ESCUELA POLITÉCNICA DE MIERES

INGENIERÍA TÉCNICA FORESTAL Y DEL MEDIO NATURAL

DEPARTAMENTO DE ENERGÍA

ÁREA DE MÁQUINAS Y MOTORES TÉRMICOS

TRABAJO FIN DE GRADO

Propuesta para la valorización de la castaña (*Castanea sativa* Mill.) como aprovechamiento energético en Asturias

AUTOR: SERGIO SÁNCHEZ PASCUAL

DIRECTOR: JUAN CARLOS RÍOS FERNÁNDEZ

JULIO, 2022

DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD DEL TRABAJO FIN DE GRADO

(de acuerdo con lo establecido en el artículo 8.3 del Acuerdo de 5 de marzo de 2020, del Consejo de Gobierno de la Universidad de Oviedo, por el que se aprueba el Reglamento sobre la asignatura Trabajo Fin de Grado de la Universidad de Oviedo)

D./D.ª Sergio Sánchez Pascual, con

DECLARO QUE:

El Trabajo Fin de Grado titulado:"Propuesta para la valorización de la castaña (*Castanea sativa* Mill.) como aprovechamiento energético en Asturias", que presento para su exposición y defensa, es original y he citado debidamente todas las fuentes de información utilizadas, tanto en el cuerpo del texto como en la bibliografía.

En Mieres, a 12 de julio de 2022

Firmado: Sergio Sánchez Pascual

Índice

Resumen. 1

I. Hipótesis de partida y alcance. 2

II. Objetivos y relación con el estado actual. 5

III. Marco teórico. 7

1. El fruto (Castaña). 7

1.1 Situación de la especie. 7

1.2 Ecología del fruto. 9

1.3 Manejo del fruto. 10

1.4 Usos principales del fruto y de sus derivados. 12

2. Indicadores económicos de la castaña en España y el Principado de Asturias. 13

3. Cadena de valor de la castaña en Asturias. 15

3.1 La actividad comercial de la castaña. 15

4. Residuos de la castaña. 17

5. Potencial energético de la biomasa. 18

5.1 La biomasa. 18

5.2 Clasificación de los tipos de biomasa. 18

5.3 Transformación de Biomasa en energía. 19

6. Propiedades energéticas de la biomasa. 20

6.1 Composición química. 20

6.2 Contenido en humedad. 22

6.3 Densidad aparente. 23

6.4 Poder calorífico. 23

7. Estimación de producción de la Biomasa. 24

IV. Metodología. 27

1. Revisión sobre los métodos de aprovechamiento. 27

1.1. Proceso de producción de castañas y residuos. 28

1.2. Extracción de energía. 29

1.3. Métodos termoquímicos..... 30
1.3.1. Pirólisis. 30
1.3.2. Torrefacción..... 32
1.4. Métodos bioquímicos. 32
1.4.1. Bioetanol. 33
1.4.2. Biometanol o biogás. 34
2. Guía práctica para el estudio del potencial energético de la castaña. 35
2.1. Materiales. 35
2.1.1. Fuentes y documentación. 36
2.1.2. Muestras. 36
2.1.3. Procesamiento de la información. 36
2.2. Metodología. 37
2.2.1. Caracterización de la cadena de valor de la castaña. 37
2.2.2. Muestreo. 40
2.2.3. Procesado de las muestras para laboratorio 40
2.2.4. Estimación de la energía producida. 42
2.2.5. Influencia de las características de la biomasa sobre su uso energético. 42
V. Resultados..... 44
1. Proceso termoquímico 44
2. Proceso bioquímico. 45
3. Comparativa entre los poderes caloríficos obtenidos. 47
VI. Conclusiones y líneas futuras de trabajo 48
VII. Recomendaciones. 51
Bibliografía..... 52

Índice de tablas

Tabla 1. Condiciones ambientales del cultivo del castaño (*Castanea sativa*) 8
Tabla 2. Serie histórica de la producción de castaña y valor económico asociado..... 13
Tabla 3. Residuos categorizados por etapas las etapas que constituyen su cadena de producción. 17
Tabla 4. Análisis de las ventaja e inconvenientes de los métodos propuestos.. 26
Tabla 5. Descripción de los métodos de aprovechamiento. [a]: En los procesos de reducción se llevan a cabo pérdidas de materia polisacárido producidos por su descomposición. 29
Tabla 6. Tipificación del residuo producido según etapas de cadena de valor. 37
Tabla 7. Influencia de los compuestos fisico-químicos de la materia prima sobre el procesado energético. 43
Tabla 8. Tabla de resultados obtenidos tras ciertos ensayos realizados dentro de las investigaciones revisadas. 47
Tabla 9. Relación de concentraciones de S y cenizas entre carbón de primer nivel y biocarbón. 47

Índice de figuras

Figura 1. Distribución de la especie Castanea sativa en el Principado de Asturias. 7
Figura 2. Castanea sativa. 9
Figura 3. Distribución de Castanea sativa y Regiones de Procedencia de sus materiales de reproducción. 11
Figura 4. Aproximación esquemática de la cadena de valor de la castaña. A partir de diversas informaciones, tanto oficiales como de comunicaciones personales. 16
Figura 5. Esquema de los tipos de biomasa existentes. Fuente: Elaboración propia a partir de varios autores. 19
Figura 6. Esquema de los tipos de biomasa existentes. Fuente: Elaboración propia a partir de varios autores. 19

Resumen.

El Principado de Asturias cuenta con unas 113 908,35 ha de superficie cubierta por castaño (*Castanea sativa* Mill.) lo que supone el 25% de su área forestal. Una especie que, pese a su gran valor cultural y paisajístico, ha pasado a protagonizar una situación de abandono notable, lo que ha provocado que se planteen nuevos métodos de aprovechamiento con el fin de recuperar un árbol tan emblemático para la sociedad rural. Este trabajo trata de presentar la castaña, uno de sus productos más valorados, como una fuente potencialmente aprovechable desde un punto de vista energético. Varios autores han concluido resultados esperanzadores de cara a su uso como biocarbón tras usar tratamientos de pirólisis y torrefactado, llegando a arrojar valores energéticos en torno a los 35MJ/kg con rendimientos del 44,31%, datos que superan al carbón limpio de primer nivel (30 MJ/kg). Por estos argumentos, se plantea realizar un estudio pormenorizado de los componentes fisicoquímicos de la castaña asturiana con el fin de evaluar la materia prima de la región y proponer procesos de aprovechamiento que ayuden a subsanar la demanda energética además de presentarse como una oportunidad para revitalizar la economía rural del entorno.

Abstract.

The Principality of Asturias has about 113 908.35 ha of surface covered by chestnut (Castanea sativa Mill.), which represents 25% of its forest area. These species are markedly neglected despite their major cultural and landscape value, resulting in a situation of considerable abandonment. On the positive side, it has promoted the appearance of emerging methods to exploit and recover a tree that is so emblematic of rural society. This dissertation tries to present the sweet chestnut, one of its most valued products, as a potentially energetic source. Several authors have published encouraging results for its use as biochar after using pyrolysis and roasting treatments. They have shown energy values around 35MJ/ kg with yields of 44.31%, which exceeds the first level of clean coal (30 MJ/kg). For these reasons, it seems reasonable to carry out a detailed study of the physicochemical components of the Asturian chestnut in order to evaluate the raw material of the region. Also, to propose exploitation processes that help to correct the energy demand in addition to presenting itself as an opportunity to revitalise the rural economy.

Palabras clave: castaña, energía, poder calorífico, biomasa, multifunción del monte.

I. Hipótesis de partida y alcance.

La gran diversidad florística del Principado de Asturias, causada en gran parte por presentar un gran rango de pisos y situaciones topográficas, se hace notable en todo su paisaje. Esta comunidad autónoma presenta un abanico de territorios que van desde bosques de diverso tipo situados en valles o zonas de alta montaña hasta dunas y arenales de costa. No obstante, a pesar de poseer una variedad de flora tan palpable, existe una especie con gran peso dentro de la sociedad asturiana.

El castaño (*Castanea sativa*, Mill.), cuyo nombre genérico proviene del latín -castănĕa, -ae- (Virgilio, trad. 1615), el cual, procede del griego χάστανον (kastanón) = castaña, y "*sativa*", nombre específico y epíteto latino que significa comestible, "cultivado", es una especie que lleva consigo más de 40 millones de años de historia sobre principado asturiano, lo que le convierte en el gran protagonista dentro del entorno natural de la región conformando una parte esencial del panorama y de la cultura.

El bosque de castaño ha producido una gran cantidad de servicios y bienes destinados a subsanar las necesidades de los pueblos desde entonces. Ha servido como combustible (leñas), material de construcción y artesanía (vigas, bastones), como recurso comestible (castaña), así como de nicho ecológico para el desarrollo de fructificaciones micológicas o como refugio y alimento para ciertas especies animales y florales de gran interés natural para la sociedad. Son destinos que hoy día siguen persistiendo en varias localidades y núcleos rurales, sin embargo, estos están en notable desuso. Su contexto actual ha llegado a originar escenarios de abandono en gran parte de las zonas naturales del entorno asturiano.

La situación actual de este recurso se debe en gran medida a; cambios en las dinámicas comerciales de los consumidores del mercado de la madera, el interés de los productores por obtener mayores rentas (lo que provoca que se decanten por especies de rápido crecimiento), la necesidad de explotar otro tipo de recursos naturales o la paulatina despoblación de unos pueblos que, en su día, cuidaron y cultivaron esas hectáreas de bosque de las que hoy día se puede disfrutar.

Este trabajo quiere destacar la posibilidad que tiene el castaño de resurgir dentro del sector económico rural de la región. De este modo, se pretende recuperar una especie forestal emblemática y autóctona, rescatando esas hectáreas de bosques que dejaron de interesar a la industria privada y pública. Para ello se expone dentro de un contexto de actualidad teniendo en cuenta el permanente auge del sector de la energía, haciendo

hincapié en temas como la transición ecológica, la sostenibilidad o la dependencia energética.

La urgencia por implantar un modelo energético basado en las energías renovables que sustituya a los actuales combustibles fósiles pone en valor aquellas propuestas que remen a favor de esta necesidad. Es aquí donde el potencial forestal del Principado de Asturias puede contribuir de modo directo. Aunque generalmente las actividades vinculadas al sector de la biomasa son menos conocidas que otras tecnologías renovables, este recurso puede contribuir sustancialmente a los objetivos que las políticas, tanto nacionales como internacionales, se han comprometido a cumplir siendo estas compatibles con un desarrollo socioeconómico sostenible y rentable.

España resulta ser una de las potencias europeas en cuanto a recursos de biomasa forestal se refiere (solo por detrás de Suecia y Finlandia) y posee el mayor ritmo de crecimiento anual en incremento de bosques (2,2% frente a la media europea 0,51%). No obstante, la utilización de este recurso está muy por debajo de su potencial, lo que supone una cierta acumulación de residuos, así como situaciones de abandono o quemas incontroladas. Concretamente, el Principado de Asturias posee la mayor superficie forestal de castaño del país, como especie principal o secundaria, estando presente en todos los concejos. Es por ello, que la especie debe ser considerada como a posible fuente productora de biomasa, pues es capaz de producir unas cantidades anuales de fruto susceptibles de ser aprovechadas con fines energéticos.

Actualmente se ha llegado a declarar en medios de comunicación autonómicos que la propia región ha alcanzado cifras de producción próximas a las 140 toneladas, unos números que en relación con la extensión de bosques de castaño en el principado (80 560,05 ha) concluye una tasa productiva muy por debajo de su potencial. Sin ir más lejos, comunidades limítrofes como Galicia (la comunidad española más productiva del sector castañero), con unas superficies de castañares que giran en torno a las 46 455,40 ha, es capaz de aportar 10 375 toneladas de castañas según el último Anuario de Estadística Forestal de España publicado en 2019. Esto concluye la capacidad de producción disponible en el Principado de Asturias abra una posibilidad de aprovechamiento única que cuenta con unas cuantías de recurso presumiblemente abrumadoras.

Alcance.

Este pretexto establece las bases sobre los cuales fundamentar el presente trabajo, si bien ya es llamativa la situación actual del castaño, contextualizarla en un marco energético la hace especialmente interesante de cara a la industria y la sostenibilidad medioambiental.

Este trabajo tiene como fin inmediato profundizar en la búsqueda de soluciones a la situación energética actual, la cual, está basada en una evidente dependencia de los combustibles fósiles. Por dicho argumento, teniendo en cuenta el gran potencial de la biomasa en el sector energético y, más aun, dentro de la región asturiana, se analiza la proyección de la castaña hacia tal fin.

Se comentan los posibles métodos de aprovechamiento energético que tiene el recurso. Para ello, se lleva a cabo una revisión actualizada de investigaciones previas. Con ello, es posible establecer un marco teórico-práctico con el cual proyectar las conclusiones iniciales.

Tras valorar la conclusión de estas investigaciones, se presenta una propuesta de estudio que sirva como guía práctica para la realización de unos ensayos propios que aporten datos reales sobre un territorio determinado a estudiar (dentro del Principado de Asturias).

Con estos conocimientos y tras este planteamiento, se concluirá la viabilidad de un futuro proyecto apoyado en estas bases.

II. Objetivos y relación con el estado actual.

Los bosques de castaño o castañares ocupan el 25% del área arbolada del principado, una superficie que además se encuentra repartida por toda la zona centro de la región. Casi la totalidad de estas masas representan monte bajo, las cuales, están formadas por cepas de las que brotaron varios pies de dimensiones pequeñas y que posteriormente no fueron seleccionados. Durante décadas, esta madera de pequeñas dimensiones fue utilizada como recurso para apeas de mina.

Actualmente, el SADEI (2017) cuantifica en torno al 2% el peso de las cortas de castaño sobre el total de la región, lo cual, ha provocado que la calidad de sus frutos sea a su vez deficiente. Sin embargo, el gran potencial productivo de estos bosques es muy amplio, ya que presenta superficies mayores que las de su comunidad más próxima por el oeste (Galicia) muestra unas rentas de entre 30~40 millones de euros anuales en el mercado nacional e internacional.

Por todo ello, los tratamientos de esta especie deben de ir enfocados a una selvicultura que mejoren sus productos principales, tanto en madera como frutos, y se debe poner en práctica procesos de regeneración basados en resalveo que lleven a estos bosques a convertirse en formaciones de monte alto. No obstante, estas prácticas de conversión pueden llevar varios años e incluso décadas en llegar a sus objetivos. Por ello, es interesante implantar métodos de aprovechamiento durante este tiempo para darle salida a esos frutos de peor calidad que puedan quedar sobre el monte y no son aprovechados.

Estos aprovechamientos se verían enfocados a escalas de producción reducidas, siendo las zonas involucradas: parroquias, pueblos o comunidades pequeñas. Al menos a croto plazo. Con su aplicación en el tiempo los productos obtenidos irán incrementando su valor en calidad y obtendrían un valor añadido que podría expandir sus destinos comerciales.

Las metas que se quiere alcanzar en este estudio pasan por presentar una solución que permita subsanar las necesidades que las políticas nacionales se han propuesto conseguir como resultado de los acuerdos alcanzados en la Agenda para el Desarrollo Sostenible 2030 (ODS) implementados por Organización de las Naciones Unidas (ONU). Estos acuerdos pretenden sustituir para antes de 2030 la economía lineal que caracteriza el empleo de recursos finitos, lo que supone el agotamiento de los mismos y una fluctuación permanente de precios, por una economía circular basado en la

utilización de recursos biodegradables y sostenibles capaces de volver a la naturaleza de modo directo o indirecto sin provocar desajustes medioambientales al agotar su vida útil. Por otro lado, de adaptarse a la Directiva de Energías Renovables (RED) II, la cual establece que los recursos renovables deben utilizarse como materia prima. Además, se procura devolver al paisaje asturiano un pedazo de su cultura natural.

Para llegar a unas pretensiones mayores, se plantean estos objetivos:

- Recuperar y poner en valor la producción de una especie autóctona y culturalmente interesante.
- Exportar al sector energético un recurso potencialmente útil.
- Aumentar las opciones de energía renovable en el conjunto de fuentes energéticas sostenibles.
- Explotar el carácter multifuncional del monte.
- Potenciar la economía rural.

III. Marco teórico.

1. El fruto (Castaña).

1.1 Situación de la especie.

Cultivados desde hace miles de años, esta especie se ha ido extendiendo por medio de plantaciones o cultivares cuya vocación ahondaba en su fruto y en la calidad de su madera. Son estas plantaciones las que con el paso del tiempo se han ido naturalizando y asilvestrando.

El origen del castaño en el Principado de Asturias sigue siendo objeto de debate entre las administraciones públicas. Pese a ello, una de las últimas revisiones respecto a su naturaleza afirma que se trata de una especie autóctona (José V. Roces-Díaza, 2018).

En cuanto a su distribución, el castaño (como especie principal) ocupa una superficie de 113 908,35 ha (MITECO, 2022).

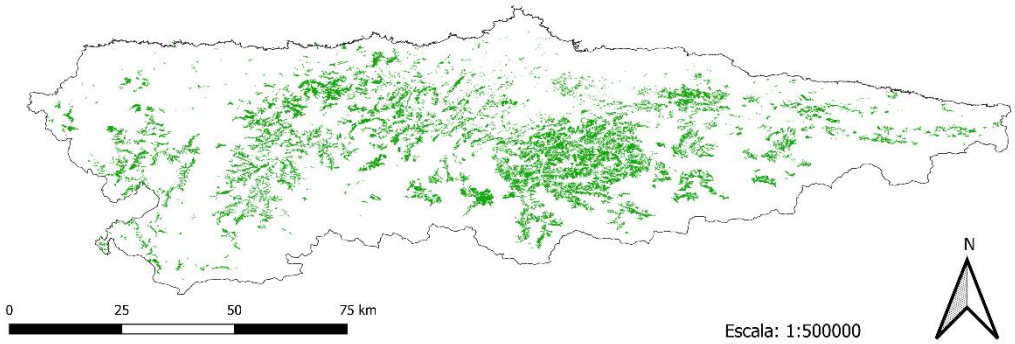

Figura 1. Distribución de la especie *Castanea sativa* en el Principado de Asturias.

Esta especie está representada por todo el territorio autonómico, haciendo especial aparición en la zona central de Asturias (Figura 1).

El castaño se desenvuelve dentro de un amplio rango de altitudes que pueden llegar desde el nivel del mar hasta unos 1 500 m, adaptándose mejor a orientaciones norte, caracterizadas por presentar una exposición sombría (la especie posee un temperamento de media sombra). En función del destino de sus productos, la altitud de su cultivo se establece según unos parámetros más adecuados (Tabla 3). Así mismo, requiere de unas precipitaciones superiores a los 600 mm y un rango de temperaturas suaves (entre 8ºC~15ºC como Temperatura Media Anual).

Régimen de precipitaciones	
Precipitación media anual	*>600 mm*
Precipitación estival	*100~150 mm*
Duración de sequía	*0~3,5 meses*
Mesófila, soporta algo la sequía	
Régimen de temperaturas	
Tª media anual	*8ºC~15ºC*
Tª media en el mes más cálido	*14ºC~22ºC*
Tª media en el mes más frío	*-1ºC~5ºC*
Mesoterma, sensible a heladas tardías	
Régimen de altitudes en función de su aprovechamiento	
Aprovechamiento de madera	500~1200 m
Aprovechamiento de fruto	200~600 m

Tabla 1. Condiciones ambientales del cultivo del castaño (*Castanea sativa*) (Cuenca Valera & Majada Guijo, 2014)

El Castaño Europeo, cuyo nombre científico es *Castanea sativa* Mill. (1768), es una especie frondosa que pertenece propiamente al género *Castanea*. familia *Fagaceae*, orden Fagales.

Se trata de un árbol caducifolio de hasta 30 m de altura, tronco muy grueso (5m de diámetro en algunos casos) que presenta hueco en la vejez. Cuenta con una corteza lisa, de color pardusca, hasta los 15~20 años, pasando a ser castaño-oscura y agrietada de modo longitudinal. Posee unas hojas simples y alternas, con formas oblongo-lanceoladas, agudas, aserradas y de color verde, con dimensiones que oscilan entre 10~25 x 5~8 cm.

Esta, es una especie monoica. Sus amentos masculinos tienen un tamaño de 13~30 cm de longitud y 7~7 mm de diámetro, de color verde en su juventud y, posteriormente, amarillos. Muestran un perianto trímero doble, con 8~12 estambres situados alrededor de un ovario estéril. Las flores femeninas manifiestan 7~9 estilos en su ápice, el cual, se encuentra recubierto de pelosidades. Las cúpulas que cubren su fruto pueden llegar

a tener unos diámetros de 10 cm. Estas son verdes durante su fructificación y pasan a tomar un color acastañado al término de su madurez. Además, poseen espinas largas y fasciculadas. Los aquenios que se encuentran en su interior tienen un tamaño aproximado de 2,5~5 cm, algo atenuados y agudos en el ápice, castaños y brillantes. Poseen un pericarpio, aunque puede ostentar dehiscencia (Castroviejo, 2022) (Ilustración 1).

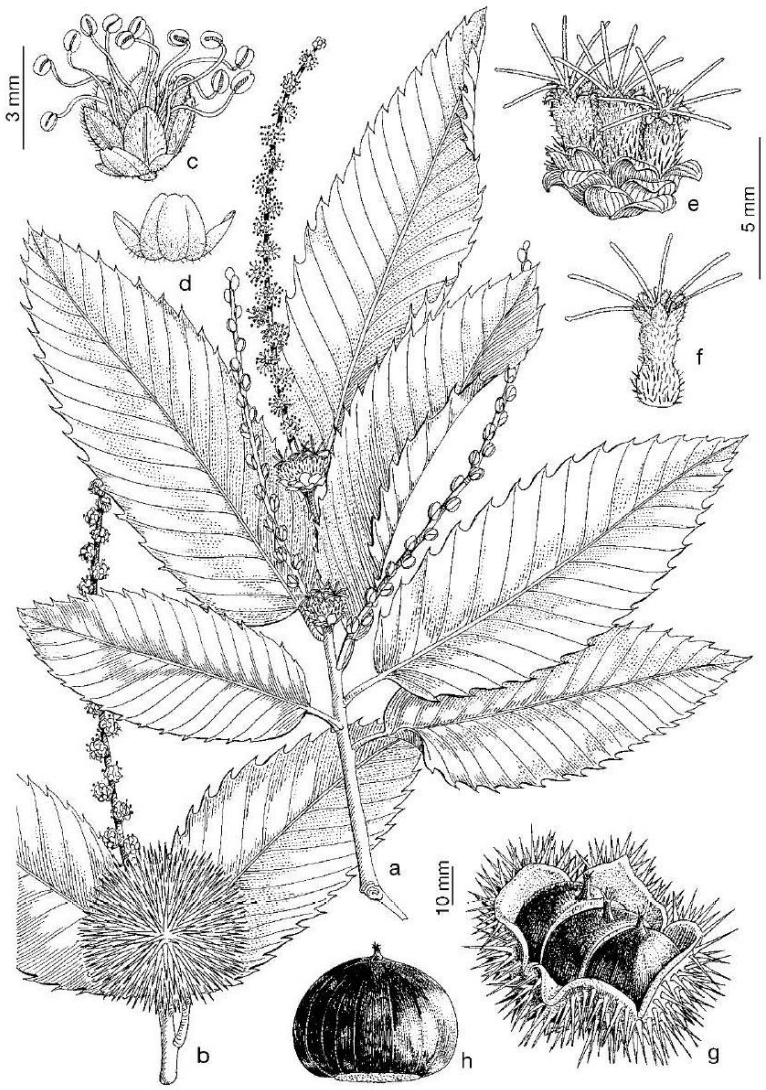

Figura 2. Castanea sativa. a) rama florida; b) rama con cúpula y amento; c-d) flor masculina y brácteas; c-f) flores femeninas; g-h) cúpula y aquenios. Autor: Castroviejo et. al

1.2 Ecología del fruto.

La floración del castaño se lleva a cabo entre mayo y junio (para el área mediterránea) y entre junio y julio para el norte de la península. En el momento que el

polen queda liberado de las anteras, la flor mantiene una receptividad muy alta durante al menos 3~4 semanas para asegurar de este modo una alta probabilidad de fecundación. Al tratarse de una especie autoincompatible, es importante tener en cuenta que los vectores que permiten una polinización eficaz se vean beneficiados por unas condiciones óptimas. Estas, en gran grado, son: la polinización anemófila y entomófila (Cuenca Valera & Majada Guijo, 2014).

Los frutos presentan una maduración anual. Les caracteriza encontrarse en el interior de una cúpula cerrada, generalmente dehiscente, a la cual, se le conoce coloquialmente como “erizo” por ostentar un carácter espinoso. La apertura de dicha cobertura se lleva a cabo a finales de octubre, produciendo que una serie de valvas se abran y permitan la caída del fruto al suelo. La semilla se encuentra en el interior de una cubertura dura de color pardo-rojizo, con un brillo lustroso en el exterior y una textura aterciopelada en el interior.

La especie posee una vecería de 3~5 años tras el inicio de la fructificación. Cada pie se estima que comienza dicha fructificación a los 10~20 años, si el pie ha sido injertado, o a los 20~30 años si no es así (Cuenca Valera & Majada Guijo, 2014). Otros autores constituyen que en montes altos se puede retrasar a los 50 años mientras que en monte bajo se pueden establecer unos periodos de entre 10~15 años.

1.3 Manejo del fruto.

Desde un punto de vista productor, la comercialización de la castaña en Asturias es de carácter local y privada, no obstante, cada vez más empresas tienen en cuenta este producto como materia prima. Como idea general, es reseñable el hecho de que un castañar en buenas condiciones de cuidado pueda llegar a producir entre tres y diez toneladas de castañas por hectárea.

El marco normativo, legal y administrativo del fruto lo describe como un producto no maderable, por lo que es valorable contar con un Plan de Aprovechamiento, el cual, estará incluido dentro de un Plan Especial perteneciente al Plan de Ordenación de los Recursos Forestales referente al monte, según la vigente Ley 3/2004, de 23 de noviembre, de montes y ordenación forestal. Cabe reseñar que, según su Artículo 44, “reglamentariamente, la Consejería competente en materia forestal regulará los términos en los que puede autorizarse y regularse otros aprovechamientos no

maderables” (Ley 3/2004, de 23 de noviembre, de montes y ordenación forestal., 2004, p. 25).

En referencia al manejo y desarrollo de la semilla en el cultivo y la creación de viveros, se debe cumplir la normativa vigente (RD 289/2003), pues, al tratarse de una especie incluida en la Directiva 1999/105/CE, la comercialización de los materiales forestales de reproducción debe de estar regulada. De esta manera, la semilla pertenecerá siempre a una regíón específica e identificafa (Alia et al., 2009). Para Asturias, el material deberá de tener su origen dentro del litoral Astur-cántabro (Zona 3 en la Figura 2) o la vertiente septentrional-cantábrica (Zona 4). Del mismo modo, se podrá localizar dichas semillas dentro del Catálogo Nacional de Materiales de Base para la producción de MFR identificado, proporcionado por el Ministerio de Transición Ecológica y para el Reto Demográfico.

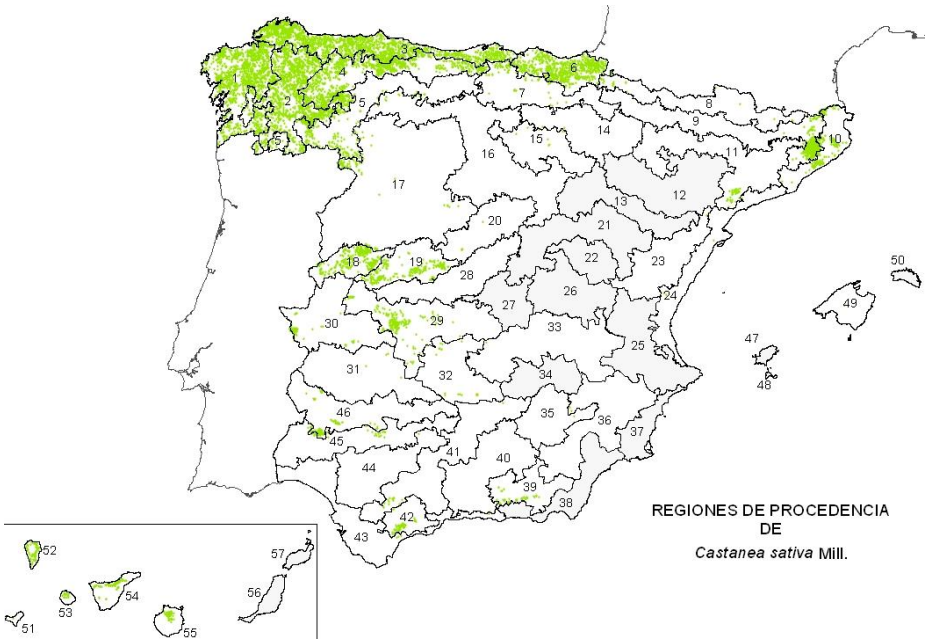

Figura 3. Distribución de *Castanea sativa* y Regiones de Procedencia de sus materiales de reproducción. Fuente: MITECO

Por otro lado y siguiendo el proceso, para llevar a cabo una buena práxis en su recolección, existen guías y planes de desarrollo que cuentan con el apoyo de las administraciones competentes[1]. Es importante contar con la implementación de unas prácticas de manejo que se orienten a la mejora del fruto, la gestión selvicultural y las

[1] En Asturias, como herramienta para el desarrollo de zonas rurales, se encuentra: Pelayo, Á. V., & Serrano, J. F. (2020). “Guía de buenas prácticas para el cultivo, tratamiento y comercialización del castaño”. León: IRMA S.L.

descripciones para el aprovechamiento. Así, será posible garantizar que cualquier acción que involucre al castaño sea compatible con los objetivos generales de la ordenación de montes, además de aquellos que le son propios al monte en concreto.

1.4 Usos principales del fruto y de sus derivados.

La castaña es un fruto que cuenta con una gran historia agroalimentaria en su haber. Desde que está presente dentro del territorio, ha soportado un enorme peso dentro de la dieta en muchas provincias de la península, pues suponen una fuente nutritiva más que reseñable. Sin embargo, la paulatina introducción de otros alimentos durante siglos pasados en nuestra sociedad, como la patata (*Solanum tuberosum*) o el maíz (*Zea mays*), diezmaron considerablemente su consumo.

A pesar de ello, todavía posee un valor evidente como producto nutritivo para humanos y animales, además, es posible observar dentro de la sociedad rural un cierto interés por su conservación y desarrollo. Un claro ejemplo de ello reside en las técnicas de selección genéticas que han permitido diferenciar distintos tipos de castañas en función de sus destinos, lo cual, deja entrever una vocación dedicada a aumentar la calidad de este producto[2].

Este fruto es consumido al natural, cocido, asado o confitado (marrón glacé), además, es usado como materia prima de mermeladas, purés, harinas, leche, cremas, café o bebidas alcohólicas.

[2] En Asturias se encuentra un estudio en referencia a los tipos principales y secundarios de la castaña en el Principado: Ara, M. C., Pereira-Lorenzo, S., Ramos-Cabrer, A., & Díaz, B. (2016). "Asturias, paraíso de castañas". *Tecnología Agroalimentaria, Boletín Informativo del SERIDA*, 21-27. Obtenido de http://www.serida.org/pdfs/6731.pdf

2. Indicadores económicos de la castaña en España y el Principado de Asturias.

Para evaluar la actividad económica de la castaña en España se han usado como indicadores la producción y el valor del producto en miles de euros (estimados a partir de un precio medio anual). La tabla 4 desengrana la producción de castaña en los últimos 15 años (últimos datos actualizados).

Años	Castaña	
	Producción (toneladas)	Valor (miles de euros)
2005	933	1 373,18
2006	59 086	35 451,61
2007	57 280	34 368,47
2008	44 575	31 195,59
2009	48 908	48 908,88
2010	55 164	55 164,16
2011	28 143	33 771,54
2012	19 071	19 071,15
2013	21 465	23 611,09
2014	16 852	25 277,25
2015	31 137	29 580,34
2016	19 263	26 967,85
2017	10 517	13 146,81
2018	10 505	14 706,90
2019	11 065	13 831,25

Tabla 2. Serie histórica de la producción de castaña y valor económico asociado. Fuente: (MITECO, 2021)

Desde 2005, el actual Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (sucesor del Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente), realiza

el Anuario de Estadística Forestal como herramienta para caracterizar los usos y valores de los distintos recursos forestales y, de este modo, establecer estrategias en tema de política forestal. Sería interesante evaluar el rendimiento de las producciones, no obstante, se antoja difícil establecer unos parámetros para este cálculo debido a que la propiedad privada no suele ofrecer datos concretos de la recogida y/o producción, por lo que dificulta la profundidad del estudio.

En la gráfica 1 se representa de manera visual la tendencia de la producción de este fruto, así como el valor asociado al producto desde el año 2005 al año 2019.

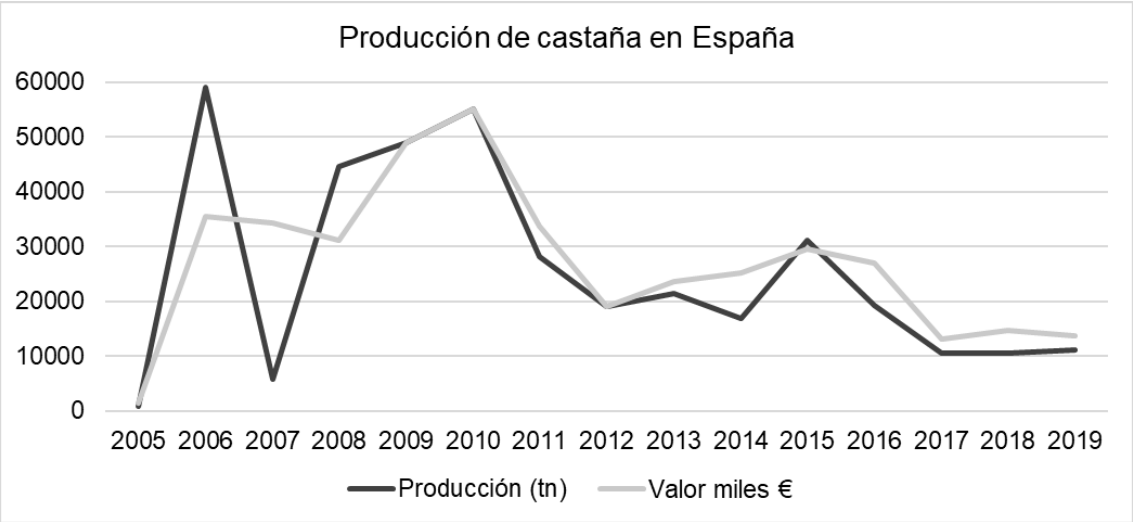

Gráfico 1. Tendencia de la producción de castaña en España. Fuente: MITECO

Se observa una tendencia descendente con el paso de los años, y es que, la variabilidad de la producción de castaña está condicionada por unos factores meteorológicos muy fluctuantes, los cuales, están gravemente afectados por el cambio climático (sequías o cambios en las temperaturas). Por otro lado, la presencia de la avispilla del castaño (*Dryocosmus kuriphilus*), así como hongos asociados, son factores influyentes a la hora de explicar este descenso productivo (MITECO, 2021). A todo ello se suma la falta de datos aportados por aquellos propietarios de titularidad privada o la inexactitud de estos en caso de aportarse. Asimismo, comunidades como Asturias, Andalucía o Extremadura (entre otras), tampoco han aportado datos concretos.

Es difícil establecer unas conclusiones firmes teniendo en cuenta la poca contundencia de los datos ofrecidos. No obstante, en cuanto al valor del producto es fácil atisbar una correlación directa con respecto a la producción, salvando las distancias en situaciones concretas donde la influencia del mercado y ciertos condicionantes sociales, así como ambientales, fijen precios fuera de esa tendencia.

En otro orden, desde el prisma regional, en Asturias no se encuentran datos explícitos contrastados sobre la recolecta y manejo de la castaña. Esta realidad es un hecho clave que obedece a la actual situación de abandono del castañar en esta comunidad.

3. Cadena de valor de la castaña en Asturias.

Michael Porter, académico y economista estadounidense, acuñó el término “cadena de valor”, en su obra “*Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*” (1985), como un modelo teórico que permite describir el desarrollo de las actividades de una organización empresarial generando valor al producto final, es decir, es la descripción de una estrategia comercial desde el comienzo de su etapa de producción hasta el consumo final de un cierto producto. Este concepto no debe de confundirse con el término “cadena productiva”, que es el conjunto de actividades articuladas integradas en un proceso planificado que permiten la transformación de unos determinados recursos en bienes o servicios mediante la aplicación de unos procedimientos tecnológicos y un capital, según Monfort (1983), citado por Selmani (1992). La diferencia entre ambas ideas radica en los actores dentro de cada proceso. Mientras que en una cadena productiva estos actores buscan el beneficio económico individual, en la cadena de valor el objetivo final es el mutuo apoyo entre ellos con el fin de lograr las metas mediante la coordinación, cooperación y comunicación (Dam, 2004).

3.1 La actividad comercial de la castaña.

Como se describe anteriormente, la comercialización de la castaña en Asturias procede de la recolección local en montes privados y/o públicos. La declaración de dichas recolecciones es desconocida, pues su destino queda relegado al autoconsumo en la mayoría de los casos.

En la figura 3 se representa de manera resumida un esquema que describe la cadena de valor de la castaña en España en función de un estudio plasmado por Sánchez González et al. (2020). Es importante reseñar que en base a estas informaciones es plausible confundir valores productivos con los realmente recolectados. A priori, no se dispone de informaciones fiables que puedan estimar la verdadera cantidad de producto

no recolectado, la que realmente se destina al autoconsumo, la que acaba en mercados informales o el producto que se pierde en algún eslabón de la cadena.

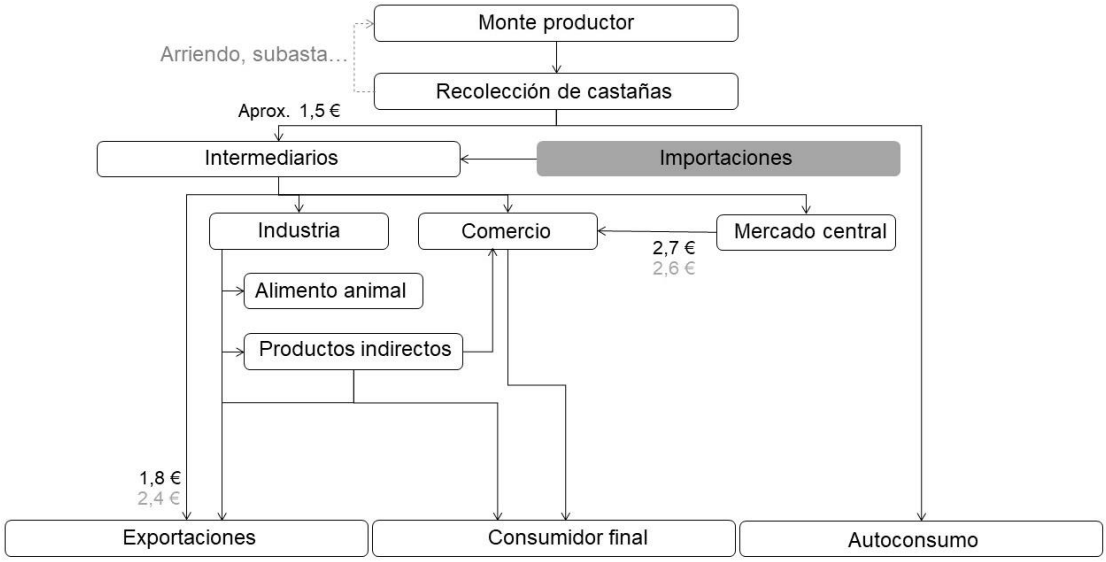

Figura 4. Aproximación esquemática de la cadena de valor de la castaña. A partir de diversas informaciones, tanto oficiales como de comunicaciones personales. Autor: Manuel López (2017). Se han incluido los datos económicos promedio (negro) y los últimos actualizados propios del año 2015 y 2016 (gris)

Cabe explicar que, pese a tratarse de un modelo estudiado a nivel nacional, es lo suficientemente general como para extrapolarlo al ámbito regional asturiano.

a. La castaña en el monte.

La recolección es una actividad realizada sobre montes propios (privados) o de titularidad pública. Los segundos, se deben arrendar para su posterior aprovechamiento, abonando una cantidad de dinero por ese derecho de recolección. No obstante, es una actividad con una gran deficiencia en cuanto a regulación administrativa en la mayoría de las comunidades autónomas, lo que explicaría que esta actividad se lleve a cabo mediante presumibles hurtos. Es importante reseñar que la mayoría de los residuos orgánicos de los que dispone el fruto en conjunto (p.e. el erizo), son desechados en esta fase de la cadena, por lo que cobra un peso reseñable dentro del estudio.

b. Intermediarios.

Tras la recolecta, y asumiendo fuera de este proceso el autoconsumo o la venta directa a algunos mercados o establecimientos concretos, por norma general el producto es comprado por intermediarios que serán los encargados de introducir la castaña dentro del mercado nacional o de exportarla al exterior. Además, en este eslabón también se añadirá la castaña importada, la cual, es común encontrarla comercializada en fresco o congelada. Por otra parte, pese al intento de integrar de modo vertical la

producción de castañas y su uso a gran escala, se ha supuesto que el fruto que no se haya destinado tanto al consumo humano como a la alimentación del ganado sea dirigida a la industria o a los mercados centrales como proceso previo al consumidor, según las consultas realizadas. En el caso de la industria, es normal encontrar segundas transformaciones o productos indirectos que usan como materia prima el fruto, de este modo, se elabora: puré, cremas, castañas en almíbar o en alcohol, etc.

c. Destino final del producto.

La cadena posee varios eslabones y/o actores que discurren de manera más o menos jerárquica haciendo que el valor del producto vaya creciendo en relación proporcional a las actividades que se van aplicando sobre él. En general, se deben destacar aquellos procesos que generan una mayor cantidad de residuos orgánicos, los cuales son: recolección, transporte, procesos de segunda transformación y el propio consumidor. Por ello, estas fases son las que poseen mayor importancia dentro del trabajo.

4. Residuos de la castaña.

Los residuos orgánicos más característicos obtenidos en las etapas propuestas se presentan en la tabla 5.

	Etapas			
	Recolección	**Transporte**	**Transformación**	**Consumidor**
Tipo de residuo	La cúpula erizada que recubre al fruto suele desprenderse en el suelo. En ocasiones, se recolecta con él. Por otro lado, la hojarasca, ramillas o hierbas de otras especies también pueden verse arrastradas.	Por lo general, solo se transporta el fruto con su cáscara, aunque es posible arrastrar cierta biomasa del bosque.	Parte de los erizos arrastrados en procesos anteriores, así como algún residuo de carácter agroalimentario específico.	Como residuo se obtiene la cáscara del fruto.
Uso del residuo	Sirve como cobertura del suelo y posible compost.	Se desecha o se estudia como posible uso alternativo [3].	Se desecha o se estudia como posible uso alternativo.	Se desecha o se estudia como posible uso alternativo.

Tabla 3. Residuos categorizados por etapas las etapas que constituyen su cadena de producción.

[3] Julia González, en su ponencia dentro de la IV Feria de Castañicultura en el Bierzo, propone el uso sostenible del residuo agroalimentario de la castaña mediante 3 vías: como fuente de productos antioxidantes dentro de la industria alimentaria, como compuesto absorbente en aguas residuales y como fuente de taninos para la elaboración de tableros de madera. González, J. (14 de noviembre de 2013). IV Feria de Castañicultura en el Bierzo. "*Usos de residuos de castaña de la industria alimentaria*". Ponferrada, El Bierzo, España: Universidad de León.

Pese a la propuesta de algunos autores para el uso de estos residuos como una alternativa a su desecho (González, 2013), en la industria dedicada a la castaña se suele desechar en campo la gran mayoría de los residuos anteriormente mencionados. Esto constituye una alternativa para el uso de dicha masa forestal residual, así como una opción de destino adicional para el fruto, como posible fuente energética.

5. Potencial energético de la biomasa.

5.1 La biomasa.

La Real Academia Española define la biomasa como la “Materia orgánica originada en un proceso biológico, espontáneo o provocado, utilizable como fuente de energía”, no obstante, una definición más técnica del concepto ofrecida por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, en base La Directiva 2009/28/CE relativa al fomento del uso de la energía procedente de fuentes renovables expone en su Artículo 2, apartado e), que la biomasa es:

> 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. (pág. 27)

Es decir, es un concepto que engloba a todos los residuos cuyo origen sea forestal, ganadero y agrícola, así como la parte orgánica de aquellos residuos industriales y domésticos, incluyendo todos los subproductos que se obtienen en la industria agroalimentaria y maderera.

Esta fuente es debidamente sometida a unos procesos mecánicos o biológicos para obtener lo que se denomina “bioenergía”, la cual, es tratada como una energía renovable.

5.2 Clasificación de los tipos de biomasa.

En España, la biomasa utilizada para la generación de energía es consecuencia directa de distintas actividades económicas. En la Figura 4 se puede observar una clasificación general y común de los tipos de biomasa existentes según varios criterios.

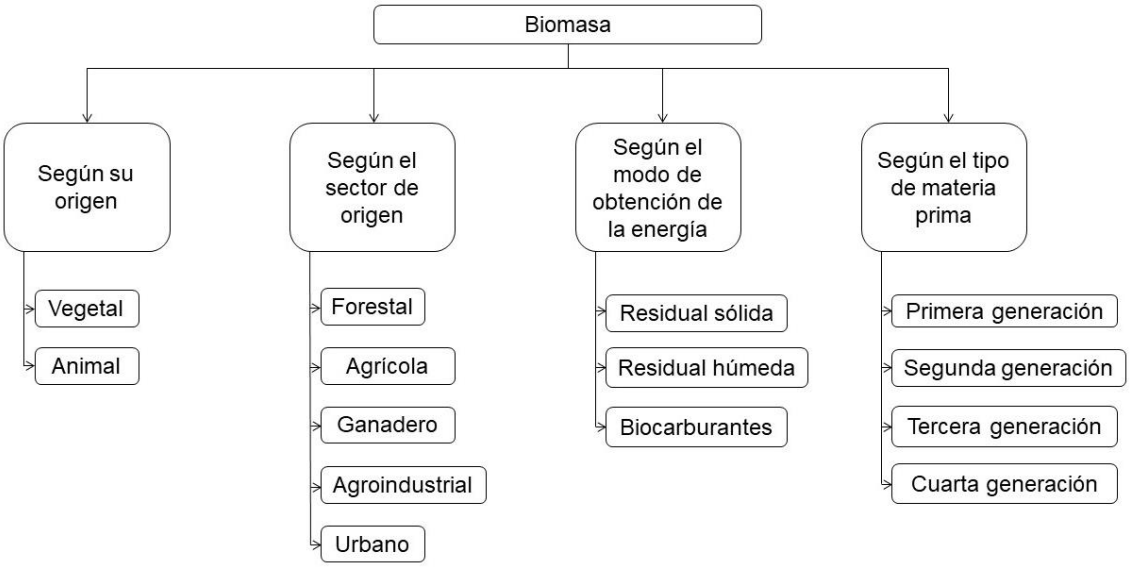

Figura 5. Esquema de los tipos de biomasa existentes. Fuente: Elaboración propia a partir de varios autores.

En cualquier caso, atendiendo a las Normas UNE-EN ISO 17225, UNE 164003 y UNE 164004, esta diversidad se ve estandarizada con el objetivo de adecuar su uso como combustible para su aplicación atendiendo a factores económicos, técnicos y medioambientales.

5.3 Transformación de Biomasa en energía.

Siguiendo las directrices de las distintas tecnologías que se utilizan con el objetivo de conseguir energía a partir de biomasa, se han desglosado dos grandes grupos de procesos: termoquímicos y bioquímicos. En la figura 5 se proponen los distintos métodos por los cuales es posible llegar a ese término (Caputo et al., 2005). Tales procesos

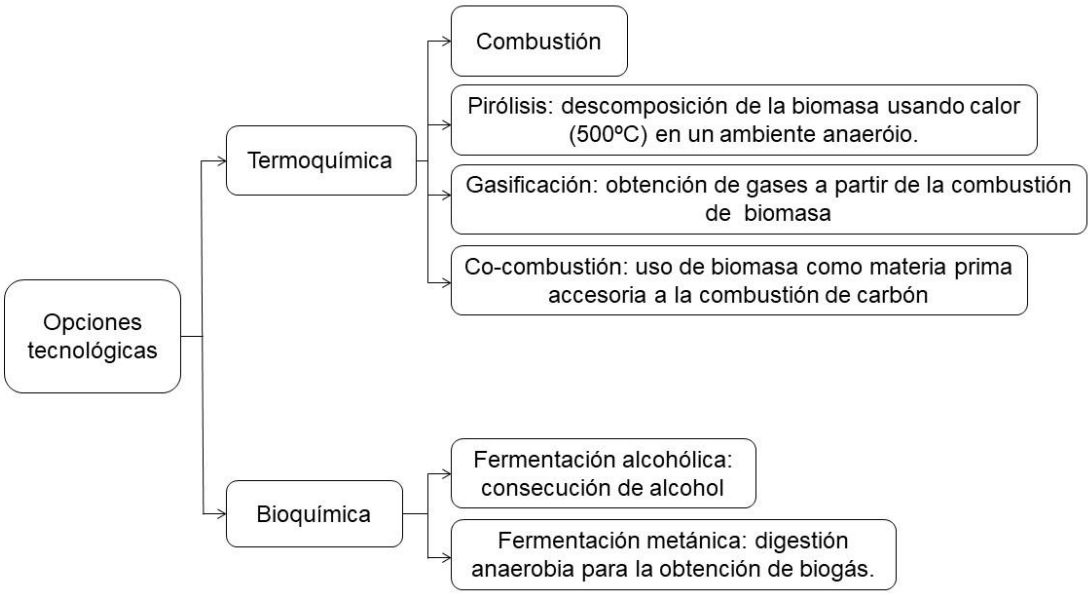

Figura 5. Esquema sobre los métodos tecnológicos usados para la obtención de energía a partir de biomasa. Fuente: *Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: effects of logistic variables*, Caputo et al. (2005).

tecnológicos permiten producir energía térmica, biogás o biocombustible, como el bioetanol o el biodiesel. Así, se pueden implementar en el proceso de producción de energía por medio de gasificación o directamente por combustión.

6. Propiedades energéticas de la biomasa.

Para evaluar la posibilidad técnica de una conversión para transformar la biomasa en energía, es esencial poner en valor ciertos factores y parámetros. Estos están agrupados:

6.1 Composición química.

La biomasa está compuesta por una parte inorgánica, otra orgánica y agua. En el proceso de combustión, la fracción orgánica del combustible es quemada y, por otro lado, la parte inorgánica será influencia directa sobre la combustión formando la ceniza u otros tipos de residuos sólidos.

Los componentes químicos más importantes de la biomasa son: el carbono (C), que puede proceder de materias orgánicas y de otros carbonatos minerales que estén presentes; el hidrógeno (H); el azufre (S), el cual puede provenir de la pirita o marcasita, así como de sulfurados orgánicos y de sulfatos inorgánicos; el nitrógeno (N), que no aporta energía aunque es un parámetro importante si su cantidad es considerable y la temperatura del proceso aplicado también es elevada, ya que participa en la formación de monóxido de carbono; y, sólo en ciertos casos, puede encontrarse cloro (Cl). Además, otro compuesto relevante es el oxígeno (O), aunque en este caso no es posible determinarse de forma directa, si no que se debe calcular mediante la diferencia entre la suma del peso de los demás elementos, más la ceniza, y el peso total del producto dedicado a biomasa y, por otro lado, su cantidad en el combustible contribuye a reducir las necesidades de aire de combustión (Castells, 2005).

Gracias al conocimiento sobre la composición de la biomasa es posible estimar las eficiencias de conversión energética de los distintos biocombustibles. Según Escalante et al. (2010), la relación O/C indica, de manera inversamente proporcional, una idea general sobre el balance del poder del poder calorífico, es decir, una disminución de la relación oxígeno-carbono implica un aumento del poder calorífico, además de una disminución en la relación H/C. Por otra parte, existe una relación que determina el índice de la digestibilidad del material orgánico, esta es la relación C/N. Este índice

resulta especialmente interesante a la hora de determinar la aptitud de un cierto material para originar biogás (Escalante Hernández et al., 2010).

Análisis proximal.

Gracias a este estudio es posible desarrollar un análisis proximal capaz de determinar el material volátil, el carbono fijo y el contenido de cenizas. Además, se hace importante incluir una cuantificación pormenorizada del contenido de grasas, aceites y proteínas cuando se desea aplicar industrialmente un cierto residuo o material como fuente de energía.

Material volátil.

Es materia compuestas por combinaciones de H, C y otros elementos, los cuales, se descomponen cuando esta alcanza los 950ºC. El contenido que un material pueda tener de volátiles puede dar un primer atisbo de la longitud de llama que este pueda alcanzar, en el caso de que este combustible se lleve a ignición. Visto desde el punto de vista energético, es importante reseñar que no todos los volátiles contribuyen en el aporte de energía (Castells, 2012).

Carbono fijo.

No es más que la fracción resultante de C, una vez que se resta las cenizas, que se ha pirolizado para la obtención de material volátil.

La cantidad de carbono fijo y de material volátil contenido en el combustible permiten deducir la facilidad con la que la biomasa reacciona, gasifica y oxida (Escalante Hernández et al., 2010).

Cenizas.

Constituidas por los restos procedentes del material combustionado. Tienen una gran influencia en el poder calorífico, pues, su alto contenido puede reducir la cantidad de energía liberada. Por otro lado, se trata de un residuo que en la mayoría de los casos debe de ser extraído por influir en la transmisión de calor dentro de los sistemas (Castells, 2005).

Análisis estructural.

Estudia y analiza los elementos de composición que conforman la biomasa. Estos son: la celulosa, la hemicelulosa y la lignina. Conocer estos elementos es necesario a la hora de plantear el proceso más adecuado para su aprovechamiento energético.

Celulosa.

Se trata de un homopolisacárido conformado únicamente por unidades de D-glucosa, las cuales, permanecen unidas mediante enlaces glucosídicos (β-1,4-O-glucisídico). Posee un peso molecular elevado, además de ser insoluble en agua. Desde el punto de vista estructural, cabe resaltar que posee una parte cristalina muy organizada que le ofrece una cierta protección a la célula, de modo que supone un impedimento en el momento que esta sufra un ataque de reactivo (Escalante Hernández et al., 2010), esto se debe a la tendencia que tienen estas moléculas a formar puentes de hidrógeno.

Hemicelulosa.

Su estructura está conformada por diferentes monosacáridos, los cuales, se unen mediante enlaces glicosídicos para formar una construcción heteropolisacárida. Estos monosacáridos son: hexosas, pentosas y ácidos urónicos. Es interesante resaltar que estas moléculas se asocian por interacciones polisacárido-polisacárido con la celulosa (Rodríguez et al., 2013).

Lignina.

Es un polímero de estructura ramificada y amorfa, además de heterogéneo. Su función consiste en mantener las celulosas y las hemicelulosas unidas para proporcionar cierta rigidez a la pared celular. Es así como evita que los microorganismos afecten a la célula (Escalante Hernández et al., 2010). Por otro lado, Sebastián Nogués et al. (2010), asegura que la energía que desprende un material es mayor en biomasa con un alto contenido de lignina, no obstante, demanda un mayor tiempo de residencia.

6.2 Contenido en humedad.

En ocasiones denominada también como humedad relativa. Es una relación entre la masa de agua que contiene un cierto material por kilogramo de materia seca. Este parámetro se puede expresar como base seca (h) o como base húmeda (H), pues, se puede considerar el peso de material húmedo (P_h), antes de secar el material, además del peso seco (P_0) que correspondería al material una vez seco.

Las relaciones son las siguientes:

$$h=\frac{P_h-P_0}{P_0} \qquad H=\frac{P_h-P_0}{P_h}$$

El valor del poder calorífico de la biomasa será inversamente proporcional respecto al valor de la humedad relativa, ya que, el proceso de combustión es más eficiente. En el momento que el calor es aplicado sobre el combustible, el agua contenida dentro del material deberá de evaporarse antes de que llegue a ignición. Es importante recalcar que en la mayoría de procesos de conversión energética se requiere que los valores de humedad contenidos sean <30%, en caso contrario, será necesario aplicar previamente procesos de secado.

6.3 Densidad aparente.

La densidad de un material se define como el peso por unidad de volumen en un estado físico concreto. En el caso de los combustibles, presentar una densidad aparente elevada favorecerá la relación de energía por unidad de volumen, pues, e este caso se requerirá menores tamaños de los equipos involucrados en los procesos y se aumenta el tiempo que transcurre entre cargas de equipo (de Lucas Herguedas et al., 2012). En caso contrario, las bajas densidades aparentes de los combustibles pueden provocar problemas de flujo por gravedad, además de presentar mayores volúmenes de almacenamiento y de transporte, lo que conlleva un aumento de la complejidad y de costos en los procesos de conversión.

6.4 Poder calorífico.

Es un parámetro que determina la energía potencialmente disponible en la biomasa. Este factor se expresa como la cantidad de energía por unidad física, es decir, como la energía liberada en forma de calor cuando la biomasa es quemada completamente.

Es importante diferenciar los dos conceptos que engloban a dicho parámetro.

Poder calorífico superior.

También denominado por sus siglas PCS, determina el poder calorífico realmente producido durante la combustión (de Lucas Herguedas et al., 2012). Será entonces el utilizado para las ecuaciones correspondientes para la estimación de la energía aportada.

Existen numerosas ecuaciones para estimar el PCS. Las mismas, están basadas en distintos tipos de análisis que se pueden realizar a la biomasa: elemental, inmediato, mixto y químico[4].

Poder calorífico Inferior.

Denominado por sus siglas PCI, es el poder calorífico que realmente es aprovechado, producido exclusivamente sin la utilización de la condensación del agua. Esta energía proviene directamente del carbono que compone la materia, el cual, reacciona con el oxígeno dentro del proceso térmico liberando energía en forma de calor (Escalante Hernández et al., 2010).

Este PCI es determinado a partir del PCS, de la siguiente manera:

$$PCI=PCS-2,5(9H+H_2O)$$

Donde:

PCI: Poder calorífico inferior (MJ/Kg)

PCS: Poder calorífico superior (MJ/Kg)

2,5: Calor de condensación del agua 0ºC (MJ/Kg agua)

9: Kg de agua que se forman al oxidar 1 Kg de H

H: Tanto por uno de hidrógeno en el combustible

H_2O: Tanto por uno de humedad del combustible

Generalmente, el contenido de energía que posee la biomasa es medida en función del poder calorífico del recurso o materia prima, aunque en el caso de alguno de ellos (cómo la biomasa residual húmeda) se determina en función del poder calorífico del producto energético obtenido en su tratamiento (de Lucas Herguedas et al., 2012).

7. Estimación de producción de la Biomasa.

El autor Sebastián et al. (2010), señala la importancia de evaluar y caracterizar los parámetros de tamaño y capacidad de producción de energía de un área. Sólo de este modo se podrá estimar un potencial energético.

[4] En orden alfabético según sus autores: Ecuación de Demirbas, Ecuación de Jiménez y González, Ecuación de Shafizadeh y Degroot, Ecuación de Tillman y Ecuación de White.

Para ello, destaca tres métodos principales.

Método con ratios.

Consiste en usar datos superficiales (generalmente en hectáreas) para multiplicarlos por un ratio, denominado RRS (ratio de residuos por unidad de superficie). Con este método es posible estimar la cantidad de biomasa que se produce en un árdea concreta. Además, si se conoce la información de producción de un material y se obtiene el ratio de residuo por unidad de producto producido (RRP), es posible calcular la cantidad de biomasa producida.

Este método es el más usado a la hora de calcular estimaciones.

Método con ecuaciones.

Son las más usadas en el ámbito forestal, ya que se basa en la utilización de ecuaciones alométricas obtenidas directamente desde los inventarios. Es interesante usar esta metodología para estimar la biomasa esperada en un área arbolada.

En el caso de obtener información referente a la producción de frutos o materia forestal concreta, es posible establecer parámetros aproximados de producción para dicha biomasa.

Método basado en modelos.

Como su propio nombre describe, se basa en el uso de modelos, es decir, procuran reproducir una realidad desconocida por medio de información real. Esta realidad desconocida, o rendimiento de biomasa, se simplifica de tal manera que sea posible establecer un marco de estimación lo más aproximado a la realidad que sea posible.

Existen dos métodos: métodos que no modelan el crecimiento y métodos que modelan el crecimiento. Los primeros son métodos menos complejos y deterministas, los cuales, se basan en información referente a variables climáticas, geográficas y/o edáficas. Implementar este tipo de modelos requiere que haya un conocimiento lo suficientemente bueno para la especie sobre la que se está parametrizando. El segundo método es el más avanzado, a que reproducen el crecimiento de una especie de manera dinámica. En este caso los parámetros climáticos, biológicos y/o edáficos están limitados y rigurosamente ponderados.

Método	Ventaja	Inconveniente
Método con ratios	Sencilla de obtener en campo	-Depende de varias variables -no se adecua al ámbito forestal por sus desviaciones -Requiere de un muestreo de campo riguroso
Método con ecuaciones	Mayor exactitud. Permite implementar el uso de inventarios detallados	-Son específicas para cada especie y zona -Su uso se restringe demasiado al ámbito forestal
Método basado en modelos	Si se realiza adecuadamente puede ser el más exacto.	-Es el método que mayor rigor requiere. Además, toda su información debe de ser detallada y explícita.

Tabla 4. Análisis de las ventaja e inconvenientes de los métodos propuestos. Fuente: Sebastián, F; García-Galindo, D; Rezeau, A. 2010. Energía de la biomasa. Zaragoza, España. 557p.

IV. Metodología.

Para desarrollar este trabajo dentro de un contexto teórico-práctico se ha propuesto realizar una revisión de las investigaciones más recientes que abarquen el aprovechamiento energético de la castaña o similares, como la bellota, así como residuos agroalimentarios asociados a estos recursos.

En este caso se ha recurrido a la herramienta de búsqueda “Web of Science”, un servicio en línea de información científica gestionado por La Fundación Española para la Ciencia y Tecnología (FECYT).

Se seguirá una serie de directrices de búsqueda que proporcionarán un filtrado de información acorde a las necesidades propuestas.

Dada la importancia por manejar información y datos relativamente actuales, se realiza una búsqueda desde el año 2015 hasta la actualidad. Posteriormente, tras haber realizado una revisión global del tema, se propusieron las siguientes palabras clave para la búsqueda de artículos concluyentes: chestnut, energy, combustion, pyrolysis, gasification, biobutanol, bioethanol, biomass, higher heating value.

Tras la búsqueda se obtuvieron 56 resultados que fueron valorados en función de su relación con la materia propuesta, escogiendo investigaciones que representan la realidad que más próxima al contexto de este trabajo, concluyendo 10 artículos relevantes.

Posteriormente se completa dicha revisión con un proceso de investigación que servirá como guía práctica para concluir unos resultados reales. En este caso, se obtendrían datos concluyentes sobre un territorio interesante para el estudio sobre los cuales fundamentar un futuro desarrollo del aprovechamiento de este recurso.

1. Revisión sobre los métodos de aprovechamiento.

La castaña, como se ha descrito anteriormente, costa de tres fracciones diferenciadas. Dos de ella; el erizo, que normalmente se desecha directamente sobre el suelo durante la recolección; y la cáscara, que puede provenir directamente de la industria agroalimentaria o en etapas de recolección y transporte, formarían la parte residual de la materia. Por otro lado, estaría el fruto en sí, un producto que generalmente se ha aprovechado dentro de la industria de la alimentación.

Los rendimientos en cuanto al potencial de biomasa de la castaña por unidad de área varían dependiendo de la calidad de la producción de castaña en sí, ya que la composición de nutrientes entre distintos cultivares de castaña y entre regiones es variables como consecuencia de la alta diversidad genética. Esta afirmación ha sido contrastada gracias a marcadores morfológicos y moleculares (Pereira-Lorenzo et al., 2006).

La variabilidad entre nutrientes y compuestos fisicoquímicos debe de ser útil a la hora de seleccionar cultivares o plantaciones específicas para el mercado energético, por ello, los estudios concluyentes para estudiar el potencial de biomasa deben de realizarse de manera explícita sobre una zona concreta.

Actualmente, el estudio del fruto como fuente potencial de energía, ya sea térmica o de generación eléctrica, se ha realizado de manera somera. Estas investigaciones no tratan de manera específica al recurso en sí, si no como parte de un conjunto potencial de recursos residuales. Es por ello que el panorama se ha centrado más en tratar de analizar los residuos provenientes de la castaña (generalmente la cáscara) y no a tratar el conjunto de esta.

Esta revisión sintetiza los recursos bibliográficos disponibles de tal modo que presenten las oportunidades y limitaciones que tiene la castaña como fuente para biocombustibles, destacando sobre todo el uso de los residuos que esta genera tras su uso en el sector agroalimentario. Por ello, se destacarán las áreas en las que es necesario dirigir y aunar los esfuerzos para alcanzar datos reales y conclusivos como fuente sostenible de manera directa, incluyendo el conjunto del fruto en el método de aprovechamiento.

1.1. Proceso de producción de castañas y residuos.

Generalmente, el flujo de procesos desde la obtención de castaña y sus residuos derivados hasta su explotación o método de aprovechamiento se puede desglosar en las siguientes etapas:

I. Cultivo del castaño (*Castanea sativa Mill.*).
II. Recolección y transporte.
III. Tratamientos de desecación y/u optimización para la extracción de energía.
IV. Método de extracción de energía adecuado.

La eficacia del combustible obtenido deprenderá del proceso de tratamiento previo que optimice ese material para un método de aprovechamiento concreto. Por tal razón, el estudio de las composiciones fisicoquímica de cultivares concretos ha de ser estudiados previamente para la posterior selección de estos, ya que la estructura de sus frutos determinará el éxito de estos una vez sean tratados.

Además, se deben desarrollar métodos de conservación y almacenamiento para permitir conservar de manera íntegra sus propiedades calóricas durante el tiempo que se considere pertinente, de modo que se pueda satisfacer la demanda durante un periodo determinado. Para solucionarlo, el tratamiento previo a su extracción puede ser considerado de gran importancia.

1.2. Extracción de energía.

Actualmente se han estudiado varios métodos para la extracción de energía, no obstante, no presenta un amplio abanico de posibilidades. Estos procesos pueden agruparse en dos grupos según sus opciones tecnológicas:

1) Métodos termoquímicos
   I. Pirólisis y torrefacción para la obtención de biocarbón
2) Métodos bioquímicos
   I. Bioetanol
   II. Biometanol o biogás

Método	**Uso de toda la biomasa orgánica**	**Secado**	**Producto**
Pirólisis	Sí	Sí	Carbón
Torrefacción	Sí	Sí	Carbón
Bioetanol	No[a]	No	Líquido
Biometanol o biogás	No[a]	No	Gas

Tabla 5. Descripción de los métodos de aprovechamiento. [a]: En los procesos de reducción se llevan a cabo pérdidas de materia polisacárido producidos por su descomposición.

1.3. Métodos termoquímicos.

Como se ha planteado anteriormente, la composición química de la biomasa juega un papel clave en relación con los rendimientos y la composición de los productos. En consecuencia, se espera que el resultado tras eventos térmicos peculiares asociados con los calores de reacción también se vea afectada. Los residuos que son tratados están formados principalmente por componentes químicos modelo (extractos, celulosa, hemicelulosa y lignina) cuyos contenidos deben de ser considerados en base seca, pues los contenidos en humedad del fruto (40~60%) son uno de los factores más limitantes a la hora de evaluar sus poderes caloríficos. Por ello, los tratamientos previos a su aprovechamiento final se deben de considerar como un factor clave para la obtención de combustibles.

Se puede concluir que existe una necesidad real por disminuir el contenido en humedad del producto inicial, por lo que debe someterse a procesos de desecación, de modo que, el uso directo de la biomasa bruta en procesos de combustión queda descartado al presentar bajos poderes caloríficos y propensiones hidrofílicas (Dyjakon & Noszczyk, 2020).

Por esta razón es necesario un tratamiento que aumente la eficiencia de este recurso a la hora de aprovechar su energía y estos son: la pirólisis y la torrefacción.

1.3.1. Pirólisis.

Estos tratamientos aportan como resultado un producto plenamente aprovechable, el biocarbón, un subproducto que se obtiene directamente de la biomasa celulósica para la producción de biocombustibles.

Existen dos opciones de conversión: la activación física y la activación química. La primera consiste en la oxidación lenta del carbón con unos agentes de oxidación suaves como son el vapor y el CO_2 a temperaturas que oscilan entre los 600ºC y los 900ºC. Este es un proceso lento que crea una nueva porosidad en la estructura del fruto, agrandando los poros ya existentes. Por norma general, existe una preferencia por el dióxido de carbono frente al vapor debido a la baja reactividad que tiene el primero, lo que permite un control sobre las tasas de oxidación provocando un desarrollo de porosidad uniforme. La activación química se basa en el uso de productos químicos ($ZnCl_2$, KOH, H_3PO_4) lo que promueve las reacciones de deshidratación,

policondensación y gasificación a temperaturas más bajas que las usadas en la activación física. Se obtienen mayores rendimientos con estos procesos, aunque requiere un extenso lavado del producto final para eliminar estos químicos, una penalización evidentemente ambiental (Contescu et al., 2018).

El uso de la castaña para estos procesos está justificado en base a los altos contenidos de carbono fijo presenta esta materia prima (~25%), generalmente mayores que los de la madera (siendo estos un 13%, normalmente), como consecuencia de los altos contenidos de lignina. Además, este componente es térmicamente más estable, por lo que se prefieren precursores vegetales ricos en lignina para producir carbones activos de mayor calidad.

Una de las conclusiones más prometedoras y eficientes asegura una materia de alta calidad a partir del uso de cáscaras de castaña, ofreciendo rendimientos y poderes caloríficos de un 44.31% en peso y unos 35.48 MJ/kg, respectivamente (Jiang et al., 2018). Este proceso se desarrolla siguiendo los cánones de la activación química haciendo uso de catalizadores basados en ácido sulfúrico y soluciones de urea previamente a la desecación. Posteriormente, tras secar en un horno las muestras de cáscara a 60ºC durante 24h, se lleva a cabo la preoxidación elevando la temperatura ambiente hasta los 250ºC a razón de 5ºC/min en un horno de ventilación forzada dentro de condiciones anaeróbicas. Finalmente, añadiendo nitrógeno a la cámara, se consigue evitar la oxidación permitiendo el carbonizado de las cáscaras a 750ºC. Así, se obtiene la destrucción de la celulosa y hemicelulosa durante la etapa de preoxidación, lo que otorga a las láminas de carbón una estructura relativamente estable.

Estos métodos de tratamiento han evolucionado con el paso de los años para aumentar su eficiencia, sin embargo, hace falta desarrollar procesos de biorrefinería que permitan producir un producto final de calidad sin la emisión de residuos químicos contaminantes o limitando estos a cantidades medioambientalmente aceptables.

Otro de los factores determinantes a la hora de evaluar los potenciales térmicos son los contenidos de azufre y ceniza. Estos juegan un papel muy importante en el rendimiento del combustible ya que son agentes limitantes en el rendimiento energético final (cenizas) y elementos fundamentales de las emisiones producidas (azufre). Esto ha llevado a los estudios a determinar cómo evolucionan los contenidos de ambos durante los procesos de torrefactado, obteniendo como resultado un aumento eventual de los contenidos de cenizas a medida que la temperatura del proceso se incrementaba. No obstante, el rango de contenido de este en el caso de las castañas se mantuvo en un

rango entre los 2.3% (materia prima) y los 6.1% (producto torrefactado a 300~320ºC) en peso (Dyjakon & Noszczyk, 2020).

1.3.2. Torrefacción.

La torrefacción es un tratamiento basado en la pirolización del material a bajas temperaturas que oscilan entre los 200ºC y los 320ºC. Este proceso mantiene un ambiente sin oxígeno, además de inerte, dentro del reactor de calentamiento gracias al uso de CO2 o N. Así, se produce una densificación del producto final que permite aumentar aproximadamente en un 30% sus propiedades energéticas (Niu et al., 2019).

Los contenidos de materia volátil están directamente relacionados con la facilidad de ignición que tiene un combustible y su estabilidad en la combustión, por lo cual, un material que se caracterice por un contenido alto de materia volátil es más fácil de encender y requiere menos energía para tal proceso. No obstante, los combustibles que poseen estos contenidos tan altos emiten menos calor, ya que, una parte significativa de la masa se libera con los volátiles a la atmósfera (Riaza et al., 2017). Desde otro prisma, se concluye que el carbón fijo (combustible sólido del producto) aumentará si existe una disminución de la materia volátil, además de un ligero aumento de cenizas, debido a la cantidad de carbono perdido que contienen los compuestos volátiles. Es por ello que el uso de tratamientos previos se vuelve inevitablemente esencial si se quieren obtener valores calóricos eficientes y rentables. Poniendo estos datos en perspectiva, el contenido de volátiles en el carbón es de, aproximadamente, el 40% (Riaza et al., 2017), por lo que se puede interpretar un acercamiento más que notable por parte de la castaña torrefactada a estos valores. No obstante, la materia volátil está muy relacionada con los compuestos orgánicos volátiles, es decir, hidrocarburos que se presentan en estado gaseoso a la temperatura ambiente normal o que son muy volátiles a dicha temperatura. Estos, afectan tanto de manera medioambiental como sobre la salud del ser humano por lo que hay que resaltar la importancia que esto supone para la industria o sector de la bioenergía, ya que, limita las opciones de aplicación de dicha biomasa.

1.4. Métodos bioquímicos.

Desde la perspectiva agroindustrial, los residuos de la castaña son una fuente de efluentes líquidos donde entre un 2.7 y un 5.2%, en peso (Jung et al., 2016), están

formados por compuestos fenólicos y donde aproximadamente un 36% son polisacáridos (Maurelli et al., 2013). Es por esto que, recuperar estas moléculas bioactivas, podría aportar como resultado un biogás de calidad de cara a su explotación.

Con el objetivo de reducir los problemas ambientales que generan los procesos termoquímicos, se plantean nuevos horizontes de aprovechamiento energético para la obtención de biocombustibles. Con estos argumentos, la cáscara de castaña se presenta como una materia prima con potencial para la producción fermentativa de vectores energéticos y bioproductos, ya que, por lo general cualquier biomasa que contenga azúcares puede ser usada como sustrato de fermentación (Sivagurunathan et al., 2017).

Sin embargo, hay discrepancias que ponen en duda la sostenibilidad de estos biocombustibles, pues, pese a solucionar una cuestión como las emisiones medioambientales también sería el responsable directo de que se lleven a cabo grandes explotaciones forestales u aprovechamientos, provocando el aumento en precios de ciertos alimentos (Kumar et al., 2018). Aunque los efectos en el mercado del uso de residuos como los que aquí se proponen aun no ilustran la realidad de este problema.

1.4.1. Bioetanol.

El proceso de conversión de biomasa en etanol comienza con un tratamiento previo que extrae la glucosa contenida en esta. El bioetanol tiene las mismas características y composición química que el etanol ya que se trata del mismo compuesto. La diferencia radica en su proceso de producción. Este combustible ha de ser obtenido a partir de materia vegetal comestible (primera generación) o biomasa lignocelulósica (segunda generación), no pudiendo obtenerse del petróleo.

Actualmente algunas investigaciones se han dedicado a estudiar unos procesos eficientes de biorrefinería para que estos tratamientos previos estén conformados por procesos eficientes (Lee et al., 2022).

Para la producción de bioetanol se debe de convertir la materia original en monosacáridos que puedan ser consumidos por los microorganismos (He et al., 2016). Por un lado, se prefiere la hidrólisis enzimática a la hidrólisis ácida que convierte los polisacáridos de la castaña en monosacáridos y ofrece tasas de conversión más altas, generando menos subproductos no deseables y sin el requerimiento de equipos

resistentes a la corrosión (Wahlström & Suurnäkki, 2015). No obstante, esta hidrólisis enzimática se ve obstaculizada por la presencia de lignina, debido a los enlaces éster de los polisacáridos que la componen, por lo que para mejorar dicha hidrólisis es necesario un pretratamiento para eliminar la lignina (Dikshit et al., 2020).

El pretratamiento consiste fundamentalmente en el uso de reactivos alcalinos como el hidróxido de sodio (NaOH) y el hidróxido de potasio (KOH). Generalmente el uso de este tratamiento supone un 35% del costo total del proceso de refinería (Kapanji et al., 2019), luego se deben de establecer procesos que optimicen la relación costo/eficiencia. Esta razón ha permitido desarrollar un proceso de pretratamiento a temperaturas ambientales de 25ºC con el uso de soluciones concentradas de NaOH, ya que el costo de esta es menor que el del KOH (Kang, 2022).

En definitiva, el uso de tratamientos para 1000g de cáscara de castaña en condiciones óptimas, es decir, una temperatura ambiental de 25ºC y el uso de de NaOH a concentraciones de 1,6% durante 2,8H de reacción, han obtenido rendimientos del 31%. Esto quiere decir que se han obtenido 310g de glucosa por cada 1000g de materia prima.

Posteriormente, el producto obtenido será fermentado mediante *Saccharomyces cerevisiae* K35 para la producción de bioetanol. La concentración inicial de glucosa en cada medio fue de 50 g/L y se consumió casi por completo después de 9h de fermentación, luego se concluye unos rendimientos de bioetanol del 97,8%, una situación muy favorecedora de cara al aprovechamiento de este tipo de residuos ricos en polisacáridos.

1.4.2. Biometanol o biogás.

La digestión anaeróbica de biomasa se ha presentado como una alternativa eficiente y de bajo costo (Vieira & Alexandre, 2014). En este proceso, los microorganismos implicados en la digestión llevan a cabo dichos procesos con el objetivo de obtener un producto basado en el metano.

Esta digestión se lleva a cabo dentro de biodigestores que aprovechan esta libración de gases para ser utilizados como biocombustible, aunque es necesario un tratamiento previo para obtener materiales con potenciales de generación de metano mayores. Los pretratamientos que se deben llevar a cabo consisten, de igual manera, en el uso de

reactivos alcalinos que sean capaces de reducir la materia y mejorar la biodegradabilidad, los cuales pueden ser aportados durante una digestión de larga duración o bien pueden usarse como tratamiento previo a un proceso digestivo de corta duración.

Por otro lado, también se pueden planear pretratamientos hidrotermales, aunque de menor impacto efectivo, luego se han llevado a cabo procesos combinados que aportan reducciones bastante favorecedoras llegando a alcanzar valores de biodegradabilidad del entre el 63 y el 67% (Bianco et al., 2021). Este pretratamiento arroja resultados tras la fermentación que llegan a aportar una cantidad de 253 L CH_4·Kg/VS (siendo VS el porcentaje en peso de la materia volátil). Otro método utilizado es la fermentación de material en cámaras UASB alimentadas con un efluente agroindustrial durante 25 semanas en condiciones mesófilas (Temperaturas de 30~40ºC) y en unos pH que fluctúan entre el 6.5 y el 8.2 (Maria et al., 2015). De igual manera se deben de mantener unos parámatros de alcalinidad que estén entre los 2000 y 5000 mg $CaCO_3$/L para que no afecte al pH (Linville et al., 2016), además, se deben de mantener unos parámetros de control claros y rigurosos para optimizar los resultados.

2. Guía práctica para el estudio del potencial energético de la castaña.

2.1. Materiales.

Para la recolección de muestras los materiales a emplear serán:

- Cuaderno de campo
- Bolsa de tela estilo malla
- Papel Kraft

En el estudio de laboratorio se emplearán las siguientes herramientas:

- LECO TGA-601
- volador KARL FISCHER
- termobalanza METTLET TOLEDO HG53
- LECO S-144DR
- bomba LECO AC-300.

Disponibles como parte del servicio ofrecido por El Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (INCAR) con sede en la Corredoria-Oviedo (Asturias)

2.1.1. Fuentes y documentación.

La información recogida, inventarios, anuarios y bases de datos sobre las estimaciones en la producción y recogida de castaña estará recopilada dentro de las siguientes fuentes:

- Ministerio para la Transición Ecológica y para el Reto Demográfico.
- Gobierno del Principado de Asturias.
- Junta de Castilla y León.
- Inventario Forestal Nacional.
- Viver Castanea Corylus.
- Servicio Regional De Investigación Y Desarrollo Agroalimentario.
- Universidad de Oviedo.
- Consultas realizadas a Concesionarios castañeros, Instituciones involucradas en el desarrollo de la actividad castañera y empresarios castañeros en general

La valoración y aceptación de la información recopilada se realizará de modo riguroso según el origen de estos datos, siendo aportados a través de fuentes cuya fiabilidad esté contrastada.

2.1.2. Muestras.

El área de estudio pertenecerá al Principado de Asturias. La zona muestreada para la recolección de muestras, así como la información recabada para el estudio será proveniente de aquellas zonas que fuesen susceptibles de ser investigadas.

Recolección de muestras.

La zona escogida para la recolección de frutos deberá de poseer una población reseñable y caracterizable de castaño. Se propone diferenciar las muestras por cultivares para determinar, de forma más explícita, el material primario utilizado para la obtención de resultados.

2.1.3. Procesamiento de la información.

En función del apartado II, correspondiente a la “Revisión Bibliográfica”, donde se expone la información referente a la producción de castaña, ratios de productos y residuos, la disponibilidad de estos y los factores de conversión necesarios, se realizará

una síntesis de datos con la ayuda de la herramienta Microsoft Excel. Además, la ubicación de dicha información se hace de manera procesada mediante mapas temáticos realizados con la ayuda de QGIS.

2.2. Metodología.

2.2.1. Caracterización de la cadena de valor de la castaña.

Basando la identificación de los componentes de la cadena de valor en función de la adaptación descrita en la Figura 3, se caracterizará aquellos eslabones involucrados en la generación de residuos. Por un lado, la obtención de biomasa que será utilizada (biomasa potencial) así como aquella que plausiblemente podría ser usada con finalidades energéticas (biomasa posible).

Etapa	Tipo de residuo	Uso
Manejo cultural	Además de la cubierta o erizo: la hojarasca, ramillas o hierbas	Se retira al ambiente, sirve como sustrato.
Recolección	Castañas en mal estado, erizos y cáscara	Se retira al ambiente, sirve como sustrato. En ocasiones: recogido para investigación.
Transporte y procesamiento	Castañas en mal estado (Control de calidad) y cáscaras	Desechado o recogido para investigación.

Tabla 6. Tipificación del residuo producido según etapas de cadena de valor.

De este cuadro se deduce que la mayoría de los residuos que el aprovechamiento de la castaña pueda generar durante su cadena de valor suelen acabar sobre el propio suelo, generalmente.

En el caso del manejo cultural el residuo posee poco valor productivo dentro de las prácticas habituales, así como para aprovechamientos alternativos. Se podría presentar una excepción dentro del campo de la investigación, donde sí pueden suscitar cierto interés, al igual que en las siguientes etapas.

Por otro lado, en la recolección se pueden atisbar unas cantidades de generación de residuos considerables y potencialmente evaluables de cara a futuro. Es por ello que debería tratarse como una etapa clave. En esta práctica, se puede observar que la gran cantidad de residuo que se genera es depositada o dejada sobre el suelo y, del mismo modo, aunque en cantidades menores (que no por ello han de dejar de considerarse relevantes), se encuentra el transporte y procesamiento.

Es complejo definir que concepto ha de ser considerado como biomasa, pues, en algunos casos la determinación de valores o cantidades de residuo producidas serán

difíciles de evaluar. Es el caso de hojarascas, ramillas y hierbas. El caso de que las castañas hayan sido desechadas, será el propio productor el que determine una cantidad o factor aproximado sobre la realidad del residuo (fracción de generación de residuos).

A continuación, se propone un flujo de procesos para la identificación de los productos residuales finales.

Primera fase: Evaluar la disponibilidad de los residuos producidos en la cadena de valor.

Identificación de las existencias, mediante el estudio de los factores económicos principales: rendimientos, producción, superficies y los ratios o porcentajes de generación de residuos. Esta información estará recopilada a partir de los anuarios forestales aportados por la comunidad autónoma, así como de consultas realizadas a productores privados.

Segunda fase: Desarrollo gráfico de un flujo productivo.

Tras determinar los eslabones de la cadena de valor susceptibles de generar residuos, se desarrollarán ratios y valores de rendimiento para cada proceso.

Se contrastará la información procedente de consultas no estructuradas y la toma de datos productivos de la zona, de este modo, se podrá desarrollar un flujo de producción actualizado. Este flujograma estará dividido en varios eslabones, se proponen: manejo cultural, recolección, transporte y procesamiento (Tabla 7).

Tercera fase: Se usará el método por ratios RRP (ratio de residuos por unidad de producto producido). Con ello se pretende estimar la cantidad de biomasa.

Tras identificar las existencias de residuos por cada eslabón con los factores de generación y estudiando el uso de estos mismos, se determinará la biomasa que estará disponible, así como la potencialmente utilizable.

Usando datos de producción (t/año), superficie (ha) y rendimientos (t/ha) obtenidos a partir de las consultas realizadas, así como de inventarios oficiales, se usarán fórmulas para cada tipo de residuo (erizo y cáscara). Se tendrá en cuenta el valor por defecto de material residual que debe de permanecer sobre el suelo con el objetivo de conservar y abastecer de materia orgánica a este. Este dato fue propuesto por la FAO (2014) y es

del 25%, aunque este dato podría ser revisable al tratarse de residuos para la producción de bioenergía, luego sería motivo de discusión.

Las siguientes fórmulas son adaptaciones de un estudio realizado por Ramírez (2016) y donde los factores de generación de residuos serán estimaciones evaluadas y contrastadas, realizadas a partir de datos productivos aportados en fases anteriores:

Erizo:

$$RD = Producción \times FGR \times 0.75$$

Donde:

RD: Residuos disponibles (t)

Producción: Producción de castaña (t)

FGR: Factor de generación de residuos

0.75: siendo el 0.25 el valor de residuos dejados sobre el suelo según la FAO (2014)

Cáscara:

$$RD = Producción \times FGR$$

Donde:

RD: Residuos disponibles (t)

Producción: Producción de castaña (t)

FGR: Factor de generación de residuos

Para la determinación de una continuidad sostenida en el tiempo, se deberá de establecer una estimación o pronóstico en la producción de residuos para los años futuros. Este valor esta influenciado por distintas variables que afectan a la producción, por ello, se usará un promedio o media aritmética a partir de datos pasados procesados mediante la herramienta Excel.

Por último, se mostrará gráficamente mediante mapas la localización del material empleado durante el estudio. Esta representación se llevará a cabo usando el programa SIG, QGIS.

2.2.2. Muestreo.

Proceso de muestreo.

Tras haber identificado los tipos de residuos producidos dentro de la cadena de valor de la castaña (erizo y cáscara), se pretende establecer un protocolo o manual práctico para la obtención de la materia prima que será estudiada.

El muestreo se llevará a cabo dentro de una zona delimitada y concreta, preferiblemente aquella que pudiera pertenecer a una de las concesiones o entidades involucradas en el procesamiento y/o uso de la castaña.

Puesto que el material se trata de un biocombustible sólido, se propone adoptar los métodos de muestreo descritos en la norma española (UNE-EN ISO 18135:2018, 2018).

Compilación de las muestras.

Después de haber muestreado una cantidad suficiente o considerada como reseñable a juicio del grupo investigador. Se proponen unas muestras promedio de 60g[5] para cada uno de los tres grupos de muestras:

- Erizo (Muestra 1)
- Cáscara o capa externa (Muestra 2)
- Fruto o capa interna (Muestra 3)

Cada uno de ellos será depositado en una bolsa, preferiblemente hermética, y será etiquetada con al menos la siguiente información: Identificador, fecha y lugar de recogida.

2.2.3. Procesado de las muestras para laboratorio

Antes de realizar los ensayos, se propone pulverizar las distintas muestras con el fin de crear un producto molido como paso final a la preparación de la muestra antes del análisis químico. De este modo, se evita que contengan contaminantes y que los resultados sean estériles.

[5] El valor del peso de cada muestra puede venir referido o determinado por la cantidad mínima necesaria para la realización de los análisis de laboratorio. La cantidad propuesta se prevé suficiente para tal uso.

Cada grupo de muestras será diferenciado en bolsas distintas para ser sometidas a cada análisis:

- Análisis proximal o inmediato.
- Análisis elemental.
- Análisis del poder calorífico.

Análisis proximal o inmediato.

Según la Real Academia de Ingeniería, se define el análisis proximal como la "determinación, en una muestra de carbón, del contenido porcentual de humedad higroscópica, material volátil, cenizas y carbono fijo". Este análisis está compuesto por una serie de ensayos mediante los cuales se puede determinar estos valores, los cuales, pasan por una desecación de la muestra para la determinación de la Humedad, así como la calcinación de una muestra en hornos de mufla para la obtención de la Materia Volátil y Cenizas.

Actualmente el Instituto de Ciencia y Tecnología del Carbono (perteneciente al CSIC) dispone de una termobalanza o termogravímetro LECO TGA-601 para la realización del análisis inmediato, así como un volador KARL FISCHER y una termobalanza METTLET TOLEDO HG53 para la determinación porcentual de la humedad.

Análisis elemental.

Consiste en la determinación del contenido total de carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) presentes en una muestra.

Esta técnica se basa en la obtención de CO2, H2O y N2 mediante la completa oxidación de la muestra. Para ello se promueve la combustión con oxígeno puro a una temperatura que alcanza aproximadamente los 1000ºC.

El contenido en carbono, hidrógeno y nitrógeno se determinará en un analizador LECO CHN-2000 Macro, mientras que el azufre total se analizará con la ayuda de un equipo LECO S-144DR. Los niveles de oxígeno se calcularán en base a la diferencia.

Poder calorífico.

Ensayo realizado a través de calorímetros, los cuales, tienen el fin de medir las unidades de calor suministradas o recibidas por los cuerpos. De este modo, se obtiene el calor específico de un cuerpo, así como las cantidades de calor desprendidas y absorbidas por él.

En el procedimiento usado se dispone de una bomba GALLENKAMP, dos bombas semiautomáticas modelo IKA C4000 y tres bombas automáticas LECO AC-300.

2.2.4. Estimación de la energía producida.

Para la estimación de la energía producida a partir de los datos referentes a los residuos obtenidos, se hará uso de los valores derivados a partir del ensayo realizado con la ayuda de la bomba IKA C4000, la cual, según la norma ASTM E-711-87 aportará datos concluyentes sobre el valor energético (High heating value) del residuo en J/g.

Siguiendo las directrices de Álvarez-Álvarez et al. (2018), las muestras se empaquetarán herméticamente con una máquina de prensado para formar pellets que pesen entre 0,8 y 0,9 g. Estos pellets prensados ayudaran al ensayo estandarizando las muestras y optimizando la combustión de estas en el calorímetro. El recipiente de descomposición se llenará de oxígeno (99,995% de aire líquido) a una presión de 30 bar para producir una combustión completa. Además, también se sumergirá en agua para que la temperatura inicial de la muestra sea de 22 ºC. Cuando la combustión sea completa, la muestra de biomasa liberará una cantidad de calor que será medida con la diferencia de temperatura en el calorímetro. El dispositivo será calibrado con pellets de ácido benzoico.

Posteriormente, se podrá utilizar los resultados conseguidos en los ensayos dentro del trabajo “Evaluation of Tree Species for Biomass Energy Production in Northwest Spain” para comparar de manera objetiva los datos referentes al poder calorífico de las especies más representativas dentro del sector de la biomasa en Asturias.

2.2.5. Influencia de las características de la biomasa sobre su uso energético.

Los distintos residuos estudiaos (erizo, capa externa y capa interna) deberían de ser tratados como biomasa en base seca. Por tal razón, cabe proponer que deban ser aprovechados mediante el uso de procesos termoquímicos. La siguiente tabla ilustra la influencia directa que los componentes más importantes de la materia prima tendrán sobre el uso del procesado energético.

Componente	Modo de procesado energético
Cenizas	Un alto contenido de cenizas descartaría su quema directa.
Holocelulosa	Un alto contenido en holocelulosas puede recomendar una transformación a etanol o biogás
Humedad	Los altos contenido en humedad que pueda presentar disminuirá su poder calórico, luego podrían proponerse procesos de desecación forzada.
Nitrógeno y Azufre	Bajos contenidos en estos compuestos recomendará una quema directa (bajas emisiones).

Tabla 7. Influencia de los compuestos fisicoquímicos de la materia prima sobre el procesado energético.

La quema directa de estos residuos puede llevarse a cabo mediante densificados previos en forma de briquetas o pellets, aunque se estiman bajos rendimientos.

V. Resultados.

1. Proceso termoquímico

Transformación física.

El primer gran cambio notable tras someter la materia prima a estos tratamientos es el cambio de color. Este se oscurece desde el marrón característico de las capas externas a negro, pasando por un rango gradual según se incrementa la temperatura.

Los procesos de pirólisis y torrefactado tienen un efecto directo sobre la disminución eventual del peso del fruto. Esto es debido en gran parte a la disminución de humedad de las materias primas durante las primeas etapas de la aplicación de calor. A partir de aquí, se produce un efecto de descomposición de la estructura donde la una gran cantidad de celulosa, hemicelulosa y lignina es destruida a razón de un 50% (aproximadamente) de la total pérdida de peso. Este último componente es difícil de descomponer y se produce a lo largo de todo el tratamiento. Finalmente, se pueden obtener líneas gráficas que presentan un S invertida con la estabilización de peso a medida que se alcanza temperaturas próximas a los 900ºC. Se pueden concluir pérdidas de hasta el 70% en masa (Jiang et al., 2018), obteniendo como resultado productos sólidos del 30% (aproximadamente).

Tras ser sometidos a estos procesos, la cantidad de material volátil se ve disminuida a razón similar que el peso y, como consecuencia, las cantidades de cenizas aumentan de manera inversamente proporcional, llegando a presentar porcentajes en peso de entre el 2 y el 6% (Dyjakon & Noszczyk, 2020). Si bien es cierto que estos contenidos pueden ser menores en los procesos de torrefactado que en los pirolíticos, debido a las temperaturas aplicadas (a mayores temperaturas, mayor cantidad de sustancias no combustibles). Aun así, este aumento tan significativo es debido a la pérdida de peso en forma de materias volátiles liberadas.

Estructura química.

Desde el punto de vista del carbón activo (parte combustible del biocombustible) se atisba un aumento a medida que aumenta la temperatura. Esto es debido principalmente a la cantidad de carbono perdido tras la descomposición de las materias volátiles y a la reacción entre el material y los catalizadores utilizados (Tang & Bacon, 1964).

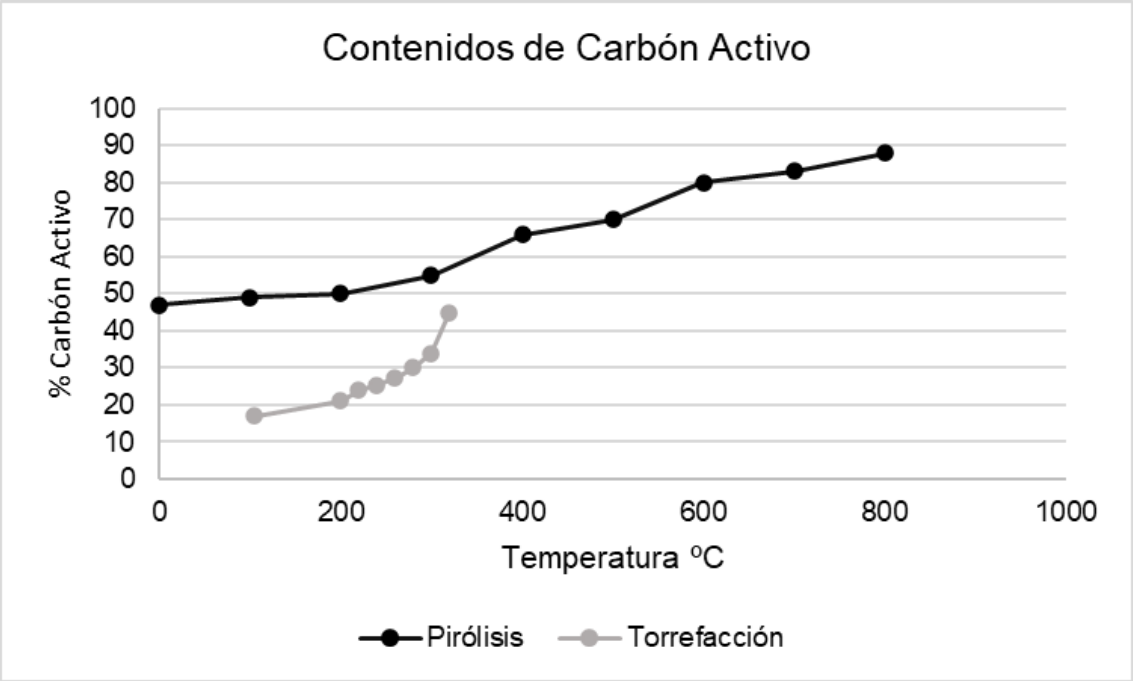

Gráfico 2. Comparativa de la evolución del contenido de Carbón Activo entre los procesos de torrefacción y pirolisis en funcion de las temperaturas aplicadas.

Como se observa en la gráfica 2, el aumento en función de la temperatura es más que evidente. Hay que reseñar que la gran diferencia entre valores, no solo corresponden a al contraste entre condiciones durante la realización de los procesos y los distintos pretratamientos realizados, si no que las composiciones fisicoquímicas de los materiales de origen difieren entre sí. No obstante, se pueden estimar aumentos en carbón activo de entre el 30 y el 40%.

2. **Proceso bioquímico.**

Bioetanol.

Transformación física.

El pretratamiento alcalino con soluciones de NaOH es fundamental para la obtención de contenidos glúcidos utilizados en la obtención de etanol. El solvente utilizado en el tratamiento previo debe de usarse a concentraciones adecuadas para que la recuperación de glucosa sea eficiente a partir de biomasa lignocelulósica (Lorenci Woiciechowski et al., 2020). Los experimentos fundamentales han demostrado que la concentración adecuada de NaOH para el pretratamiento del SNC está dentro del 2% (p/p) a temperatura ambiente (25ºC) (Lee et al., 2022). Además, se ha demostrado que la eficiencia de los pretratamientos dependerá del tipo de reactivo, la concentración y

las condiciones de la reacción (Kim et al., 2013). Luego es necesario la optimización estadística para sacar la máxima eficiencia.

Transformación química.

El uso de *S. cerevisiae*K35 presentó un consumo de una concentración de glucosa de 50g/L a las 9h y se determinó que la producción del grupo experimental llegó a aportar 25g/L de bioetanol a las 12h de fermentación, con unos rendimientos del 97.8% y se estima una producción de aproximadamente 155,0 g de bioetanol a partir de los 1000g hidrolizados de la cáscara de castaña pretratada.

Biometanol o biogás.

Transformación física.

Se ha demostrado que el uso de tratamientos hidrotermales combinados con los alcalinos ha mejorado significativamente la biodegradabilidad del sustrato (cáscara de castaña) hasta un 67%, gracias al uso de KOH y NaOH a unas concentraciones del 3%. En consecuencia, la reducción total del material volátil aumentó porcentajes que oscilaban entre el 45 y el 48% (p/p). Las fases alcalina e hidrotermal actuaron positivamente tanto en la deslignificación como en la polimerización de la hemicelulosa (Sun et al., 2014).

Transformación química.

Por otro lado, la optimización por medio del monitorio de demanda química de oxígeno, la demanda bioquímica de oxígeno, sólidos suspendidos, controles de pH (6.5~8.2) y temperatura (30~40ºC) es esencial para la obtención de un producto eficiente.

El biodigestor se alimenta durante 25 semanas y se opera en condiciones mesófilas. Con respecto a los valores de reducción de los sustratos volátiles fueron del 78%, 94% y 63%. Además, se obtuvieron altas tasas de producción de metano, entre 2500 y 4800 L CH_4/kg de demanda química de oxígeno.

3. Comparativa entre los poderes caloríficos obtenidos.

Autor	Materia prima	Pretratamiento	Método de aprovechamiento	Rendimiento (%)	Poder calorífico (MJ/Kg)
Jiang et al., 2018	Cáscara de castaña	Preoxidación catalítica con ácido sulfúrico y urea	Pirólisis	44.31	35.48
Dyjakon & Noszczyk, 2020	Castaña de indias	Secado	Torrefacción	44.70	26.50
Lee et al., 2022	Cáscara de castaña	Reducción en disoluciones de NaOH	Bioetanol	98.00	3.71
Martins et al., 2017	Cáscara de castaña	Ninguno	Biometanol o biogás	~65%	337.6[a]
Melgarejo et al., 2018	Carbón de primer nivel	Ninguno	-	-	~30

Tabla 8. Tabla de resultados obtenidos tras ciertos ensayos realizados dentro de las investigaciones revisadas. [a]: Estos valores deben de ser tratados bajo un factor de tiempo.

Producto	S (% en peso)	Cenizas (% en peso)
Biocarbón	0.21	3.76
Carbón de primer nivel	0~0.3	5.01~5.5

Tabla 9. Relación de concentraciones de S y cenizas entre carbón de primer nivel y biocarbón.

VI. Conclusiones y líneas futuras de trabajo

- Es necesario mostrar un uso más atractivo para el castaño. De este modo, industrias como la energética, podrían invertir en fomentar su producción con un impulso en cuanto a capital y recursos se refiere. De ser una propuesta favorable, supondría una revalorización de la especie considerable.

- En vista de los resultados obtenidos por parte de las investigaciones recopiladas se prevé un futuro prometedor para este nuevo horizonte productivo de la castaña. En definitiva, el biocarbón es un candidato prometedor para combustible

- Es posible que esta propuesta suponga una oportunidad para revitalizar la economía rural del entorno.

- Fomentar la reintroducción de bosques de castaño sobre el suelo rural asturiano podría suponer beneficioso de modo directo. Algunos ejemplos para estudiar son: refugio para ciertas especies animales que hoy día son objeto de conflicto (p.e.: *Canis lupus*), potencial real de estas plantaciones para desarrollar vida micológica, devolver un paisaje histórico al entorno rural asturiano, revalidar la presencia de una especie autóctona frente a otras especies que han colonizado de manera natural o artificial el monte de la región, etc.

- La poca robustez de la información referente a la producción y situación del uso de la especie demuestra un cierto desinterés por parte de la administración regional. Además, el paulatino descenso de la producción castañera en España pone de manifiesto el abandono de estos bosques. Esta propuesta presenta argumentos que permiten enfocar los esfuerzos necesarios para desarrollar políticas de sostenibilidad desde estos organismos.

En cuanto a las líneas futuras de trabajo, la no existencia de registros oficiales en cuanto a la producción de biomasa, así como la falta de datos contundentes, hace que la estimación del potencial energético de la región o de una zona concreta requiera conocer la disponibilidad y manejo de una información contrastada y veraz, así como de

métodos matemáticos o de cálculo capaces de evaluar con la máxima rigurosidad la realidad de ese entorno.

En primer lugar, se deberá concluir la cantidad de área forestal de castaño que es interesante para el estudio, además, es imprescindible valorar que sea realmente accesible para su manejo en la recogida del fruto. En este caso, es importante asegurar que las producciones sean adecuadas para la recogida de castaña, así como la de sus residuos.

Tras ello, es necesario realizar un estudio pormenorizado con estimaciones adecuadas en cuanto a productividad del sistema forestal castañero en aquellos concejos, municipios y/o regiones, así como áreas concretas, que sean de interés para la propuesta. Determinar la calidad de estación de una formación es fundamental para implantar planes de gestión sostenible de los recursos que esta proporcione. Generalmente esta determinación se lleva a cabo mediante el uso de índices de sitio, los cuales, expresan la máxima producción alcanzable por una especie en un lugar y tiempo determinados. Para ello, se debe analizar el componente físico en el cual se desenvuelve el bosque, el componente ambiental medio anual del entorno y el suelo sobre el cual se sustenta dicha producción, de este modo, será posible realizar patrones de desarrollo que aporten información suficiente para establecer ciclos productivos rentables. Así mismo, se podrán establecer las necesidades de mantenimiento para asegurar una productividad adecuada. Con toda esta información será posible predecir la fracción de biomasa accesible con la cual llevar a cabo cálculos aproximados de la energía potencialmente sustentable.

Por otro lado, contar con la información con la cual trabajan los productores involucrados en el tratamiento de la especie conformaría una base de datos fiable y robusta. Con lo cual, se llevarían a cabo entrevistas a la par que un estudio de los informes productivos que declaren dichos productores.

Del mismo modo, se puede plantear el cultivo energético de la castaña como una opción, si bien los datos productivos que se estiman puedan ser rentables y compatibles con los intereses socio-rurales.

Seguidamente, se debe debatir el modo de aprovechamiento, mecánico o manual, evaluando el impacto de estas prácticas sobre el entorno y teniendo siempre en cuenta el bienestar de las sinergias ecológicas que involucran a sistemas vegetales, de fauna y del suelo.

Sacar conclusiones dentro del balance propuesta-resultados traduciendo los servicios ecosistémicos que se proponen y la productividad final en valores económicos aproximados. En este apartado se valorará el carácter multifuncional del monte y la compatibilidad de este para albergar distintos tipos de aprovechamientos.

VII. Recomendaciones.

- Realizar un estudio técnico que ofrezca mostrar la viabilidad de la puesta en marcha, gestión y mantenimiento de plantas de biorrefinería y producción de biocombustibles basadas en los residuos propuestos.

- Se debería estimar, en lo posible, el impacto que supondría sobre el mercado esta nueva propuesta. Así, se discutiría la compatibilidad de los usos del fruto desde el punto de vista del consumidor final.

- Sería imperativo contar con la opinión y el apoyo de la sociedad económica rural del entorno involucrado en este estudio. Además, se propondría una oportunidad de involucrar una parte social que busca opciones viables y de futuro desde el punto de vista laboral.

- Evaluar las necesidades energéticas de la zona complementaría un argumento favorable para el uso energético de la castaña.

Bibliografía.

Alia, R., Garcia del Barrio, J. M., Iglesias, S., Mancha, J., Miguel, J., Nicolás, J., Pérez, F., & Sánchez de Ron, D. (2009). *Regiones de Procedencia de Especies Forestales en España*.

Bianco, F., Şenol, H., & Papirio, S. (2021). Enhanced lignocellulosic component removal and biomethane potential from chestnut shell by a combined hydrothermal–alkaline pretreatment. *Science of The Total Environment*, *762*, 144178. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144178

Caputo, A. C., Palumbo, M., Pelagagge, P. M., & Scacchia, F. (2005). Economics of biomass energy utilization in combustion and gasification plants: Effects of logistic variables. *Biomass and Bioenergy*, *28*(1), 35-51. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2004.04.009

Castells, X. E. (2005). *Tratamiento y valorización energética de residuos*. Díaz de Santos. https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=311897

Castells, X. E. (2012). *Reciclaje de residuos industriales: Residuos solidos urbanos y fangos de depuradora*. Ediciones Díaz de Santos.

Castroviejo, S. (2022). *Castanea Mill.* [Directorio pdf]. Flora Ibérica. http://www.floraiberica.es/floraiberica/texto/pdfs/02_041_02_Castanea.pdf

Contescu, C., Adhikari, S., Gallego, N., Evans, N., & Biss, B. (2018). Activated Carbons Derived from High-Temperature Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass. *C*, *4*(3), 51. https://doi.org/10.3390/c4030051

Cuenca Valera, B., & Majada Guijo, J. P. (2014). Producción y manejo de semillas y plantas forestales, Castanea Sativa. En *Naturaleza y Parques Nacionales: Vol. I* (pp. 274-493). ORGANISMO AUTÓNOMO PARQUES NACIONALES MINISTERIO DE AGRICULTURA, ALIMENTACIÓN Y MEDIO AMBIENTE. https://www.miteco.gob.es/es/parques-nacionales-

oapn/publicaciones/Semillas%20-%20Fichas%20de%20especies%20C-E_tcm30-100337.pdf

Dam, C. van. (2004). *Certificación forestal, equidad y participación*. 1-11.

de Lucas Herguedas, A. I., del Peso Taranco, C., Rodríguez García, E., & Prieto Paniagua, P. (2012). *Biomasa, Biocombustibles y Sostenibilidad*. Centro Tecnológico Agrario y Agroalimentario. ITAGRA.CT.

Dikshit, P. K., Jun, H.-B., & Kim, B. S. (2020). Biological conversion of lignin and its derivatives to fuels and chemicals. *Korean Journal of Chemical Engineering*, *37*(3), 387-401. https://doi.org/10.1007/s11814-019-0458-9

Dyjakon, A., & Noszczyk, T. (2020). Alternative Fuels from Forestry Biomass Residue: Torrefaction Process of Horse Chestnuts, Oak Acorns, and Spruce Cones. *Energies*, *13*(10), 2468. https://doi.org/10.3390/en13102468

Escalante Hernández, H., Orduz Prada, J., Zapata Lesmes, H. J., Cardona Ruiz, M. C., & Duarte Ortega, M. (2010). Muestreo y caracterización de la biomasa residual en Colombia. En *Atlas del potencial energético de la biomasa residual en Colombia.* (pp. 134-136). IDEAM.

FAO. (2014). RESIDUOS AGRÍCOLAS Y RESIDUOS GANADEROS. En *Manuales de Usuario BEFS RA* (Vol. 3). FAO.

Ley 3/2004, de 23 de noviembre, de montes y ordenación forestal., BOE-A-2005-393 (2004). https://www.boe.es/buscar/pdf/2005/BOE-A-2005-393-consolidado.pdf

González, J. (2013). *Usos de residuos de castaña de la industria alimentaria*. https://buleria.unileon.es/handle/10612/3098

He, Y.-C., Liu, F., Di, J.-H., Ding, Y., Gao, D.-Z., Zhang, D.-P., Tao, Z.-C., Chong, G.-G., Huang, M.-Z., & Ma, C.-L. (2016). Effective pretreatment of dilute NaOH-soaked chestnut shell with glycerol–HClO4–water media: Structural characterization, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation.

Bioprocess and Biosystems Engineering, *39*(4), 533-543. https://doi.org/10.1007/s00449-015-1535-z

UNE-EN ISO 18135:2018 Biocombustibles sólidos. Muestreo., ISO 18135:2018 (2018). https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0059669

Jiang, K., Cheng, C., Ran, M., Lu, Y., & Wu, Q. (2018). Preparation of a biochar with a high calorific value from chestnut shells. *New Carbon Materials*, *33*(2), 183-187. https://doi.org/10.1016/S1872-5805(18)60333-6

Jung, B. S., Lee, N.-K., Na, D. S., Yu, H. H., & Paik, H.-D. (2016). Comparative analysis of the antioxidant and anticancer activities of chestnut inner shell extracts prepared with various solvents. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, *96*(6), 2097-2102. https://doi.org/10.1002/jsfa.7324

Kapanji, K. K., Haigh, K. F., & Görgens, J. F. (2019). Techno-economic analysis of chemically catalysed lignocellulose biorefineries at a typical sugar mill: Sorbitol or glucaric acid and electricity co-production. *Bioresource Technology*, *289*, 121635. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121635

Kim, S. B., Lee, S. J., Lee, J. H., Jung, Y. R., Thapa, L. P., Kim, J. S., Um, Y., Park, C., & Kim, S. W. (2013). Pretreatment of rice straw with combined process using dilute sulfuric acid and aqueous ammonia. *Biotechnology for Biofuels*, *6*(1), 109. https://doi.org/10.1186/1754-6834-6-109

Kumar, V., Nanda, M., Joshi, H. C., Singh, A., Sharma, S., & Verma, M. (2018). Production of biodiesel and bioethanol using algal biomass harvested from fresh water river. *Renewable Energy*, *116*, 606-612. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.10.016

Lee, K. H., Lee, S. K., Lee, J., Kim, S., Kim, S. W., Park, C., & Yoo, H. Y. (2022). Energy-efficient glucose recovery from chestnut shell by optimization of NaOH pretreatment at room temperature and application to bioethanol production.

Environmental Research, *208*, 112710. https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.112710

Linville, J. L., Shen, Y., Schoene, R. P., Nguyen, M., Urgun-Demirtas, M., & Snyder, S. W. (2016). Impact of trace element additives on anaerobic digestion of sewage sludge with in-situ carbon dioxide sequestration. *Process Biochemistry*, *51*(9), 1283-1289. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2016.06.003

Lorenci Woiciechowski, A., Dalmas Neto, C. J., Porto de Souza Vandenberghe, L., de Carvalho Neto, D. P., Novak Sydney, A. C., Letti, L. A. J., Karp, S. G., Zevallos Torres, L. A., & Soccol, C. R. (2020). Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance - Conventional processing and recent advances. *Bioresource Technology*, *304*, 122848. https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122848

Maria, J., Leitão, A., & Martins, R. (2015). Tratamento anaeróbio do efluente da indústria de lacticínios usando um reactor UASB. *4ª Conferência Nacional sobre Ciência e Tecnologia*. https://bibliotecadigital.ipb.pt/handle/10198/16399

Martins, R., Boaventura, R., & Paulista, L. (2017). Treatment and Energy Valorisation of an Agro-Industrial Effluent in Upflow Anaerobic Sludge Reactor (UASB). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, *95*, 042045. https://doi.org/10.1088/1755-1315/95/4/042045

Maurelli, L., Ionata, E., La Cara, F., & Morana, A. (2013). Chestnut Shell as Unexploited Source of Fermentable Sugars: Effect of Different Pretreatment Methods on Enzymatic Saccharification. *Applied Biochemistry and Biotechnology*, *170*(5), 1104-1118. https://doi.org/10.1007/s12010-013-0264-5

Melgarejo, R. C. C., Huamayalli, J. G. P., Huerta, G. R. B., & Romero, L. L. H. (2018). Incremento del poder calorífico de los minerales de carbón antracita del departamento de Áncash mediante la técnica de flotación diferencial. *Aporte Santiaguino*, ág. 43-54. https://doi.org/10.32911/as.2018.v11.n1.455

MITECO. (2021). *Anuario de Estadística Forestal 2019*. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/aef2019_completo_estandar_tcm30-534526.pdf

MITECO. (2022). *MFE de máxima actualidad. Principado de Asturias*. Ministerio para la Transición Ecológica y para el Reto Demográfico. https://www.miteco.gob.es/es/cartografia-y-sig/ide/descargas/biodiversidad/mfe_Asturias.aspx

Niu, Y., Lv, Y., Lei, Y., Liu, S., Liang, Y., Wang, D., & Hui, S. (2019). Biomass torrefaction: Properties, applications, challenges, and economy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *115*, 109395. https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109395

Pereira-Lorenzo, S., Ramos-Cabrer, A. M., Díaz-Hernández, M. B., Ciordia-Ara, M., & Ríos-Mesa, D. (2006). Chemical composition of chestnut cultivars from Spain. *Scientia Horticulturae*, *107*(3), 306-314. https://doi.org/10.1016/j.scienta.2005.08.008

Riaza, J., Gibbins, J., & Chalmers, H. (2017). Ignition and combustion of single particles of coal and biomass. *Fuel*, *202*, 650-655. https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.04.011

Rodríguez, A. Á., García, C. P., & Díaz, M. B. F. (2013). *CARACTERIZACIÓN QUÍMICA DE BIOMASA Y SU RELACIÓN CON EL PODER CALORÍFICO*. 12.

Sánchez González, M., Calama, R., & Bonet, J. A. (2020). Aspectos Económicos de los Productos Forestales No Madereros en España. En *Los productos forestales no madereros en España: Del monte a la industria* (p. 372). Ciencia.

Sebastián Nogués, F., García Galindo, D., & Rezeau, A. (2010). *Energía de la Biomasa (volumen I)*. Universidad de Zaragoza.

Sivagurunathan, P., Kumar, G., Mudhoo, A., Rene, E. R., Saratale, G. D., Kobayashi, T., Xu, K., Kim, S.-H., & Kim, D.-H. (2017). Fermentative hydrogen production

using lignocellulose biomass: An overview of pre-treatment methods, inhibitor effects and detoxification experiences. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, *77*, 28-42. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.03.091

Sun, S., Cao, X., Sun, S., Xu, F., Song, X., Sun, R.-C., & Jones, G. L. (2014). Improving the enzymatic hydrolysis of thermo-mechanical fiber from Eucalyptus urophylla by a combination of hydrothermal pretreatment and alkali fractionation. *Biotechnology for Biofuels*, *7*(1), 116. https://doi.org/10.1186/s13068-014-0116-8

Tang, M. M., & Bacon, R. (1964). Carbonization of cellulose fibers—I. Low temperature pyrolysis. *Carbon*, *2*(3), 211-220. https://doi.org/10.1016/0008-6223(64)90035-1

Vieira, G. E. G., & Alexandre, G. P. (2014). Tratamento, caracterização e obtenção de bio-óleo combustível a partir da pirólise termocatalítica de lodo de esgoto doméstico – uma revisão. *Revista Liberato*, *15*(23), 51-64.

Wahlström, R. M., & Suurnäkki, A. (2015). Enzymatic hydrolysis of lignocellulosic polysaccharides in the presence of ionic liquids. *Green Chemistry*, *17*(2), 694-714. https://doi.org/10.1039/C4GC01649A