

FACULTAD CIENCIAS EXPERIMENTALES
GRADO EN CIENCIAS AMBIENTALES
TRABAJO DE FIN DE GRADO
CURSO 2022-2023



UNIVERSITAS
Miguel Hernández



CIENCIAS AMBIENTALES
FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

**VALORIZACIÓN
ENERGÉTICA DE
MATERIALES ORGÁNICOS.
ESTUDIO PRELIMINAR.**

Autora:

María Laguna Ballesteros

Tutoras:

María Belén Almendro Candel

Ana Pérez Gimeno

Departamento:

Agroquímica y Medio Ambiente

Área:

Ingeniería Química

COIR:

TFG.GCA.MBAC.MLB.230321

ÍNDICE

1. RESUMEN	2
2. INTRODUCCIÓN	4
2.1 ECONOMÍA CIRCULAR	5
2.2 JERARQUÍA DE LOS RESIDUOS.....	8
2.3 CRISIS ENERGÉTICA	9
2.4 VALORIZACIÓN ENERGÉTICA	10
2.4.1 PODER CALORÍFICO.....	12
3. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS	14
3.1 ANTECEDENTES	14
3.2 OBJETIVOS.....	15
4. MATERIALES Y MÉTODOS	16
4.1 MATERIALES Y RESIDUOS SELECCIONADOS	16
4.2 CALORÍMETRO	18
4.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	21
4.3.1 CALIBRACIÓN	21
4.3.2 MEDIDA DE MUESTRAS	22
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA	29
6.1 CONCLUSIÓN.....	29
6.2 PROYECCIÓN FUTURA.....	29
7. BIBLIOGRAFÍA	31

1. RESUMEN

La investigación realizada trata sobre los diferentes valores de poder calorífico de varios materiales, desde residuos forestales como restos de diferentes árboles como almendro, olivo o palmera, hasta otros elaborados mediante tratamientos, como el caso de compost de una Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR). Con esto, se persigue comparar la energía contenida que puede llegar a existir entre diferentes materiales y residuos, además de conocer cuál sería su aprovechamiento, tanto energético como funcional, para promover el principio de una economía circular y suavizar la crisis energética actual.

La técnica utilizada para la medición del poder calorífico ha sido mediante un calorímetro en el laboratorio, obteniendo así resultados y observando variaciones entre estos, alcanzando un valor de hasta 19941 kJ/kg las muestras de restos forestales, pero a su vez, solo 11462 kJ/kg la muestra de compost recogido de una EDAR.

Esto explica el papel tan importante que juega la materia orgánica que contienen estos materiales para la posterior obtención de energía renovable, siendo los restos de poda más energéticos que el compost, ya que se compone en su gran mayoría de esta.

Palabras clave: residuos, crisis energética, economía circular, valorización energética, poder calorífico.

ABSTRACT

The research carried out deals with the different calorific value of various materials, from forest residues such as the remains of different trees such as almond, olive or palm trees, to others produced through treatments, such as the case of compost from a WWTP. With this, the aim is to compare the contained energy that can exist between different materials and waste, in addition to knowing what its use would be, both energetic and functional, to promote the principle of a circular economy and soften the current energy crisis.

The technique used to measure the calorific value was by means of a calorimeter in the laboratory, thus obtaining results and observing variations between them, reaching a value of 19941 kJ/kg for the samples of forest residues, but only 11462 kJ/kg for the sample of compost collected from a WWTP.

This explains the important role played by the organic matter contained in these materials for the subsequent obtaining of renewable energy, pruning remains being more energetic than compost since they are made up mostly of it.

Keywords: waste, energy crisis, circular economy, energy recovery, calorific value.

2. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la cantidad de residuos que se genera es superior a la que el planeta puede permitirse soportar, lo que conlleva a un problema global cuyas consecuencias afectan directamente al medio ambiente.

Según los últimos datos publicados por el Instituto Nacional de Estadística (INE), la cantidad de residuos urbanos recogidos en España al año oscilaba entre los 129 y 138 millones de toneladas (INE, 2023). En el año 2020 se puede ver una clara disminución de hasta 27 millones de toneladas en comparación al año anterior, pasando de 133 a 106 millones de toneladas de residuos urbanos generados (figura 1), descenso posiblemente debido al confinamiento por el COVID19 que se decretó ese año.

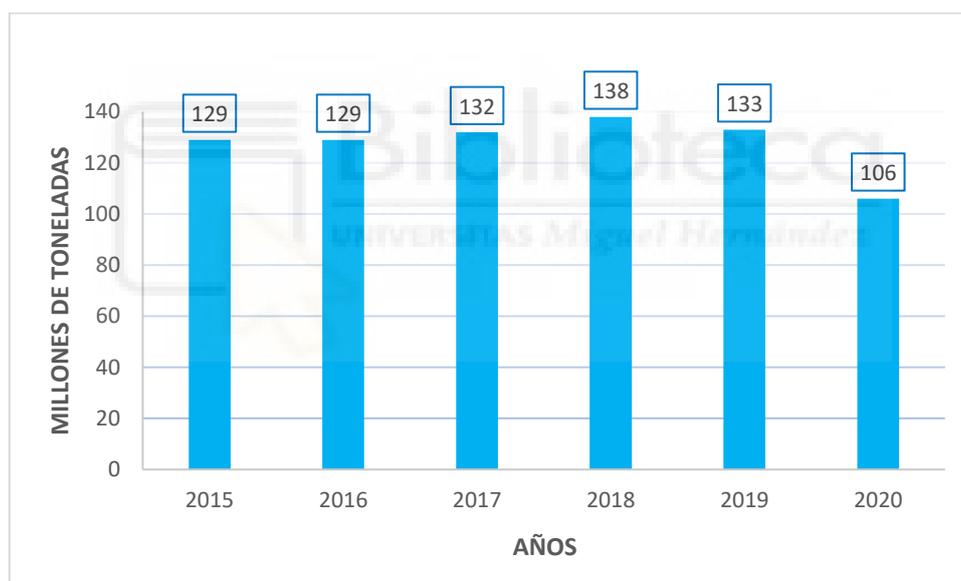


Figura 1. Cantidad de residuos urbanos recogidos en España de 2015 a 2020. [Fuente: Elaboración propia con datos del INE (INE,2023)]

Los problemas de generación de residuos, tanto sólidos como líquidos, contaminación ambiental, escasez de recursos y degradación de las condiciones ambientales son provocados, en gran medida, por la rápida expansión de las actividades industriales (Lahane & Kant, 2022).

Es por ello, por lo que para un correcto desarrollo sostenible se necesita abordar problemas, como la correcta gestión de todos los residuos generados, siendo obligatorio atender a los tres pilares fundamentales de este desarrollo sostenible: económico, social y ambiental.

2.1 ECONOMÍA CIRCULAR

Los efectos a corto y medio plazo del cambio climático pueden ser mitigados por una rápida transición energética. La transición hacia la economía circular requiere la implementación de innovaciones tecnológicas, organizativas y sociales, siendo estas una parte fundamental para impulsar el cambio necesario en los modelos de producción y consumo (Carballada, 2020). Cuando se combina con los principios de la economía circular, esta puede generar una serie de oportunidades de manera sostenible, especialmente en las ciudades de los países en desarrollo, donde la generación de desechos y la necesidad de energía están aumentando (Bellezoni *et al.*, 2022).

La economía circular se describe como un proceso en el que se optimiza el uso de los recursos y se fomenta la eficiencia de los sistemas productivos. Además, garantiza diversos movimientos como el crecimiento económico, el bienestar de la sociedad y la preservación del capital natural (Carballada, 2020).

La economía circular surge como una táctica para contrarrestar efectos negativos que se producen en el medio ambiente. Pretende sustituir el modelo lineal de producción convencional de "tomar, usar y desechar" por un modelo circular, con el objetivo de cerrar ciclos y devolver la mayor parte de los residuos a la etapa de producción, ya sea del mismo producto o de otro completamente diferente, producción propia o de terceros y, además, que sean ecológicos y de retorno a la naturaleza. Este modelo sugiere utilizar los principios de las 3R, es decir, reducir, reciclar y reutilizar, para lograr un equilibrio entre la economía y el medio ambiente utilizando la gestión de residuos, el reciclaje de sus residuos y el uso responsable de la energía (Solís-Muñoz & Cogollo-Flórez, 2021).

Las estrategias o metodologías están dirigidas principalmente a negocios, procesos y productos, por lo que asegurar la calidad de lo generado con sistemas de control y certificaciones actualizadas es estrictamente necesario (Barbaritano *et al.*, 2019), de este modo, se aseguran la confianza del cliente en el producto elaborado mediante economía circular y de tener este una sencilla introducción en el mercado.

En los últimos años, ha habido un aumento en el interés y las contribuciones de investigación sobre economía circular, siendo Italia, España y China los países que más han contribuido (Solís-Muñoz & Cogollo-Flórez, 2021). La conclusión es que la especie humana y la velocidad de crecimiento del sector urbanístico son la causa principal de este consumo excesivo de recursos, que excede lo que el planeta puede llegar a sostener, así como de la generación de más desechos de los que el medio ambiente puede manejar.

Numerosos estudios también destacan el valor de fomentar acciones circulares en las ciudades, pero no se encuentran estudios académicos que realmente muestren cómo se puede hacer esto o qué ventajas tiene para los distintos niveles de gobierno, algo que no motiva a la población a contribuir en el movimiento. Se ha demostrado también que existen muy pocos estudios sobre el uso de biomasa para energía, especialmente en la procedente de residuos de cultivos, que se benefician de los marcos de economía circular en ciudades que apuntan a una transición energética para combatir el cambio climático (Bellezoni *et al.*, 2022).

Se busca diseñar productos que no pierdan calidad a lo largo de su ciclo de vida y que sean sencillos de reciclar o reutilizar una vez cumplido su propósito. A los consumidores les resultará difícil cambiar y adaptarse si no son conscientes del medio ambiente (Solís-Muñoz & Cogollo-Flórez, 2021). Con la fabricación de productos de buena calidad se empieza a llamar la atención ciudadana para el consumo de estos, promoviendo así la economía circular y dejando atrás la antigua lineal, en la que, como se observa en la Figura 2, después del consumo termina su ciclo de vida sin ser aprovechada.

Es posible ampliar los modelos de economía circular ya existentes en las zonas urbanas, lo que podría resultar en una disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, se pueden desencadenar actuaciones positivas ambientales asociadas a la gestión de los residuos y beneficios económicos y sociales.

La incapacidad de adaptarse a este modelo se ve fomentada por una serie de factores, incluida la falta de conciencia y el conocimiento inadecuado, siendo la mejor manera de resolverlo el abordar este tema informando a las empresas de las ventajas de implementar esta economía circular.

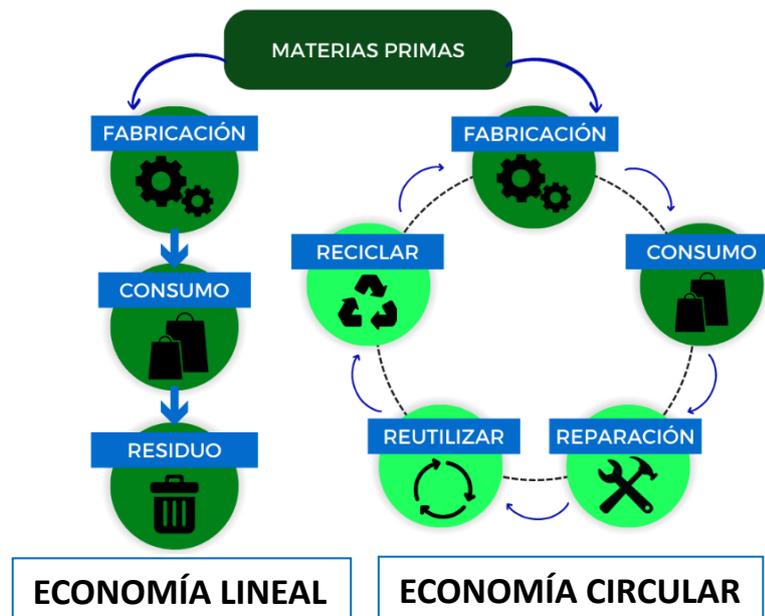


Figura 2. Esquema de las etapas de la economía lineal y circular [Fuente: Elaboración propia a partir de información de Teachers for the Future (2022)].

Las recientes actividades de fabricación en el entorno empresarial han dado lugar a una serie de preocupaciones sobre un desarrollo no sostenible que podría tener un efecto negativo en la sociedad y el funcionamiento del ecosistema. De este modo, para abordar estos problemas, las industrias deben adoptar soluciones creativas, positivas para el medio ambiente y de largo plazo. Como resultado, disminuye la producción de residuos en todo el ecosistema, se reduce la entrada de materiales necesarios para la fabricación y mejora la sostenibilidad ambiental en las organizaciones comerciales (Lahane & Kant, 2022).

Uno de los subproductos de los procesos urbanos es la biomasa, que puede reciclarse para producir energía en las zonas urbanas. Las alternativas simples de biomasa que son fácilmente accesibles podrían usarse para reemplazar los combustibles fósiles, como el carbón, y empujar la economía circular hacia una transición energética (Bellezoni *et al.*, 2022).

Las cadenas de suministro de las industrias manufactureras son operadas por la cadena de suministro circular utilizando los principios de la economía circular. Con ello se observa como, en lugar del enfoque convencional, la cadena de suministro circular ofrece una alternativa, teniendo consecuencias, como la comentada anteriormente, de que haya atraído esta mucha más atención de la comunidad de investigación (Lahane & Kant, 2022). Se necesita urgentemente un marco numérico sobre las prácticas de economía circular para ayudar a las personas encargadas en tomar la decisión en varias industrias, para así lograr los objetivos de sostenibilidad.

Por lo tanto, la cadena de suministro circular se considera una táctica de gestión de residuos para las entidades corporativas. De este modo, las empresas encargadas de la producción consiguen mejorar la eficiencia social y económica, el diseño y la competitividad de los productos, la escasez de recursos mediante la implementación de la cadena de suministro circular y reducen la contaminación y el uso de energía en el desarrollo (Lahane & Kant, 2022).

De todas las prácticas líderes de economía circular, las prácticas de iniciativa de gestión son las más cruciales. Las iniciativas gubernamentales, las prácticas empresariales y las iniciativas de gestión tienen un impacto significativo en la adopción de la gestión de la cadena de suministro circular en cerca del 50 % de los casos.

2.2 JERARQUÍA DE LOS RESIDUOS

La gran cantidad de residuos que se producen mundialmente son gestionados a través de una normativa vigente a cumplir. En España, hablamos de la Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.

El principal objetivo de esta ley es “reducir al mínimo los efectos negativos de la generación y gestión de los residuos en la salud humana y el medio ambiente” (Ley 7/2022), siendo también de principal importancia promover la economía circular para conseguir, en la mayoría de lo posible, el residuo cero, implementando costumbres sostenibles sobre los recursos.

En ella, además de la protección e importancia de la conservación del medio ambiente y marino, se habla de una jerarquía de residuos, a diferencia de la anterior Ley 11/2012, de 19 de diciembre, de medidas urgentes en materia de medio ambiente.

La jerarquía de residuos sigue un orden de prioridad, donde el 1 es la mejor opción, sosteniblemente hablando, y el 5 la peor (Figura 3). De este modo, el orden según la Ley 7/2022 sería el siguiente:

1. Prevención
2. Preparación para la reutilización
3. Reciclado
4. Otros tipos de valorización (incluida la valorización energética)
5. Eliminación



Figura 3. Pirámide jerarquía de los residuos. [Fuente: Elaboración propia]

Sin embargo, esta jerarquía siempre busca el mejor resultado ambiental general, por lo tanto, cuando sea necesario desviarse de ella para conseguir dicho resultado, se permite aplicar cambios en cuanto al orden de prioridad, siempre justificando el impacto de la generación y gestión de estos desechos a lo largo de un ciclo de vida, conforme a la Ley 7/2022, teniendo en cuenta los principios generales de precaución y sostenibilidad en el ámbito de la protección medioambiental, la viabilidad técnica y económica, la protección de los recursos, así como el conjunto de impactos medioambientales sobre la salud humana, económicos y sociales.

Este Trabajo de Fin de Grado se encuentra directamente relacionado con el cuarto orden de prioridad de la pirámide de la jerarquía de residuos “Otros tipos de valorización”, en concreto, con la valorización energética a partir de residuos sólidos.

2.3 CRISIS ENERGÉTICA

Además del COVID19, problema comentado anteriormente, la economía española se ha visto afectada también recientemente por otro suceso como es la guerra en Ucrania, perturbaciones que seguirán marcando el rumbo de la economía de nuestro país como mínimo durante los próximos años en materia de crecimiento (Torres & Fernández, 2022).

De este modo, es evidente que actualmente la crisis energética es una preocupación que se encuentra presente entre la población y con razón. A parte de la pandemia y la guerra, que persisten aún hoy en día, existen otros factores, como el rápido crecimiento de la población o la industrialización, que han explotado las fuentes de energía tradicionales usadas en España, por lo que ha sido estrictamente necesaria la búsqueda de alternativas de obtención de energía para satisfacer la demanda que cada vez es mayor.

Desde un punto de vista más estructural, puede ser un desafío identificar las tendencias globales en este entorno inquietante, pero no se puede negar que la crisis energética está forzando un cambio en el modelo productivo, que tendrá costes, pero a su vez presentará oportunidades para la economía española (Torres & Fernández, 2022).

La Unión Europea ha tomado medidas para ampliar sus fuentes de suministro de energía y promover la reducción de la dependencia que existe de fuentes de energía importadas, contribuyendo así a la disminución de la famosa crisis energética. Algunas de las medidas son (Kontek *et al.*, 2023):

- Buscar nuevas fuentes de energía (como la energía renovable y el gas natural licuado)
- Aumentar las capacidades de almacenamiento
- Invertir en interconectores u otra infraestructura

Por ello, en este Trabajo de Fin de Grado se pretende investigar el poder calorífico de diferentes materiales, con el objetivo de saber si es factible su valorización energética para promover la economía circular, es decir, utilizar materiales que, en caso de no darles uso, se convertirían en residuos, como nuevas alternativas para la obtención de energía.

De ahí que se analicen restos agrícolas y forestales, puesto que son muy abundantes, y en algunos casos sin otro tipo de uso, en los que comparando el poder calorífico de estos u otros materiales, se puede priorizar aquellos con mayor contenido de energía para una mayor eficiencia y desarrollo como alternativa energética.

2.4 VALORIZACIÓN ENERGÉTICA

La valorización energética se define como “aprovechamiento de los residuos como fuente de energía para algún proceso productivo, sin poner en peligro la salud humana y sin causar perjuicios al medio ambiente” (Castells, 2005).

Solo se puede valorizar energéticamente los residuos que no se haya podido evitar su generación, que no hayan podido ser reutilizados y tampoco reciclados. No se considera valorización energética la extracción de energía de un residuo si la finalidad del proceso es deshacerse del mismo.

Además, para que el aprovechamiento energético de un residuo se pueda calificar como valorización energética, el poder calorífico del residuo debe ser alto y debe haber sido recuperado mediante un proceso de alta eficiencia energética (Castells, 2005).

En cuanto a sus propiedades químicas es interesante caracterizar el contenido de humedad, la materia volátil, el carbono fijo y la fracción no combustible, es decir, cenizas, ya que cuanto menor sean la humedad y el contenido en cenizas, y, por tanto, mayor el contenido en materia orgánica, el poder calorífico de un material o residuo será mayor.

Uno de los materiales que se podría usar para valorizar energéticamente es la biomasa, que se define como “una fuente de energía renovable que se puede utilizar para producir productos de valor añadido, así como para satisfacer las crecientes necesidades energéticas del mundo” (Rodríguez-Romero *et al.*, 2022). En consecuencia, se cree que la biomasa juega un papel crucial en el desarrollo sostenible.

Por otro lado, el Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010) define la biomasa como “la fracción biodegradable de los productos, subproductos y residuos procedentes de la agricultura (incluidas las sustancias de origen vegetal y animal), de la silvicultura y de las industrias conexas, así como la fracción biodegradable de los residuos industriales y municipales”.

De este modo, la biomasa forestal residual puede interpretarse como la producida por los sistemas forestales a través de la gestión forestal sostenible en cualquiera de las situaciones enumeradas a continuación:

- Tratamientos que no supongan la corta de árboles (podas, olivaciones)
- Tratamientos intermedios o de mejora (claras y clareos)
- Tratamientos finales o corta final
- Tratamientos silvícolas sobre el suelo no aéreo (desbroces y descuajes sobre el matorral)

En esta definición se tiene en cuenta lo dispuesto en el Real Decreto 661/2007, de 25 de mayo, que regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial, en particular el Anexo II, que define la biomasa y el biogás que pueden tenerse en cuenta en el régimen especial de generación de energía eléctrica.

Así, en los procesos termoquímicos se utiliza el calor como fuente de transformación de la biomasa, jugando un papel importante la cantidad de oxígeno presente durante la transformación para la determinación del tipo de proceso que tiene lugar. Estos procesos se definen de la siguiente manera (Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino, 2010):

- **Combustión.** Se aplican altas temperaturas y una gran cantidad de oxígeno a la biomasa. Es una técnica comprobada para producir calor industrial, generar energía eléctrica y obtener calor en entornos domésticos.
- **Pirólisis.** Sin presencia de oxígeno, la biomasa se calienta a una temperatura de unos 500°C. Además, se obtienen combustibles líquidos que se asemejan a los hidrocarburos y se utiliza para obtener carbón vegetal.
- **Gasificación.** Para lograr una combustión completa, la biomasa se calienta a temperaturas extremadamente altas mientras se expone a una cantidad muy pequeña de oxígeno. Dependiendo de si en el proceso se usa oxígeno puro o aire, se produce: gasógeno, con el que se puede obtener electricidad y vapor, o gas de síntesis, que se podrá transformar en combustible líquido.

2.4.1 PODER CALORÍFICO

El poder calorífico se define como “la cantidad de calor que cede un kilogramo, o un metro cúbico, de combustible al oxidarse de forma completa. Se puede determinar con una bomba calorímetra o mediante cálculos teóricos si se conoce su composición elemental” (Castells, 2005). Encontramos así 2 tipos de poder calorífico donde, en ambos, todo el carbono debe oxidarse de forma completa a CO₂.

- Poder calorífico inferior (PCI)

Calor desprendido por unidad de combustible en una combustión completa, si en los productos el agua está en estado gaseoso, es decir, sin enfriar o condensar, lo que hace que ese calor no se aproveche porque una parte de este, generado en las oxidaciones, se utiliza para la evaporación del agua.

- Poder calorífico superior (PCS)

Calor generado cuando, en condiciones de referencia, se quema completamente una unidad de combustible, quedando el agua de los productos en estado líquido, de forma que se aprovecha todo el calor de oxidación de los componentes del combustible. El vapor de agua contenido en los gases de combustión condensa.

De este modo, el poder calorífico que se mide mediante el calorímetro en este Trabajo de Fin de Grado es el poder calorífico superior, ya que incluye el calor liberado durante la condensación del vapor de agua, tanto el generado durante la combustión como el que ya estaba presente en el material cuyo poder calorífico se quiere medir.

Brevemente, el funcionamiento del calorímetro se basa en quemar una muestra en atmósfera de oxígeno, de manera que la muestra se oxida de manera completa y la energía que se desprende hace que aumente la temperatura de una cantidad conocida de agua. Sabiendo la cantidad de agua y los grados centígrados que ha aumentado la temperatura, podemos conocer la energía desprendida por el material, que, dividida por la cantidad de material que hemos quemado, proporciona el poder calorífico superior.

Además de los métodos experimentales, existen diferentes modelos matemáticos para predecir el poder calorífico, tanto inferior como superior, a partir de su análisis. Por ejemplo, en un estudio comparativo de modelos matemáticos lineales (Rodríguez-Romero *et al.* 2022) realizado a partir de restos agrícolas, los hallazgos demuestran que el mejor modelo es aquel que solo toma en cuenta el contenido de materia volátil y carbono fijo, así como una débil dependencia indirecta del contenido de cenizas. En la investigación se observa que el contenido de cenizas puede sobrestimar o subestimar significativamente el poder calorífico cuando se le da un peso alto al correlacionar los dos. Esto se debe a que el contenido de cenizas no solo depende de la composición de la biomasa o de las condiciones en las que se cultivó, sino también de varios aspectos de cómo se manejó, almacenó y transportó esa biomasa. Por lo tanto, se recomienda asumir una dependencia débil de este factor, porque es muy variable y tiene un impacto significativo en la estimación del poder calorífico.

3. ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

3.1 ANTECEDENTES

Los materiales agrícolas y forestales son abundantes y de fácil disponibilidad en prácticamente todo el mundo. Esto genera un gran problema para el medio ambiente puesto que, al generarse en grandes cantidades, un mal uso como es la quema controlada, libera en exceso gases de efecto invernadero y contaminantes a la atmósfera. Sin embargo, estos materiales se pueden utilizar para la producción de energía, contribuyendo así a una buena gestión de los residuos y al adelanto del futuro cambio en el uso de combustibles fósiles hacia energías renovables y limpias.

De este modo, la urgente reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero es el principal motivo por el que es importante tomar acción frente a la incompleta gestión de los residuos sólidos y la escasa participación de energías renovables en las fuentes de energía (Valdivia-Espinoza & Guardia-Muguruza, 2023).

Es por ello, por lo que el uso de restos de poda es una fuente importante de energía renovable, pudiendo conseguir con esta una disminución de la dependencia de los limitados combustibles fósiles y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, al convertir estos desechos en bioenergía o biocombustibles.

Según investigaciones realizadas, la obtención de energía mediante biomasa es el método que ocupa el tercer lugar como fuente de energía renovable más comercializada. Las tecnologías modernas permiten la conversión de esta biomasa en biocombustibles sólidos (briquetas, pélets combustible), gaseosos (biogás, hidrógeno renovable) y líquidos (bioetanol, biodiésel) (Rodríguez-Romero *et al.*, 2022).

Además de como fuente de energía renovable, los residuos orgánicos tienen diferentes funciones, como su uso para calefacción o cocina usando la leña para generar el fuego, como cobijo para animales, como cubierta del suelo para mantener la humedad, temperatura y el crecimiento de malas hierbas, y la creación, a partir de estos, de compost para mejorar la fertilidad del suelo.

De este modo, se ha demostrado que el buen uso de estos residuos orgánicos genera beneficios como:

- **Generación de puestos de trabajo:** Para conseguir generar energía a partir de estos residuos es necesario, en primer lugar, recolectarlos y transportarlos, de manera que se produzca el procesamiento para la final generación de esa energía, procesos que necesitan de trabajadores para llevarse a cabo.
- **Reducción de contaminantes expulsados a la atmósfera:** A pesar de usarse también la combustión en el proceso de producción de energía, liberándose igualmente CO₂ con la quema, en comparación con los tradicionales combustibles fósiles encontramos una disminución de contaminantes expulsados, además de una energía más limpia como resultado.
- **Gestión ambiental sostenible:** Los residuos forestales destacan por ser excesivamente abundantes, por lo que, en caso de no aprovecharse, se destina gran cantidad de recursos para su eliminación. Además, una gestión incontrolada de estos residuos desencadena problemas, como incendios forestales descontrolados, afectando a la calidad del aire, suelo y agua cercanos.

3.2 OBJETIVOS

El objetivo general de este Trabajo de Fin de Grado es determinar el poder calorífico de diferentes materiales y residuos orgánicos en el laboratorio, como paso previo a su posible valorización energética.

Además de objetivos más específicos como analizar la posible existencia de una correlación entre el poder calorífico y el contenido de materia orgánica total de las muestras ensayadas.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1 MATERIALES Y RESIDUOS SELECCIONADOS

Para la realización de este Trabajo de Fin de Grado se seleccionaron los siguientes materiales y residuos:

- Paja de cereal
- Poda de olivo (*Olea europaea L.*)
- Acículas de pino (*Pinus halepensis*)
- Piel de granada (*Punica granatum L.*)
- Poda de almendro (*Prunus dulcis*)
- Poda de vid (*Vitis vinifera*)
- Poda de hoja de palmera (*Phoenix dactylifera L.*)
- Compost comercial
- Compost de lodo de depuradora

En cuanto a la procedencia y composición de los materiales utilizados:

- Las muestras de restos de poda y cosechas se recogieron de zonas agrícolas cercanas a Elche.
- Las acículas de pino se recogieron de la superficie del suelo de una zona forestal.
- El compost de lodo procede de la Estación Depuradora de Aguas Residuales (EDAR) de Aspe.
- El compost comercial se compone de turba, perlita, agrosil, cal y nutrientes.

Todas las muestras se secaron al aire en el interior del invernadero del Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente y fueron trituradas y tamizadas a 2 mm.

A continuación, se muestran dichas muestras mediante imágenes (Figura 4 y 5):

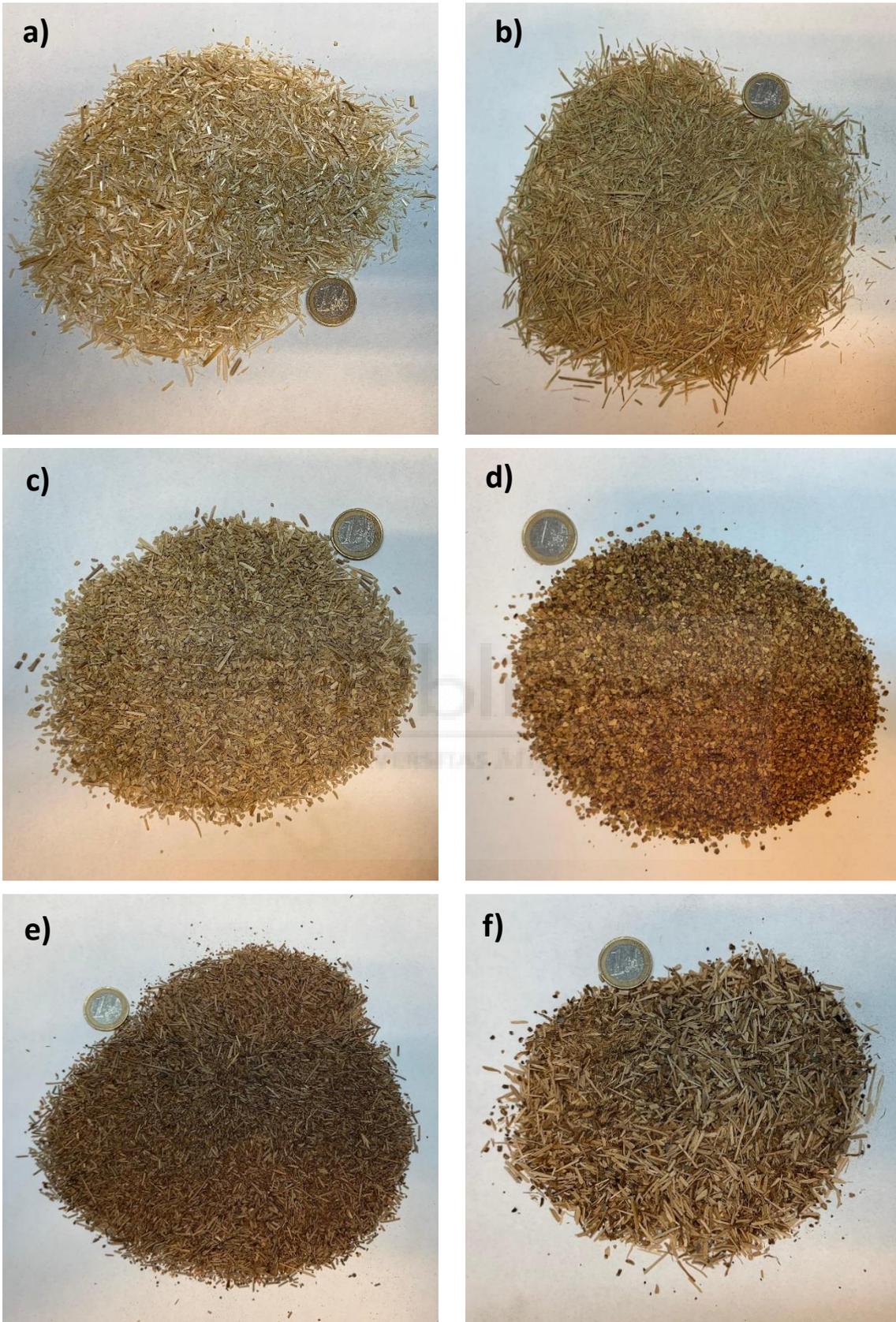


Figura 4. Muestras analizadas (a: pino, b: paja, c: olivo, d: granada, e: palmera, f: almendro)

[Fuente: Elaboración propia]



Figura 5. Muestras analizadas (g: sarmiento, h: compost comercial, i: compost EDAR)

[Fuente: Elaboración propia]

4.2 CALORÍMETRO

La parte fundamental del estudio ha sido el calorímetro empleado para la determinación del poder calorífico de las muestras anteriores. Se trata así del Calorímetro C 200 de IKA, equipo que cuenta con diferentes accesorios externos que son imprescindibles para el correcto análisis de las muestras. Está compuesto de manera externa por:

Parte delantera (Figura 6, donde se indican los componentes con la misma numeración que a continuación):

1. Tapa de celda de medición manual
2. Tubo de llenado del depósito
3. Pantalla
4. Teclado
5. Indicador del nivel de llenado, marcando el máximo y el mínimo permitido

Parte trasera:

- Vaciado de emergencia de la caldera interna
- Vaciado del depósito
- Vaciado de la caldera interna

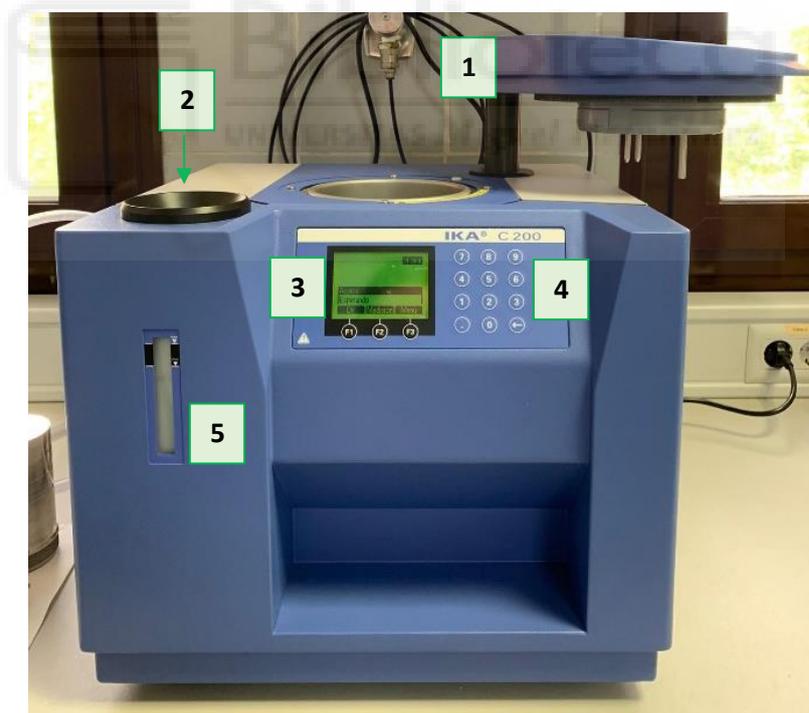


Figura 6. Parte delantera del calorímetro utilizado. [Fuente: Elaboración propia]

Los accesorios externos que necesita este equipo (Figura 7) son:

- Recipiente de disgregación estándar C5010
 1. Tuerca de racor
 2. Válvula de oxígeno
 3. Tapa del recipiente de disgregación
 4. Crisol
 5. Soporte del crisol
 6. Alambre de ignición
- Adaptador de encendido
- Matraz graduado de 2000 ml
- Fibra de algodón alargada de 50 julios de poder calorífico
- Ácido benzoico en tabletas
- Estación de oxígeno conectado a la botella de oxígeno de 50 litros
- Válvula de reducción de presión de oxígeno
- Botón de desaireación



Figura 7. Accesorios externos del calorímetro. [Fuente: Elaboración propia]

4.3 DESARROLLO EXPERIMENTAL

Para la determinación del poder calorífico superior en el calorímetro se producen combustiones en circunstancias completas. En el recipiente de disgregación se agrega una muestra de combustible previamente pesada, se combustiona, y se mide el aumento de temperatura que registra el agua en el calorímetro, como se explica en la guía de Calorímetro C200 IKA (IKA, 2021).

El recipiente de disgregación se llena con oxígeno puro al 99,95 % para optimizar el proceso de combustión, de manera que la presión de oxígeno en su interior es de 30 bar.

De este modo, para obtener el poder calorífico superior se deben cumplir las normativas vigentes que parten de los siguientes supuestos (IKA, 2021):

- La temperatura del combustible y la de sus productos de combustión es de 25 °C.
- El agua contenida en el combustible antes de la combustión y el agua que se forma al quemar los compuestos hidrogenados del combustible deben permanecer en estado líquido después de la combustión.
- No se produce oxidación del nitrógeno del aire.
- Los productos gaseosos que hay después de la combustión son oxígeno, nitrógeno, dióxido de carbono y dióxido de azufre.
- Pueden formarse sustancias sólidas, como cenizas (suceso que pudimos comprobar).

4.3.1 CALIBRACIÓN

Para poder llevar a cabo mediciones precisas es necesario calibrar el calorímetro. Esto se logra quemando ácido benzoico en formato de tabletas certificadas con un poder calorífico bruto superior conocido (el procedimiento es similar al de las muestras y se explica en el apartado siguiente). Así, la capacidad calorífica del sistema se calcula a partir de la cantidad de calor necesario para elevar la temperatura del agua contenida en el calorímetro en 1 Kelvin. Se realizan varias réplicas de calibración usando la tableta de ácido benzoico hasta conseguir un mínimo de 3 ensayos con datos concordantes, introduciendo la media de dichos datos en el calorímetro como la capacidad térmica.

El sistema debe calibrarse cada día que se vaya a realizar análisis de muestras para conseguir el resultado más preciso posible.

Otro factor a tener en cuenta para obtener un buen resultado es asegurarse de que la calibración y los ensayos posteriores se realizan en las mismas condiciones. Así, conforme indica el manual de instrucciones del calorímetro C200 IKA (IKA, 2021), un buen uso de este aparato exige una serie de condiciones como:

- Una temperatura ambiente del laboratorio que oscile entre 20 °C y 25 °C
- Una temperatura del agua que oscile entre 18°C y 25 °C con una precisión de $\pm 1^\circ\text{C}$
- 2 litros de agua mineral natural

4.3.2 MEDIDA DE MUESTRAS

Con todos los componentes nombrados anteriormente, tanto muestras como accesorios externos, se puede empezar ya el análisis para la obtención del poder calorífico de los diferentes materiales, siendo este procedimiento similar al de calibración, utilizando la muestra a analizar en lugar del patrón de ácido benzoico. De este modo, habiendo realizado en primer lugar la calibración del equipo, comenzamos con el análisis.

El procedimiento, comienza creando con la ayuda de las pinzas un nudo en medio del alambre de ignición con la fibra de algodón con un poder calorífico superior conocido de 50 julios, de manera que queden 2 tiras de igual longitud. Continuamos pesando el crisol, tarándolo, e introduciendo la cantidad de muestra necesaria en cada caso (siempre sin superar la marca de máximo que tiene grabada el crisol). Seguidamente, colocamos el crisol en su soporte y con ayuda de unas pinzas insertamos la fibra de algodón en su interior. Es importante que la fibra esté en contacto en todo momento con la muestra, o en el caso de la calibración, con la pastilla de ácido benzoico, ya que, es el hilo lo que va a arder y encenderá de este modo el contenido del crisol durante el proceso de combustión.

Una vez en contacto (Figura 8), tapamos el recipiente de disgregación asegurándolo con la tuerca de racor e introduciendo oxígeno con la estación instalada. Por último, lo introducimos en el calorímetro de manera que al cerrar cree contacto por inducción. Solo quedaría llenar la bomba de agua mineral natural y empezaría el proceso.



Figura 8. Recipiente de disgregación con el ácido benzoico en contacto con la fibra de algodón preparado para el análisis [Fuente: Elaboración propia]

La muestra se quema y emite calor por la reacción de combustión, calor que se transmite al agua del recipiente. Debido a esa transferencia el agua aumenta su temperatura, siendo este un dato numérico que nos proporciona el calorímetro y que debemos controlar que sea igual en calibraciones y ensayos. Por último, debido a ese aumento en la temperatura y como es necesario partir de las mismas condiciones en todos los ensayos, se cambia el agua.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En cuanto a los resultados, en la tabla que se muestra a continuación (Tabla 1) se plasma el poder calorífico superior obtenido mediante el calorímetro en el laboratorio de cada muestra (media de los ensayos realizados), con su correspondiente desviación estándar en cada caso.

Tabla 1. Valor medio y desviación estándar del poder calorífico superior de las muestras analizadas, en kJ/kg [Fuente: Elaboración propia].

MUESTRAS	PODER CALORÍFICO SUPERIOR (kJ/kg)	DESVIACIÓN ESTANDAR
PINO	19870	209
PAJA DE CEREAL	18062	51
OLIVO	19511	131
GRANADA	16170	94
PALMERA	18479	85
ALMENDRO	18640	103
SARMIENTO	17852	56
COMPOST COMERCIAL	16912	152
COMPOST EDAR	11668	269

De manera general, podrían dividirse en 2 grupos, los residuos agrícolas/forestales, en los que se encuentran la paja de cereal, poda de olivo, acículas de pino, piel de granada, poda de almendro, poda de vid (sarmiento) y hoja de palmera, y, por otro lado, el compost, tanto el comercial como el procedente de una EDAR.

Con el poder calorífico medio de cada muestra (Tabla 1) obtenido tras realizar varias réplicas de cada muestra, se ha realizado la Figura 8 donde se representa este mediante un gráfico de barras.

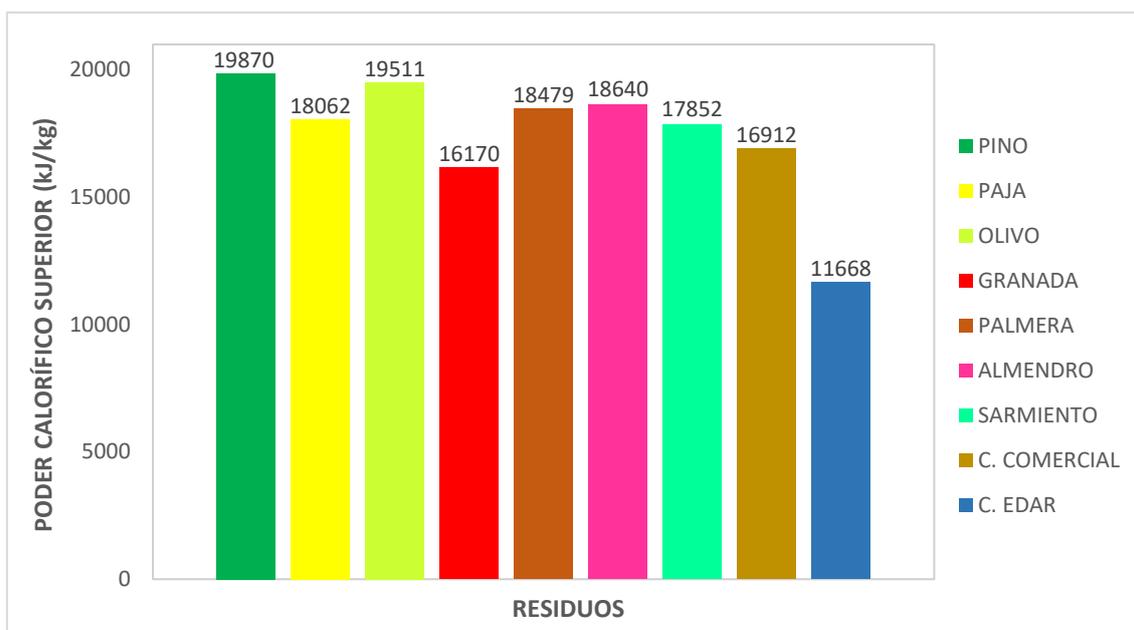


Figura 9. Representación del poder calorífico superior de cada material analizado.

De este modo, como se puede observar en la gráfica (Figura 8), el material que mayor poder calorífico presenta es la aguja de pino seguida de la poda de olivo, con un valor medio de 19870 y 19511 kJ/kg respectivamente, por el contrario, el que tiene el poder calorífico más bajo es el compost de la EDAR con un valor medio de 11668 kJ/kg. Este suceso se debe principalmente a las diferencias en la composición de cada material.

Así, en cuanto a la composición, la mayor responsable de esa diferencia en el poder calorífico es la cantidad de materia orgánica, la cual conocemos gracias a estudios previos con estos mismos materiales realizados en el Departamento de Agroquímica y Medio Ambiente. En dichos estudios (Rodríguez-Espinosa *et al.*, 2021, 2023) la materia orgánica y el contenido en cenizas se determinaron mediante la calcinación de las muestras en el horno Mufla a 450°C, siguiendo lo indicado en la norma UNE-EN13039 (AENOR, 2001).

Como se observa en la Figura 10 y en la Tabla 2, la materia orgánica se encuentra notablemente en menor cantidad en el compost de la EDAR, que corresponde con el material analizado con el poder calorífico más bajo. Sin embargo, el resto de los materiales se encuentran agrupados aproximadamente en un rango alto, entre el 87 y 95%. Además, encontramos una buena correlación con un R^2 de 0,8498.

Tabla 2. Porcentaje de materia orgánica total de cada muestra con su poder calorífico (kJ/kg)

[Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en este TFG y de las referencias

Rodríguez-Espinosa et al., 2021,2023]

MUESTRA	PODER CALORÍFICO SUPERIOR (kJ/kg)	MATERIA ORGÁNICA (%)
PINO	19870	91,9
PAJA	18062	95,0
OLIVO	19511	94,1
GRANADA	16170	87,5
PALMERA	18479	90,9
ALMENDRO	18640	93,2
SARMIENTO	17852	94,0
COMPOST COMERCIAL	16912	91,0
COMPOST EDAR	11668	59,0

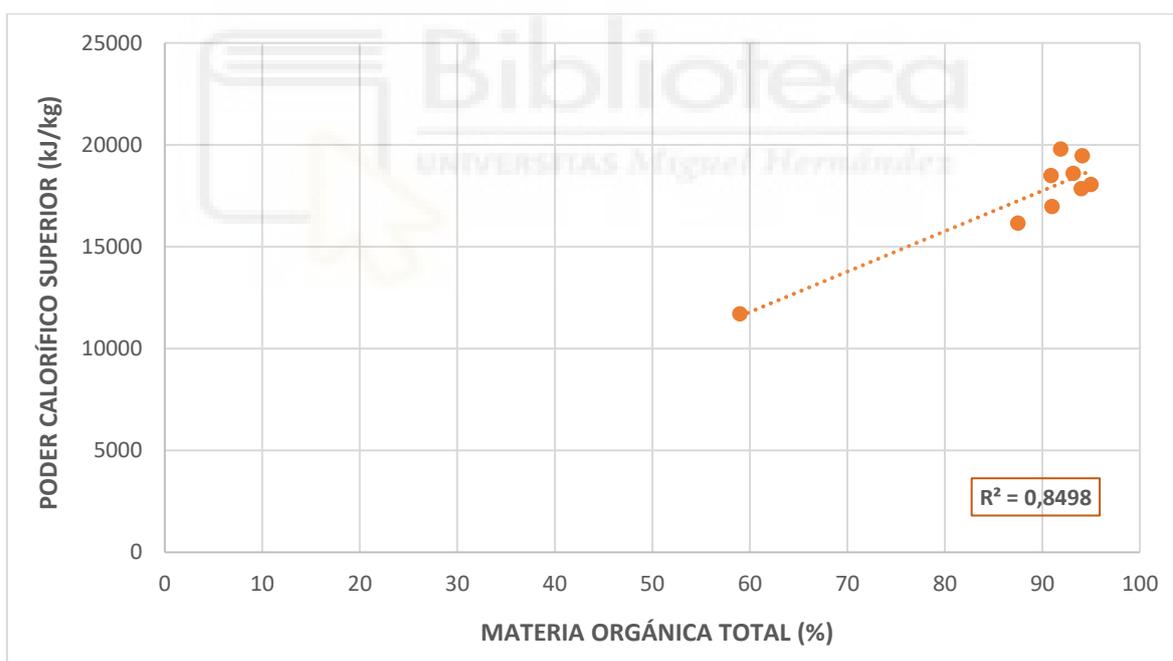


Figura 10. Correlación de materia orgánica total y poder calorífico superior de cada muestra

analizada. [Fuente: Elaboración propia a partir de los datos obtenidos en este TFG y de las

referencias Rodríguez-Espinosa et al., 2021, 2023]

Se observa también una diferencia numérica notable entre el poder calorífico del compost producido en una estación depuradora de aguas residuales (EDAR) y el compost comercial. Esto, es debido principalmente a su composición y método de producción, ya que el compost de la EDAR se compone principalmente de materia orgánica extraída de los desechos de diferentes tratamientos por los que pasa el agua a tratar, y el compost comercial, sin embargo, suele tratarse de una mezcla de restos orgánicos y agrícolas producido en plantas específicas de compostaje, de ahí que el poder calorífico del compost comercial se asemeje más a los de restos de poda.

En cuanto a los restos forestales, vemos que no existen diferencias numéricas exageradas, encontrando entre todos estos tipos de residuos una media de 18500 kJ/kg, siendo el mayor valor de *Pinus halepensis* con 19870 kJ/kg y el menor de *Punica granatum L.* con 16170 kJ/kg. Siguiendo un orden de mayor poder calorífico superior a menor nos encontraríamos:

1. Acículas de pino (19870 kJ/kg)
2. Poda de olivo (19511 kJ/kg)
3. Poda de almendro (18640 kJ/kg)
4. Poda de hojas de palmera (18479 kJ/kg)
5. Paja de cereal (18062 kJ/kg)
6. Poda de vid (17852 kJ/kg)
7. Compost comercial (16912 kJ/kg)
8. Piel de granada (16170 kJ/kg)
9. Compost de lodo de EDAR (11668 kJ/kg)

Gracias a un estudio realizado (Martínez-Pérez et al., 2012) podemos comparar el poder calorífico de los restos de poda de especies de árboles frutales, comprobando que el poder calorífico es prácticamente similar, siendo de 16728 kJ/kg en *Malus domestica* (comúnmente el manzano) y de 16021 kJ/kg en *Annona cherimola* (comúnmente el chirimoyo), coincidiendo aproximadamente con nuestra muestra analizada de *Punica granatum L.* (comúnmente el granado) con un poder calorífico de 16170 kJ/kg.

Por otra parte, cabe destacar que los combustibles más utilizados habitualmente, que son el gasóleo, gas butano, gas propano y gas natural, cuentan con un poder calorífico superior bastante mayor al de todas las muestras que hemos analizado, siendo su valor aproximado de 39200 kJ/kg, 49600 kJ/kg, 50300 kJ/kg y 43100 kJ/kg respectivamente, según viene dado por el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2010).

Esto supone que el contenido energético de los combustibles habituales es bastante mayor que el de las muestras analizadas, de manera que con el combustible con menor contenido energético (gasóleo 39200 kJ/kg) tiene un poder calorífico superior casi el doble que las acículas de pino (19870 kJ/kg), que es la muestra analizada con mayor poder calorífico superior.

A pesar de que el contenido energético sea menor, y teniendo en cuenta la situación de la crisis energética en la que estamos, en zonas donde hay abundancia de estos materiales se podrían utilizar para la obtención de energía, como alternativa a los combustibles tradicionales.

Muchas veces a estos materiales se les da otros usos, entre los cuales se encuentra el aprovechamiento de la materia orgánica que contienen para mejorar el rendimiento de los cultivos o mejorar las propiedades y calidad del suelo.

Por ejemplo, en un estudio realizado (Castro *et al.*, 2009) donde se realiza una plantación en la que se aplica lodos de depuradora secados al aire y compost de desechos sólidos municipales, el mayor rendimiento en cuanto al crecimiento de la planta se observó en los lodos extraídos de la EDAR. Además, en estas parcelas se produjo un aumento de la materia orgánica y de microorganismos en comparación a las del otro compost que, a pesar de contener también materia orgánica en los inicios, es en menor proporción que los lodos de depuradora.

Sin embargo, otro estudio (Hueso *et al.*, 2018) demostró que, si nos centramos en la calidad del suelo, el método anterior con mayor rendimiento no sería útil para mejorarlo. Se expuso a suelos reforestados y enmendados a diferentes situaciones: con acolchado de astillas de pino carrasco, con restos de paja, lodos de depuradora y estiércol de origen vacuno. Tras años de su aplicación, solamente han supuesto un aumento significativo de los valores de carbono orgánico del suelo los suelos acolchados con paja y pino, dándose este suceso debido al incremento de la actividad microbiana que favorece el aumento de la estabilidad media de los agregados.

Pero la Ley 7/2022 permite, en determinadas circunstancias, cambiar el orden de prioridad en la jerarquía de residuos cuando el resultado final es mejor desde el punto de vista ambiental. Teniendo en cuenta la cantidad de restos agrícolas y forestales que se generan en algunas zonas y épocas del año, no es descartable su uso para la obtención de energía, por lo menos en las épocas en que hay abundancia del material, solucionando así el problema de qué hacer con esa gran cantidad de material que se convertirá en residuo si no se le da uso, al aprovechar la energía que contiene.

6. CONCLUSIONES Y PROYECCIÓN FUTURA

6.1 CONCLUSIÓN

Los resultados obtenidos en el laboratorio mediante el uso del calorímetro demostraron que, dependiendo de la composición o producción de los diferentes materiales, estos tienen un valor energético mayor o menor. Como valor energético alto destacan los restos de poda, en concreto, el material con mayor poder calorífico analizado ha sido las acículas de pino con 19870 kJ/kg, y, por otro lado, el compost extraído de una EDAR ha sido el material que proporciona un menor contenido energético con un poder calorífico de 11668 kJ/kg.

En conclusión, se confirma la importancia del uso de residuos de poda como fuente de energía renovable, ya que son estos los que más contenido en materia orgánica contienen, siendo este factor el responsable de obtener un poder calorífico mayor. Esto genera una disminución de contaminantes expulsados a la atmósfera, una buena gestión de estos residuos que encontramos en abundancia y una mejora económica, tanto por la creación de nuevos puestos de trabajo como por la disminución del coste destinado a la eliminación de estos residuos.

6.2 PROYECCIÓN FUTURA

De cara al futuro, se podría seguir investigando sobre la valorización energética de materiales orgánicos.

- Realizar ensayos mezclando materiales: Consistiría en la mezcla de muestras para intentar optimizar con qué mezcla de residuos se puede llegar a tener mayor poder calorífico, buscando siempre el mayor rendimiento energético posible.
- Cambios en el proceso para el aumento del poder calorífico: En este Trabajo de Fin de Grado se ha trabajado únicamente con muestras secadas y tamizadas, por lo tanto, se podría estudiar de qué manera influye el pretratamiento en el poder calorífico de la muestra, realizando pruebas y análisis que compararen energéticamente varios residuos con diferentes pretratamientos.

- Ampliación de la variedad de muestras a ensayar: Se podría seguir realizando ensayos con diferentes residuos para tener más cantidad de datos y seguir buscando qué materiales son más energéticos, para intentar estar más cerca de una energía completamente renovable.
- Análisis de las mismas muestras, pero en diferentes condiciones: Aunque puede que no sea aplicable a todas las muestras analizadas, para algunas puede ser interesante analizar hasta qué punto puede cambiar el contenido energético de cada residuo dependiendo de la zona de origen o la estación del año. Se podría analizar un mismo material, pero en diferente ubicación geográfica, siguiendo de cada localización un análisis durante 1 año para ver, además, los cambios que puede haber en su poder calorífico dependiendo de la estación del año.



7. BIBLIOGRAFÍA

AENOR. (2001) UNE-EN-13039:2001 Mejoradores de suelo y sustratos de cultivo. Determinación del contenido en materia orgánica y de las cenizas.

Barbaritano, M., Bravi, M., & Savelli, E. (2019). Sustainability and Quality Management in the Italian Luxury Furniture Sector: A Circular Economy Perspective. *Sustainability*. 11(11) <https://doi.org/10.3390/su11113089>

Bellezoni, R. A., Adeogun, A. P., Paes, M. X., Puppim de Oliveira, J.A. (2022). Tackling climate change through circular economy in cities, *Journal of Cleaner Production*, 381, Part 1, 135126 <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135126>

Carballada, Á. M. (2020). The forestry industry of Spain in the circular economy, is its integration possible? *Anales De Geografía De La Universidad Complutense*, 40(2), 439-465. [doi:10.5209/AGUC.72982](https://doi.org/10.5209/AGUC.72982)

Castells, X. E. (2005). Tratamiento y valorización energética de residuos. Fundación Universitaria Iberoamericana Madrid Díaz de Santos. ISBN: 84-7978-694-9

Castro, E., Mañas, P., & De las Heras, J. (2009). A comparison of the application of different waste products to a lettuce crop: Effects on plant and soil properties. *Scientia Horticulturae*, 123(2), 148-155. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2009.08.013>

Hueso-González, P., Martínez-Murillo, J. M., & Ruiz-Sinoga, J. D. (2018). Técnicas de restauración de suelos basadas en el uso de residuos orgánicos: seis años de beneficios sobre las propiedades de un suelo forestal. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 44(2), 675–695. <https://doi.org/10.18172/cig.3422>

Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía (IDAE, 2010). Guía técnica de diseño de centrales de calor eficientes. [Ministerio de Industria, Turismo y Comercio] https://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11_Guia_tecnica_de_diseno_de_centrales_de_calor_eficientes_e53f312e.pdf (último acceso: 19/06/2023)

IKA (2021). Instrucciones del manejo del Calorímetro C200. Disponible en: <https://www.ika.com/es/Productos-LabEq/Calorímetros-pg330/C-200-8802500/Descargas-cpdl.html>

Instituto Nacional de Estadística (INE, 2023). *Cuentas medioambientales. Cuenta de los residuos. Serie 2015-2020*. <https://www.ine.es/uc/9hJZbdOQ> (último acceso: 19/06/2023)

Kontek, M., Brezinščak, L., Jurišić, V., Brandić, I., Antonović, A., Matin, B., Matin, A. (2023). Mitigating the energy crisis: Utilization of seed production wastes for energy production in continental Croatia. *Energies*, 16(2) <https://doi.org/10.3390/en16020738>

Lahane, S. & Kant, R. (2022) Investigating the sustainable development goals derived due to adoption of circular economy practices, *Waste Management*, 143, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2022.02.016>.

Ley 7 de 2022. De residuos y suelos contaminados para una economía circular. 8 de abril del 2022, BOE núm 85 <https://www.boe.es/eli/es/l/2022/04/08/7>

Ley 11 de 2012. De medidas urgentes en materia de medio ambiente, de la implementación de una jerarquía de residuos. 19 de diciembre del 2012, BOE núm 305 <https://www.boe.es/eli/es/l/2012/12/19/11>

Martínez-Pérez, R., Pedraza-Bucio, F. E., Apolinar-Cortes, J., López-Miranda, J., & Rutiaga-Quiñones, J. G. (2012). Poder calorífico y material inorgánico en la corteza de seis árboles frutales. *Revista Chapingo. Serie Ciencias forestales y del ambiente*, 18(3), 375–384. <https://www.redalyc.org/pdf/629/62926234009.pdf> (último acceso: 29/05/2023)

Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino (2010). Estrategia Española para el desarrollo del uso energética de la biomasa forestal residual. https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/publicaciones/Estrategia%20Biomasa%20Forestal%20Residual%20Marzo%202010_tcm30-155830.pdf (último acceso: 04/05/2023)

Real Decreto 661 de 2007. Por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica en régimen especial. Boletín Oficial del Estado. [Ministerio de Industria, Turismo y Comercio] De 25 de mayo de 2007. <https://www.boe.es/eli/es/rd/2007/05/25/661/con>

Rodríguez-Espinosa, T., Navarro-Pedreño, J., Gómez-Lucas, I., Almendro-Candel, M. B., (2021). Determinación de propiedades físicas y físico-químicas de residuos orgánicos para mejorar las propiedades hídricas del suelo. ISBN 978-84-1302-138-6, págs. 785-797

Rodríguez-Espinosa, T., Navarro-Pedreño, J., Gómez-Lucas, I., Almendro-Candel, M. B., Pérez-Gimeno, A., Jordán-Vidal, M., Papamichael, I., & Zorpas, A. A. (2023). Environmental Risk from Organic Residues. *Sustainability*, 15(1), 192. <https://doi.org/10.3390/su15010192>

Rodríguez-Romero, L. A., Gutiérrez-Antonio, C., García-Trejo, J. F., & Feregrino-Pérez, A. A. (2022). Estudio comparativo de modelos matemáticos para predecir el poder calorífico de residuos agrícolas mexicanos. *Tecno - Lógicas*, 25(53), e2142. <https://doi.org/10.22430/22565337.2142>

Solís-Muñoz, D., & Cogollo-Flórez, J. M. (2021). La economía circular y los sistemas de control de calidad de procesos y productos] *Produccion y Limpia*, 16(1), 160-185. <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v16n1/1909-0455-pml-16-01-160.pdf>

Teachers for the Future (2022). *Economía Circular*. <https://teachersforfuturespain.org/> (último acceso: 01/06/2023)

Torres, R. & Fernández, M. J. (2022). La economía española, de la pandemia a la crisis energética. *Papeles de economía española*, 173, 2. https://www.funcas.es/wp-content/uploads/2022/11/PEE-173_Torres-Fernandez.pdf

Valdivia-Espinoza, A. & Guardia-Muguruza, X. (2023). Valorización energética de residuos orgánicos: el vínculo entre la política energética y la gestión integral de residuos sólidos. *South Sustainability*, 4(1). <https://revistas.cientifica.edu.pe/index.php/southsustainability/article/view/1439/1115> (último acceso: 16/05/2023)