

A continuación se irán comentando de manera individual los diferentes parámetros para hacer posteriormente una reflexión final conjunta de los mismos.

### 3.1. Poderes caloríficos

La Tabla 8 recoge los datos del Poder Calorífico Superior (PCS) de las diferentes muestras estudiadas. A la vista de los resultados se puede concluir que:

- Los valores medios del PCS van de los 17.705,52 kJ kg<sup>-1</sup> del muestreo de Junio-Julio a los 18.176,87 kJ kg<sup>-1</sup> del muestreo de Marzo-Abril. Las diferencias entre los valores más extremos, en color rojo en la Tabla 8, están en torno al 6 %. Esta mínima diferencia nos hace pensar que la variable de la edad, recogida de forma indirecta en las clases diametrales (Grupos 1, 2 y 3), no tiene una especial influencia sobre el PCS de las muestras en contra de lo que suponíamos al empezar el trabajo. Esta suposición se basaba en estudios previos de otros autores en los que se relacionaba aparentemente la edad del individuo con la evolución en la relación celulosa de constitución (16.100 kJ kg<sup>-1</sup>) y lignina (24.500 kJ kg<sup>-1</sup>) [2, 3]. Este mismo razonamiento, basándonos en los datos de la Tabla 8, nos permite concluir que otros parámetros analizados como la situación (solana o umbría), el origen (brinzal o chirpial) o la gestión (sometido o no a silvicultura) no van a tener una especial importancia en los valores del PCS, y por lo tanto, estos parámetros no deberían ser relevantes a tener en cuenta a la hora de elegir un individuo u otro como materia prima para elaborar combustible.
- El PCS es siempre mayor en las muestras recogidas en el periodo Marzo-Abril. Este resultado refuerza la hipótesis de partida que suponía que es el principio de la Primavera, el momento idóneo para apear la madera que va a procesarse

en leña, puesto que se dan ya unas condiciones ambientales para que se inicie el secado, y aunque la actividad vegetativa está comenzando, el árbol no tiene suficiente superficie foliar para aprovechar tal situación y convertirla en crecimiento en su totalidad. Por la contra, si esperamos al final del verano para cortar los árboles, por un lado se secará peor la leña (pues el verano ya habrá acabado y comienzan los periodos de lluvia y de gran humedad ambiental) y por otro, se habrá formado sólo la parte del anillo de ese año, correspondiente a la madera de primavera, con vasos mucho más grandes y una densidad real menor, que terminará generando una leña con peor comportamiento energético.

Muestra	PCS (kJ kg <sup>-1</sup> )	
	MARZO-ABRIL	JUNIO-JULIO
1BSS	18.216,24±33,75 (0,19 %)	17.850,44±71,17 (0,40 %)
1BS <sub>NO</sub> S	18.230,73±83,51 (0,46 %)	17.474,82±179,24 (1,03 %)
1BS <sub>NO</sub> U	18.053,68±99,83 (0,55 %)	17.843,74±27,38 (0,15 %)
1CSS	18.362,18±86,70 (0,47 %)	17.833,52±100,27 (0,56 %)
1CS <sub>NO</sub> S	17.978,45±97,13 (0,54 %)	17.928,73±28,93 (0,16 %)
1CS <sub>NO</sub> U	17.916,02±25,13 (0,14 %)	17.882,93±1,60 (0,01 %)
2BSS	18.510,19±25,87 (0,14 %)	17.876,16±30,76 (0,17 %)
2BS <sub>NO</sub> S	18.318,52±62,14 (0,34 %)	17.091,04±131,27 (0,77 %)
2BS <sub>NO</sub> U	18.287,29±71,79 (0,39 %)	17.351,55±173,16 (1,00 %)
2CSS	17.946,52±27,67 (0,15 %)	17.843,25±122,71 (0,69 %)
2CS <sub>NO</sub> S	18.122,64±16,22 (0,09 %)	17.546,62±84,42 (0,42 %)
2CS <sub>NO</sub> U	18.271,16±27,78 (0,15 %)	17.536,02±68,91 (0,39 %)
3BSS	18.342,97±91,00 (0,50 %)	18.101,10±31,58 (0,17 %)
3BS <sub>NO</sub> S	17.670,21±155,28 (0,88 %)	17.430,76±84,19 (0,48 %)
3BS <sub>NO</sub> U	18.318,59±29,58 (0,16 %)	18.069,96±48,52 (0,27 %)
3CSS	18.381,50±59,43 (0,32 %)	18.100,26±103,57 (0,57 %)
3CS <sub>NO</sub> S	18.087,87±42,35 (0,23 %)	17.171,48±32,42 (0,19 %)
3CS <sub>NO</sub> U	18.168,95±175,71 (0,97 %)	17.766,93±38,33 (0,22 %)
<b>18.216,24±33,75 (0,19 %)</b> 18.216,24 Poder Calorífico en kJ kg <sup>-1</sup> ±33,75 la desviación típica (0,19 %) error en las medidas		
PCS medio	18.176,87 kJ kg <sup>-1</sup>	17.705,52 kJ kg <sup>-1</sup>

Tabla 8. Poder Calorífico Superior (PCS) de las muestras estudiadas.

- Los valores medios del PCS son semejantes a los de otras especies forestales usadas habitualmente como materia prima para la elaboración de pellets, briquetas o leña, unos 18.000 kJ kg<sup>-1</sup> [4-6]. Parece pues que los datos dan la razón a la creencia popular de la bondad de la madera de carballo y su

reconocimiento como buena leña. Estudios realizados en nuestro Grupo de Investigación con maderas de *Paulownia* y Chopo determinaron valores de PCS de (18.300 y 18.800) kJ kg<sup>-1</sup> respectivamente.



En la Tabla 9 se recogen los valores del Poder Calorífico Inferior (PCI) de las muestras estudiadas. Para el cálculo del PCI genérico, y con la intención de eliminar del estudio la variable de la humedad del muestreo, se utilizó una humedad standard del 20 %. Además esta humedad es la más habitual de la leña estivada en un lugar techado y bien aireado. Lo más destacable de esta Tabla es que:

- Los valores medios del PCI van de los 12.558,55 kJ kg<sup>-1</sup> en Junio-Julio a los 12.914,10 kJ kg<sup>-1</sup> de Marzo-Abril. Es decir, al igual que en el caso del PCS, una diferencia menor a los 800 kJ kg<sup>-1</sup> entre los valores más extremos (de color rojo en la Tabla 9), y por lo tanto diferencias de PCI en torno al 6 % entre las muestras en cada muestreo.

Muestra	PCI (kJ kg <sup>-1</sup> )	
	MARZO-ABRIL	JUNIO-JULIO
1BSS	12.987,45±27,00 (0,21 %)	12.601,62±56,94 (0,45 %)
1BS <sub>NO</sub> S	12.939,26±66,81 (0,52 %)	12.345,08±143,40 (1,16 %)
1BS <sub>NO</sub> U	12.774,77±79,86 (0,63 %)	12.696,49±21,91 (0,17 %)
1CSS	13.044,42±69,36 (0,53 %)	12.653,14±80,22 (0,63 %)
1CS <sub>NO</sub> S	12.765,57±77,70 (0,61 %)	12.771,51±23,14 (0,18 %)
1CS <sub>NO</sub> U	12.689,25±20,10 (0,16 %)	12.706,74±1,28 (0,01 %)
2BSS	13.206,78±20,70 (0,16 %)	12.747,03±24,61 (0,19 %)
2BS <sub>NO</sub> S	13.072,79±49,71 (0,38 %)	12.023,99±105,01 (0,87 %)
2BS <sub>NO</sub> U	13.010,88±57,43 (0,44 %)	12.278,11±138,53 (1,13 %)
2CSS	12.708,37±22,13 (0,17 %)	12.639,83±98,17 (0,78 %)
2CS <sub>NO</sub> S	12.879,16±12,97 (0,10 %)	12.462,30±67,54 (0,54 %)
2CS <sub>NO</sub> U	12.962,81±22,22 (0,17 %)	12.462,61±55,13 (0,44 %)
3BSS	13.044,88±72,80 (0,56 %)	12.865,45±25,27 (0,20 %)
3BS <sub>NO</sub> S	12.536,56±124,22 (0,99 %)	12.357,31±67,27 (0,54 %)
3BS <sub>NO</sub> U	12.981,41±23,66 (0,18 %)	12.815,92±38,82 (0,30 %)
3CSS	13.112,63±47,54 (0,36 %)	12.866,53±82,86 (0,64 %)
3CS <sub>NO</sub> S	12.821,46±33,88 (0,26 %)	12.151,64±25,94 (0,21 %)
3CS <sub>NO</sub> U	12.914,45±140,57 (1,09 %)	12.608,66±30,66 (0,24 %)
12.987,45±27,00 (0,21 %) 12.987,45 Poder Calorífico en kJ kg <sup>-1</sup> ±27,00 la desviación típica (0,21 %) error en las medidas		
PCI medio	12.914,10 kJ kg <sup>-1</sup>	12.558,55 kJ kg <sup>-1</sup>

Tabla 9. Poder Calorífico Inferior (PCI) de las muestras estudiadas.

- De forma general el PCI es siempre mayor en las muestras recogidas en el periodo Marzo-Abril. Las "anomalías" presentadas en este comportamiento son

debidas a la composición elemental, de forma más concreta, en lo referente a la concentración del hidrógeno.

- Estudios realizados en nuestro Grupo de Investigación con maderas de *Paulownia* y Chopo determinaron valores de PCI de (3.200 y 7.900) kJ kg<sup>-1</sup> respectivamente. Estos valores son muy inferiores a los del PCI del carballo, unos 12.900 kg<sup>-1</sup>. Esto podría significar que **la madera de carballo genera mayor rendimiento energético que otras maderas de crecimiento rápido**. La razón debe entenderse en base a las humedades de los individuos muestreados de *Paulownia* (71 %) y de Chopo (48 %) que eran muy jóvenes. No debemos olvidar que estas especies de crecimiento rápido se plantan con vistas al aprovechamiento energético en turnos de corta menores a los 10 años.



En la Tablas 10 y 11 se puede observar la evolución del Poder Calorífico Inferior (PCI) de las muestras estudiadas en los muestreos al (20 , al 15 y al 10) % de humedad. El motivo de elegir estas humedades es que son las que se recogen en la normativa UNE-EN-14961-1 para clasificar las leñas en los grupos M10 ( $\leq 10$  %), M15 ( $\leq 15$  %) y M20 ( $\leq 20$  %), como las humedades más aconsejables para rendimientos energéticos óptimos. Las conclusiones más destacables son que:

- Lógicamente se mantiene la relación que en un mismo material a menor humedad mayor será el poder calorífico obtenido, por lo tanto la influencia de la humedad es notable. Teniendo en cuenta que en el caso de la leña almacenada, las fluctuaciones de agua de impregnación de las paredes celulares puede oscilar más de un 15 %, podríamos encontrarnos con oscilaciones en los valores del poder calorífico superiores al 30 %, es decir, de más de  $3.600 \text{ kJ kg}^{-1}$ . Por lo tanto, la creencia popular presentada en el punto "1.3. Bases teóricas de la investigación" de que la leña obtenida en laderas orientadas al Norte es mucho peor que la extraída en pendientes orientadas al Sur, desde un punto de vista estrictamente energético, cuando es empleada como leña, no es debida directamente a la procedencia del material, sino que responde posiblemente a un proceso deficiente de secado y almacenado.
- Los descensos en humedad del 5 % provocan incrementos del 7 % en el poder calorífico. Este dato es de interés a la hora de diseñar la logística de almacenamiento y tratamiento previo de la madera antes de su utilización como combustible. Es decir, que el esfuerzo por extraer la humedad a la madera antes de procesarla o usarla como combustible y el de evitar que recupere del ambiente agua de impregnación en las paredes celulares compensa, ya que el incremento energético logrado con este preprocesado sería bastante apreciable.

Muestra	PCI ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ) muestreo MARZO-ABRIL		
	PCI M10 ( $\leq 10\%$ )	PCI M15 ( $\leq 15\%$ )	PCI M20 ( $\leq 20\%$ )
1BSS	14.916,13 $\pm$ 30,38 (0,20 %)	13.951,79 $\pm$ 28,69 (0,21 %)	12.987,45 $\pm$ 27,00 (0,21 %)
1BS <sub>NO</sub> S	14.861,921 $\pm$ 75,16 (0,51 %)	13.900,59 $\pm$ 70,98 (0,51 %)	12.939,26 $\pm$ 66,81 (0,52 %)
1BS <sub>NO</sub> U	14.676,86 $\pm$ 89,84 (0,61 %)	13.725,82 $\pm$ 84,85 (0,62 %)	12.774,77 $\pm$ 79,86 (0,63 %)
1CSS	14.980,22 $\pm$ 78,03 (0,52 %)	14.012,32 $\pm$ 73,69 (0,53 %)	13.044,42 $\pm$ 69,36 (0,53 %)
1CS <sub>NO</sub> S	14.666,52 $\pm$ 87,41 (0,60 %)	13.716,05 $\pm$ 82,56 (0,60 %)	12.765,57 $\pm$ 77,70 (0,61 %)
1CS <sub>NO</sub> U	14.580,66 $\pm$ 22,62 (0,16 %)	13.634,96 $\pm$ 21,31 (0,16 %)	12.689,25 $\pm$ 20,10 (0,16 %)
2BSS	15.162,88 $\pm$ 23,29 (0,15 %)	14.184,83 $\pm$ 21,99 (0,16 %)	13.206,78 $\pm$ 20,70 (0,16 %)
2BS <sub>NO</sub> S	15.012,14 $\pm$ 55,93 (0,37 %)	14.042,47 $\pm$ 52,82 (0,38 %)	13.072,79 $\pm$ 49,71 (0,38 %)
2BS <sub>NO</sub> U	14.942,49 $\pm$ 64,61 (0,43 %)	13.976,69 $\pm$ 61,02 (0,44 %)	13.010,88 $\pm$ 57,43 (0,44 %)
2CSS	14.602,17 $\pm$ 24,90 (0,17 %)	13.655,27 $\pm$ 23,52 (0,17 %)	12.708,37 $\pm$ 22,13 (0,17 %)
2CS <sub>NO</sub> S	14.794,31 $\pm$ 14,60 (0,10 %)	13.836,74 $\pm$ 13,78 (0,10 %)	12.879,16 $\pm$ 12,97 (0,10 %)
2CS <sub>NO</sub> U	14.888,42 $\pm$ 25,00 (0,17 %)	13.925,62 $\pm$ 23,61 (0,17 %)	12.962,81 $\pm$ 22,22 (0,17 %)
3BSS	14.980,74 $\pm$ 81,90 (0,55 %)	14.012,81 $\pm$ 77,35 (0,55 %)	13.044,88 $\pm$ 72,80 (0,56 %)
3BS <sub>NO</sub> S	14.408,88 $\pm$ 139,75 (0,97 %)	13.472,72 $\pm$ 131,99 (0,98 %)	12.536,56 $\pm$ 124,22 (0,99 %)
3BS <sub>NO</sub> U	14.909,34 $\pm$ 26,62 (0,18 %)	13.945,38 $\pm$ 25,14 (0,18 %)	12.981,41 $\pm$ 23,66 (0,18 %)
3CSS	15.056,95 $\pm$ 53,48 (0,36 %)	14.084,79 $\pm$ 50,51 (0,36 %)	13.112,63 $\pm$ 47,54 (0,36 %)
3CS <sub>NO</sub> S	14.729,39 $\pm$ 38,11 (0,26 %)	13.775,42 $\pm$ 35,99 (0,26 %)	12.821,46 $\pm$ 33,88 (0,26 %)
3CS <sub>NO</sub> U	14.834,01 $\pm$ 158,14 (1,07 %)	13.874,23 $\pm$ 149,35 (1,08 %)	12.914,45 $\pm$ 140,57 (1,09 %)
<b>PCI medio</b>	<b>14.833,56 <math>\text{kJ kg}^{-1}</math></b>	<b>13.111,80 <math>\text{kJ kg}^{-1}</math></b>	<b>12.914,10 <math>\text{kJ kg}^{-1}</math></b>

Tabla 10. Comparación del Poder Calorífico Inferior (PCI) de las muestras estudiadas en el muestreo de Marzo-Abril al 20 %, al 15 % y al 10 % de humedad con el PCS.

Muestra	PCI (kJ kg <sup>-1</sup> ) muestreo JUNIO-JULIO		
	PCI M10 (≤10 %)	PCI M15 (≤15 %)	PCI M20 (≤20 %)
1BSS	14.482,07±64,05 (0,44 %)	13.451,85±60,49 (0,45 %)	12.601,62±56,94 (0,45 %)
1BS <sub>NO</sub> S	14.193,46±161,32 (1,14 %)	13.269,27±152,36 (1,15 %)	12.345,08±143,40 (1,16 %)
1BS <sub>NO</sub> U	14.588,80±24,65 (0,17 %)	13.642,64±23,28 (0,17 %)	12.696,49±21,91 (0,17 %)
1CSS	14.540,03±90,25 (0,62 %)	13.596,58±85,23 (0,63 %)	12.653,14±80,22 (0,63 %)
1CS <sub>NO</sub> S	14.673,20±26,04 (0,18 %)	13.722,35±24,59 (0,18 %)	12.771,51±23,14 (0,18 %)
1CS <sub>NO</sub> U	14.600,33±1,44 (0,01 %)	13.653,53±1,36 (0,01 %)	12.706,74±1,28 (0,01 %)
2BSS	14.645,66±27,68 (0,19 %)	13.696,35±26,15 (0,19 %)	12.747,03±24,61 (0,19 %)
2BS <sub>NO</sub> S	13.832,24±118,14 (0,85 %)	12.928,12±111,58 (0,86 %)	12.023,99±105,01 (0,87 %)
2BS <sub>NO</sub> U	14.118,13±155,84 (1,10 %)	13.198,12±147,18 (1,12 %)	12.278,11±138,53 (1,13 %)
2CSS	14.525,06±110,44 (0,76 %)	13.582,44±104,31 (0,77 %)	12.639,83±98,17 (0,78 %)
2CS <sub>NO</sub> S	14.325,34±75,98 (0,53 %)	13.393,82±71,76 (0,54 %)	12.462,30±67,54 (0,54 %)
2CS <sub>NO</sub> U	14.325,69±62,02 (0,43 %)	13.394,15±58,57 (0,44 %)	12.462,61±55,13 (0,44 %)
3BSS	14.788,88±28,43 (0,19 %)	13.822,17±26,85 (0,19 %)	12.865,45±25,27 (0,20 %)
3BS <sub>NO</sub> S	14.207,22±75,68 (0,53 %)	13.282,26±71,47 (0,54 %)	12.357,31±67,27 (0,54 %)
3BS <sub>NO</sub> U	14.723,16±43,67 (0,30 %)	13.769,54±41,24 (0,30 %)	12.815,92±38,82 (0,30 %)
3CSS	14.780,10±93,21 (0,63 %)	13.823,31±88,03 (0,64 %)	12.866,53±82,86 (0,64 %)
3CS <sub>NO</sub> S	13.975,84±29,18 (0,21 %)	13.063,74±27,56 (0,21 %)	12.151,64±25,94 (0,21 %)
3CS <sub>NO</sub> U	14.490,00±34,50 (0,24 %)	13.549,33±32,58 (0,24 %)	12.608,66±30,66 (0,24 %)
<b>PCI medio</b>	<b>13.649,28 kJ kg<sup>-1</sup></b>	<b>12.738,16 kJ kg<sup>-1</sup></b>	<b>12.558,55 kJ kg<sup>-1</sup></b>

Tabla 11. Comparación del Poder Calorífico Inferior (PCI) de las muestras estudiadas en el muestreo de Junio-Julio al 20 %, al 15 % y al 10 % de humedad con el PCS.

En las Figuras 34 y 35 se muestra la evolución del PCI a las 3 humedades básicas y se compara con el PCS, teóricamente con la muestra totalmente seca, es decir, humedad 0 %.

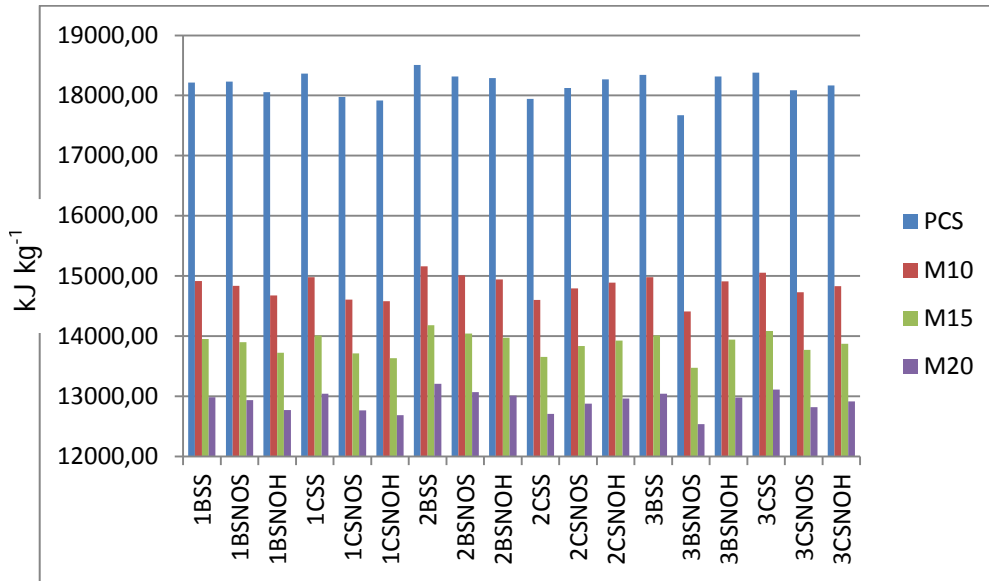


Figura 35. Evolución del PCI del muestreo de Marzo-Abril a las 3 humedades básicas y comparación con el PCS.

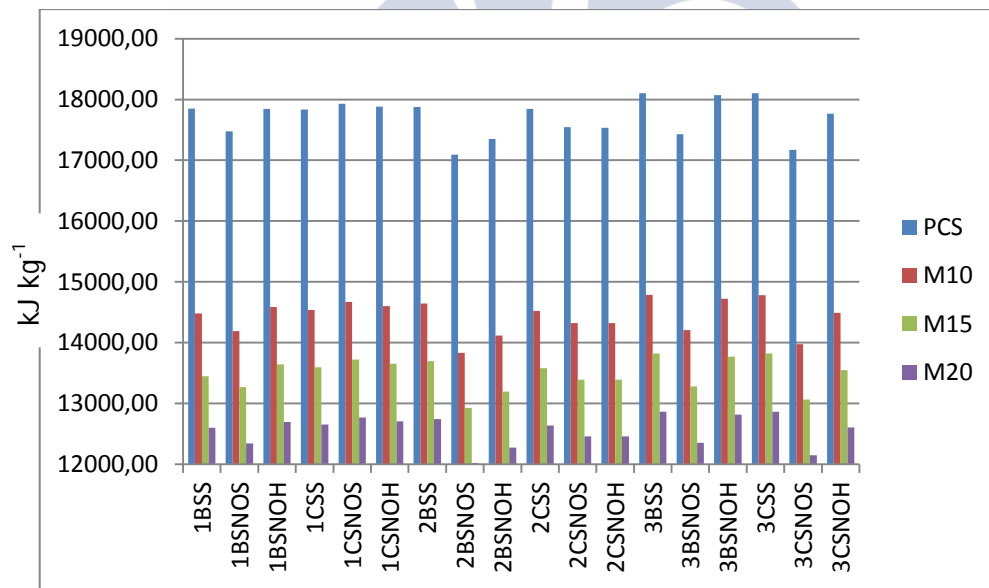


Figura 36. Evolución del PCI del muestreo de Junio-Julio a las 3 humedades básicas y comparación con el PCS.

## 3.2. Termogramas

Muestreo Marzo-Abril									
Muestra	CURVA TG					CURVA DTG			
	T <sub>ONSET</sub> (°C)	Δm <sub>1</sub> (%)	Δm <sub>2</sub> (%)	Δm <sub>3</sub> (%)	Δm <sub>4</sub> (%)	T <sub>PICO 1</sub> (°C)	T <sub>PICO 2</sub> (°C)	T <sub>PICO 3</sub> (°C)	T <sub>PICO 4</sub> (°C)
1BSS	266	24,01	42,47	27,55	-	303	340	512	607
1CSS	272	24,5	46,14	24,33	-	304	344	490	-
2BSS	265	21,07	44,49	29,16	0,31	292	334	504	591
2CSS	285	20,84	43,47	26,1	-	311	349	515	-
3BSS	268	22,09	37,17	33,02	1,22	304	340	485	632
3CSS	269	23,05	41,82	29,65	0,95	305	345	519	598
1BS <sub>NO</sub> U	280	21,51	42,2	28,2	-	316	350	500	609
2BS <sub>NO</sub> U	284	19,01	43,9	28,7	-	317	348	542	628
2BS <sub>NO</sub> U	281	24	40,5	27,6	-	318	347	515	-
3BS <sub>NO</sub> U	285	17,80	46,1	27,3	-	312	346	526	-
3BS <sub>NO</sub> U	280	19,0	43,0	29,1	0,64	312	345	523//543	612
Muestreo Junio-Julio									
Muestra	CURVA TG					CURVA DTG			
	T <sub>ONSET</sub> (°C)	Δm <sub>1</sub> (%)	Δm <sub>2</sub> (%)	Δm <sub>3</sub> (%)	Δm <sub>4</sub> (%)	T <sub>PICO 1</sub> (°C)	T <sub>PICO 2</sub> (°C)	T <sub>PICO 3</sub> (°C)	T <sub>PICO 4</sub> (°C)
1BSS	271	24,42	40,48	27,99	-	304	338	489	541
1CSS	268	22,65	44,21	27,25	0,32	305	345	456//490	605
2BSS	271	25,27	42,67	25,03	-	305	340	489	-
2CSS	276	21,00	35,00	34,40	-	310	347	470//528	-
3BSS	266	21,88	35,77	34,00	1,55	298	335	462//531	594
3CSS	271	18,65	35,87	38,35	0,32	304	329	546//563	614
1BS <sub>NO</sub> U	280	21,35	42,26	27,92	-	315	351	523	612
2BS <sub>NO</sub> U	283	16,5	42,9	30,31	1,24	316	348	521	637
3BS <sub>NO</sub> U	279	17,67	44,11	29,56	0,77	313	344	520	621

Tabla 12. Parámetros básicos en el estudio y análisis de los termogramas.

A continuación se va a hacer una discusión general de los estudios de termogravimetría realizados.

En la Figura 37 se muestran los valores correspondientes a las temperaturas ONSET de las curvas TG que son un indicativo de la temperatura a la que comienza a degradarse la muestra. Como se puede observar, la degradación térmica de todas las muestras comienza en torno a los 270 °C salvo para las muestras BS<sub>NO</sub>U que lo hacen alrededor de 280 °C, debido o bien al contenido en agua adsorbida (que fue en todos los casos alrededor del 6,7 % en peso), bien a que se han pulverizado más finamente con el fin de obtener una muestra más homogénea o a que la densidad real es mayor para estas últimas, como se ha comentado en el estudio de los poderes caloríficos. Valores significativamente menores, sobre 235 °C, fueron obtenidos por Gronli et al [7], aunque estos fueron medidos sobre curvas dinámicas registradas a 5 °C min<sup>-1</sup> y las de este

trabajo se midieron a  $10\text{ }^{\circ}\text{C min}^{-1}$ . Como es bien sabido, a medida que la velocidad de calentamiento aumenta, las curvas obtenidas se desplazan hacia temperaturas mayores.

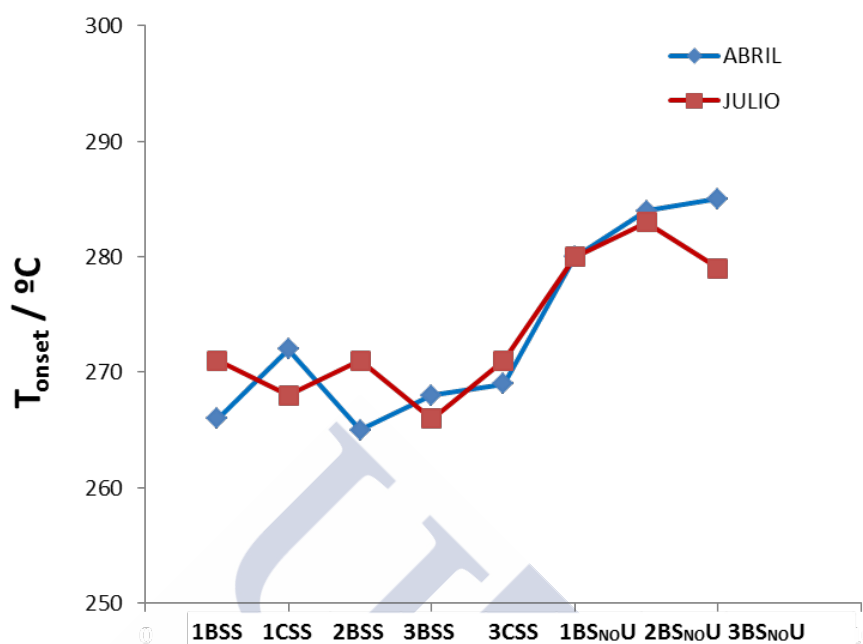


Figura 37. Valores de la temperatura ONSET para los diferentes tipos de muestras estudiadas

Si comparamos a través de la Tabla 12 muestras de solana y umbría del mismo diámetro, por ejemplo 1BSS con 1BS<sub>NoU</sub> o 2BSS con 2BS<sub>NoU</sub>, veremos que los ONSET o puntos que caracterizan el inicio de la degradación, son siempre un poco más elevados en las muestras de umbría y las pérdidas de masa en los últimos tramos del proceso se acrecientan siendo menores al inicio. La tendencia se mantiene en todas, por lo que se concluye que la madera de umbría tiene una degradación más lenta debido a que presenta mayor porcentaje relativo de madera de verano-invierno y menor porcentaje de vasos grandes, lo que aumenta su capacidad para tomar agua del ambiente una vez se encuentra apilada y a cobijo de las precipitaciones en forma de leña y lo que dificulta la entrada de oxígeno a través del leño por el menor tamaño del poro una vez iniciada la combustión. En la fotografía de la Figura 50 se puede observar lo aquí comentado.

En las Figuras 38 y 39, se muestran las comparativas de las curvas TG y DTG obtenidas para muestras cuya diferencia es la edad del árbol (clase diametral).

Como ya ha sido indicado por muchos autores, las curvas DTG para biomasa forestal muestran el solapamiento de dos picos, que realmente se manifiesta como un pico con un hombro en el lado de temperaturas menores. Se asume que este hombro corresponde a la descomposición de las hemicelulosas; el pico simple corresponde a la

descomposición de la celulosa y la porción de curva con degradación más lenta corresponde principalmente a la descomposición de la lignina [8].

En los casos analizados en el presente trabajo de investigación, se observa, de manera general, que el primer pico con el hombro correspondiente, que estaría asociado principalmente a la degradación de las hemicelulosas y de la celulosa (parte también correspondería a la degradación, mucho más lenta, de la lignina), se extiende entre (200 y 450) °C, mientras que el segundo, que estaría asociado a la degradación de la lignina restante, entre (400 y 600) °C. Estos intervalos de degradación coinciden con los indicados por otros autores para muestras de biomasa similares. Algunos investigadores indican que las hemicelulosas se descomponen principalmente en un rango de temperaturas de (250 a 300) °C, seguido por la celulosa en el intervalo (300-350) °C y por la lignina en el (300-500) °C [9]. Otros autores [10] consideran que la degradación térmica de las hemicelulosas se produce en el rango (200-300) °C, la celulosa en el (250-350) °C y la lignina en el (200-500) °C.

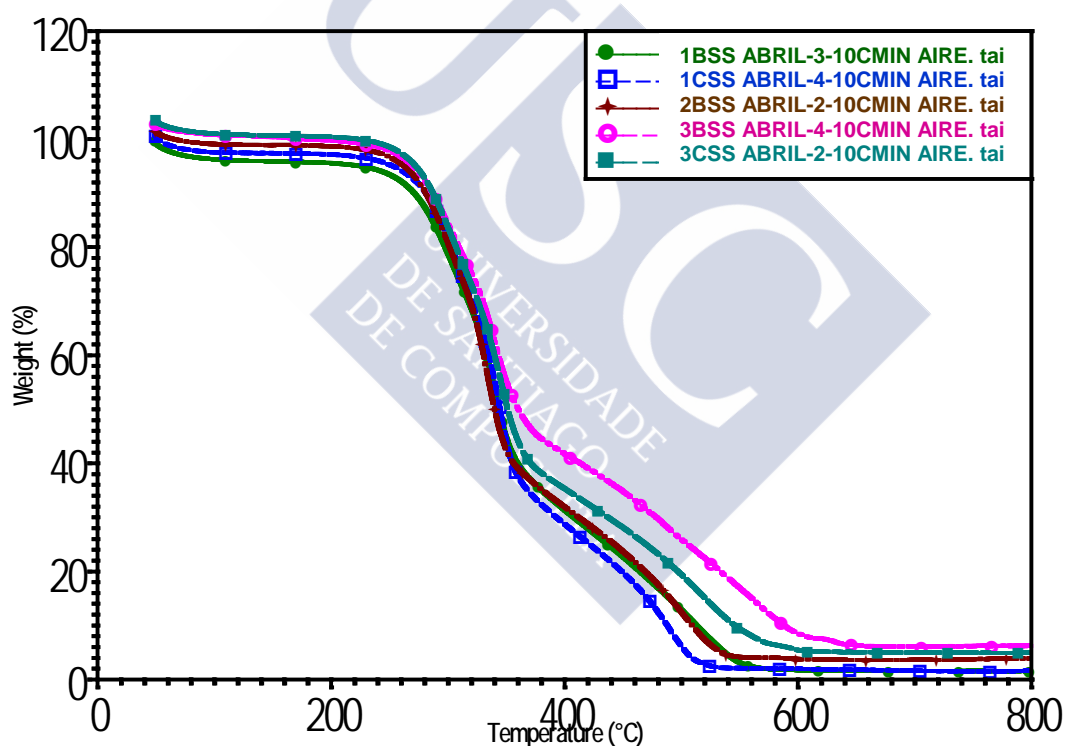


Figura 38. Curvas TG para muestras de diferente edad de Marzo-Abril.

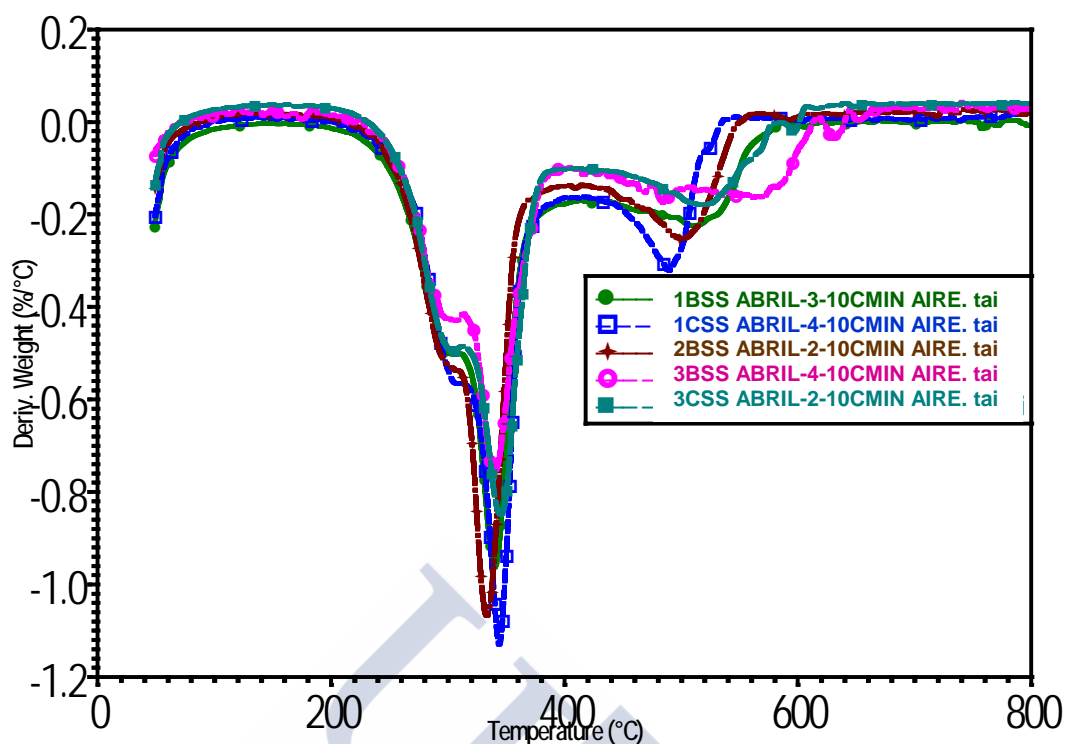


Figura 39. Curvas DTG para muestras de diferente edad de Marzo-Abril.

La edad, representada en esta tesis por las tres agrupaciones diametrales, Grupo 1 de (5 a 15) cm, Grupo 2 de (15 a 25) cm y Grupo 3 de (25 a 35) cm influye levemente en la diferente degradación de unas muestras y otras, pero tal y como se aprecia en la gráfica de ejemplo donde las curvas 1 Abril y 5 Abril representan a muestras del Grupo 1, la 9 Abril al Grupo 2 y las 17 y 21 de Abril al Grupo 3, conforme aumenta la edad, se dilata la degradación en el tiempo, de tal manera que las leñas más maduras, tardarían un poco más en arder, pero ese poco, tal vez no justifique el empleo de diámetros mayores de 25 cm, lo que en Galicia representa una generalidad. Se podría, tal y como se relata en la propuesta de modelo silvícola de esta Tesis, ir a diámetros mucho menores y a turnos muy competitivos, con una leña de similar comportamiento.

La explicación a lo anterior se basa en el aumento de lignina con la edad del árbol y que provoca una degradación más lenta de las muestras más viejas.

En las Figuras 40 y 41 se comparan muestras de árboles de edades similares, pero que corresponden a épocas de muestreo diferentes.

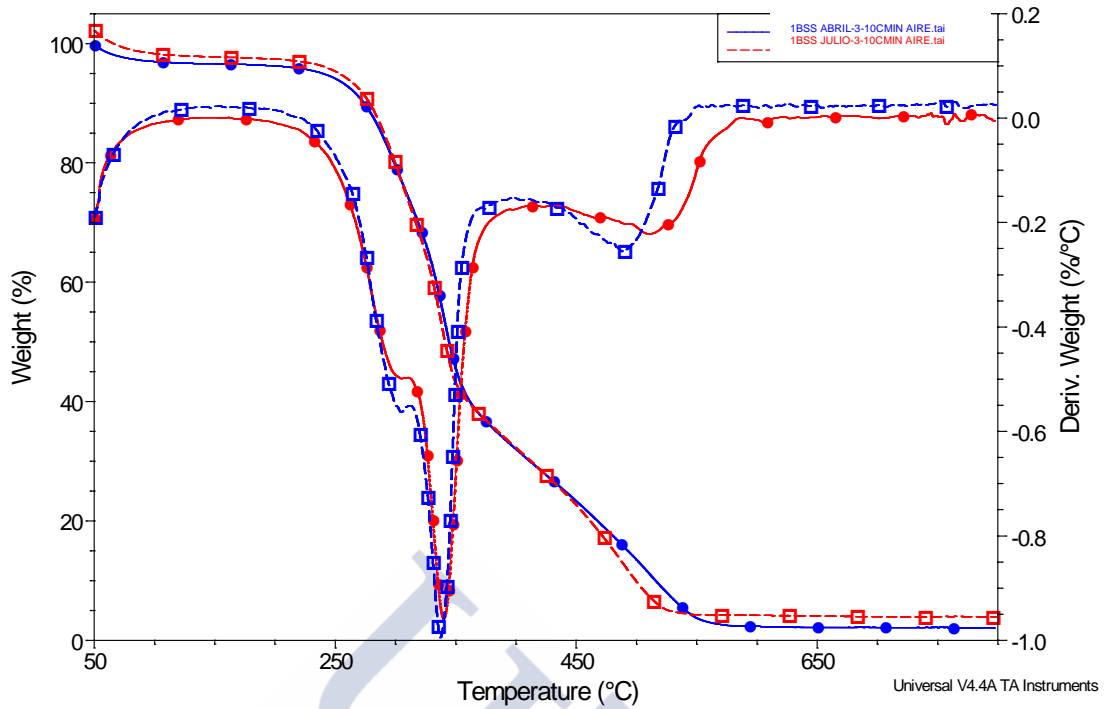


Figura 40. Curvas TG y DTG para muestras 1BSS de Marzo-Abril y Junio-Julio respectivamente

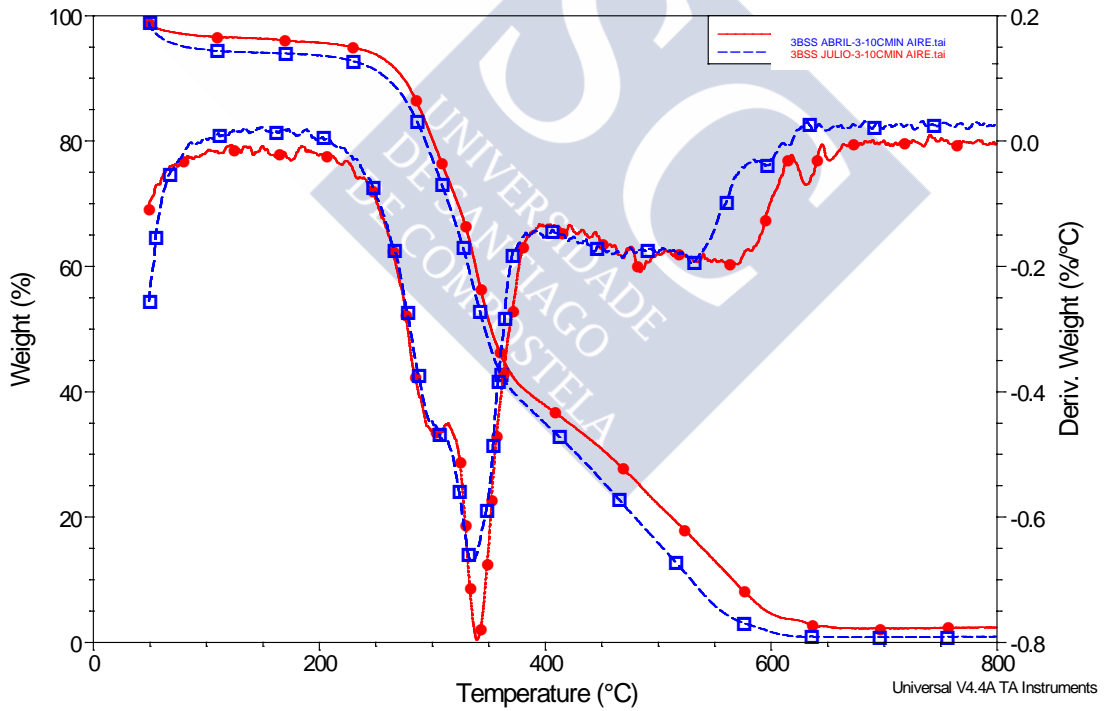


Figura 41. Curvas TG y DTG para muestras 3BSS de Marzo-Abril y Junio-Julio respectivamente

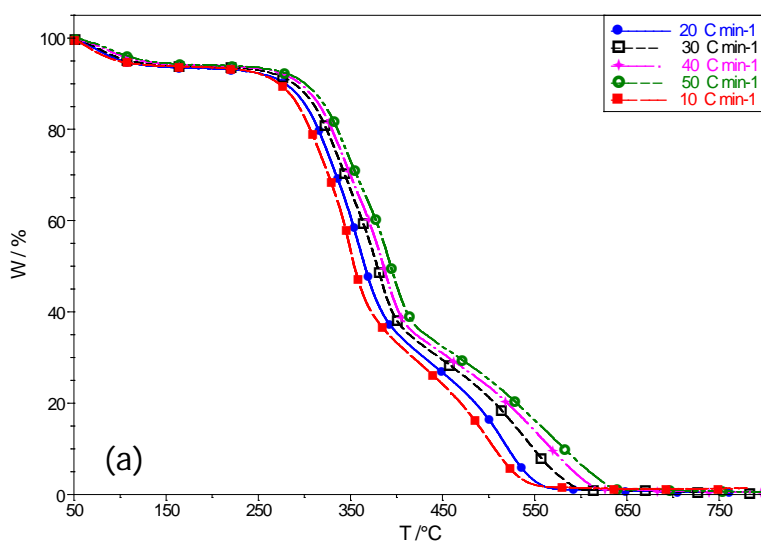
Las muestras tomadas en Marzo-Abril tienen un porcentaje ligeramente superior de madera de invierno, pues la parte de madera de primavera del anillo del año en que fueron cogidas todavía no se había formado. Esta puede ser la razón de que se obtenga

en todos y de un modo más acusado en diámetros mayores, una termodegradación un poco más lenta y un poder calorífico siempre un poco más alto. Son valores no obstante, también poco significativos.

En general, la parte del anillo de crecimiento correspondiente a la primavera, presenta vasos más grandes y es más pequeña que la correspondiente a los crecimientos de verano y caída hacia el invierno, puesto que en estas épocas, el árbol tiene mayor superficie foliar y mayor capacidad fotosintética, si las condiciones ambientales de temperatura y edáficas hídricas son las normales. Esta tendencia, se acentúa en las maderas que crecen en exposiciones de umbría, que presentan todavía más porcentaje relativo de madera de verano respecto a la de primavera y les da entonces mayor proporción de pared celular para absorber agua de impregnación cuando la madera se ha convertido en leña y se encuentra convenientemente apilada y almacenada.

### Análisis de la cinética de degradación

Como ya se ha indicado anteriormente, el estudio cinético de la degradación térmica se llevó a cabo únicamente para una muestra de las estudiadas en el apartado anterior, dada la semejanza entre los parámetros obtenidos de las curvas TG y DTG y recogidos en la Tabla 12. Como se ha dicho, se realizaron barridos dinámicos a las velocidades de (10, 20, 30, 40 y 50) °C min<sup>-1</sup> entre (50 y 800) °C en atmósfera de aire.



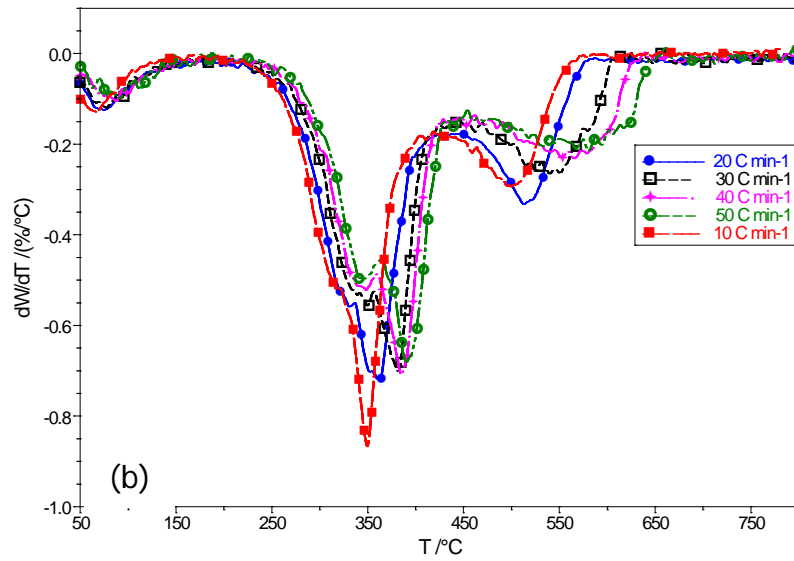


Figura 42. Curvas TG (a) y DTG (b) obtenidas para la muestra 1BS<sub>NO</sub>U a diferentes velocidades de calentamiento

En la Figura 42 se muestran las curvas TG (a) y DTG (b) obtenidas para la muestra seleccionada a las velocidades indicadas.

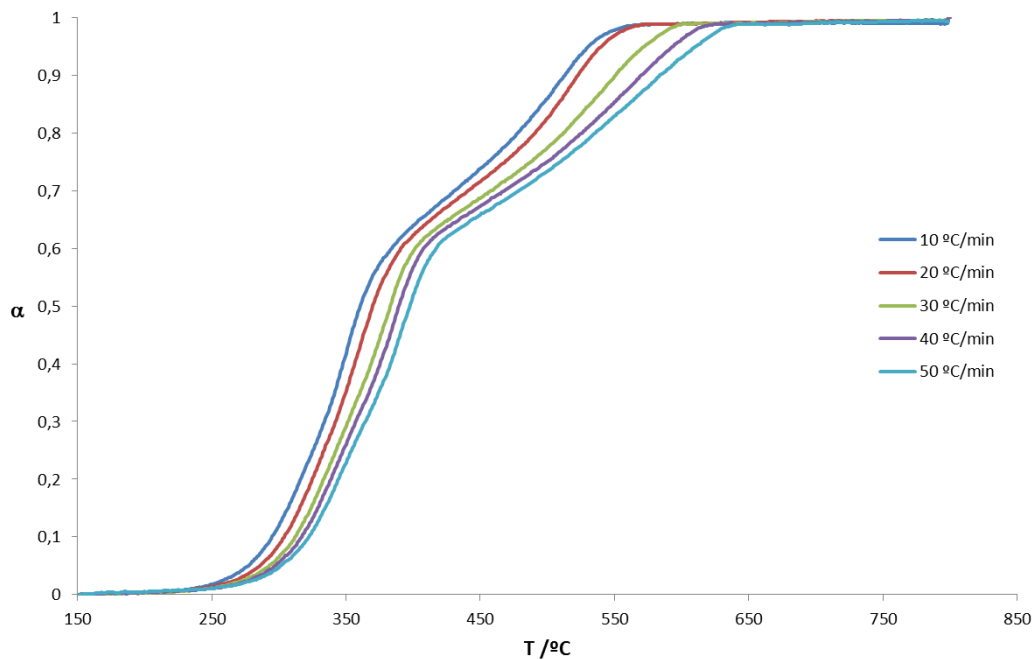


Figura 43. Curvas de conversión en función de la temperatura obtenidas para la muestra 1BS<sub>NO</sub>U a diferentes velocidades de calentamiento

En la Figura 43 se muestra la conversión en función de la temperatura para las diferentes velocidades de calentamiento consideradas. Como se puede ver claramente, hay un cambio en la pendiente de la curva correspondiente a la aparición del tercer pico en la curva DTG (más adelante se mostrará una comparación entre ambas curvas).

### Método de Kissinger

En la Figura 44 se presentan los ajustes realizados para la obtención de la energía de activación de la termodegradación por el método de Kissinger. Como se puede observar en la Figura 34, las curvas TG presentan varios escalones de degradación solapados, que corresponden a la degradación térmica de los componentes principales de la madera, y que dan lugar a diversos picos en las curvas DTG (Tabla 12). Por ello, se ha hecho el análisis por el método de Kissinger para cada uno de los picos registrados (excluimos el pico del agua que apareció en algunas de las muestras, y que correspondía a agua adsorbida durante el almacenamiento de las muestras en el laboratorio) obteniéndose por tanto varias energías de activación asociadas, a priori, a procesos diferentes.

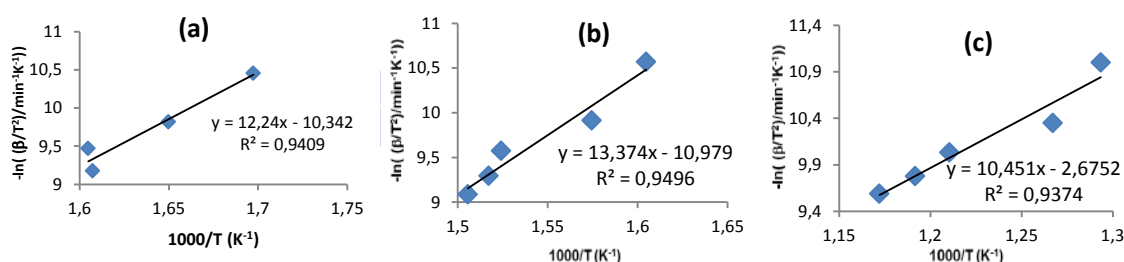


Figura 44. Ajustes de los datos para la determinación de las energías de activación por el método de Kissinger para (a) el primer pico, (b) el segundo pico y (c) el tercer pico.

A partir de los valores de las pendientes de los ajustes anteriores, se han obtenido las energías de activación que se recogen en la Tabla 13:

	$E_a/\text{kJ mol}^{-1}$	$S(E_a)/\text{kJ mol}^{-1}$
PICO 1	101,8	2,2
PICO 2	111,2	1,8
PICO 3	86,9	1,6

Tabla 13. Energías de activación obtenidas por el método de Kissinger.

### Método de Flynn-Wall-Ozawa (FWO) y método de Friedman

Siguiendo la metodología de otros autores [11-17], se han aplicado estos métodos integrales de isoconversión para conversiones entre el (5 y el 80) %, obteniéndose los ajustes que se muestran en las Figuras 45 y 46. Como se puede apreciar, para el caso del método de FWO, las pendientes de las rectas de ajuste difieren sólo ligeramente, lo que hace pensar que las energías de activación, aunque van a depender del valor de la conversión considerado, van a ser bastante parecidas. Sin embargo, aplicando el método de Friedman, las pendientes de ajuste son significativamente más dispares, lo que implicará una dispersión entre los valores de las energías de activación, con respecto al valor medio, mayor.

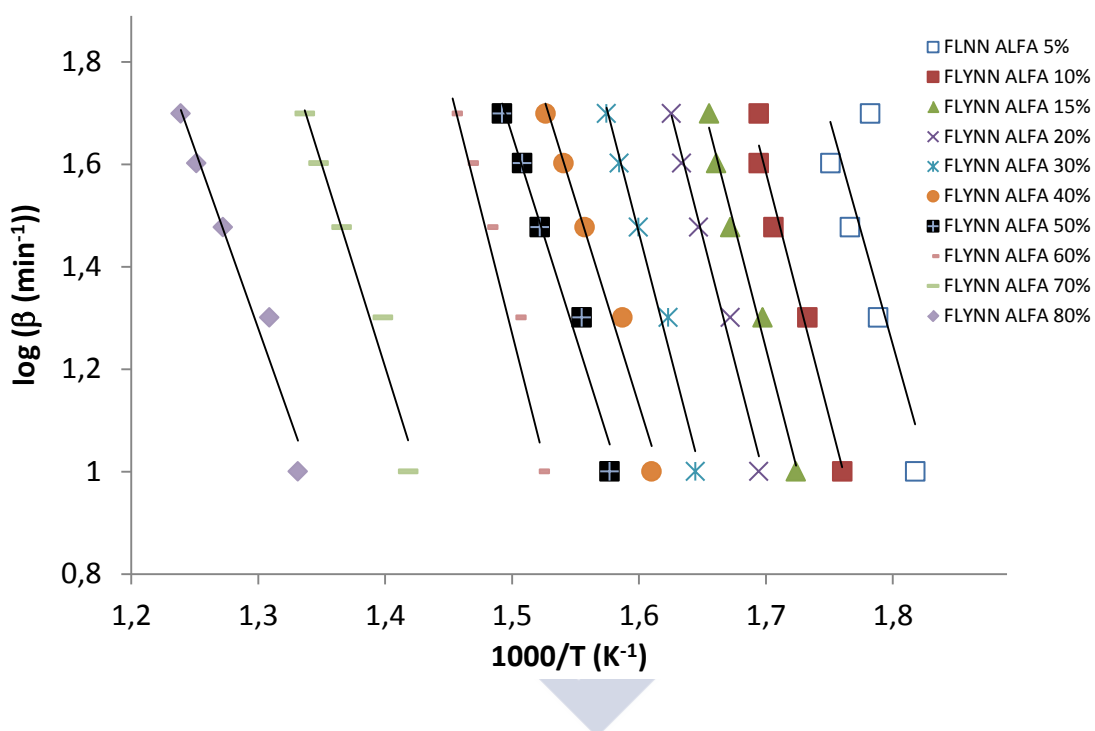


Figura 45. Ajustes de los datos para la determinación de las energías de activación por el método de Flynn-Wall-Ozawa.

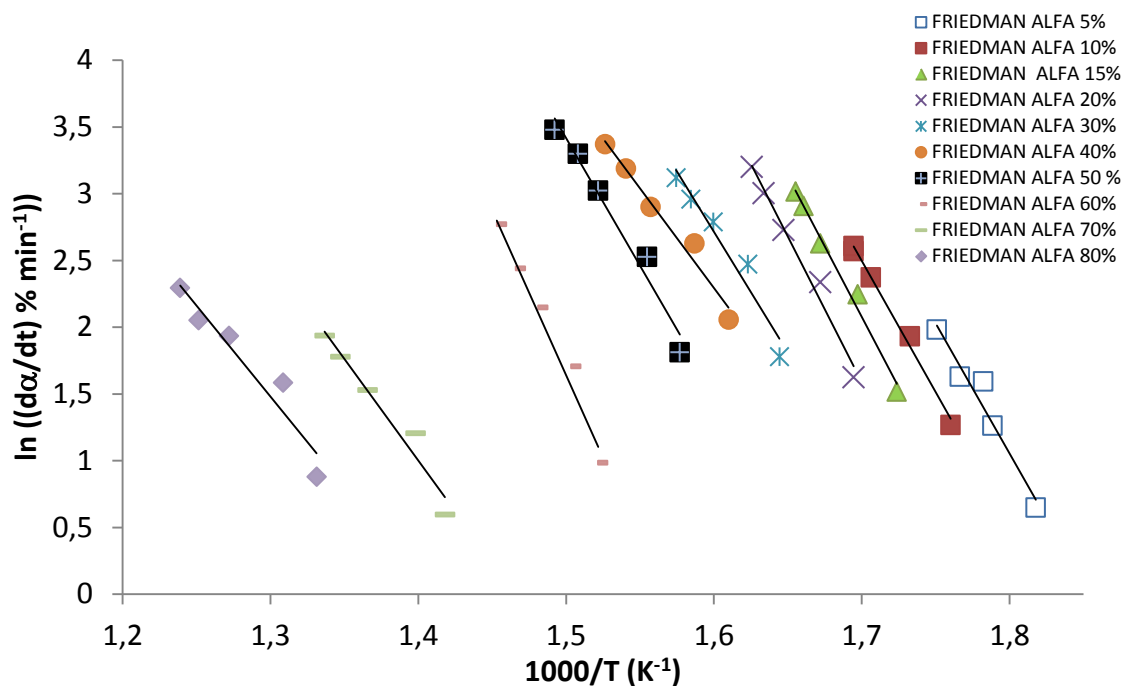


Figura 46. Ajustes de los datos para la determinación de las energías de activación por el método de Friedman.

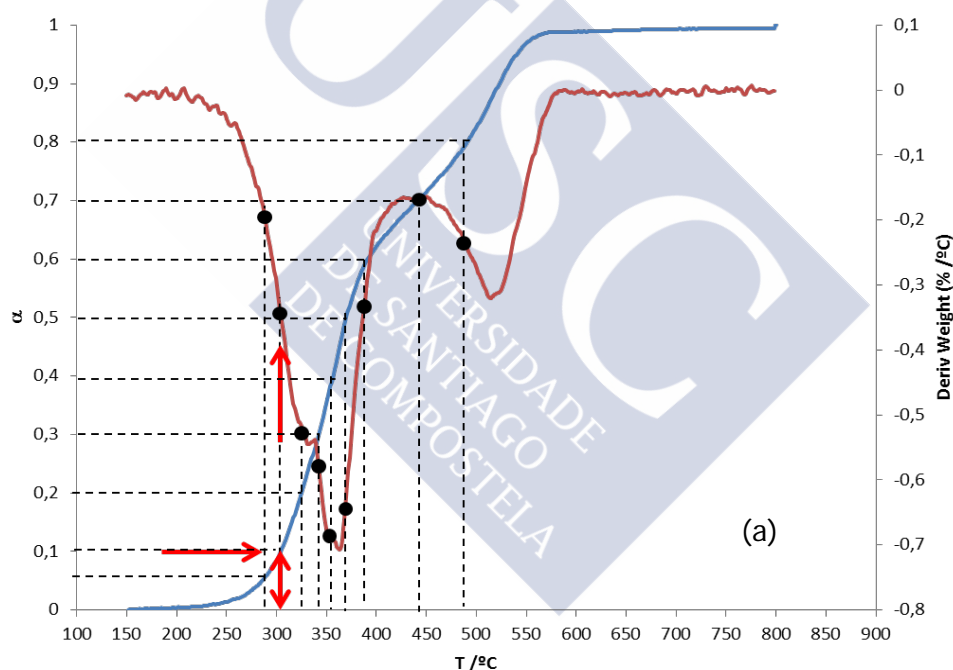
En la Tabla 14 se muestran los valores obtenidos para las energías de activación a las distintas conversiones estudiadas, por los métodos de Flynn-Wall-Ozawa y por el método de Friedman.

FRIEDMAN		FLYNN-WALL-OZAWA	
ALFA (%)	ENERGÍA (kJ mol <sup>-1</sup> )	ENERGÍA (kJ mol <sup>-1</sup> )	ENERGÍA (kJ mol <sup>-1</sup> )
5	162,1	160,7	
10	163,5	174,1	
15	175,8	175,2	
20	181,1	175,6	
30	150,2	174,5	
40	124,1	145,5	VM (HASTA EL 40% INCLUIDO): 167,6 ± 12,2
50	158,9	142,8	
60	205,6	178,4	
70	126,2	143,7	
80	113,1	127,1	VM (DESDE EL 40% INCLUIDO): 147,5 ± 18,8
		<b>VM TOTAL: 156,1 ± 28,6</b>	<b>VM TOTAL: 159,8 ± 18,5</b>

Tabla 14. Valores de las energías de activación obtenidas por el método de Friedman y por el método de Flynn-Wall-Ozawa en función de la conversión y valores medios (VM).

A la vista de los resultados recogidos en la Tabla anterior, se puede concluir que hay una **dependencia clara de la energía de activación con el rango de conversión**. Esto puede ser debido a un cambio en el mecanismo de reacción responsable del proceso de degradación al cambiar de rango de conversiones, si es que este implica un cambio en las energías de activación [18].

En la Figura 47 se muestran las curvas de conversión y la DTG para los experimentos realizados a  $(20 \text{ y } 50) \text{ } ^\circ\text{C min}^{-1}$ . Como se puede apreciar, debido a la forma "especial" de la curva DTG, se pueden distinguir tres regiones, que pueden variar ligeramente en función de la velocidad de calentamiento, correspondientes al tramo de caída del primer y segundo picos, el tramo de subida del mismo pico y la caída del tercer pico. Estas tres regiones corresponden a tramos de conversión entre (0 y 40) % el primero, (40 y 70) % el segundo y 70 % en adelante el tercero. Esto podría explicar el porqué de la diferencia entre los valores de las energías en estos tres tramos de conversiones.



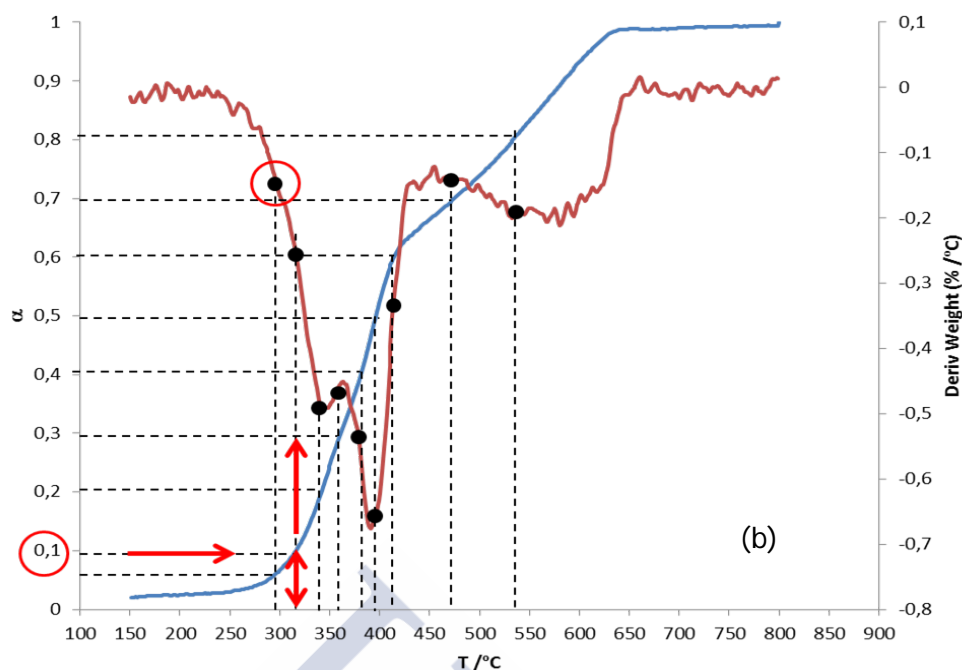


Figura 47. Curvas de conversión y DTG para las velocidades de calentamiento de  $20\text{ °C min}^{-1}$  (a) y  $50\text{ °C min}^{-1}$  (b).

Si comparamos los valores obtenidos con los calculados por Kissinger, se puede ver que los valores de este último no se parecen en nada a los de Friedman y de FWO. Esto puede ser debido a lo que acabamos de comentar y al hecho de que por el método de Kissinger sólo se tiene en cuenta la temperatura a la que se alcanza la máxima velocidad de degradación (que no se da siempre a la misma conversión) y no la “forma” de la curva. Sin embargo, los valores de ambos métodos de isoconversión se parecen bastante entre sí, sobre todo para alfas mayores de 40 %. Si se tienen en cuenta los valores medios de las energías hasta el 40 % por un lado y desde el 40 % en adelante por el otro, se puede ver que hay una coincidencia de valores para ambos modelos considerando el valor medio de las energías de activación. Haciendo un valor medio general teniendo en cuenta todo el rango de conversiones estudiado, también se obtienen valores de la energía similares. En cualquier caso, están dentro del margen del 10 % considerado por Vyazovkin [18].

### 3.3. Carbono fijo, cenizas y volátiles

En la Tabla 13 se presentan los resultados de la determinación del carbono fijo, cenizas y volátiles. En ella se pueden destacar los siguientes resultados:

- El porcentaje del carbono fijo medio es menor en las especies más longevas en los dos muestreos.
- Por el contrario la presencia de volátiles media es mayor en las especies más longevas en los dos muestreos.

Muestra	MARZO-ABRIL			JUNIO-JULIO		
	Carbono fijo (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)	Carbono fijo (%)	Cenizas (%)	Volátiles (%)
1BSS	75,93	1,10	17,75	84,33	0,74	14,93
1BS <sub>NO</sub> S	83,55	0,95	15,50	83,41	1,16	15,43
1BS <sub>NO</sub> U	83,71	0,60	15,69	82,50	0,52	16,98
1CSS	84,56	0,58	14,86	81,87	0,69	17,45
1CS <sub>NO</sub> S	83,70	0,97	15,33	82,86	0,44	16,70
1CS <sub>NO</sub> U	84,69	0,48	14,83	81,71	0,39	17,90
Valores medios	82,69	0,78	15,66	82,78	0,66	16,57
2BSS	80,14	0,38	19,48	83,24	0,41	16,35
2BS <sub>NO</sub> S	81,35	0,87	17,78	83,27	0,59	16,15
2BS <sub>NO</sub> U	82,19	0,64	17,17	81,56	0,48	17,97
2CSS	84,74	0,74	14,51	79,78	0,63	19,59
2CS <sub>NO</sub> S	78,62	0,40	20,98	79,34	0,87	19,80
2CS <sub>NO</sub> U	82,48	0,56	16,95	81,46	0,53	18,01
Valores medios	81,59	0,60	17,81	81,44	0,59	17,98
3BSS	77,22	1,04	21,75	79,92	0,49	19,59
3BS <sub>NO</sub> S	80,97	0,71	18,31	79,54	1,54	18,92
3BS <sub>NO</sub> U	80,62	0,44	18,93	78,85	0,99	20,16
3CSS	82,95	0,51	16,54	77,96	0,90	21,13
3CS <sub>NO</sub> S	81,92	0,55	17,52	83,24	0,89	15,87
3CS <sub>NO</sub> U	78,47	0,36	21,17	80,85	1,27	17,88
Valores medios	80,36	0,60	19,04	80,06	1,01	18,93

Tabla 15. Valores de carbono fijo, cenizas y volátiles.

En el caso de la *Paulownia* y el Chopo los valores del carbono fijo son ligeramente inferiores, entre (60 y 65) % respectivamente. El porcentaje de volátiles es muy similar. Estos resultados pueden ser la clave para explicar una estabilidad térmica mayor en el caso del carballo, es decir, permite hacer un combustible más duradero con una producción de cenizas semejante. Si comparamos las tres especies, Figuras 48 y 49, podemos ver como las curvas TG del carballo poseen una pendiente más similar en las dos fases principales y como en éstas se “reparte” por igual el material degradado. En el caso de la *Paulownia* o el Chopo la primera fase de degradación es más agresiva y consume casi el 70 % del material combustible.

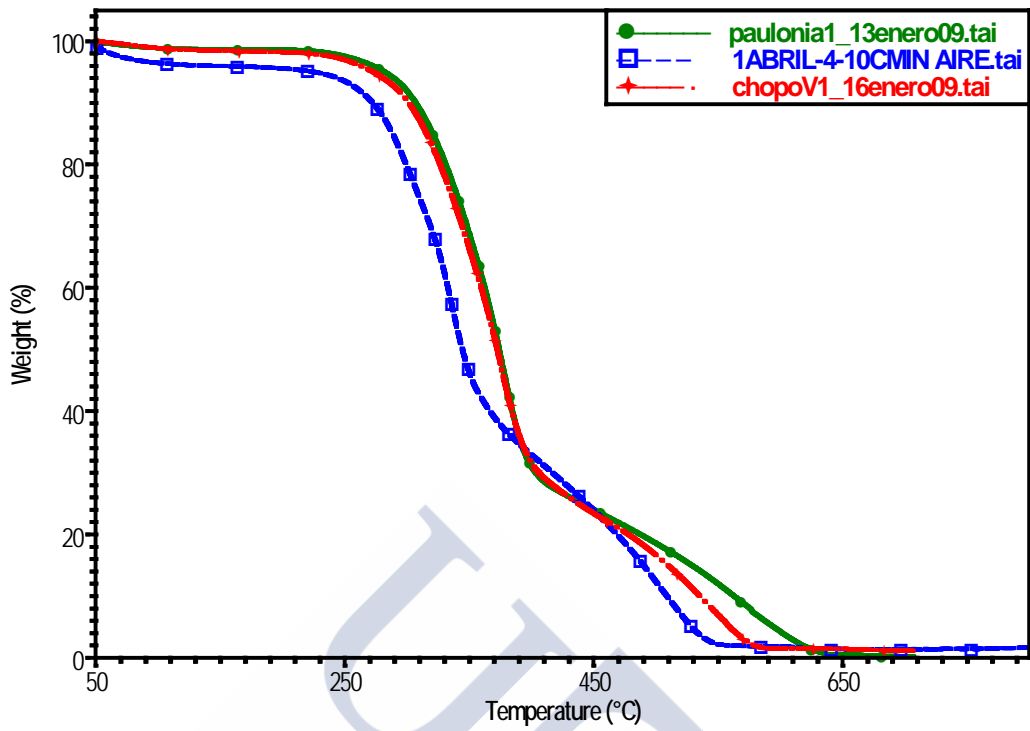


Figura 48. TG de *Paulownia* (verde), carballo (azul) y Chopo (rojo).

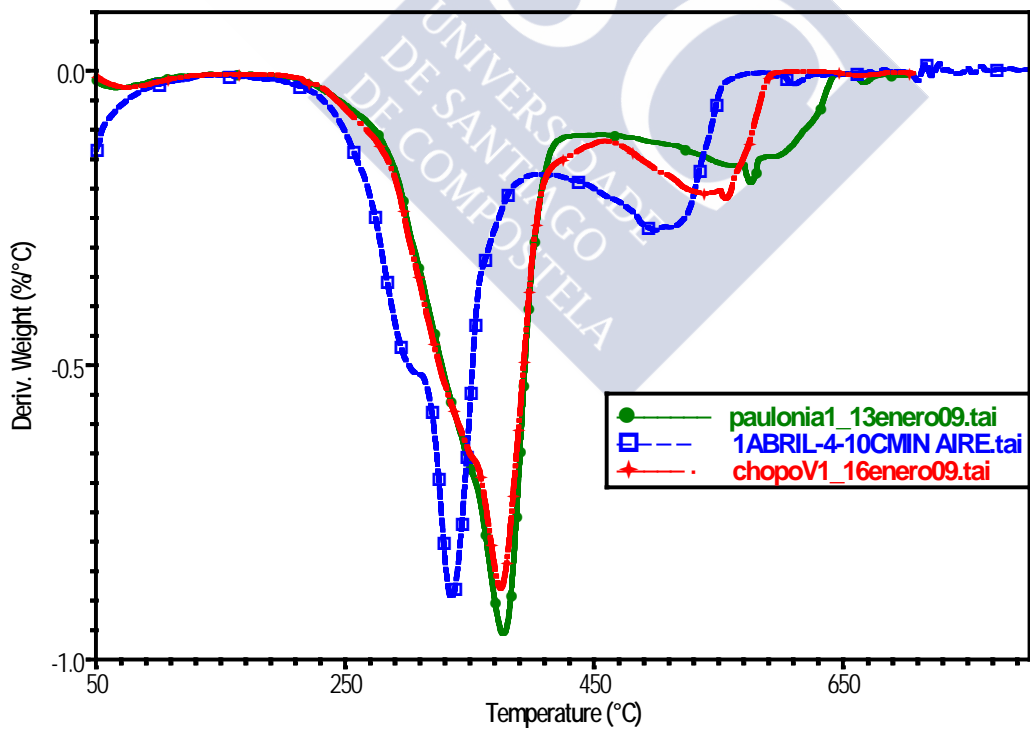


Figura 49. DTG de *Paulownia* (verde), carballo (azul) y Chopo (rojo).

### 3.4. Análisis elemental

En la Tabla 14 se recogen los resultados de la analítica elemental realizada en la Unidad de Análisis Elemental de la USC. Lo más destacable de esta Tabla es:

- Por un lado la ausencia total de azufre (S) en las muestras analizadas. Este dato es positivo ya que **elimina factores potenciales de riesgo como la formación de SO<sub>x</sub> en los gases** con el consiguiente impacto ambiental en el medio o la formación de elementos ácidos, tanto en gases como en cenizas, que puedan dañar las instalaciones (estufas, calderas u hornos) o generar problemas en la gestión de las cenizas.
- Los valores en el resto de los elementos no aporta información destacada ya que son similares. Ocurre lo mismo si comparamos los datos de análisis elemental de *Paulownia* y *Chopo* (ANEXO I).

Muestra	MARZO-ABRIL					JUNIO-JULIO				
	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)
1BSS	0,21	46,98	6,24	46,57	0,00	0,27	45,72	6,77	47,24	0,00
1BS <sub>NO</sub> S	0,24	46,03	6,58	47,15	0,00	0,22	46,73	6,52	46,53	0,00
1BS <sub>NO</sub> U	0,29	46,39	6,71	46,61	0,00	0,24	45,36	6,20	48,20	0,00
1CSS	0,39	46,88	6,58	46,15	0,00	0,22	46,43	6,40	46,95	0,00
1CS <sub>NO</sub> S	0,25	46,34	6,42	46,99	0,00	0,27	45,19	6,16	48,38	0,00
1CS <sub>NO</sub> U	0,23	45,63	6,57	47,57	0,00	0,21	46,90	6,32	46,57	0,00
2BSS	0,20	47,15	6,33	46,32	0,00	0,22	45,86	6,06	47,86	0,00
2BS <sub>NO</sub> S	0,25	46,39	6,22	47,14	0,00	0,29	47,01	6,60	46,10	0,00
2BS <sub>NO</sub> U	0,19	46,52	6,43	46,86	0,00	0,22	47,05	6,34	46,39	0,00
2CSS	0,16	45,41	6,52	47,91	0,00	0,22	46,58	6,60	46,60	0,00
2CS <sub>NO</sub> S	0,17	45,97	6,43	47,43	0,00	0,28	46,44	6,18	47,10	0,00
2CS <sub>NO</sub> U	0,27	47,14	6,63	45,96	0,00	0,19	44,90	6,13	48,78	0,00
3BSS	0,21	47,37	6,49	45,93	0,00	0,27	47,17	6,41	46,15	0,00
3BS <sub>NO</sub> S	0,30	46,05	6,32	47,33	0,00	0,29	46,69	6,25	46,77	0,00
3BS <sub>NO</sub> U	0,24	47,25	6,74	45,77	0,00	0,26	46,98	6,55	46,21	0,00
3CSS	0,17	47,61	6,28	45,94	0,00	0,23	47,13	6,40	46,24	0,00
3CS <sub>NO</sub> S	0,18	45,72	6,60	47,50	0,00	0,19	46,12	6,24	47,45	0,00
3CS <sub>NO</sub> U	0,16	45,98	6,44	47,42	0,00	0,17	46,01	6,35	47,47	0,00

Tabla 16. Datos de la composición elemental.

### 3.5. Variables estructurales propias

En las Tablas 15 y 16 se muestran los resultados del estudio de algunos parámetros dendrométricos concluyendo que son los esperados, a medida que el árbol es más longevo, y por lo tanto presentan un diámetro mayor, las superficies de cada una de las partes son también mayores.

Dentro de este razonamiento, la única relación es que a medida que el árbol es más longevo, en los meses de Marzo-Abril predomina el duramen sobre la albura y la corteza, mientras que en Junio-Julio sólo se da este comportamiento en la clase 3, mientras que en las clases 1 y 2 predominan la albura frente a duramen y corteza. Esto es debido en primer lugar a que el duramen aparece en el roble durante segunda década de vida y a que las muestras de Junio-Julio tienen mayor cantidad de vasos grandes y más agua, con lo que el duramen, que fue medido antes de extraer la humedad, tiene mayor presencia que en las muestras de Marzo-Abril. Una vez extraída el agua, la tendencia debería invertirse.

Muestra	MARZO-ABRIL			
	Duramen (cm <sup>2</sup> , %)	Albura (cm <sup>2</sup> , %)	Corteza (cm <sup>2</sup> , %)	Total (cm <sup>2</sup> )
1BSS	58,34 (36,12)	55,76 (34,53)	47,41 (29,35)	161,51
1BS <sub>NO</sub> S	27,81 (28,33)	47,09 (47,97)	23,26 (23,70)	98,16
1BS <sub>NO</sub> U	27,36 (33,10)	37,05 (44,81)	18,27 (22,10)	82,68
1CSS	12,07 (11,43)	68,71 (65,10)	24,82 (23,50)	105,60
1CS <sub>NO</sub> S	18,97 (29,25)	30,25 (46,65)	15,63 (24,09)	64,85
1CS <sub>NO</sub> U	46,96 (45,08)	41,17 (39,53)	16,04 (15,39)	104,17
2BSS	116,24 (36,43)	152,65 (47,85)	50,15 (15,72)	319,03
2BS <sub>NO</sub> S	71,08 (38,48)	65,36 (35,39)	48,27 (26,13)	184,72
2BS <sub>NO</sub> U	155,15 (39,59)	155,80 (39,75)	80,97 (20,66)	391,92
2CSS	178,94 (46,42)	145,29 (37,69)	61,29 (15,90)	385,52
2CS <sub>NO</sub> S	129,53 (37,84)	131,64 (38,46)	81,11 (23,69)	342,28
2CS <sub>NO</sub> U	96,20 (28,17)	165,66 (48,51)	79,63 (23,32)	341,49
3BSS	370,17 (54,03)	171,22 (24,99)	143,76 (20,98)	685,15
3BS <sub>NO</sub> S	223,45 (25,57)	465,81 (53,31)	184,45 (21,11)	873,71
3BS <sub>NO</sub> U	447,42 (57,44)	208,36 (26,75)	123,18 (15,81)	778,96
3CSS	179,85 (30,28)	331,63 (55,83)	82,46 (13,88)	593,94
3CS <sub>NO</sub> S	336,22 (35,92)	373,86 (39,94)	226,06 (24,15)	936,15
3CS <sub>NO</sub> U	419,94 (54,06)	231,05 (29,75)	125,75 (16,19)	776,74
58,34 (36,12) 58,34 superficie en cm <sup>2</sup> (36,12) Porcentaje de la fracción (duramen, albura o corteza) respecto al total de la superficie de la muestra				

Tabla 17. Datos de estructura de las diferentes muestras.

Por otro lado, la variabilidad en el duramen se atribuye en un 33,4 % a la edad del árbol, del 19 % al índice de sitio y del 22,85 % al diámetro normal, pero en realidad no hay una tendencia clara, de tal manera que son la genética y la competencia [2], quienes posiblemente determinen la mayor o menor cantidad de duramen y lignina en los diferentes individuos, con lo que en relación a estas variables estructurales, habrá que decir que la mayor presencia de duramen significa mayores poderes caloríficos, pero que su vinculación a la edad y al diámetro no es definitiva.

Muestra	JUNIO-JULIO			
	Duramen (cm <sup>2</sup> , %)	Albura (cm <sup>2</sup> , %)	Corteza (cm <sup>2</sup> , %)	Total (cm <sup>2</sup> )
1BSS	14,94 (21,66)	39,68 (57,53)	14,35 (20,81)	68,97
1BS <sub>NO</sub> S	42,09 (27,97)	77,00 (51,17)	31,39 (20,86)	150,48
1BS <sub>NO</sub> U	47,58 (35,249)	70,54 (52,25)	16,88 (12,51)	135,00
1CSS	22,90 (19,58)	70,55 (60,34)	23,47 (20,08)	116,92
1CS <sub>NO</sub> S	21,80 (39,49)	22,66 (41,04)	10,75 (19,47)	55,21
1CS <sub>NO</sub> U	32,72 (20,40)	104,83 (65,36)	22,84 (14,24)	160,39
2BSS	69,26 (25,42)	149,17 (54,76)	53,99 (19,82)	272,42
2BS <sub>NO</sub> S	23,48 (8,49)	182,14 (65,82)	71,11 (25,69)	276,73
2BS <sub>NO</sub> U	147,93 (64,39)	55,15 (24,01)	26,65 (11,60)	229,73
2CSS	112,89 (28,77)	239,77 (61,11)	39,69 (10,12)	392,34
2CS <sub>NO</sub> S	136,97 (53,57)	73,73 (28,84)	45,00 (17,60)	255,71
2CS <sub>NO</sub> U	184,55 (56,69)	72,34 (22,22)	68,62 (21,08)	325,52
3BSS	715,28 (60,97)	292,81 (24,96)	165,00 (14,07)	1173,09
3BS <sub>NO</sub> S	51,15 (8,66)	419,60 (71,07)	119,66 (20,27)	590,41
3BS <sub>NO</sub> U	250,92 (41,72)	190,35 (31,65)	160,23 (26,63)	601,50
3CSS	270,03 (59,13)	119,80 (26,23)	66,84 (14,64)	456,67
3CS <sub>NO</sub> S	347,97 (34,03)	515,63 (50,42)	158,98 (15,55)	1022,59
3CS <sub>NO</sub> U	408,76 (53,44)	220,93 (28,89)	135,15 (17,67)	764,85
<b>14,94 (21,66)</b> 14,94 superficie en cm <sup>2</sup> (21,66) Porcentaje de la fracción (duramen, albura o corteza) respecto al total de la superficie de la muestra				

Tabla 18. Datos de estructura de las diferentes muestras.

### 3.6. Otras propiedades de interés

Los resultados de densidad presentados en la Tabla 17 confirman que a medida que el árbol crece las densidades van aumentando, así los árboles de la clase 3 poseen mayor densidad que los árboles de las clases 1 y 2.

Muestra	MARZO-ABRIL Densidades (kg m <sup>-3</sup> )				JUNIO-JULIO Densidades (kg m <sup>-3</sup> )			
	Duramen	Albura	Corteza	Media	Duramen	Albura	Corteza	Media
1BSS	705,0	679,8	596,0	771,9	791,8	651,3	616,8	675,3
1BS <sub>NO</sub> S	772,5	763,5	620,5	731,7	943,9	800,0	746,0	829,0
1BS <sub>NO</sub> U	767,5	631,5	584,8	666,1	987,5	741,6	664,3	817,6
1CSS	755,7	734,5	652,0	717,0	937,6	726,0	718,8	766,9
1CS <sub>NO</sub> S	615,5	602,0	595,8	604,4	667,5	636,8	603,0	642,7
1CS <sub>NO</sub> U	877,7	732,0	693,2	791,7	907,8	743,0	704,8	770,2
Valores medios	749,0	690,6	623,7	713,8	872,7	716,5	675,6	750,3
2BSS	895,6	645,5	603,5	728,8	911,0	693,5	685,5	746,3
2BS <sub>NO</sub> S	873,5	712,5	689,5	769,3	895,5	743,5	709,3	748,6
2BS <sub>NO</sub> U	827,0	760,0	646,7	764,1	897,0	870,0	706,5	868,5
2CSS	833,5	713,7	620,7	753,9	806,5	785,8	621,0	775,0
2CS <sub>NO</sub> S	736,7	659,7	651,7	687,1	836,5	697,5	618,8	759,2
2CS <sub>NO</sub> U	835,3	829,0	626,0	784,1	981,0	813,4	756,3	896,9
Valores medios	833,6	720,1	639,7	747,9	887,9	767,3	682,9	799,1
3BSS	973,7	846,0	706,5	885,7	1005,0	885,0	779,0	943,4
3BS <sub>NO</sub> S	891,5	715,3	655,0	748,4	901,8	751,2	638,8	742,3
3BS <sub>NO</sub> U	913,3	646,0	626,3	796,4	922,6	695,0	629,5	772,5
3CSS	881,0	738,0	618,5	764,2	833,3	701,5	641,0	780,1
3CS <sub>NO</sub> S	977,5	855,0	740,0	820,2	958,5	708,6	685,0	789,8
3CS <sub>NO</sub> U	908,8	735,5	691,3	740,2	907,5	860,3	833,8	880,5
Valores medios	924,3	756,0	672,9	792,5	921,5	766,9	701,2	818,1

Tabla 19. Densidades (kg m<sup>-3</sup>) de las muestras. En la Tabla se recogen las densidades del duramen, albura, corteza y media. La densidad media, y que es la que se debe utilizar como referencia para el estudio, se obtiene utilizando como referencia los datos estructurales de la Tabla 16.

Siguiendo con la comparativa con *Paulownia* y Chopo, las densidades determinadas fueron de unos (850 y 880) kg m<sup>-3</sup>, muy similares. Este valor, unido al de las humedades de las muestras, es **positivo para el planteamiento de utilizar la madera de carballo como leña** frente a especies de crecimiento rápido ya que en las operaciones de logística el proceso es más eficiente, o de manera más coloquial, transportar más combustible en el mismo espacio.

Tabla 18. Valores de humedad de las muestras en el momento de la recogida. Tal y como se comentó en el punto “2.1.4.1. Preparación de las muestras”, los valores de humedad en este estudio no dejan de ser orientativos ya que referenciamos los datos energéticos a valores de humedad standard para todas y cada una de las muestras. Como se puede observar todos los valores de humedad aquí presentados son mayores al valor de referencia más alto y correspondiente a una humedad del 20 %.

Los valores de humedad de campo son muy importantes en estudios de diseño de índices de riesgo para prevenir y combatir eficazmente los incendios forestales.

Muestra	MARZO-ABRIL	JUNIO-JULIO
	Humedad (%)	Humedad (%)
1BSS	40,74	49,87
1BS <sub>NO</sub> S	42,36	25,13
1BS <sub>NO</sub> U	40,16	32,40
1CSS	44,39	27,25
1CS <sub>NO</sub> S	42,40	46,95
1CS <sub>NO</sub> U	39,55	31,26
2BSS	39,42	46,02
2BS <sub>NO</sub> S	44,99	23,12
2BS <sub>NO</sub> U	43,87	29,23
2CSS	41,40	44,61
2CS <sub>NO</sub> S	46,22	31,96
2CS <sub>NO</sub> U	35,29	33,29
3BSS	37,98	48,57
3BS <sub>NO</sub> S	38,90	44,35
3BS <sub>NO</sub> U	41,97	47,27
3CSS	41,90	44,09
3CS <sub>NO</sub> S	20,16	20,12
3CS <sub>NO</sub> U	42,00	28,75

Tabla 20. Valores de humedad de las muestras en el momento de la recogida.

Analizados ya los parámetros de forma individual, vamos a realizar unas reflexiones más globales. Así si nos fijamos en los valores medios, la densidad de la madera aumenta ligeramente con la edad, en torno a un 5 % de una clase diametral a la siguiente, esto es cada 7 años aproximadamente. También lo hace con la época del año en que se toman las muestras, aumentando al recogerse éstas en el período Junio-Julio respecto a Marzo-Abril. Esto se debe a que en Junio-Julio los árboles tienen la copa totalmente formada y si las condiciones hídricas o de temperatura ambiente no son limitantes, la mayor superficie foliar fotosintética y el mayor número de horas de luz en este período del año, provoca que los contenidos de humedad sean más elevados en las muestras de Junio-Julio. No obstante y según esto, lo que realmente aumenta es la densidad aparente gracias al agua, pero disminuiría la densidad real, que es la que interesaría en el momento en que la madera se ha procesado como leña.

En cuanto a la exposición fisiográfica a umbría o solana, decir que las muestras recogidas en verano (Junio-Julio) tienen, en general, mayor contenido de agua que las recogidas al final del invierno (Marzo-Abril), y por lo tanto mayor peso específico, tal y como puede comprobarse en la Tabla 17 y en particular en la columna dedicada al duramen, responsable de la mayor aportación a la densidad. Puede verse que salvo en la albura, donde existe alguna excepción, la tendencia es uniforme. En cualquier caso, hablamos en general de diferencias introducidas fundamentalmente por la humedad que contenían las muestras, en torno al 40 % cuando fue medida. Una vez secas, están diferencias ahora entre el (3 y el 18) %, se reducen en torno al 3%. Por el contrario, los poderes caloríficos obtenidos a partir de las muestras tomadas en Marzo-Abril son mayores debido a que sus densidades reales también son mayores y las proporciones relativas de duramen respecto a la albura y entre muestras de primavera y verano, una vez extraída la humedad y perdido por tanto volumen la madera, también.

La misma tendencia que se muestra entre las maderas recogidas en Marzo-Abril y las obtenidas en Junio-Julio se aprecia entre la madera de umbría (que sigue el esquema de las primeras) y la de solana (pareja a las segundas).

La leña de orientación Sur, tiene mayor porcentaje de madera de grano fino (de primavera), más clara, con fibras huecas de pared delgada y con vasos más grandes; con menor densidad relativa, menor porcentaje de duramen una vez seca y mayor mojada y por todo esto, aportando un poco menos de poder calorífico y una degradación algo peor, con valores poco significativos en ambos casos.

La creencia popular de que la madera de exposición Norte no es adecuada para su utilización como combustible, es cierta solamente cuando su contenido en agua de impregnación (agua de la pared celular) es excesivo por un secado deficiente o un mal almacenaje. Su tipología y composición celular, que influyen directamente en el tiempo que tarda en perder agua durante su secado una vez cortada y en los equilibrios higroscópicos que se establecerán precisamente durante su almacenaje, son más propensas a absorber agua del ambiente pues el tamaño de los vasos es mucho menor, tal y como puede apreciarse en la Figura 48. Durante el verano los anillos que se forman tienen una apariencia más oscura y mayor sección, puesto que las horas de luz son más y la copa está totalmente desarrollada. Como puede apreciarse en la siguiente fotografía, el número de vasos es mayor, pero son mucho más pequeños, lo que hace que la cantidad de madera y lignina aumenten, con lo que también aumentará la capacidad de captar y ceder agua cuando la madera se almacene en forma de leña durante el invierno en las maderas de umbría.



Figura 50. Fotografía que muestra en detalle madera de verano y primavera en los anillos de crecimiento del roble.

En los árboles de umbría, las células se alargan en respuesta al intento de estos mismos por estirar su fuste en detrimento del grosor y en aras de alcanzar la luz, a la vez que los contenidos de lignina aumentan, traduciéndose esto en una pérdida de densidad aparente (aumento de densidad real) y en un aumento del poder calorífico.

El número de vasos y sobre todo el grosor de la pared celular (aumentan la capacidad de la madera de captar agua de impregnación) se acrecienta en las leñas de umbría respecto a las de solana y en las recogidas al inicio de la primavera respecto a las apeadas al final del verano, ya que se eleva el porcentaje de madera de verano.

Por otro lado, el agua puede encontrarse en la madera bajo tres formas diferentes:

- Agua de constitución, aquella que forma parte de su naturaleza y que sólo perderá al degradarse.
- Agua libre, que es aquella de "imbibición" contenida en el lumen de las células, es decir, llenando sus cavidades; ésta no se puede captar de la atmósfera y una vez perdida sólo puede recuperarse por inmersión.
- Agua de impregnación; la que está contenida en las paredes celulares que se mantiene en equilibrio dinámico con la del medio ambiente que rodea a la madera.

Atendiendo a las consideraciones anteriores, la madera de solana por su mayor contenido en vasos, tiene menos espacio volumétrico relativo susceptible de embeberse de agua de impregnación, que junto con la de constitución será la única presente en la leña. Es entonces la humedad de impregnación la que podría estar captando la madera

empleada como combustible durante la fase de almacenaje, con lo que siempre y ya apilada, la leña obtenida a partir de madera de umbría, tendrá mayor tendencia a presentarse más húmeda.

Si el aire está más caliente puede contener más agua, y si está más frío, menos. En invierno, en el interior de las viviendas y debido a los sistemas de calefacción, el aire aunque se calienta, se seca y la leña que se encuentra en estas condiciones reduce su humedad. Sin embargo, es la leña empleada durante uno o dos días la que se almacena en el interior de la vivienda, permaneciendo habitualmente en garajes o tapada en el exterior el grueso de la misma, así que serán estas condiciones las que realmente habrá que analizar. Hablamos entonces de ambientes moderadamente fríos y húmedos en zonas de costa y fríos con menos humedad en zonas de interior para la casuística de Galicia y durante los momentos de utilización de la leña, lo que provocará que la leña en zonas próximas a la costa, tenga contenidos de humedad más elevados.

Para concluir comentar que la silvicultura (o no silvicultura) aplicada a las masas donde se tomaron las muestras (podas hasta 5 m y claros hasta densidades de 200 pies  $\text{ha}^{-1}$ , cuatro años antes del inicio de los trabajos de campo) no ha mostrado variaciones reseñables en cuanto al poder calorífico se refiere. De igual manera, la procedencia de los pies (reproducción sexual o semilla y de reproducción vegetativa o rebrote) tampoco ha mostrado variaciones.



### 3.7. Bibliografía

- [1] Riesco Muñoz, G., Remacha Gete, A. Y Pedras Saavedra, F. Influencia de la situación geográfica y la fisiografía en la calidad de la madera de *Quercus robur* L. Recursos Rurais. 2006;1(2):57-65.
- [2] Bergman, Richard, Cai, Zhiyong, Clausen, Carol A., Dietsberger, Mark A., Falk, Robert H., Frihart, Charles R., Glass, Samuel V., Hunt, Christopher G., Ibach, Rebecca E., Kretschmann, David E., Lebow, Stan T., Rammer, Douglas R., Ross, Robert J., Stark, Nicole M., Wacker, James P., Wang, Xiping, Wiedenhoef, Alex C., Wiemann, Michael C. and Zelinka, Samuel L. Wood Handbook. Wood as an Engineering Material. General Technical Report FPL-GTR-190. Forest Service. Forest Products Laboratory. USDA. Madison, Wisconsin; 2010.
- [3] Barrio Anta, M., Díaz-Maroto Hidalgo, I.J., Álvarez González, J.G. Y Vila Lameiro, P. El problema de la regeneración de robles caducifolios y marcescentes en el Noroeste Peninsular. En: Actas De La Iii Reunión Sobre Regeneración Natural-Iv. Reunión Sobre Ordenación De Montes. Cuad. Soc. Esp. Cien. For. 2003;15:95-100.
- [4] Lisardo Núñez-Regueira, J.A. Rodríguez-Añón, J. Proupín, and A. Romero-García. Bioresource Technology. 2002;82:5-13.
- [5] Lisardo Núñez-Regueira, J.A. Rodríguez-Añón, J. Proupín, and A. Romero-García. Bioresource Technology. 2003;88:121-130.
- [6] Elvira Martín, L. M. y Hernando Lara, C. Inflamabilidad y energía de las especies de sotobosque. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. INIA. Madrid; 1989.
- [7] Gronli, M.G., Varhegyi, G., Di Blasi, C. Industrial Engineering and Chemistry Research. 2002;41:4201-4208.
- [8] Idris, S. S., Abd Rahman, N., Ismail, K., Bahari Alias, A., Abd Rashid, Z., Jindra Aris, M. Bioresource Technology. 2010;101:4584-4592.
- [9] Song, C., Hu, H., Zhu, S., Wang, G., Chen, G. Energ. Fuel. 2004;18(1):90-96.
- [10] Carrier, M., Loppinet-Serani, A., Denux, D., Lasnier, J., Ham-Pichavant, F., Cansell, F., Aymonier, C. Biomass and Bioenergy. 2011;35:298-307.
- [11] Wongsiriammuay, T., Tippayawong, N. Bioresource Technology. 2010;101:5638-5644.
- [12] Idris, S. S., Abd Rahman, N., Ismail, K. Bioresource Technology. 2012;123:581-591.
- [13] Magdziarz, A., Wilk, M. J. Therm. Anal. Calorim. 2013;114:519-529.
- [14] Liu, Q., Wang, S., Zheng, Y., Luo, Z., Cen, K. J. Anal. Appl. Pyrolysis.

2008;82:170-177.

- [15] Fasina, O., Littlefield, Brad. Fuel Processing Technology. 2012;102:61-66.
- [16] Ounas, A., Aboukas, A., El harfi, K., Bacaoui, A., Yaacoubi, A. Bioresource Technology. 2011;102:11234-11238.
- [17] Gai, C., Dong, Y., Zhang, T. Bioresource Technology. 2013;127:298-305.
- [18] Vyazovkin, S. Journal of Computational Chemistry. 2001;22(2):178-183.







# Capítulo 4

## Conclusiones





# Conclusiones

Denominación	Pág.
Conclusiones	145
Consideraciones en la silvicultura del carballo. Propuestas y líneas de trabajo actuales	147
Modelo silvícola alternativo propuesto por esta Tesis para la producción de leñas a partir de madera de <i>Quercus robur</i> L. en Galicia	149
Bibliografía	153





## Conclusiones

Este apartado lo vamos a plantear presentando en primer lugar una recopilación de conclusiones generales breves obtenidas de la discusión previa de los resultados, y que darán lugar a un posterior posicionamiento general que será la base para proponer un Modelo silvícola para el aprovechamiento de leñas de *Quercus robur* L. en Galicia. Así tenemos como conclusiones generales que:

- Las mínimas diferencias encontradas en el PCS, inferiores al 6 %, nos llevan a “despreciar” la variable de la edad y parámetros como la situación, el origen y la gestión a la hora de elegir un individuo u otro como materia prima para elaborar combustible.
- El PCS es siempre mayor en las muestras recogidas a finales de invierno y principio de primavera, por lo tanto, momento ideal en el se deberían concentrar los procesos de extracción de madera.
- Los valores medios del PCS son semejantes a los de otras especies forestales usadas habitualmente como materia prima para la elaboración de biocombustibles sólidos.
- Los valores del PCI nos permiten afirmar que la madera de carballo debería poseer mayor rendimiento energético frente a otras maderas de crecimiento rápido.
- La calidad energética de la leña responde principalmente al proceso de secado y almacenado.
- Los valores del poder calorífico a diferentes humedades nos permiten proponer un proceso de secado natural hasta alcanzar una humedad propia estable del 20 %. Aún así la extracción “extra” de humedad compensa energéticamente hablando, ya que reducciones de un 5 % de humedad generan incrementos de un 7 % en el poder calorífico.
- Las maderas de umbrían son más resistentes a la termodegradación, y por lo tanto sometidas a un proceso de secado adecuado serían mejor leña.
- Los árboles con más edad generan madera más resistente a la termodegradación es decir, mejor leña (más resistente y con menor producción de cenizas).
- La correspondencia encontrada entre clase diametral y poder calorífico nos permite proponer turnos de corta muy competitivos.
- La estabilidad térmica del carballo es mayor que la de otras especies forestales utilizadas habitualmente como materia prima para elaborar biocombustibles

sólidos. Es decir, el carballo posee un rendimiento energético superior y por lo tanto con menor cantidad de leña se produciría mayor cantidad de energía y durante más tiempo.

- Los valores presentados en la Tabla 14 eliminan factores potenciales de riesgo en la formación de  $SO_x$  en los gases.
- Los valores de humedad y densidad sitúan al carballo como una especie bien posicionada en aspectos tan importantes como la logística y el transporte.

Expuestas estas conclusiones, y tal y como se comentó al inicio de esta Tesis, partíamos con el objetivo claro de definir o tratar de caracterizar la tipología ideal de tronco que optimizase el poder calorífico de la madera de *Quercus robur* L. empleada como leña. Pues bien, después del estudio realizado se ha concluido que no existe tal tipología desde el punto de vista del rendimiento energético. Sí probablemente desde el punto de vista de la termodegradación cuando hablamos de un leño, ya que su forma y geometría influyen en la mayor o menor superficie expuesta al fuego y en la cantidad de madera que se va carbonizando, y que actúa de aislante ante la entrada del oxígeno durante la combustión. Sin embargo este aspecto no se ha podido estudiar en esta Tesis con la suficiente profundidad ya que las experiencias en la TGA, partían de muestras sin geometría definida, pues la madera se pulverizaba previamente a su quemado, y el tamaño de muestra es muy pequeño. En cualquier caso, parámetros como la edad, el grosor inicial del árbol del que se extraen las leñas, el haber realizado silvicultura o no, el que el pie proceda de reproducción asexual o de semilla o cualquier otra consideración ambiental o dendrométrica, apenas influyen. La única excepción en esta reflexión es la humedad, único parámetro que para variaciones de un 5 %, frecuentes en leñas convenientemente secas y apiladas, afectan hasta en un 10 % al poder calorífico y “retrasan” los procesos de termodegradación.

Vemos que el poder calorífico apenas varía con la clase diametral y por tanto con la edad. No se puede establecer una tendencia demasiado clara y que funcione para todos los casos. La edad explicaría un 33,4 % de la variabilidad del contenido en duramen y seguramente del leve aumento en lignina en los pies más viejos, lo que provocaría pequeños aumentos del poder calorífico, aunque no se puede establecer una tendencia y habría que atribuir probablemente más razones a las condiciones genéticas y de competencia de cada individuo, que precisamente a parámetros como la edad, el diámetro normal o índice de sitio [1].

La creencia popular, idea inicial que ha inspirado en gran medida esta Tesis, de que la madera de solana es mejor desde un punto de vista energético para su utilización como leña respecto a la obtenida en zonas de umbría, es en esencia falsa, ya que la madera de umbría, con mayor densidad real, mayor proporción de madera de grano

grueso y menor tamaño en los vasos conductores de savia, proporciona poderes caloríficos más elevados y tiempos de degradación más prolongados. Sin embargo, hay que puntualizar que si la leña se seca o se almacena de forma inconveniente, y esto es una práctica habitual, sí se cumple la creencia, puesto que es también la madera de umbría tiene mayor capacidad higroscópica para captar agua de impregnación en las paredes celulares.

La madera de umbría se comporta desde el punto de vista del poder calorífico y de termodegradación, de igual manera que la recogida a principios de la primavera, con mayor proporción de madera de invierno y la de exposición solana, de igual forma que la apeada en verano, con mayor proporción de madera de primavera.

A continuación presentamos el **Modelo silvícola** planteado para el aprovechamiento de leñas de *Quercus robur* L. en Galicia.

En función de los resultados obtenidos en esta Tesis, de sus conclusiones y de las consideraciones silvícolas más actuales de quienes están a la vanguardia del estudio de modelos silvícolas para *Quercus robur* L. y que se van a exponer a continuación, se determina un modelo que se asume ya de antemano el constante feedback y su necesaria revisión, puesto que no pretende ser algo definitivo, sino una guía para que en un futuro, después de analizar resultados y experiencias, pueda culminar en un instrumento de apoyo y consulta para la redacción de una silvicultura exhaustiva y precisa de nuestras masas de carballo, con el objetivo principal de la obtención de leñas de calidad a partir de esta especie.

### **Consideraciones en la silvicultura del carballo. Propuestas y líneas de trabajo actuales**

Las líneas de propuesta y trabajo actuales podrían resumirse en las siguientes [2, 3]:

1. No existe en Galicia ninguna ordenación de masas de *Quercus robur* L. y si hablamos de España, solamente pueden darse algunas citas en la Cordillera Cantábrica. Esto implica partir de un punto extremadamente incipiente y primigenio, en el que está prácticamente todo por hacer, proponer y testar.
2. Francia y Alemania, con las diferencias indudables a nivel climático y edáfico, así como de costumbre, tipología de aprovechamientos madereros, industria, nivel de mecanización y profesionalización del sector, políticas forestales y orografía respecto al particular caso de nuestra comunidad, son los países que abanderan el empleo del roble en sus silviculturas más punteras y rentables desde un punto de vista económico. Por este motivo, muchas de las líneas de trabajo de nuestras universidades y de los proyectos de investigación apoyados

desde nuestras entidades públicas y privadas, toman como base el aprendizaje y las técnicas de estos países, cuando las diferencias son considerables con el nuestro como venimos de decir y los errores, probablemente crasos debido a esto.

3. Los aprovechamientos tradicionales que venían haciéndose en Galicia con la principal finalidad de la obtención de sus leñas, terminaron con el monte en sus formas silvícolas de monte bajo y medio, extrayéndose de forma sistemática y reiterada los mejores pies, cuando lo ideal sería un aprovechamiento en forma de monte alto si hablamos de elegir la forma fundamental de masa más conveniente, desde el punto de vista de la obtención de madera de sierra de calidad, yéndonos a turnos de (200 a 300) años, que con nuevas técnicas de puesta en luz, podrían reducirse a menos de 160 años, en los lugares de mejores condiciones climáticas y edáficas.

Comenzar siempre con densidades elevadas que obliguen a nuestros árboles a crecer con un fuste derecho y desprovisto de excesiva ramosidad, al competir de este modo en altura, fuertemente por la luz. Será preciso hacer clareos desde los 15 años en adelante. Al iniciar los clareos la densidad a menudo es superior a los 10.000 pies  $\text{ha}^{-1}$ , llegando al final de los clareos los (2.000-2.500) pies  $\text{ha}^{-1}$ .

Las claras se inician a los 30 años y se realizarán a intervalos de 7 a 10 años hasta el momento de comenzar las cortas de regeneración. La primera clara puede conllevar la preselección de los candidatos a pies de porvenir, en un número de 200-300 pies  $\text{ha}^{-1}$ , para luego realizar una selección definitiva a los (50-60) años. El espaciamiento adecuado entre los pies de porvenir definitivos oscilará entre (10-12) m, es decir, de (70 a 100) pies  $\text{ha}^{-1}$ .

La corta puede realizarse hacia los 100 años, si se han realizado adecuadamente las claras, ya que de lo contrario los diámetros serán reducidos y habrá que esperar hasta los 120 o más años.

En plantaciones se recomiendan densidades entre los (2.000 y 2.500) pies  $\text{ha}^{-1}$ , correspondientes a unos espaciamentos de 2 x 2, 2,5 x 2 y 3,5 x 1,5 m.

4. Por ser el carballo de temperamento robusto, muy exigente en luz, la regeneración que plantean los expertos sería por aclareo sucesivo y uniforme. Se conseguiría en un período de 3-6 años con una sola corta secundaria y una final.
5. Realización de claras. Datos franceses, proponen cuando se persiguen diámetros en torno a 60 cm, realizar una a los (100-110) años.

6. Aplicar en las ordenaciones según las exigencias de flexibilidad marcadas por el gestor, los métodos de tramo único, móvil en regeneración u ordenación por rodales.
7. Datos de la Xunta de Galicia del año 1991, arrojan crecimientos para el roble de hasta  $6 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ , muy a tener en cuenta para su elección como especie productora.

### **Modelo silvícola alternativo propuesto por esta Tesis para la producción de leñas a partir de madera de *Quercus robur* L. en Galicia**

Tal y como arrojan los datos de este trabajo, las mayores variaciones en la calidad de la leña, medida por su capacidad energética (densidad energética), esto es por el poder calorífico que aporta y el tiempo durante el cual lo hace en relación a su peso, se ha visto que la influencia de los factores ambientales, aunque existente, es pequeña; que la dendrometría apenas afecta; y que por tanto debe de ser la genética del individuo, la que marca las mayores diferencias. Atendiendo a esto, en montes ya existentes que pretendan su reconversión y entrada en producción de leña, la elección de forma fundamental de masa parece clara en favor del monte alto, aunque la finalidad sea el aprovechamiento de la leña, pues los métodos de monte medio y sobre todo bajo que vienen siendo habituales y precedentes, han supuesto un proceso de selección genética regresiva que ha culminado en nuestros días, en un desarrollo y porte deficientes y en una leña de peores características.

Por supuesto, en el caso de nuevas plantaciones, emplear material seleccionado y controlado en la plantación inicial, pudiéndose en las sucesivas regeneraciones de la masa cortada, emplear los mejores rebrotes eliminando el resto y no suponiendo esta acción pérdida alguna de calidad genética, pues en ningún supuesto se dejan progresar los pies peores y suponiendo esta técnica un abaratamiento del producto final.

Como lógicamente el monte alto es una forma fundamental de masa aplicada a una silvicultura encaminada a la consecución de madera de sierra, con grandes diámetros y turnos elevados, es aquí donde se plantea otra de las apuestas silvícolas. Monte alto entonces para mejorar la genética, pero con unas bajas densidades por ha, hablamos de marcos de (7x7), (8x8), como si se tratase casi de una plantación para fruto, lo que hará que exista un mayor crecimiento y uniformidad de leñas y la posibilidad de un aprovechamiento complementario como es la bellota, que abriría el campo a ordenaciones silvopastorales para el aprovechamiento de este fruto con pastoreo de porcino, aumentando la renta que en un futuro introduciría la leña.

Del esquema de aprovechamiento tradicional de monte bajo en turnos de (8-20) años, nos quedamos un turno lo más próximo a estos posible en las nuevas condiciones. Un turno de unos (30-35) años sería el adecuado, para tener leña en toda la parte aérea de cada pie y no solo en el tronco principal, ya que necesitamos que la leña tenga > 6cm (recordar que la normativa europea de calidad de las leñas, CEN/EN 14961-1:2010, contempla el aprovechamiento a partir de 2 cm), para que resulte rentable su procesado y para que el acortamiento extremo de los turnos de la especie, de (100-120) años cuando se produce madera de calidad a (30-35) años cuando se produce leña de calidad, convierta al roble en una verdadera alternativa, apetecible y atractiva, a la hora de elegir por parte de los propietarios, su opción más ventajosa en lo que a uso del suelo rural se refiere.

Con Turnos de 30-35 años, tendríamos pies de los Grupos 2 y 3 de estudio de esta tesis, que aunque con variaciones poco significativas, siempre aportan un poco más de poder calorífico y de mejores condiciones para la degradación, ya que aumentan normalmente los porcentajes de duramen y lignina y la proporción de madera de grano grueso. Cortando y procesando para leña con estas edades, nos aseguramos una reducción importante de diámetro respecto a los grandes robles trasmochos que a menudo se emplean hoy en Galicia, disminuyendo claramente los costes de su procesado pues las tareas de hendido prácticamente desaparecerían.

En nuevas plantaciones o cuando se ayude a la regeneración con planta de vivero, se habrán de tener en cuenta las siguientes consideraciones de calidad de planta:

Emplear planta de 1 o 2 savias repicada. Las raíces fasciculadas, libres de enrollamientos y deformaciones, no muy densas y sin amarilleos. Tallo lignificado, cuello y hojas sin daños. Estado sanitario controlado y sin fermentaciones ni mohos.

Decir también, que el hecho de elegir esta apuesta silvícola que destina el roble a su utilización como leña, solamente deberá tenerse en cuenta, en aquellos terrenos que reúnan los requerimientos de estación de la especie. Hay que considerar que en Galicia, las mejores carballeiras aparecen en valles o laderas suaves con terrenos profundos, sueltos y frescos. El sustrato puede ser muy variado, prefiriendo los silíceos. Se sitúan especialmente sobre tierras pardas, con abundante humedad. Su poca exigencia en aireación de las raíces hace al *Quercus robur* L. compatible con terrenos muy compactos, tolerando la inundación temporal. Tiene exigencias medias en cuanto a fertilidad, soportando mal la aridez [4].

El *Quercus robur* L. vive en los pisos colino y montano con ombroclima subhúmedo a hiperhúmedo, requiere una precipitación media anual superior a 600 mm y necesita cierta cantidad de lluvia y humedad, tanto atmosférica como edáfica durante el verano [5].

El empleo del carballo para leña en lugar de hacerlo para madera de fuste de gran diámetro y calidad, también amplía la superficie potencialmente vocacional en relación a las características antes descritas de estación, pues los portes pueden ser mucho menores, y el suelo más limitante. Seguramente la mejor opción, sería destinar los terrenos mejores a fuste y los de características medias a leña. Los terrenos donde el roble sigue siendo vegetación climática, pero que por no reunir condiciones edáficas generan pies de porte no utilizable ni para leña, ni para fuste, deberían destinarse a otras especies menos exigentes o ser conscientes en el caso contrario, que el carballo en esta situación, estaría realizando una misión ambiental y restauradora, que por qué no, también puede ser rentable económicamente. Desde otra óptica, resulta obvio que ya lo es.

Completar esta propuesta añadiendo también, que puede estimarse la biomasa utilizable para leña, con las ecuaciones de biomasa de árbol individual elaboradas en el grupo de investigación UXFS (Unidade de Xestión Forestal Sostible da USC), que para el caso del roble nos presentan de la forma siguiente:

<i>Quercus robur</i>	$w_w = -5,714 + 0,01823 \cdot d^2 \cdot h$	0,939	147,3	48,4
	$w_b = -1,500 + 0,03154 \cdot d^2 + 0,001110 \cdot d^2 \cdot h$	0,801	41,1	51,2
	$w_{b7} = 3,427 \cdot 10^{-9} \cdot (d^2 \cdot h)^{2,310}$	0,575	162,3	49,1
	$w_{b2-7} = 4,268 + 0,003410 \cdot d^2 \cdot h$	0,858	37,4	48,4
	$w_{b0,5-2} = 0,03851 \cdot d^{1,784}$	0,799	8,41	50,3
	$w_{b0,5} = 1,379 + 0,0002400 \cdot d^2 \cdot h$	0,617	4,14	50,7
	$w_l = 0,01985 \cdot (d^2 \cdot h)^{0,7375}$	0,832	11,2	50,4
	$w_r = 0,01160 \cdot (d^2 \cdot h)^{0,4625}$	0,854	103,6	48,6

Nota:  $w_w$  = biomasa de madera en el fuste (kg);  $w_b$  = biomasa de corteza en el fuste (kg);  $w_{b7}$  = biomasa de madera y corteza de ramas con diámetro mínimo en punta delgada de 7 cm (kg);  $w_{b2-7}$  = biomasa de madera y corteza de ramas con diámetro máximo en punta gruesa de 7 cm y mínimo en punta delgada de 2 cm (kg);  $w_{b0,5-2}$  = biomasa de madera y corteza de ramas con diámetro máximo en punta gruesa de 2 cm y mínimo en punta delgada de 0,5 cm (kg);  $w_{b0,5}$  = biomasa de madera y corteza de ramas con diámetro máximo en punta gruesa de 0,5 cm (kg);  $w_l$  = biomasa de hojas (kg);  $w_r$  = biomasa de raíces (kg);  $w_{ob}$  = biomasa de ramas secas a lo largo del fuste (kg);  $d$  = diámetro normal (cm);  $h$  = altura total (m);  $cl$  = longitud de copa (m);  $h_{bc}$  = altura de la base de la copa viva (m);  $l_{cd}$  = diámetro máximo de copa (m);  $cc$  = valor medio de concentración de carbono en la materia seca (%)

Unos cuantos datos más de la AFG (Asociación Forestal de Galicia) que inclinan la balanza hacia esta propuesta. Los precios orientativos facilitados por la Asociación, sitúan el precio de pino con diámetro en punta delgada superior a 35 centímetros, en 47 a 62 euros  $m^{-3}$ , en cargadero de camión. El destinado a chapa, con 55 centímetros de diámetro, en 110 euros  $m^{-3}$ .

El eucalipto para desarrollo (42-46) euros  $m^{-3}$  mientras que el destinado a chapa se sitúa entre los (76 y 89) euros  $m^{-3}$ .

El castaño, según los usos, se paga entre (80 y 120) euros  $m^{-3}$  en parque de fábrica.

El roble para sierra oscila entre (48 y 85) euros  $m^{-3}$ , según el uso.

Y el dato y la reflexión; el precio del metro cúbico de madera de roble para leña es de entre (31 y 42) euros  $m^{-3}$  el metro cúbico en fábrica. Vendida en mercado local directamente al consumidor, (50-60) euros  $m^{-3}$ . En el peor de los casos, con turnos de 35 años como los planteados, sería el destino más rentable del roble con mucha diferencia y haría cierta competencia en dinero y en espera a pino y eucalipto.

Se concluye este apartado recordando que la apuesta por la leña como combustible puede ser una nueva actividad a realizar por la población del medio rural, en un recurso vocacional y que representaría un aprovechamiento de primera transformación que cualquier habitante podría plantearse con un coste y una inversión en infraestructuras asumible, ampliando la tipología de combustibles ofertada, ya que la sensación actual, es la de que la leña pierda cuota de mercado en poder de derivados de la madera tipo pellets, que necesitan una transformación y elaboración mayor, lo que quita a los pequeños productores la posibilidad de hacerse un sitio en el mercado y de afianzarse en el medio rural, evitando competencia a los monopolios de la madera.



## Bibliografía

- [1] Barrio Anta, M., Díaz-Maroto Hidalgo, I.J., Álvarez González, J.G. Y Vila Lameiro, P. El problema de la regeneración de robles caducifolios y marcescentes en el Noroeste Peninsular. En: Actas De La III Reunión Sobre Regeneración Natural-IV. Reunión Sobre Ordenación De Montes. Cuad. Soc. Esp. Cien. For. 2003;15:95-100.
- [2] Díaz-Maroto, I. J. & Silva-Pando, F. J. Cuadernos de la S.E.C.F. 1995;1:211-219.
- [3] <http://www.agrobyte.com/publicaciones/frondosas/cap6.html>
- [4] Ceballos, L., & J. Rurz De La Torre; Arboles y arbustos. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes. Madrid; 1979.
- [5] Silva-Pando, F. J. & A. Rigueiro; *Guía das árbores e bosques de Galicia*. Ed. Galaxia. Vigo; 1992.







# Reflexiones y futuro





## Reflexiones y futuro

A lo largo de este trabajo de casi 5 años, se ha pasado por etapas muy ilusionantes, normalmente coincidiendo con el inicio del mismo y en donde se plantearon quizás unos objetivos muy ambiciosos, etapas de tedio durante la fase de muestreo y experimental con todos los pros y contras de las mismas, y etapas frustrantes relacionadas normalmente con problemas en el desarrollo del procedimiento experimental, problemas con los equipos o con los resultados obtenidos.

Por fin, y después de unas buenas dosis de trabajo, ilusión y paciencia, se han alcanzado las principales metas marcadas inicialmente. Pero como es habitual en todo trabajo de investigación, también se cometieron errores de los que se aprendieron y que ayudaron a modificar el protocolo de trabajo, a desechar estudios que en un inicio se creían importantes, o implementar nuevas ideas que han ayudado a darle coherencia al trabajo y que pueden ayudar en investigaciones futuras, tanto al que escribe como a otros investigadores.

En resumen, al final de un trabajo de investigación uno comprende, aunque pueda parecer frustrante, la máxima de que es difícil llegar a grandes conclusiones y fácil cometer errores, pero que todo, tanto lo bueno como lo malo, es un paso más para seguir investigando, y que los errores cierran vías que pueden ayudar a otros a no cometer los mismos fallos en un futuro, y esto también debería ser considerado como una conclusión. Pero aunque en la sociedad en la que nos movemos, los errores están mal considerados, esto no nos puede hacer dudar de su valía.

Estos motivos, en un ejercicio de honrada reflexión que nace desde el convencimiento, son los que nos movieron a plantear este apartado de la Tesis.

Así, y siguiendo con la estructura de la Tesis, vamos a enumerar cuestiones que consideramos de relevancia y no necesariamente errores entendidos desde la negatividad. Empezaremos por estudios que no se pudieron hacer o se decidieron no llevar a cabo y que podrían completar en un futuro esta Tesis:

1. Realizar una cuantificación más detallada de la biomasa generada tanto por árbol apeado como por árbol "gestionado". Este punto ayudaría a cuantificar la biomasa potencial generada por superficie y tiempo, y realizar cálculos de producción y sostenibilidad. Este punto, y a lo largo de todo el muestreo, es dependiente de permisos y actuaciones que muchas veces no se pueden controlar y suponen un problema insalvable y un tiempo del que no se disponía.

- Este motivo es el que nos llevó a realizar cortas muy selectivas y de un número de individuos menor al previsto inicialmente.
2. Estudiar la evolución de la tasa temporal recuperación de la biomasa de los árboles "gestionados" para cuantificar su producción por ha y por periodo de tiempo. Con ello se podrían establecer turnos de corta sostenible y analizar la potencialidad del recurso en superficies gestionadas silvícolamente. Temporalmente es un proceso difícil de gestionar pero sí a tener en cuenta en el futuro.
  3. Realizar un estudio económico más complejo para identificar, determinar, y cuantificar la viabilidad económica del proceso, y poder ofrecer así una "excusa" más sólida a la administración para realizar inversiones públicas en la mejora del patrimonio forestal. Esta fase sería la que se podría iniciar inmediatamente y que pasaría por un proceso previo de identificación de indicadores económicos apoyándonos en el proyecto VANE y en las peculiaridades de la zona.
  4. Sería interesante estudiar la evolución de la humedad (procesos de secado y "recarga" de humedad) de la leña almacenada. Este proceso, que podría llevar 2 años de estudio y la necesidad de cantidades importantes de leña, sería importante a la hora de tomar decisiones sobre el diseño de leñeras o procesos a seguir para obtener el grado de "humedad" ideal en la leña para no comprometer su poder calorífico ni generar esfuerzos innecesarios en su almacenamiento.
  5. Llevar a cabo una identificación más clara de los componentes principales de la madera para analizar con mayor rigor las curvas de termodegradación. Este apartado nos gustaría ponerlo en marcha próximamente. Si no se hizo fue por la falta de tiempo y por que los resultados obtenidos en el calorímetro no arrojaban grandes diferencias.
  6. Debido a causas ajenas a la investigación, tanto personales como climatológicas, muchas muestras fueron tratadas más tarde de lo deseado después del muestreo, y de ahí que los valores de humedad los hallamos estandarizado a humedades iguales. De haber salido todo como estaba proyectado se hubieran realizado determinaciones más precisas de humedad con la intención de realizar estudios de inflamabilidad de partes finas del árbol (ramas finas y hojas) y poder así utilizarlos en la base de datos del programa de índices de riesgo que el Grupo de Investigación tiene elaborado.
  7. Esperamos realizar un complemento a esta caracterización energética con la determinación de más propiedades térmicas de las maderas como la

- conductividad térmica, dilatación térmica, inflamabilidad, y combustibilidad, y analizar la propiedad de estudiar ciertas propiedades mecánicas de interés.
8. Mejorar el protocolo de preparación de las muestras para la TG. Nos percatamos de la mejora en los resultados cuanto más fina era la muestra. El problema de este procesado de doble molienda pasa por la captación de la muestra de un 5 % aproximado de humedad ambiental. Estamos analizando como podríamos corregir este defecto. También tratamos de hacer ensayos dinámicos y todas las pruebas fracasaron. Creemos que la pequeña cantidad de muestra utilizada nos impide llevarlo a cabo y por eso se empezó a trabajar en la posibilidad de “crear” una TG de mayor tamaño que nos permitiera trabajar con muestras “tipo” leño. Estamos dándole vueltas al tema pero es un poco complicado a nivel de diseño real. En principio pasaría por poder reconvertir un horno de mufla para instalarle una especie de soporte conectado a una balanza y sobre el cual se colocaría una muestra de un peso aproximado de 1 kg También nos percatamos que la geometría de las muestras afecta a los procesos de termodegradación de una manera importante y por eso el proceso de “pulverización” de las muestras es clave para homogeneizar los resultados.
  9. Nos gustaría tener series más largas de datos ambientales y en la zona de muestreo, tal y como hacemos con los estudios de sostenibilidad y productividad de suelos en los que tenemos una estación metereológica en la zona de trabajo de campo desde hace varios años.
  10. Sería interesante realizar estudios complementarios de DSC (Calorimetría Diferencial de Barrido) que nos permitirían conocer el consumo energético durante la pirolisis de las muestras. Los perfiles de las curvas del DSC suelen ser análogos a los de las curvas DTG pero ofrecen información complementaria.
  11. El siguiente paso del trabajo estaría enfocado en estudiar y caracterizar física, química y biológicamente el suelo de la zona de muestreo y analizar la evolución de sus bioindicadores a lo largo del año y compararlos con otros suelos de la zona y que soporten masas forestales diferentes o estén sometidas a un régimen de explotación diferente. Este trabajo puede llevar unos 3 años pero se presenta como muy interesante y podría arrojar datos claves sobre la sostenibilidad de las formaciones de carballo sometidas a diferentes procesos de explotación.







## Glosario





# Glosario

## A

a.C.: antes de Cristo

AENOR: Asociación Española de certificación y Normalización. Es una entidad privada sin fines lucrativos cuya actividad contribuye a mejorar la calidad y competitividad de las empresas, sus productos y servicios

AFG: Asociación Forestal de Galicia

ARM: régimen Administrativo de Responsabilidad Medioambiental. Régimen administrativo en el que instituye todo un conjunto de potestades administrativas con cuyo ejercicio la Administración pública debe garantizar el cumplimiento de la ley y la aplicación del régimen de responsabilidad que incorpora. Esta Ley tiene por objeto regular la responsabilidad de los operadores de prevenir, evitar y reparar los daños, de conformidad con el artículo 45 de la Constitución y transpone a nuestro ordenamiento jurídico la Directiva 2004/35/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de Abril de 2004, sobre responsabilidad medioambiental en relación con la prevención y la reparación de daños ambientales

ASTM: American Society for Testing and Materials. Organización de normas internacionales que desarrolla y publica, acuerdos voluntarios de normas técnicas para una amplia gama de materiales, productos, sistemas y servicios

## B

bcu: unidades bioclimáticas ( $\text{mes}^{-1}$ ). Parámetro para el seguimiento de la actividad vegetativa de una comunidad vegetal en función de la temperatura, las precipitaciones y de la distribución de ambas a lo largo del año

BOE: Boletín Oficial del Estado

BP: Before Present

## C

C: Carbono

CE: Comunidad Europea

CEN: Comité Europeo de Normalización. Organización no lucrativa privada cuya misión es fomentar la economía europea en el negocio global, el bienestar de ciudadanos europeos y el medio ambiente proporcionando una infraestructura eficiente a las partes interesadas para el desarrollo, el mantenimiento y la distribución de sistemas estándares coherentes y de especificaciones

CEN/EN: Comité Europeo de Normalización (ENGLISH)

CIS Madeira: Centro de Innovación y Servicios Tecnológicos de la Madera que tiene por objetivos identificar oportunidades de negocio y posibles colaboradores, promover la realización de nuevos proyectos de innovación y explorar nuevos escenarios y productos

CO: monóxido de carbono

CO<sub>2</sub>: dióxido de carbono

## D

D: Diámetro en la norma CEN/EN 14961-1:2010  
 D: Disponibilidad hídrica (mm) en los diagramas bioclimáticos  
 DIN: Deutsches Institut für Normung. Es una organización que define estándares técnicos para el aseguramiento de la calidad en productos industriales y científicos en Alemania  
 DSC: Differential Scanning Calorimetry  
 DTG: Derivada curva TermoGravimétrica

## E

e: evapotranspiración residual (mm) en los diagramas bioclimáticos  
 E<sub>a</sub>: Energía de activación  
 E<sub>f</sub>: estado final de la reacción  
 E<sub>o</sub>: estado inicial de la reacción  
 ETFE: Etileno TetraFluoroEtilen. Polímero termoplástico de gran resistencia al calor, a la corrosión y a los rayos UV  
 ETP: EvapoTranspiración Potencial (mm) en los diagramas bioclimáticos  
 €: euro

## F

FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations. Organismo internacional que busca alcanzar la seguridad alimentaria para todos y asegurar que las personas tengan acceso a alimentos de buena calidad que les permitan llevar una vida activa y saludable es la esencia de las actividades de la FAO  
 FWO: Flynn-Wall-Ozawa

## G

GEI: Gas Efecto Invernadero. Su presencia en la atmósfera contribuyen al efecto invernadero, principal responsable de la vida en el planeta. Los principales GEI's son el vapor de agua, el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), el ozono (O<sub>3</sub>) y los clorofluorocarbonos (CFC)

## H

H: Hidrógeno  
 H: Humedad (%) en los diagramas bioclimáticos  
 HC: HidroCarburos  
 HCN: Ácido cianhídrico  
 H<sub>b</sub>: porcentaje de hidrógeno de la muestra bruta  
 H<sub>o</sub>: poder calorífico superior a volumen constante calculado por el calorímetro  
 H<sub>s</sub>: porcentaje de hidrógeno de la muestra seca  
 HS: Horas de Sol mes<sup>-1</sup> en los diagramas bioclimáticos  
 H<sub>u</sub>: poder calorífico inferior a volumen constante calculado por el calorímetro

**I**

I: Insolación (%) en los diagramas bioclimáticos

IBP: Intensidad Bioclimática Potencial en bcu en los diagramas bioclimáticos. Se correspondería a la actividad vegetativa máxima que puede proporcionar el clima

IBL: Intensidad Bioclimática Libre o intensidad climática en un periodo sin limitación hídrica en bcu en los diagramas bioclimáticos

IFN3 (III IFN): Tercer Inventario Forestal Nacional

IFN4 (IV IFN): Cuarto Inventario Forestal Nacional

ISO: International Standardization Organization. Entidad internacional encargada de favorecer normas de fabricación, comercio y comunicación en todo el mundo

**J**

J: Julio. Unidad de energía en el Sistema Internacional

**K**

K: Kelvin. Unidad de temperatura en el Sistema Internacional

K: coeficiente de humedad en el cálculo de poderes caloríficos a volumen constante

**L**

l: litro.

L: Longitud en la norma CEN/EN 14961-1:2010

**M**

M: Molar

METEOGALICIA: unidad de observación y predicción meteorológica de Galicia dependiente de la Consellería de Medio Ambiente, Territorio e Infraestructuras

MFE25: Mapa Forestal de España a escala 1:25.000

ML :pérdida porcentual de masa

**N**

N: Nitrógeno

NBS: National Bureau of Standards. Ahora conocido por The National Institute of Standards and Technology (NIST) o por National Metrological Institute (NMI) es un Instituto Nacional de Normas y Tecnología dependiente de la Administración de Tecnología del Departamento de Comercio de los Estados Unidos perteneciente al National Institute of Standards and Technology

N.D.: No Detectado

NEIKER: Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario. Centro público para investigación agraria dependiente del Gobierno Vasco

NO<sub>x</sub>: óxidos de nitrógeno

**O**

O: Oxígeno

## P

P: Precipitación en mm

p: presión

PANER: Plan de Acción Nacional en materia de Energías Renovables elaborado por el Estado Español para dar cumplimiento a la Directiva 2009/28/CE del Parlamento europeo y del Consejo, de 23 de Abril, relativa al fomento del uso de energía procedente de fuentes renovables

PCI: Poder Calorífico Inferior en  $\text{kJ kg}^{-1}$

(PCI)<sub>b</sub>: Poder Calorífico Inferior bruto en  $\text{kJ kg}^{-1}$

(PCI)<sub>s</sub>: Poder Calorífico Inferior seco en  $\text{kJ kg}^{-1}$

PCS: Poder Calorífico Superior en  $\text{kJ kg}^{-1}$

(PCS)<sub>s</sub>: Poder Calorífico Superior seco en  $\text{kJ kg}^{-1}$

(PCS)<sub>b</sub>: Poder Calorífico Superior bruto en  $\text{kJ kg}^{-1}$

## R

R: residuo en experiencias termogravimétricas

RIAIDT: Red de Infraestructuras de Apoyo a la Investigación y al Desarrollo Tecnológico de la USC

## S

S: azufre

$S(E_a)$ : incertidumbre de la Energía de activación

SO<sub>x</sub>: óxidos de azufre

## T

T: Temperatura

t: tiempo

T<sub>c</sub>: Temperatura de los puntos de Curie

TERBIPROMAT: Grupo de Investigación en TERmodinámica, BioPROcesos y MATeriales de la USC

T<sub>f</sub>: Temperatura de descomposición final

TG: curva TermoGravimétrica

TGA/TG: TermoGravimetría

T<sub>i</sub>: Temperatura de descomposición inicial

T<sub>M</sub>: Temperatura media (°C) en los diagramas bioclimáticos

T<sub>∞</sub>: es la temperatura a la que llegaría el calorímetro en un tiempo infinito si la velocidad de agitación se mantuviese constante

**U**

UE: Unión europea

UNE: Una Norma Española. Conjunto de normas tecnológicas creadas por los comités técnicos de normalización (CTN), de los que forman parte todas las entidades y agentes implicados e interesados en los trabajos del comité. Por regla general estos comités suelen estar formados por la ENAC (Entidad Nacional de Acreditación), fabricantes, consumidores y usuarios, administración, laboratorios y centros de investigación.

USC: Universidade de Santiago de Compostela

UTM: sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator basado en la proyección cartográfica transversa de Mercator, que se construye como la proyección de Mercator normal, pero en vez de hacerla tangente al Ecuador, se la hace tangente a un meridiano. Es un sistema de proyección cartográfica conforme, en el que se respetan las formas de los continentes pero no los tamaños

**V**

V: Volumen

VANE: Valoración de los activos naturales en España. Proyecto llevado a cabo por la Universidad de Alcalá junto con el Ministerio de Medio Ambiente, con el objetivo principal de facilitar la identificación y la valoración económica de las funciones y servicios ambientales en el territorio español

Vm: Valor Medio

**W**

W: humedad de la muestra en %

**OTRAS SEÑAS DE INTERÉS**

$\Delta m$ : pérdida de masa en una experiencia de TGA.

$\Delta m_1$ : pérdida de masa asociada al primer pico registrado en la curva DTG.

$\Delta m_2$ : pérdida de masa asociada al segundo pico registrado en la curva DTG.

$\Delta m_3$ : pérdida de masa asociada al tercer pico registrado en la curva DTG.

$\Delta m_{TOTAL}$ : pérdida de masa total calculada entre 200 y 750 °C en la curva DTG.

**NOMENCLATURA DE LAS MUESTRAS**

1	B	S	S
2			
3	C	S <sub>NO</sub>	U
Clase diametral 1: de (5 a 15) cm 2: de (15 a 25) cm 3: de (25 a 35) cm	Origen B: de semilla C: reproducción asexual	Gsetión S: silvicultura S <sub>NO</sub> : no silvicultura	Situación S: solana U: umbría







## Anexos





# Anexos

Denominación	Pág.
Anexo I. Tabla con valores medios de la analítica elemental de Paulownia y Chopo	173
Anexo II. Interpretación de un termograma/DTG	173
Anexo III. Valores del Poder Calorífico de diferentes tipos de biomasa	175
Anexo IV. Relación de fotografías y su origen	176



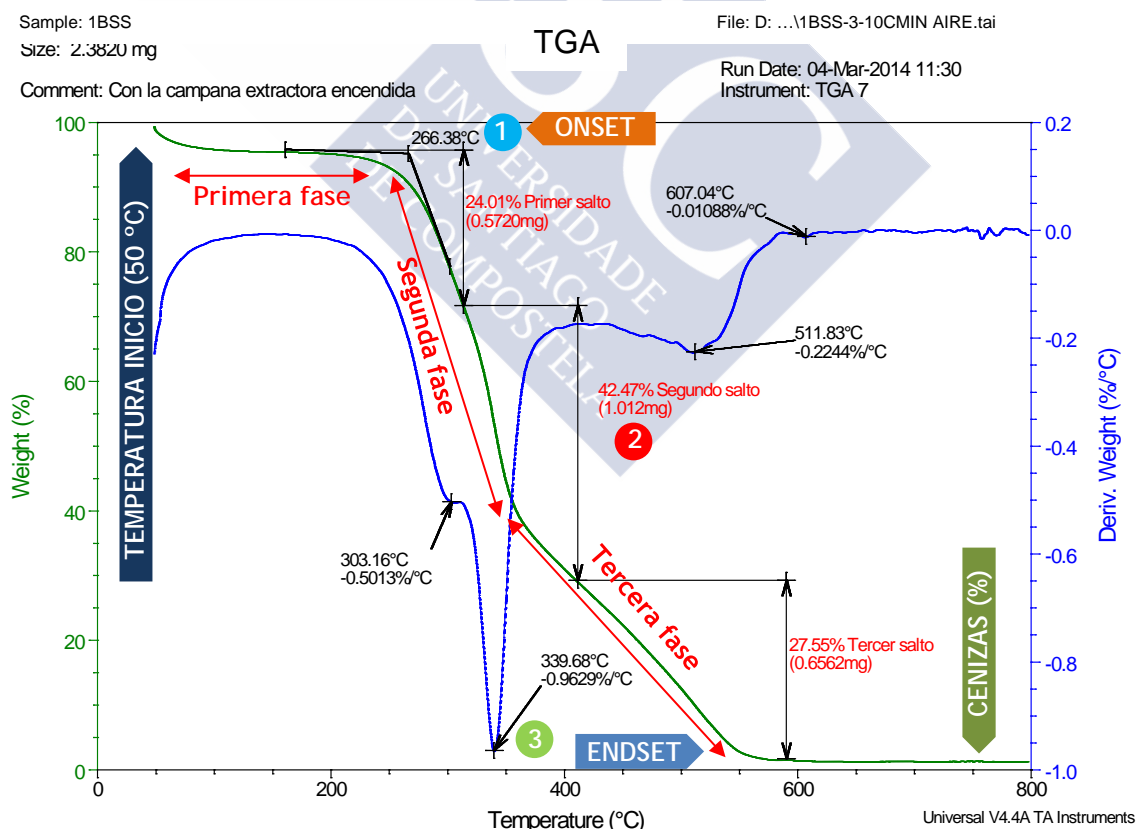


## Anexos

Anexo I. Tabla con valores medios de la analítica elemental de *Paulownia* y Chopo. En la Tabla se puede observar la presencia de S en la composición de ambas especies. En trabajos realizados por nuestro Grupo de Investigación también se detectaron cantidades de S en pino y eucalipto de 0,3 y 0,2 % respectivamente.

Muestra	VALORES MEDIOS				
	N (%)	C (%)	H (%)	O (%)	S (%)
<i>Paulownia</i>	0,16	46,22	6,60	41,85	0,07
Chopo	0,32	47,86	6,50	41,25	0,07

Anexo II. Interpretación de un termograma/DTG. En el termograma que vamos a comentar como "tipo" las condiciones de trabajo fueron las standard a lo largo de la primera parte del estudio, de (50 °C a 800) °C, con una velocidad de calentamiento de 10 °C min<sup>-1</sup>, y con un flujo de aire de 14 ml min<sup>-1</sup> y de nitrógeno de 25 ml min<sup>-1</sup>.



En la Figura anterior se muestran los puntos básicos para el análisis de una curva termogravimétrica típica en color verde (TG) y su derivada en color azul (DTG): en la parte superior la Temperatura del ONSET (1), las pérdidas porcentuales de masa  $\Delta m_1$ ,

$\Delta m_2$ ,  $\Delta m_3$ ,  $\Delta m_4$  (D) y las temperaturas de los picos  $T_{PICO1}$ ,  $T_{PICO2}$ ,  $T_{PICO3}$ ,  $T_{PICO4}$  que se usan de referencia para los cálculos de pérdida de masa (Z). Para mayor facilidad comentamos brevemente el significado de la curvas verde (registra la evolución de la pérdida masa en función del incremento de temperatura) y azul (curva derivada de la original y que nos da la velocidad de termodegradación).

En la **curva TG** el dato del ONSET nos marca el punto en el cual el material empieza a sufrir la termodegradación de forma importante. El ENDSET marca el final de la termodegradación. En color rojo aparecen los datos de pérdida de masa (%) y entre paréntesis su equivalente en masa (mg).

Para comprender el comportamiento de un material durante su termodegradación determinamos la temperatura en el cual el proceso es más "agresivo", es decir, donde se está produciendo la velocidad máxima de termodegradación ( $T_{PICO2}$ ). Este parámetro es importante a la hora de "diseñar" materiales combustibles ya que cuanto más logremos estabilizar esta temperatura y hacer que la pendiente sea menor, el tiempo en el que un material va a estar generando energía en forma de calor va a ser mayor y por lo tanto el consumo de material combustible menor.

En la **curva DTG** destacan principalmente tres "mínimos" y que se corresponden con cambios de inflexión en la curva principal:

- El primer y segundo pico están solapados y corresponden a la descomposición de las hemicelulosas, y celulosas.
- El tercero se corresponde con la pérdida del resto de la lignina.

En las muestras de madera son comunes las siguientes fases:

- Una primera fase desde la temperatura de inicio del experimento (50 °C) hasta el ONSET (E). El dato del ONSET nos marca el punto en el cual el material empieza a sufrir la termodegradación de forma importante. Estamos hablando de una temperatura cercana a los 266 °C. Durante este proceso la pérdida de masa es cercana al 10 % aproximadamente.
- Una segunda fase muy importante desde los 266 °C hasta aproximadamente los 360 °C aproximadamente. En esta fase los productos que se degradan son la hemicelulosa, con un intervalo de degradación entre (200 y 500) °C, la celulosa, con un intervalo de degradación entre (180 y 350) °C, y la lignina que se degrada a partir de los 200 °C. Debemos tener en cuenta que en apenas 90 °C se degrada bastante más de la mitad del material. En esta fase es importante destacar la temperatura en donde la velocidad de termodegradación es máxima. En este proceso determinamos la temperatura a la que la velocidad de termodegradación es máxima. El estudio de estas

pendientes es muy interesante a la hora de diseñar combustibles (reducir la pendiente supondría alargar el proceso de generación de energía en forma de calor, y esto a su vez reduciría en consumo de combustible en calderas).

- La tercera fase se relaciona directamente con la combustión principalmente de la lignina. Esta fase se puede observar mejor en la curva de la derivada.

Anexo III. Valores del Poder Calorífico de diferentes tipos de biomasa. Esta Tabla fue extraída del informe del IER/Biomasa. Manuales de Energías Renovables 5. IDAE (1992) a través de la web <http://idae.electura.es/libros/167/>

TABLA 5. Poderes caloríficos de diferentes tipos de biomasa

Producto	PCS (kcal/kg) Humedad = 0%	PCI a la humedad x (kcal/kg)			
		x	PCI	x	PCI
<i>Leñas y ramas</i>					
Coníferas	4.950	20%	3.590	40%	2.550
Fronosas	4.600	20%	3.331	40%	2.340
<i>Serrines y virutas</i>					
Coníferas	4.880	15%	3.790	35%	2.760
Fronosas autóctonas	4.630	15%	3.580	35%	2.600
Fronosas tropicales	4.870	15%	3.780	35%	2.760
<i>Corteza</i>					
Coníferas	5.030	20%	3.650	40%	2.650
Fronosas	4.670	20%	3.370	40%	2.380
<i>Vid</i>					
Sarmientos	4.560	20%	3.280	40%	2.310
Ramilla de uva	4.440	25%	2.950	50%	1.770
Orujo de uva	4.820	25%	3.240	50%	1.960
<i>Aceite</i>					
Hueso	4.960	15%	3.860	35%	2.810
Orujillo	4.870	15%	3.780	35%	2.760
<i>Cáscaras frutos secos</i>					
Almendra	4.760	10%	3.940	15%	3.690
Avellana	4.500	10%	3.710	15%	3.470
Piñón	4.930	10%	4.060	15%	3.830
Cacahuete	4.250	10%	3.480	15%	3.260
<i>Paja de cereales</i>					
	4.420	10%	3.630	20%	3.160
	4.420	30%	2.700		
<i>Cascarilla de arroz</i>					
	4.130	10%	3.337	15%	3.150
<i>Girasol</i>					
<i>Residuo de campo</i>	4.060	10%	3.310	15%	3.090

## Anexo IV. Relación de imágenes y su origen

Imagen	Origen
Hoja roble azul	<a href="http://bombercan.blogspot.com.es/">http://bombercan.blogspot.com.es/</a>
Hojas roble final	<a href="https://pixabay.com/">https://pixabay.com/</a>
Figura 1	<a href="http://www.galiciaunica.es/">http://www.galiciaunica.es/</a>
Figura 2	<a href="https://dezarutas.files.wordpress.com/">https://dezarutas.files.wordpress.com/</a>
Figura 3 (izquierda)	<a href="http://www.rios-galegos.com/">www.rios-galegos.com/</a>
Figura 3 (derecha)	<a href="https://losprofesdelmaiz.files.wordpress.com/">https://losprofesdelmaiz.files.wordpress.com</a>
Figura 4	<a href="http://www.cabanarealcarreteros.org/">http://www.cabanarealcarreteros.org/</a>
Figura 5	<a href="http://www.maderasaguirre.com/">http://www.maderasaguirre.com/</a>
Figura 6	<a href="http://www.abc.es/">http://www.abc.es/</a>
Figura 7	<a href="http://fotos.santiagoanuncios.es/">http://fotos.santiagoanuncios.es/</a>
Figura 8	<a href="http://www.fragasdomandeo.org/">http://www.fragasdomandeo.org/</a>
Figura 9 (izquierda)	<a href="https://ventalena.files.wordpress.com/">https://ventalena.files.wordpress.com/</a>
Figura 9 (centro)	<a href="http://www.espores.org/">http://www.espores.org/</a>
Figura 9 (derecha)	<a href="http://images.eldiario.es/">http://images.eldiario.es/</a>
Tabla 5	<a href="http://www.infobio.ru/">http://www.infobio.ru/</a>
Figura 14 (izquierda)	<a href="http://2.bp.blogspot.com/">http://2.bp.blogspot.com/</a>
Figura 14 (centro)	<a href="https://reciclajeverde.files.wordpress.com/">https://reciclajeverde.files.wordpress.com/</a>
Figura 14 (derecha)	<a href="http://3.bp.blogspot.com/">http://3.bp.blogspot.com/</a>
Figura 15	<a href="http://www.roblemoreno.es/">http://www.roblemoreno.es/</a>
Figura 18	<a href="http://www2.meteogalicia.es/">http://www2.meteogalicia.es/</a>
Figura 20	<a href="http://es.mt.com/">http://es.mt.com/</a>
Figura 21 (derecha)	<a href="http://akostalab.ru/">http://akostalab.ru/</a>
Figura 21 (derecha)	<a href="http://www.ictsl.net/">http://www.ictsl.net/</a>
Figura 23	<a href="http://www.ika.com/">http://www.ika.com/</a>
Figura 50	<a href="http://www.barricafrancesa.es/descargas/faq_3.pdf">http://www.barricafrancesa.es/descargas/faq_3.pdf</a>

# Índice de Figuras





# Índice de Figuras

Figura, nº	Denominación	Pág.
Figura 1.	Kaer quez era como los celtas llamaban al carballo. Aunque para los celtas el árbol sagrado era la encina, consideraban al carballo, o "árbol bello", como un altar verde en el que los Dioses se manifestaban a aquellos que poseían "la sabiduría del roble" o Druidas	4
Figura 2.	Fraga de Quiroga (Lalín), también llamada carballeira de Quiroga, es un buen ejemplo de bosque caducifolio mixto conformado por castaños y robles principalmente	5
Figura 3.	A la izquierda de la foto se puede ver un ejemplar adulto de carballo. En la parte derecha se pueden observar en detalle sus hojas y frutos	7
Figura 4.	Recreación de la estructura de madera de un galeón	9
Figura 5.	Traviesas de tren realizadas a partir de madera de carballo	11
Figura 6.	Uno de los múltiples incendios que azotan Galicia todos los años	12
Figura 7.	Leña de carballo apilada. Si se observa en detalle se pueden observar el duramen, la albura, cambium y la corteza en los leños	14
Figura 8.	La biodiversidad en Galicia depende de manera muy importante de unas masas forestales sanas	19
Figura 9.	Diferentes presentaciones de la biomasa forestal. De izquierd a derecha: leña, astilla, pellets y briquetas	22
Figura 10.	Producción de leña por Comunidades Autónomas	27
Figura 11.	Dedicación de las empresas en el sector forestal	28
Figura 12.	Volúmenes de producción	28
Figura 13.	Tipos de leña	29
Figura 14.	Nuevas propuestas forestales en Galicia	44
Figura 15.	El carballo está considerado últimamente como un bioindicador de referencia en estudios de impacto del cambio climático sobre la biodiversidad. Desde 2011 el Instituto Vasco de Investigación y Desarrollo Agrario (NEIKER-TECNALIA) estudia la progresiva mediterraneización de los bosques del País Vasco como consecuencia de la modificación variables bioclimáticas claves como la humedad y la temperatura y que podría generar la desaparición del hábitat de esta especie en el 2080	46
Figura 16.	Localización de la zona de estudio con su posición en coordenadas UTM 29T (638853, 4710960). Al final de la serie de fotografías se muestra un detalle de la zona de muestreo	57
Figura 17.	Diagrama bioclimático de la zona de muestreo. Se analizan conjuntamente la temperatura (T), la disponibilidad hídrica (D), evapotranspiración potencial (ETP), evapotranspiración potencial residual (e), la intensidad bioclimática potencial (IBP)	60

- El 7.5°C representa la temperatura mínima para que los vegetales tengan actividad vegetativa, las BCU son unidades bioclimáticas  $\text{mes}^{-1}$ . El área coloreada de verde representa la potencialidad productiva y la coloreada en azul el parón vegetativo causado por las bajas temperaturas en invierno. Durante los meses de Julio y Agosto la dependencia de las lluvias es clave en el proceso productivo de los vegetales de la zona
- Figura 18. Vista general de la estación meteorológica de Conchada (Quiroga, Lugo) situada a escasos 7 km de la zona de muestreo y con unas condiciones similares a la zona de muestreo 61
- Figura 19. Durante el trabajo de campo los materiales básicos utilizados son palas, paletas, picos, hachas, tijeras de poda, motosierra, desbrozadora, rastrillos, dinamómetro, material de seguridad, etc. 63
- Figura 20. Detalle de la balanza científica Mettler XS104 con el kit para la determinación de densidades 64
- Figura 21. A la izquierda molino Retsch SM-1 y a la derecha molino IKA A 11. El proceso de doble molienda es imprescindible para preparar las muestras para la parte analítica 65
- Figura 22. Vista general del horno de mufla SELECTA SELECT HORN 67
- Figura 23. Vista general del sistema calorimétrico IKA C5000 control. En la imagen se pueden ver claramente diferenciados los 3 elementos básicos: controlador (izquierda y de color azul), célula de medición (centro de color blanco y con la bomba calorimétrica colocada en su soporte) y sistema de refrigeración C5001 (derecha y de color azul) 71
- Figura 24. Detalle de la consola de mando en donde se pueden observar los principales parámetros de control en la pantalla antes del experimento: el método de trabajo, el número de experimento asignado por el equipo, la fecha y hora, peso de la muestra, peso y energía sustancias auxiliares, denominación de la muestra por parte del operador, usuario, elección de calibrado, menú de escritura, OK, parada, panel control general con numeración, flechas control, y otros botones de control múltiple para el menú de ayuda 72
- Figura 25. Detalle de la bomba calorimétrica. En la fotografía se pueden observar las partes principales: lo que denominamos cuerpo (superior izquierda), la cabeza (inferior en el centro) con el soporte del crisol, el filamento de platino y la chapa protectora, y la rosca exterior (superior derecha) encargada de unir cabeza y cuerpo durante las experiencias calorimétricas. El material del que está hecha la bomba es acero inoxidable Carpenter 20cb-3, aleación resistente a mezclas ácidas como las de ácido nítrico y sulfúrico predominantes en la combustión de las muestras utilizadas en este estudio. Sobre fondo negro podemos ver el crisol de cuarzo 73
- Figura 26. Detalle de la colocación del hilo de algodón en la cabeza de la 77

	bomba. Este hilo, atado al filamento de platino, facilita la combustión de la muestra funcionando como una mecha. En la Figura se puede observar la placa de protección que tienen los electrodos de la cabeza	
Figura 27.	En la consola del controlador, una vez finalizada la experiencia, puede observarse dato obtenido del poder calorífico. Además, y de forma sencilla, se recoge la gráfica temperatura-tiempo	78
Figura 28.	En la figura se recoge de manera esquemática los diferentes elementos responsables en la cuantificación del calor de combustión obtenido en cada experiencia calorimétrica. El valor final del poder calorífico de la muestra de combustible se obtiene mediante una corrección automática que realiza el equipo previa introducción del protocolo de trabajo por parte del operador	80
Figura 29.	En la consola del controlador, una vez finalizada la experiencia, puede observarse la identificación de la bomba calorimétrica (1), la denominación automática de la muestra (2), la masa de la muestra (3) y el valor obtenido del poder calorífico (4). Además, y de forma sencilla, se recoge la gráfica temperatura-tiempo en donde se pueden observar los tres periodos (inicial, principal y final), y la $\Delta T_{corr}$ , valor que el calorímetro usa como referencia para el cálculo del poder calorífico	81
Figura 30.	Foto TG. Se puede observar en detalles la TG con el ordenador, el horno, y la cápsula de aluminio abierta en donde se introduce la muestra	84
Figura 31.	Foto TG. Se puede observar en detalle la TG con el horno abierto (izquierda), y la cápsula de aluminio abierta en donde se introduce la muestra (centro), y la TG con el horno ya cerrado (derecha)	86
Figura 32.	Curva típica de un proceso de termodegradación con un único escalón de descomposición	87
Figura 33.	Principales tipos de curvas termogravimétricas	89
Figura 34.	Puntos básicos para el análisis de una curva termogravimétrica típica (TG) y su derivada (DTG) para una muestra de biomasa 1BSS del muestreo de Marzo-Abril	90
Figura 35.	Evolución del PCI del muestreo de Marzo-Abril a las 3 humedades básicas y comparación con el PCS	115
Figura 36.	Evolución del PCI del muestreo de Junio-Julio a las 3 humedades básicas y comparación con el PCS	115
Figura 37.	Valores de la temperatura ONSET para los diferentes tipos de muestras estudiadas	117
Figura 38.	Curvas TG para muestras de diferente edad de Marzo-Abril	118
Figura 39.	Curvas DTG para muestras de diferente edad de Marzo-Abril	119
Figura 40.	Curvas TG y DTG para muestras 1BSS de Marzo-Abril y Junio-Julio respectivamente	120
Figura 41.	Curvas TG y DTG para muestras 3BSS de Marzo-Abril y Junio-Julio respectivamente	120

Figura 42.	Curvas TG (a) y DTG (b) obtenidas para la muestra 1BS <sub>NO</sub> U a diferentes velocidades de calentamiento	122
Figura 43.	Curvas de conversión en función de la temperatura obtenidas para la muestra 1BS <sub>NO</sub> U a diferentes velocidades de calentamiento	122
Figura 44.	Ajustes de los datos para la determinación de las energías de activación por el método de Kissinger para (a) el primer pico, (b) el segundo pico y (c) el tercer pico	123
Figura 45.	Ajustes de los datos para la determinación de las energías de activación por el método de Flynn-Wall-Ozawa	124
Figura 46.	Ajustes de los datos para la determinación de las energías de activación por el método de Friedman	125
Figura 47.	Curvas de conversión y DTG para las velocidades de calentamiento de 20 °C min <sup>-1</sup> (a) y 50 °C min <sup>-1</sup> (b)	127
Figura 48.	TG <i>Paulownia</i> (verde), carballo (azul) y Chopo (rojo)	129
Figura 49.	DTG <i>Paulownia</i> (verde), carballo (azul) y Chopo (rojo)	129
Figura 50.	Fotografía que muestra en detalle madera de verano y primavera en los anillos de crecimiento del roble	136

# Índice de Tablas





# Índice de tablas

Figura, nº	Denominación	Pág.
Tabla 1.	Bienes y servicios prestados por las formaciones de <i>Quercus robur</i> L. presentes en Galicia	15
Tabla 2.	Superficie total productiva (ha) e índices de ocupación (%)	16
Tabla 3.	Valores de producción (€) de las masas de <i>Quercus</i>	17
Tabla 4.	Valores de producción totales (€) de las masas de <i>Quercus</i>	18
Tabla 5.	Especificación de las propiedades de las trozas	32
Tabla 6.	Características generales de las leñas. CENER Centro Nacional de Energías Renovables	33
Tabla 7.	Principales parámetros climáticos de la zona de muestreo. Resultados medios de los años 2011, 2012 y 2014	59
Tabla 8.	Poder Calorífico Superior (PCS) de las muestras estudiadas	108
Tabla 9.	Poder Calorífico Inferior (PCI) de las muestras estudiadas	110
Tabla 10.	Comparación del Poder Calorífico Inferior (PCI) de las muestras estudiadas en el muestreo de Marzo-Abril al 20 %, al 15 % y al 10 % de humedad con el PCS	113
Tabla 11.	Comparación del Poder Calorífico Inferior (PCI) de las muestras estudiadas en el muestreo de Junio-Julio al 20 %, al 15 % y al 10 % de humedad con el PCS	114
Tabla 12.	Parámetros básicos en el estudio y análisis de los termogramas	116
Tabla 13.	Energías de activación obtenidas por el método de Kissinger	123
Tabla 14.	Valores de las energías de activación obtenidas por el método de Friedman y por el método de Flynn-Wall-Ozawa en función de la conversión y valores medios (VM)	125
Tabla 15.	Valores de carbono fijo, cenizas y volátiles	128
Tabla 16.	Datos de la composición elemental	130
Tabla 17.	Datos de estructura de las diferentes muestras de Marzo-Abril	131
Tabla 18.	Datos de estructura de las diferentes muestras de Junio-Julio	132
Tabla 19.	Densidades de las muestras. En la Tabla se recogen las densidades del duramen, albura, corteza y media. La densidad media, y que es la que se debe utilizar como referencia para el estudio, se obtiene utilizando como referencia los datos estructurales de la Tabla 16	133
Tabla 20.	Valores de humedad de las muestras en el momento de la recogida	134

