



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Valorización de residuos orgánicos por carbonización hidrotermal

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Gonzalo Castellanos Nicolás

DIRECTORES: Rocío, Maceiras Castro
Leticia, Pérez Rial

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Valorización de residuos orgánicos por carbonización hidrotermal

Grado en Ingeniería Mecánica

Intensificación en Tecnología Naval

Cuerpo General / Infantería de Marina

UniversidadeVigo

RESUMEN

El trabajo aborda la creciente preocupación global por la generación de residuos y su impacto ambiental y social. Se enfoca en la valorización de residuos orgánicos comunes, como cáscaras de naranjas, piel de plátano, algas secas, pistachos, posos de café y piel de patata, a través de la carbonización hidrotermal. Esta técnica implica la carbonización de la biomasa a diferentes temperaturas en una mufla, sin necesidad de secado previo, lo que la hace más eficiente y respetuosa con el medio ambiente en comparación con otros métodos de pirólisis a alta temperatura. Por ello se pretenderá analizar qué ventajas puede ofrecer realizar esta técnica en comparación con ensayos realizados secando previamente el residuo a valorizar

El producto resultante, conocido como biochar, tiene diversas aplicaciones que promueven la economía circular y la sostenibilidad ambiental y social, como la remediación de suelos contaminados, la mejora de la calidad del aire y del agua y el uso en la agricultura.

El estudio incluye la caracterización de los biochar obtenidos para evaluar sus propiedades físicas y químicas, compararlos entre sí y determinar los usos más adecuados en función de estas características.

PALABRAS CLAVE

Biochar, Residuo, Valorización, Carbono, Carbonización hidrotermal.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quería agradecer a mis compañeros, en especial al estudio 119B con los que tantas largas noches de estudio y penurias he vivido, siendo con los mismos con los que cuando toca, celebro los éxitos y alegrías.

En segundo lugar, quería agradecer a mis tutoras, Rocío Maceiras Castro y Leticia Pérez Rial, por su paciencia y dedicación para lograr realizar este trabajo.

Contenido

Índice de Figuras	4
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos	6
1.1 Motivación	6
1.2 Objetivos	7
2 Estado del arte	8
2.1 Residuos	8
2.1.1 Clasificación de residuos	9
2.1.1.1 Según su origen.....	10
2.1.1.2 Según su peligrosidad.	12
2.1.2 Problemática actual.....	12
2.1.3 Legislación.....	14
2.2 Gestión de residuos orgánicos.....	14
2.2.1 Jerarquía de los residuos	14
2.2.2 Valorización de residuos orgánicos	16
2.2.2.1 Valorización energética	17
2.2.2.1.1 Digestión anaerobia	17
2.2.2.1 Valorización no energética	18
2.3 Biocarbón (biochar)	19
2.3.1 Historia y descubrimiento.....	19
2.3.2 Propiedades físico/químicas	20
2.3.3 Principales beneficios	21
2.3.4 Principales usos	21
2.3.4.1 Agricultura	21
2.3.4.2 Remediación de suelos	22
2.3.4.3 Filtración de agua	22
2.3.5 Técnicas de obtención.....	23
2.3.5.1 Pirólisis	23
2.3.5.2 Gasificación	24
2.3.5.3 Torrefacción.....	25
2.3.5.4 Carbonización hidrotermal	25
3 Desarrollo del TFG.....	27
3.1 Residuos utilizados	28

3.2 Preparación de las muestras	28
3.3 Ensayos de caracterización	29
3.3.1 Granulometría	29
3.3.2 Densidad	29
3.3.3 Análisis inmediato	29
3.3.4 Análisis elemental.....	30
3.3.5 Poder calorífico.....	30
3.4 Ensayos de carbonización hidrotermal	30
3.4.1 Ensayos caracterización biochar	32
3.4.2 Densidad y porosidad	32
3.4.2.1 Volumen aparente	33
3.4.3 Rendimiento del biochar	33
3.4.4 pH	33
3.4.5 Análisis estadístico ANOVA	34
4 Resultados y discusión	36
4.1 Datos obtenidos.....	36
4.1.1 Densidad	36
4.1.2 Humedad inicial.....	37
4.1.3 Rendimiento.....	37
4.1.4 Granulometría	38
4.1.5 pH	41
4.1.6 Porosidad y Volumen aparente	42
4.1.7 Análisis inmediato	44
4.1.8 Análisis elemental y poder calorífico	45
4.2 Análisis estadístico de varianza	47
4.2.1 Densidad	48
4.2.2 Análisis del rendimiento	48
4.2.3 Análisis del pH	49
4.2.4 Análisis de la porosidad.....	50
4.2.5 Análisis del volumen aparente.....	51
4.2.6 Análisis elemental del carbón.....	52
4.2.7 Poder calorífico.....	53
5 Conclusiones	55
5.1 Líneas futura	56
6 Bibliografía.....	57

Anexo I: Implicaciones sociales, económicas y ambientales	63
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	65

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Diferencia entre basura y residuo [4]	9
Figura 2-2 Clasificación de los residuos	9
Figura 2-3 Residuos industriales [7]	10
Figura 2-4 Residuos sanitarios [10].....	11
Figura 2-5 Clasificación residuos peligrosos [11].....	12
Figura 2-6 Basura acumulada en un río de la India [13]	13
Figura 2-7 Jerarquía de residuos, indicando el orden de preferencia de las opciones de gestión de residuos basadas en la sustentabilidad [21].....	15
Figura 2-8 A) Vertedero previo a ser cubierto con tierra B) Distribución vertedero moderno.....	16
Figura 2-9 Economía circular/ economía lineal [28].....	17
Figura 2-10 Planta de biogás [34]	18
Figura 2-11 Diferencia compost y biochar [40]	19
Figura 2-12 Tierra preta vs Tierra normal [42]	20
Figura 2-13 Beneficios del biochar en agricultura [47]	21
Figura 2-14 Beneficios biochar en el suelo [49]	22
Figura 2-15 Usos del biochar para filtrar aguas [53].....	23
Figura 2-16 Planta de gasificación ubicada en Toledo [59]	24
Figura 2-17 Proceso de Torrefacción [60]	25
Figura 3-1 Metodología seguida en el TFG	27
Figura 3-2 Residuos utilizados	28
Figura 3-3 Mufla de la marca Nabertherm y modelo “up to 3000 °C”.	29
Figura 3-4 Reactor HTC	30
Figura 3-5 Ensayos realizados.....	31
Figura 3-6 A) Reactor tras ensayo en la mufla B) Biochar tras filtrado al vacío y secado	32
Figura 3-7 Medición del pH	34
Figura 3-8 Análisis ANOVA.....	34
Figura 4-1 Granulometría de los diferentes ensayos con cáscara de naranja	39
Figura 4-2 Granulometría de los diferentes ensayos con piel de plátano	39
Figura 4-3 Granulometría de los diferentes ensayos con posos del café.....	40
Figura 4-4 Granulometría e los diferentes ensayos con algas secas.....	40
Figura 4-5 Granulometría de los diferentes ensayos con cáscaras de pistachos	41
Figura 4-6 Granulometría de los diferentes ensayos con piel de patata	41

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1 Comparativa de generalidades técnicas de obtención [54]	23
Tabla 4-1 Densidad del residuo y de los biochar obtenidos.	36
Tabla 4-2 Humedad inicial residuos en base húmeda.	37
Tabla 4-3 Rendimientos del biochar (%) en los diferentes ensayos.....	37
Tabla 4-4 pH de los biochar obtenidos de los diferentes ensayos	42
Tabla 4-5 Porosidad de los biochar obtenidos de los diferentes ensayos.....	43
Tabla 4-6 Volumen aparente de los biochar obtenidos de los diferentes ensayos	43
Tabla 4-7 Análisis inmediato de los residuos.....	44
Tabla 4-8 Análisis inmediato de los diferentes biochar obtenidos de los ensayos.....	44
Tabla 4-9 Análisis elemental de los residuos.	45
Tabla 4-10 Análisis del N, C e H de los biochar	46
Tabla 4-11 Análisis de S, O y poder calorífico del biochar	47
Tabla 4-12 Densidades de los residuos y biochar en base seca.....	48
Tabla 4-13 ANOVA de la densidad	48
Tabla 4-14 Rendimientos del biochar de los diferentes ensayos.....	49
Tabla 4-15 ANOVA del rendimiento	49
Tabla 4-16 pH del biochar de los diferentes ensayos	50
Tabla 4-17 ANOVA del pH	50
Tabla 4-18 Porosidad del biochar de los diferentes ensayos	51
Tabla 4-19 ANOVA de la porosidad.....	51
Tabla 4-20 Volumen aparente del biochar de los diferentes ensayos	51
Tabla 4-21 ANOVA del volumen aparente.....	52
Tabla 4-22 Contenido en carbono del biochar de los diferentes ensayos.....	52
Tabla 4-23 ANOVA del contenido en carbono	52
Tabla 4-24 Poder calorífico del biochar de los diferentes ensayos	53
Tabla 4-25 ANOVA del poder calorífico.....	53

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Motivación

En un mundo donde la población crece de forma exponencial, la cantidad de residuos crece a su vez generando problemas medioambientales cada vez más complejos y graves. El cambio climático debido a la exposición cada vez mayor a gases de efecto invernadero unido a la contaminación de suelos y aguas supone una amenaza cada vez más seria para el conjunto de la humanidad. Las crecientes sequías, la exposición de suelos a la lluvia ácida, el aumento del nivel del mar, la subida de temperaturas y los efectos nocivos en la salud son sólo algunos de los problemas a los que se expone la humanidad, siendo ella misma la que suele pasar por alto dichas problemáticas debido a su complejidad o poco conocimiento general sobre el foco de origen [1].

Siguiendo esta tónica, es esencial tomar conciencia para adoptar prácticas medioambientales sostenibles que permitan salvaguardar el futuro del planeta y de generaciones venideras. Vivimos en una era de sobreexplotación de recursos naturales, los cuales son finitos, y en muchos casos son consumidos a un ritmo más rápido del que se pueden generar. Es por ello por lo que un aprovechamiento eficiente de los recursos disponibles, así como el tratamiento posterior de los mismos se hace indispensable, no solo para reducir la presión sobre el medioambiente sino también para generar una sociedad más sostenible.

Como introducción a la problemática de los desechos orgánicos generados, queda decir que su acumulación en vertederos puede representar un peligro para la salud pública, pudiendo incluso alterar el ecosistema, tanto terrestre como marino, si estos no son gestionados de manera adecuada. No sólo el suelo sobre el que se encuentra o las aguas existentes en la zona pueden verse contaminados, sino que además la descomposición de muchas de estas sustancias puede dar lugar a gases de efecto invernadero como el metano que, emitido a la atmósfera, contribuye directamente al calentamiento global y al cambio climático.

En este contexto, y en especial en la Armada, el tratamiento de residuos es un tema de especial importancia. Tanto el vertido al mar de sustancias como la gestión de dichos desechos está normalizada, siendo esta práctica llevada a cabo concienzudamente. De acuerdo con esto y más concretamente, en la propia Escuela Naval Militar de Marín se cumplen también con dichas medidas, sin embargo, es importante resaltar que los desechos orgánicos procedentes principalmente de comidas no tienen vida más allá de ir al respectivo vertedero, o si se permite, al mar. Como dato, destacar que el 58% de los residuos generados en una casa son de origen orgánico y, sin embargo, solo se aprovecha un 1% [2].

Esto supone una enorme cantidad de toneladas de material desechado que, bien aprovechado, podría suponer una nueva materia prima con multitud de usos posteriores a su vida “útil”.

Es en este punto cuando entra en juego la valorización de residuos orgánicos. Esta consiste en dar valor a estos en vez de simplemente eliminarlos. Existen diversas formas de valorización, entre las cuales destacan el compostaje, la recuperación de energía mediante incineración o la producción de biogás, entre otras. Sin embargo, gran parte de las alternativas de valorización existentes entre las que se encuentra la carbonización convencional requiere de una etapa de secado previo de la materia orgánica para su posterior tratamiento lo que se traduce en un mayor consumo energético y de recursos.

En el presente Trabajo Fin de Grado se busca un enfoque de gestión de residuos orientado hacia la economía circular, optimizando el uso de los recursos y reduciendo al mínimo los desechos originados. Es por ello por lo que este trabajo se centra en una técnica prometedora como es la carbonización hidrotermal (HTC).

Además, este trabajo pretende revisar la problemática acerca de la gestión de los residuos en general hasta centrar el foco en las técnicas de obtención de biochar. Este proceso finaliza analizando la metodología seleccionada para este trabajo, la carbonización hidrotermal, mostrando sus ventajas y estudiando las características principales del subproducto obtenido de los ensayos a realizar, el hidrochar.

1.2 Objetivos

El objeto de este trabajo es generar un biochar a partir de una serie de residuos generados en la Escuela Naval Militar mediante el proceso de carbonización hidrotermal. Paralelamente, se analizará la influencia de la temperatura y el contenido en agua de la materia prima en el proceso.

Como objetivos secundarios están analizar estadísticamente mediante un proceso ANOVA si las propiedades obtenidas del biochar han sido influenciadas principalmente por el tipo de compuesto o por la temperatura del ensayo y en base a los resultados se propondrá que usos serían más favorables para que tipo de biochar y que diferencias se han obtenido entre los ensayos en base seca y base húmeda.

2 ESTADO DEL ARTE

En este primer apartado se va a hacer una revisión de la naturaleza de los diferentes residuos que son generados y la gran importancia de estos en la actualidad. Dicha información servirá para crear un contexto que permita analizar la situación que se atraviesa en su gestión y como esta se lleva a cabo, viendo por lo tanto los diferentes escalones y técnicas hasta finalmente indagar en el tema del trabajo, la valorización de biomasa residual y la obtención de un producto con un elevado potencial de aprovechamiento como es el biochar.

2.1 Residuos

Es conveniente comenzar definiendo qué es un residuo. La Ley 22/2011 define residuo como “cualquier sustancia u objeto que su poseedor deseché o tenga la intención o la obligación de desechar” 9. Otra definición sería: “La palabra residuo (con origen en el latín residuum) describe al material que pierde utilidad tras haber cumplido con su misión o servido para realizar un determinado trabajo. El concepto se emplea como sinónimo de basura por hacer referencia a los desechos que el hombre ha producido” [3].

Sin embargo, aunque sinónimos parciales, basura y residuo no significan lo mismo. La primera hace referencia a un material que va a ser desechado y no tiene ninguna utilidad posterior, mientras que un residuo si puede ser aprovechado tal y como aparece representado en la Figura 2-1.



Figura 2-1 Diferencia entre basura y residuo [4]

2.1.1 Clasificación de residuos

Los residuos se clasifican de diferentes maneras atendiendo especialmente a la legislación de un país, por lo que no tienen una clasificación clara. Sin embargo, la división más común de estos es: según su origen y según su peligrosidad como se ve en la Figura 2-2.

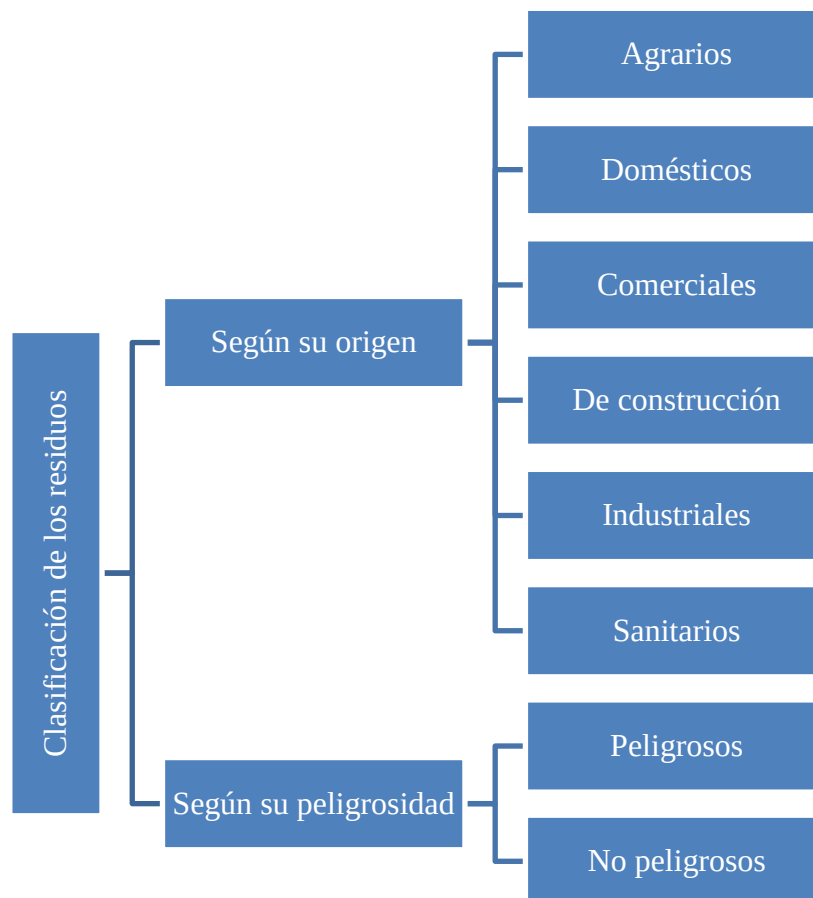


Figura 2-2 Clasificación de los residuos

2.1.1.1 Según su origen

Según la procedencia de los residuos, estos se pueden clasificar como [5]:

- **Residuos agrarios.**

En este grupo se engloban los residuos generados por las actividades del sector primario de la economía que incluyen la agricultura, la ganadería, la pesca, la actividad forestal y la cinegética, así como aquellos producidos por industrias alimenticias que van desde mataderos y empresas lácteas hasta harineras y empresas tabacaleras. Estos materiales en muchos casos pueden ser utilizados *a posteriori* en compostaje o en forma de biofertilizantes [6].

- **Residuos domésticos.**

Son aquellos residuos que se generan en el ámbito del hogar, limpiezas de vías públicas, limpiezas de zonas verdes y áreas recreativas.

- **Residuos comerciales.**

Los residuos producidos por actividades comerciales, tanto al por mayor como al por menor, en restaurantes, bares, oficinas, mercados y otros servicios.

- **Residuos de construcción y demolición (RCD).**

Los (RCD) son desechos derivados de la construcción, renovación o demolición de edificaciones. Incluyen materiales como hormigón, madera, metal, vidrio y plástico. Gestionarlos implica recolectar, clasificar y reciclar estos materiales para su reutilización en nuevas construcciones, obras viales o como relleno, reduciendo la carga de desechos urbanos y promoviendo prácticas ambientales sostenibles

- **Residuos industriales.**

Son aquellos resultantes de diversas actividades relacionadas con la fabricación, utilización, transformación, consumo, limpieza o mantenimiento dentro de un entorno industrial [7].

- **Inertes:** por sus características no son peligrosos para el medioambiente ni la vida humana o animal, y no precisan de ningún tratamiento previo a su almacenamiento. Son escombros, chatarras, vidrios o cenizas.
- **Asimilables a Residuos Sólidos Urbanos (RSU),** véase Figura 2-3: son aquellos generados en oficinas, tiendas, restaurantes, hogares y espacios públicos. La fracción principal incluye residuos orgánicos, envases de cartón y plástico. Se pueden reciclar utilizando compactadoras específicas para cada material, como compactadoras de cartón y plástico [8].
- **Peligrosos o especiales:** son aquellas sustancias cuya composición puede afectar gravemente al medioambiente o la salud de los seres humanos y que necesitan un tratamiento específico. Muchas veces no se dispone de la tecnología para tratarlos por lo que se dejan almacenados en recipientes bien cerrados.



Figura 2-3 Residuos industriales [7]

- **Residuos sanitarios**

Son aquellos materiales relacionados con el ámbito de la sanidad que han llegado al final de su vida útil como agujas, gasas, pipetas etc. como los de la Figura 2-4. Se dividen en los siguientes tipos [9].



Figura 2-4 Residuos sanitarios [10]

- *Residuos sanitarios asimilables a residuos municipales o de tipo I:* Estos residuos son los que no requieren procedimientos especiales para su manejo. Comprenden cartón, papel, suministros de oficinas, desechos de cocina, bares y comedores, residuos de talleres, jardinería y desechos de pacientes no infecciosos excluidos de los grupos II y III.
- *Residuos sanitarios no específicos o de tipo II:* estos desechos requieren precauciones adicionales durante su manipulación, recolección, almacenamiento y transporte, pero solo dentro del entorno de un centro de atención médica. Se refieren a materiales como apósitos, vendajes, prendas y utensilios desechables contaminados con sangre, secreciones o excreciones, que no están catalogados como residuos sanitarios específicos.
- *Residuos sanitarios específicos de riesgo o de tipo III:* estos residuos requieren medidas de prevención tanto dentro como fuera del centro donde se generan, ya que pueden representar un riesgo para la salud pública y laboral. Se clasifican en:
 - *Residuos sanitarios o infecciosos:* se dice de aquellos residuos capaces de transmitir enfermedades infecciosas.
 - *Residuos anatómicos:* son los restos anatómicos de seres humanos reconocibles.
 - *Sangre y hemoderivados líquidos:* consisten en contenedores con sangre u otros líquidos biológicos.
 - *Agujas y material punzante:* son los objetos utilizados en actividades sanitarias, como agujas y bisturíes.
 - *Vacunas vivas y atenuadas:* son todos los desechos relacionados con vacunas.
- *Residuos tipificados en normativas singulares o de tipo IV:* Estos son residuos que requieren una gestión especial desde el punto de vista de la higiene y el medio ambiente, tanto dentro como fuera del lugar donde se generan. Incluyen:
 - Residuos citostáticos: restos de medicamentos antineoplásicos y material desechable relacionado.
 - Residuos de sustancias químicas: materiales contaminados con productos químicos industriales.
 - Medicamentos caducados, aceites minerales y sintéticos, residuos con metales.

- Residuos radiactivos: materiales contaminados con sustancias radiactivas.
- Restos anatómicos humanos: cadáveres y restos humanos de abortos u operaciones quirúrgicas.

2.1.1.2 Según su peligrosidad.

En función de la peligrosidad los residuos se dividen en: residuos peligrosos y residuos no peligrosos.

- **Residuos peligrosos**

Según la (Ley 7/2022), un residuo peligroso es aquel que exhibe una o más de las cualidades riesgosas mencionadas en el anexo I de dicha Ley, y también aquel identificado como tal por el Gobierno según lo dispuesto en las Leyes de la Unión Europea.

También se incluyen en esta definición los envases que tengan restos de sustancias peligrosas o estén contaminados por ellas.

Algunos ejemplos de residuos peligrosos son (véase Figura 2-5):

- Amianto.
- Aceites industriales usados y PCB.
- Vehículos fuera de servicio.
- La mayoría de las pilas y baterías.
- Algunos aparatos electrónicos desechados, como frigoríficos, aires acondicionados, móviles, pantallas y televisores con tecnología distinta de LED, fluorescentes y lámparas de descarga no -LED y paneles fotovoltaicos de CdTe etc.
- Algunos residuos sanitarios, como los del Grupo III (sangre y hemoderivados, material punzante y cortante, residuos infecciosos, etc.) y los medicamentos citotóxicos y citostáticos.



Figura 2-5 Clasificación residuos peligrosos [11]

- **Residuos no peligrosos**

Un residuo no peligroso es aquel que no cumpla con los criterios para ser considerado como tal. Algunos ejemplos de estos residuos incluyen lodos de depuración, biorresiduos, neumáticos al final de su vida útil, la mayoría de los residuos de construcción y demolición, y residuos textiles, entre otros.

2.1.2 Problemática actual

Actualmente el ser humano genera una enorme cantidad de residuos a nivel mundial derivados de las diferentes actividades domésticas y económicas. La sociedad va en aumento y, por lo tanto, la basura

también, sin embargo, el espacio donde poder almacenar esta no aumenta y las que se eliminan consumen una gran cantidad de energía y materias primas, además de afectar negativamente al medioambiente y a la salud humana [12].

Desde el punto de vista ambiental, la basura desechada se acumula en vertederos pudiendo contaminar el suelo y las aguas (se han llegado a detectar sustancias como nicotina y antidepresivos en aguas de la Antártida [13]) además de ocupar un lugar físico donde se generarán olores fuertes y donde, con el viento, se trasladarán micropartículas que pudieran llegar hasta las personas o animales [14]. Cabe destacar que no solo se desechan los residuos tras el final de su vida útil, estos pueden ser eliminados con tratamientos posteriores como la incineración, lo cual genera una sobreexplotación de recursos naturales como el agua. La eliminación de residuos también lleva asociada un aumento de emisiones de gases de efecto invernadero perjudiciales para la salud.

Este punto hace reflexionar sobre los problemas sanitarios que pueden generar los residuos en el planeta. Se ha demostrado que los animales que habitan zonas donde existe concentración de estos desechos pueden llegar a consumirlos de forma directa o indirecta, contrayendo enfermedades que pudieran ser transmitidas al ser humano. También, es notable la acumulación de sustancias en organismos que ingresan en la cadena trófica y acaban llegando al ser humano tras su consumo, como por ejemplo la ingesta involuntaria de partículas de micro plásticos por parte de la fauna marina, la misma que posteriormente se comercializa como comida [15].

Socialmente el impacto generado es notable. En países pobres y en vías de desarrollo la “industria del plástico” es mayoritaria y, sumado a grandes poblaciones, resulta en un deterioro del entorno que se ve infestado de basura tanto en las urbes como en sus alrededores, véase, derivando en unas condiciones de vida pésimas para la población como visto en la Figura 2-6.



Figura 2-6 Basura acumulada en un río de la India [13]

Finalmente, el tratamiento de los residuos afecta de manera importante a la economía. Se produce una alta inversión para su gestión. La recogida, el tratamiento, el transporte son solo unos de los costes asociados, además de la pérdida de valor de aquellos suelos donde se acumula basura o el despilfarro de materias primas utilizadas en el tratamiento posterior [16]. Estos motivos, por lo tanto, están condicionando al conjunto de la sociedad a buscarle usos alternativos a los residuos, aprovechando los recursos que estos contienen, pudiendo obtener un beneficio a la vez que se disminuye el impacto negativo asociado a su eliminación. La mentalidad de aprovechamiento y de minimización está cada vez más patente en una sociedad que ve como este problema se va incrementando a una rapidez vertiginosa y cuya solución, aunque parcial, está al alcance de la mano.

2.1.3 Legislación

Actualmente en España la principal ley que rige la normativa en gestión de residuos es Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular [17]. Esta ley es predecesora de la Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados [18]. El principal esfuerzo 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».

Existen multitud de normas acerca del tratamiento de residuos en España, tratamiento de envases o sustancias peligrosas como: Desarrollo de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación, Real Decreto regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero o Plan Estatal Marco de Gestión de Residuos (PEMAR) 2016-2022, Desarrollo de la Ley de prevención y control integrados de la contaminación (parcial), Real Decreto regula la eliminación de residuos mediante depósito en vertedero, Normativa general sobre vertidos de sustancias peligrosas desde tierra al mar, Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de sustancias peligrosas, Reglamento sobre clasificación, envasado y etiquetado de preparados peligrosos y el Real Decreto sobre las garantías financieras en materia de residuos [10]. Así mismo cada comunidad autónoma tiene diferentes legislaciones propias sobre distintos temas relacionados con la materia.

En cuanto a la ley que más afectaría al desarrollo de este trabajo, la reciente Ley de 09/24 de Prevención de las pérdidas y el desperdicio alimentario [19]. Como visto en el apartado 1.1, se genera un 58% de desperdicios orgánicos en el ámbito del hogar, de los cuales la gran mayoría son de restos de las comidas que no se consumen y se tiran. El principal propósito de la Ley 09/24 sobre el desperdicio alimentario es disminuir la cantidad de alimentos desperdiciados en todas las etapas de la cadena de suministro, desde su producción hasta su consumo final. Sus principales puntos a tener en cuenta son [20]:

- *Productos imperfectos*: la ley contempla la comercialización de productos cercanos a su fecha de caducidad para incentivar al consumidor a usar estos productos pronto, evitando que se acumulen u olviden en el hogar. Así mismo, se incluye la venta de productos imperfectos rechazados por grandes distribuidoras, pero en buen estado para su consumo junto a productos de temporada y ecológicos.
- *Prevención de pérdidas y despilfarro*: se prioriza el consumo humano para prevenir pérdidas, implicando a la hostelería en ofrecer opciones para llevar productos no consumidos. Se promueve la donación y redistribución de alimentos para satisfacer las necesidades de la población vulnerable. Además, se propone la transformación de alimentos en otros subproductos para evitar el despilfarro, siempre que las condiciones lo permitan.
- *Optimización del trabajo y recursos naturales*: se centra en conservar los recursos naturales, así como llevar a cabo una correcta planificación y comercialización de los productos.
- *Concienciación*: por último, esta ley tiene como objetivo llevar al ciudadano a la reflexión y consideración de la importancia del consumo responsable y de dar en cuanto sea posible otra vida a aquellos productos que no se han consumido.

2.2 Gestión de residuos orgánicos

2.2.1 Jerarquía de los residuos

La jerarquización es un proceso por el cual se prioriza que acción tomar con respecto a la gestión de los residuos, tomando en cuenta tanto la complejidad de la propia acción como su impacto en el medioambiente. La siguiente gráfica representa una pirámida invertida que abarca desde las acciones más deseables a realizar hasta la menos deseable Figura 2-7.

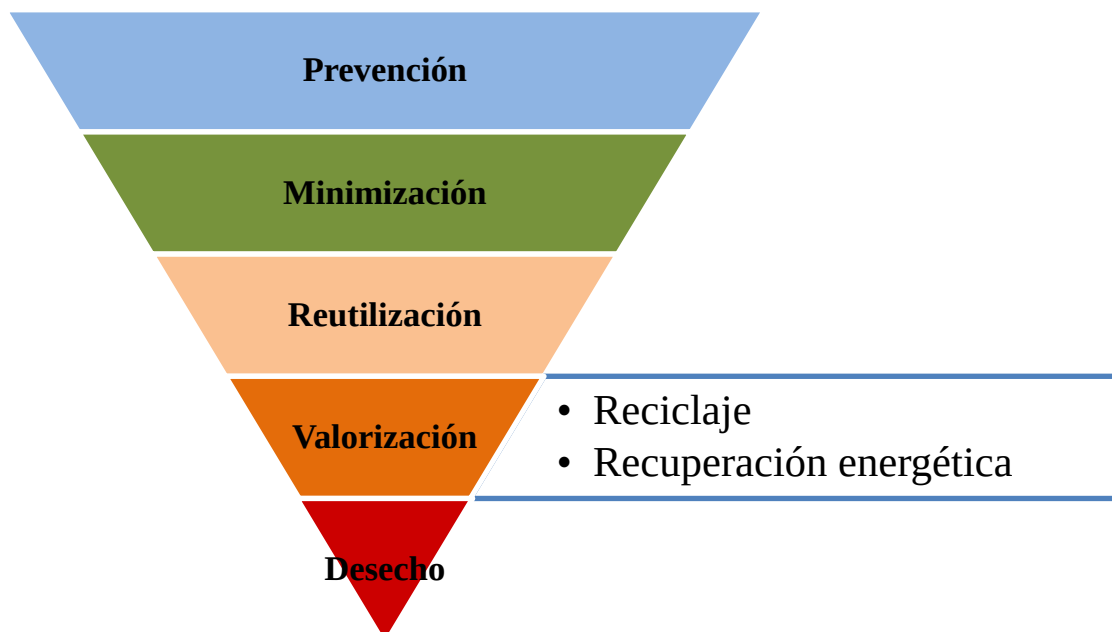


Figura 2-7 Jerarquía de residuos, indicando el orden de preferencia de las opciones de gestión de residuos basadas en la sustentabilidad [21]

A grandes rasgos se puede dividir esta jerarquización en 6 principales escalones. Estos serían de mayor a menor preferencia ordenados según: prevención, minimización, reutilización, reciclaje, recuperación energética y por último el desecho de los residuos.

En primer lugar, se tiene la prevención, siguiendo la premisa de que el mejor residuo es aquel que no se genera, se debe prevenir, en la medida de lo posible, la generación de residuos y en caso de que se produzcan se tratará de disminuir su grado de peligrosidad y el impacto que estos puedan tener sobre el medioambiente, entre otras cosas.

En cuanto a la minimización, se refiere a reducir la cantidad de los residuos generados en primer lugar desde la fuente. Esto se consigue mediante la reducción de desperdicios de alimentos y la de productos duraderos mediante su diseño. Un ejemplo claro de minimización de residuos es usar bolsas de tela para realizar las compras en los supermercados en vez de las de plástico. Para ello se deben cambiar los hábitos de consumo, educando desde temprano a la población para aprovechar al máximo los alimentos y reducir los desperdicios generados [21].

En el siguiente escalón de la jerarquización se encuentra la reutilización. Consiste en recuperar un producto o componente de producto que ha llegado al final su vida útil, para poder reutilizarlo sin agotar demasiados recursos en restaurarlo.

En penúltimo lugar y antes de la eliminación, se encuentra la recuperación, o también llamada valorización. Dentro de este escalón se abarca la recuperación energética y el reciclado. Ambas disciplinas ayudan a reducir el nivel de residuos que acaban en un vertedero y son una alternativa para la obtención de energía, pero dichas técnicas también generan emisiones y subproductos que deben ser gestionados adecuadamente para minimizar su impacto ambiental.

Por su parte, la recuperación energética consiste en aprovechar el residuo para generar electricidad, calor o combustible [22]. Para ello se les aplica un tratamiento posterior en vez de desecharlos directamente a los vertederos, y así explotar la energía contenida en el material. Los dos métodos más comunes utilizados son la incineración y la digestión anaeróbica. En la primera, se queman los residuos a altas temperaturas generando calor, que a su vez genera vapor de agua que alimenta turbinas y generadores de electricidad. Este calor también se puede utilizar directamente para la calefacción.

En cuanto a la digestión anaeróbica, microorganismos digieren la materia orgánica sin oxígeno produciendo un biogás en el proceso. Este biogás puede ser utilizado como fuente de energía renovable, refinándose para producir biometano, utilizado como gas natural. También, puede ser quemado para producir electricidad o utilizarlo como una fuente de calor [23].

El segundo método, el reciclado, consiste en la valorización del residuo para darle una nueva funcionalidad como un nuevo producto. El ejemplo más claro es el de los envases tanto de cartón como de plástico, que, una vez usados y ambientados, pueden servir como nuevos productos del mismo material.

Por último, y como método menos conveniente dentro de la jerarquía de residuos se encuentra la eliminación. En esta etapa se disponen los residuos de manera segura y controlada procurando minimizar el impacto ambiental. Existen diferentes métodos para llevar a cabo esta acción, siendo los más comunes el depósito en vertederos sanitarios y el tratamiento físico/químico [24].

En el primer tipo, se compactan los residuos y se colocan en celdas o lugares específicos del vertedero, cubriéndose con tierra para reducir olores y el surgimiento de vectores de enfermedades. Los vertederos modernos, además están hechos con sistemas de control de lixiviaciones y gases para reducir la contaminación de suelos y aire, véase en la Figura 2-8 B) [25].

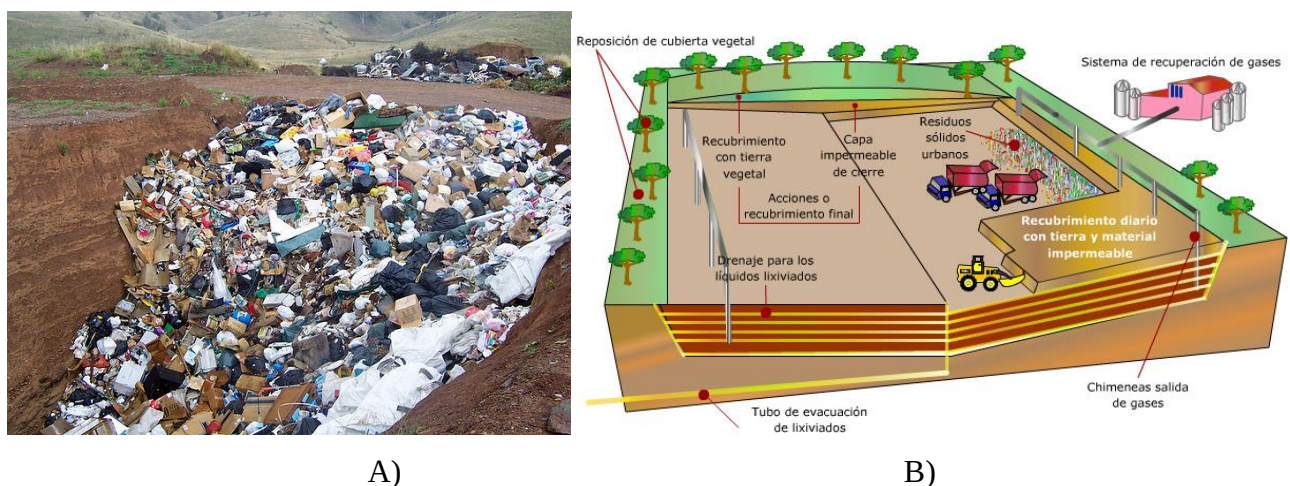


Figura 2-8 A) Vertedero previo a ser cubierto con tierra B) Distribución vertedero moderno

En cuanto, a los tratamientos físico/químicos, son utilizados para residuos peligrosos o especiales, desactivando o minimizando su impacto antes de depositarlos definitivamente. Esto puede incluir procesos como la estabilización, solidificación, neutralización o encapsulamiento de residuos peligrosos.

2.2.2 Valorización de residuos orgánicos

Como se ha visto en el apartado anterior, la valorización de los residuos es un aspecto clave en la economía circular, dándole una utilidad posterior a un residuo en vez de desecharlo, y en comparación como ocurre en la economía lineal, como en la Figura 2-9. La directiva europea 2008/98/CE de 19 de noviembre sobre los residuos [26], define la valorización de residuos como “cualquier operación cuyo objetivo principal es que el residuo pueda servir con una finalidad útil a sustituir a otros materiales que, de otro modo, se habrían utilizado para cumplir una función particular” [27]. Así, la valorización se puede clasificar según su finalidad en: valorización energética y en valorización de residuos sólidos.



Figura 2-9 Economía circular/ economía lineal [28]

2.2.2.1 Valorización energética

La valorización energética de residuos es lo que se conoce hoy en día como “waste to energy”. Este término, muy de moda entre la sociedad actual, hace referencia a la obtención de energía a partir de desechos que no han podido ser tratados en un escalón superior de la jerarquía de residuos, permitiendo la generación de electricidad, calor o combustible. Este proceso, además de ayudar a reducir la dependencia de combustibles fósiles y a contribuir en la producción de energía renovable, permite disminuir el impacto ambiental que estos residuos pueden generar en la naturaleza.

El proceso de conversión de residuos no reciclables en energía útil es una estrategia clave para reducir el impacto ambiental y promover la reutilización de recursos. Según datos del Centro Internacional de Tecnología Ambiental de la ONU, la valorización energética puede disminuir hasta en un 90 % la cantidad de desechos enviados a vertederos tradicionales. En países avanzados, entre un 25 % y un 30 % de los residuos son tratados mediante esta tecnología. Sin embargo, en España, solo alrededor del 12 % de los residuos se valorizan energéticamente, según informa la Asociación de Empresas de Valorización Energética de Residuos Urbanos (Aeversu) [29], a pesar de contar con once plantas de valorización energética que procesan millones de toneladas de residuos, el país aún tiene un largo camino por recorrer para cumplir con los objetivos de la Unión Europea en materia de transición ecológica. Estas mismas instalaciones sin embargo desempeñan un papel crucial al convertir los residuos en recursos energéticos, contribuyendo así a una gestión más sostenible de los desechos y promoviendo los principios de economía circular [30].

Como visto en el apartado previo, los métodos más comunes de la valorización energética son la incineración y la digestión anaerobia.

2.2.2.1.1 Digestión anaerobia

- **Biogás:** el biogás está compuesto por un 55-75 % de metano (CH_4) y en menor medida dióxido de carbono (CO_2) y otros gases. Tiene propiedades similares al gas natural y se produce por la fermentación de materia orgánica en ausencia de oxígeno, es decir, en condiciones anaeróbicas [31].

Es en una planta de digestión anaerobia donde tiene lugar la obtención de biogás (Figura 2-10). En dicha planta se reciben materiales orgánicos como desechos alimenticios, estiércol y otros subproductos agrícolas o ganaderos que son introducidos en grandes reactores herméticos, donde se crean condiciones específicas de temperatura y ausencia de aire. Esto favorece la descomposición controlada de la materia orgánica, generando biogás como resultado. Este biogás es una fuente de energía renovable que puede utilizarse para producir electricidad y calor. Además, como subproducto del proceso, se obtiene un material llamado digestato, que puede ser utilizado como fertilizante orgánico para mejorar la calidad del suelo en agricultura [32].

- **Biometano:** tal y como se comentó en el subapartado anterior, el biogás aparece acompañado de otros gases, considerados impurezas, como es el caso del dióxido de carbono. Es por ello

por lo que el biogás se trata mediante un proceso denominado “upgrading” donde se le retiran impurezas como el dióxido de carbono y el sulfuro de hidrógeno alcanzando un contenido en metano superior al 95 % de pureza y cuyo poder calorífico es muy superior al biogás original. El biometano de alta pureza puede incorporarse a la red de gas natural o utilizarse para generar electricidad, calor o como combustible para propulsar vehículos.

En términos básicos, podríamos describir al biometano como una versión refinada del biogás. Este último es sometido a un proceso de purificación con el objetivo de que su composición se asemeje lo máximo posible a la del gas natural de origen fósil. De esta manera, el biometano adquiere características similares al gas natural convencional, lo que lo hace más versátil y apto para una variedad de aplicaciones energéticas [33].

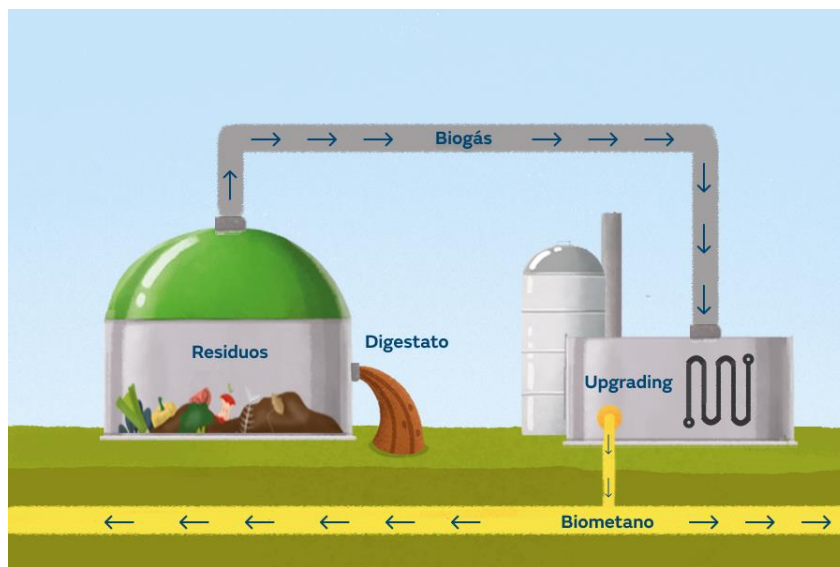


Figura 2-10 Planta de biogás [34]

2.2.2.1 Valorización no energética

En este tipo de valorización, el compuesto que ha llegado al final de su vida útil puede ser reciclado o reutilizado, total o parcialmente, dándole así un nuevo uso.

Esta puede llevarse a cabo con residuos inorgánicos, que son desechos artificiales que no se descomponen naturalmente y pueden emitir sustancias dañinas al medio ambiente si no se manejan adecuadamente [35]. Estos incluyen materiales sintéticos como el papel y el cartón, el vidrio, el plástico ligero, la madera, los metales, los componentes de aparatos electrónicos de uso doméstico o comercial, como los ordenadores. Su gestión adecuada, a través de la recogida selectiva, el reciclaje y la concienciación pública, es crucial para reducir su impacto ambiental negativo [36].

En cuanto a los compuestos orgánicos, estos compuestos son aquellos que contienen carbono en su estructura molecular y forma parte de materiales naturales y sintéticos. Los principales productos valorizables proceden del sector alimentario, del agrícola, de la industria química y del envase y embalaje. Las valorizaciones más comunes llevadas a cabo con estos compuestos son el compostaje y la obtención de biochar, ver Figura 2-11.

- **Compostaje:** El compostaje implica la descomposición de materia orgánica por microorganismos descomponedores, como bacterias y hongos, así como por animales detritívoros como lombrices y escarabajos. Este proceso da como resultado la producción de un valioso abono natural llamado compost, que es un excelente fertilizante y regenerador del suelo [37]. Existen tres clasificaciones: compostaje doméstico, compostaje comunitario y vermicompostaje, que consiste en llevar a cabo el tratamiento de los residuos orgánicos mediante el humus de las lombrices [38].

- **Obtención de biochar:** es una forma de carbón obtenido del calentamiento de biomasa durante un proceso termoquímico. Este proceso se lleva a cabo a unas temperaturas altas donde se elimina una gran cantidad de compuesto volátil dejando una parte rica en carbono. Este material posee una gran cantidad de propiedades capaces de influir positivamente en el medioambiente, como mejorar la salud del suelo, reducir la contaminación del agua e incluso puede ayudar a filtrar sustancias nocivas del entorno [39].

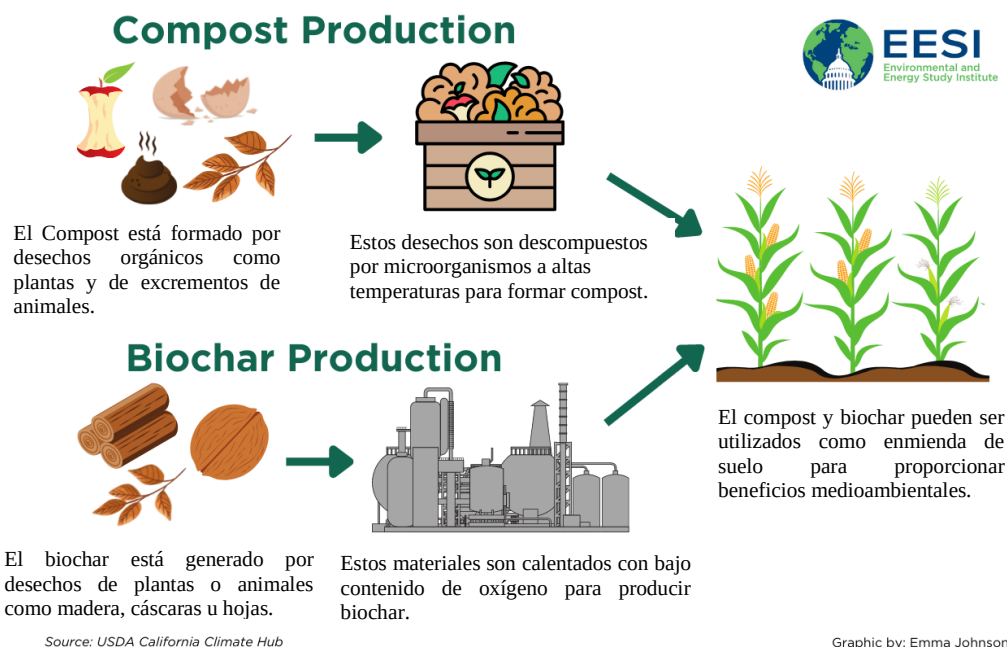


Figura 2-11 Diferencia compost y biochar [40]

2.3 Biocarbón (biochar)

El biochar es un tipo de carbón que se obtiene por pirólisis de material orgánico a temperaturas relativamente bajas ($< 700\text{ }^{\circ}\text{C}$). Este material está compuesto principalmente por estructuras atómicas de C-O y C-H, así como una gran concentración de benceno. Dicho compuesto es el principal objeto de estudio de este trabajo y a continuación se expone como surgió, así como algunas de sus características y sus principales usos.

2.3.1 Historia y descubrimiento

La historia del biochar tiene sus raíces en la antigua Amazonia brasileña, donde se practicaba la técnica de “terra preta”. Estudios arqueológicos indican que las poblaciones nativas de la Amazonia prosperaron en civilizaciones agrarias gracias a la modificación de suelos pobres en nutrientes mediante la aplicación de carbón vegetal (conocido hoy en día como biochar) y materia orgánica. Este período de prosperidad se extendió desde aproximadamente el año 400 a.C [41].

Los habitantes amazónicos producían biochar mediante la quema controlada y enterramiento de biomasa, creando condiciones de baja oxigenación necesarias para la formación de carbón vegetal. Este método, conocido como agricultura de tala y quema, resultaba en una retención de carbono de hasta el 50 %, a diferencia de los métodos de tala y quema tradicionales, que generaban niveles más altos de ceniza y solo una retención de carbono del 1 % al 3 % [42].

Más adelante, en la década de 1550, el explorador español Francisco de Orellana condujo expediciones al delta del Amazonas brasileño con el propósito de establecer asentamientos en la región. Orellana informó sobre una civilización avanzada que prosperaba en la Amazonía en ese momento, y evidencias arqueológicas posteriores respaldaron sus afirmaciones, mostrando la presencia de geoglifos

y extensas tierras preta (Figura 2-12) datadas entre los años 0-1250 d.C. Investigaciones arqueológicas contemporáneas lideradas por Michael Heckenberger y Eduardo Goes Neves han revelado restos de antiguas ciudades, "autopistas" de 60 pies de ancho y suelos fértiles enriquecidos con biochar en regiones visitadas por la expedición de Orellana. Se estima que en el año 1500 d.C., alrededor de 5 millones de personas habitaban la región, pero esta cifra disminuyó drásticamente debido a una pandemia introducida por los europeos [43].

En la actualidad, miles de hectáreas de suelos antropogénicos ricos en nutrientes permanecen en la región mencionada, en contraste con los suelos tropicales que resultan generalmente agotados e inservibles para acciones agrícolas. Estos suelos únicos han proporcionado a científicos, horticultores y ambientalistas evidencia de los efectos beneficiosos y duraderos del biochar y lo han verificado como una forma estable de carbono con el potencial de mediar en las concentraciones modernas de gases de efecto invernadero y mejorar en definitiva el desarrollo de los suelos.



Figura 2-12 Tierra preta vs Tierra normal [42]

2.3.2 Propiedades físico/químicas

El biochar es un material carbonoso que presenta un aspecto negruzco y amorfo, constituido por partículas de diferentes tamaños que atienden principalmente al tamaño de la materia prima utilizada en el ensayo. Su porosidad es alta, ya que durante la pirólisis de la materia prima se genera una gran cantidad de microporos, directamente proporcional a cuanto más temperatura se lleve a cabo el ensayo. Además, se ha observado que el biocarbón tiene una capacidad de intercambio de cationes (CIC) superior por unidad de carbono en comparación con la materia orgánica del suelo. Esto se atribuye a su mayor área superficial, carga negativa superficial más alta y mayor densidad de carga. Es relativamente proporcional la disminución de (CIC) a la disminución del nivel de pH del compuesto. El pH por su parte también ha presentado valores más altos a mayores temperaturas de operación [41].

En cuanto a sus propiedades químicas, el biochar contiene un alto contenido de carbón, del rango de un 70-95 % dependiendo del compuesto original. Se diferencia principalmente del mineral del carbón en que el biochar comprende una mayor relación C/O. Su estructura atómica consiste principalmente de enlaces C-O y C-N, que aproximadamente forman el 58 % del carbono que se encuentra, estando este en forma de estructuras aromáticas altamente compactas, siendo el resto estructuras de carbono oxidadas (13 %) y alifáticas (29 %). Este material tiene también altas propiedades recalcitrantes, es decir, que aguantan la degradación química y biológica por lo que su tiempo de permanencia en el suelo es inmensamente mayor al de los compuestos orgánicos.

2.3.3 Principales beneficios

El biochar presenta propiedades interesantes que le dotan de una gran utilidad en diversos campos. Su alta porosidad favorece la retención de la humedad, ya que al deshacerse de gran parte de la materia volátil durante la pirólisis, la materia prima se vuelve menos repelente al agua, lo cual lo hace de gran interés en la agricultura y la gestión del suelo. Se fortalecen también las defensas naturales de las plantas, ya que en estos poros se concentran microorganismos y nutrientes que las propias plantas aprovechan, como el fósforo, material que no se volatiliza y que una vez solubilizado en el suelo es aprovechado por la flora. El biochar es también un material que facilita el intercambio catiónico, mejorando así la retención de nutrientes y metales pesados en el suelo [44]. Su influencia en la conductividad eléctrica estimula la actividad microbiana, mientras que su pH neutro a ligeramente alcalino ayuda a neutralizar suelos ácidos, mejorando su fertilidad. La estabilidad a largo plazo del biochar debido a sus propiedades recalcitrantes asegura su presencia duradera en el suelo, lo que lo convierte en una herramienta valiosa para mejorar la calidad de este y promover la sostenibilidad agrícola y pudiendo actuar como un sumidero de carbono que ayude a mitigar el exceso de CO₂ en la atmósfera. En conjunto, estas propiedades hacen del biochar un recurso fundamental para optimizar el rendimiento de los cultivos y contribuir a la salud a largo plazo del suelo y del medio ambiente [45].

2.3.4 Principales usos

A continuación, se explicarán cuáles son los principales usos que se le puede dar al biochar, ver Figura 2-13.

2.3.4.1 Agricultura

El biochar es utilizado comúnmente como enmienda de suelo, debido a algunas de las propiedades mencionadas anteriormente. Es capaz de regular el pH de los suelos más ácidos y mejorar sus propiedades físicas y químicas. Mejora considerablemente la estructura del suelo, así como la retención de agua y nutrientes debido a su composición alta en carbón. Su alta actividad microbiana consigue una rápida descomposición orgánica la cual libera nutrientes que son aprovechados por los cultivos [46].

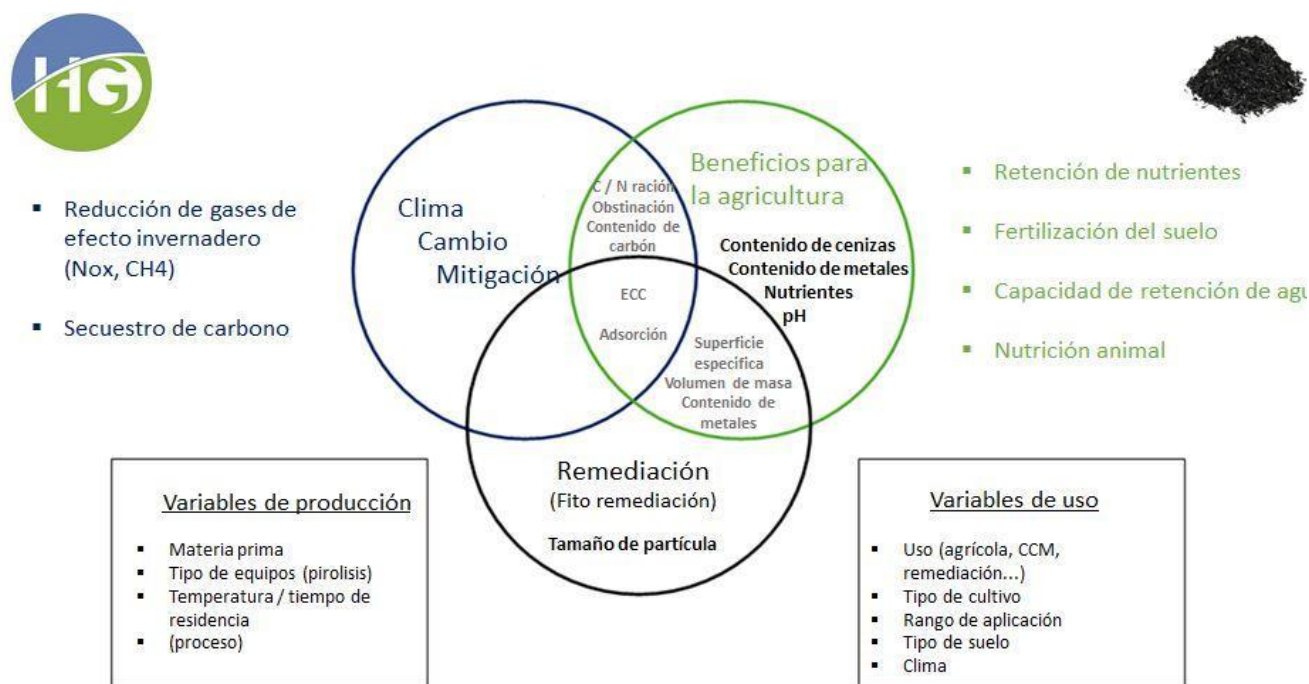


Figura 2-13 Beneficios del biochar en agricultura [47]

2.3.4.2 Remediación de suelos

El biochar, en la remediación de suelos contaminados tiene un peso significativo, ya que posee la capacidad de adsorber y retener contaminantes orgánicos e inorgánicos, que incluyen desde metales pesados a compuestos tóxicos. Su estructura porosa inmoviliza y atrapa los contaminantes, reduciendo su riesgo de lixiviación. Es sin duda su alto contenido en carbón la principal valía de este compuesto, ya que otro de sus usos más importantes es la retención y captura de este mismo compuesto y tiene un tiempo de residencia significativamente más largo en los suelos en comparación con otras sustancias orgánicas. Esto supone que se reduzcan los niveles de CO_2 que se liberan a la atmósfera, ayudando a mitigar el cambio climático. Además, mejora la estructura del suelo, aumentando su capacidad de retención de agua y nutrientes como visto previamente, promoviendo además el crecimiento de microorganismos benéficos, no ya solo para la actividad agrícola pero también para recuperar terrenos calcinados o donde ha habido un derrame tóxico, (Figura 2-14) [48].

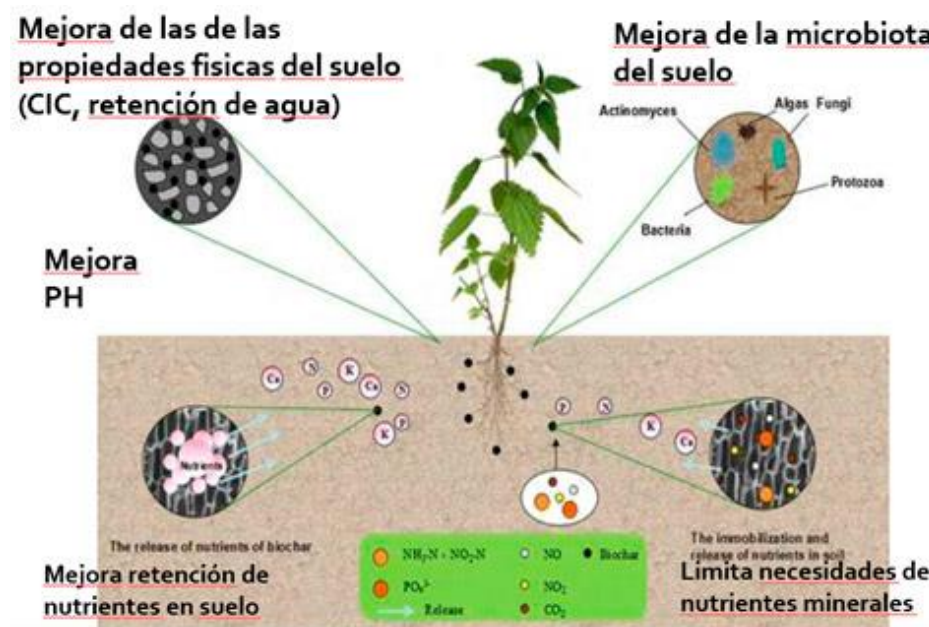


Figura 2-14 Beneficios biochar en el suelo [49]

2.3.4.3 Filtración de agua

El biochar, debido a sus propiedades físicas y su composición alta en carbono puede servir como filtro para aguas contaminadas. En primer lugar, debido a su alta porosidad es capaz de absorber gran cantidad de toxinas presentes en las aguas residuales. Las principales a las que el biochar puede hacer frente son aquellas procedentes de compuestos volátiles, compuestos orgánicos y metales pesados [50]. Por otro lado, su composición química hace que el biochar tenga a capacidad de adsorción con otros compuestos que pudieran estar presentes en el agua. Estos serían principalmente compuestos farmacéuticos, iones metálicos e incluso radionucleidos. Estos se adhieren a la superficie mediante fuerzas electrostáticas o reacciones químicas, como puede ser observado en la Figura 2-15 [51].

Este tipo de uso está siendo cada vez más investigado para promover la desintoxicación de aguas en zonas con menos recursos. En países pobres o en vías de desarrollo, se investiga que tipos de compuestos pueden generar un biochar más eficaz para este fin, pudiendo aliviar la calidad de vida de aquellas personas que no tengan fácil acceso a agua limpia [52].



Figura 2-15 Usos del biochar para filtrar aguas [53]

2.3.5 Técnicas de obtención

El interés general que ha despertado el biochar por sus propiedades ha significado en un alto consumo de este, y por tanto en una mayor conversión de la biomasa a dicho compuesto. El principal método y que abarca al resto de técnicas es la conversión termoquímica, técnica que engloba las disciplinas de pirólisis (lenta y rápida), carbonización hidrotermal, gasificación y torrefacción. Es preciso elegir correctamente que método usar, ya que cada uno utiliza unas temperaturas y obtiene un rendimiento medio al ser tratado durante un tiempo determinado. Se muestra un resumen con las principales características en la Tabla 2-1 [54].

Técnica	Temperatura (C°)	Tiempo	Rendimiento biochar (%)	Producción biocombustible (%)	Producción syngas (%)
Pirólisis rápida	500-1000	5 (s)-5 (min)	15	75	35
Pirólisis lenta	300-700	1-24 (h)	35	30-40	13
Carbonización hidrotermal	180-300	1-24 (h)	50-80	5-20	2-5
Gasificación	750-900	10-20 (s)	10	5	85
Torrefacción	300	10-60 (min)	80	0	20

Tabla 2-1 Comparativa de generalidades técnicas de obtención [54]

2.3.5.1 Pirólisis

Se trata de un proceso de descomposición de materia en ausencia de oxígeno a unas temperaturas que abarcan desde los 300-1000 °C. La falta de oxígeno evita que se genere una combustión, pudiendo así producir los productos. Durante la pirólisis, los componentes de la biomasa, como celulosa, hemicelulosa y lignina, se descomponen y dan lugar a diferentes productos: sólidos (biochar), líquidos (biocombustible) y gases (dióxido de carbono, monóxido de carbono, hidrógeno y syngas) [55]. Para su

producción se emplean diversos tipos de reactores, como hornos de paletas, lechos fluidizados burbujeantes y hornos rotativos. El rendimiento del biochar depende del tipo de biomasa utilizada y de la temperatura, la cual es un factor crítico que influye en la eficiencia del proceso. Normalmente, un aumento de temperatura reduce el rendimiento del biochar y aumenta la producción de syngas. Así mismo un mayor tiempo de exposición aumenta la producción de biocombustible [56].

Se pueden distinguir dos tipos de pirólisis [57]:

- *Pirólisis rápida:* es un proceso que convierte la biomasa sólida en bio-oil líquido de alta calidad para aplicaciones energéticas. Se caracteriza por calentar rápidamente la biomasa ($>100\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$) a altas temperaturas ($500\text{--}1000\text{ }^{\circ}\text{C}$) durante un breve tiempo ($0.5\text{ (s)}\text{--}5\text{ (min)}$), lo que minimiza el tiempo de residencia de los vapores en la zona caliente para obtener un bio-oil de buena calidad. Esto se logra enfriando rápidamente los vapores.
- *Pirólisis lenta:* En la pirólisis lenta, la velocidad de calentamiento es muy baja, aproximadamente de $5\text{ a }7\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$, y el tiempo de residencia es más largo, de más de 1 hora. Esta técnica produce una mayor cantidad de carbón vegetal en comparación con otras estrategias de pirólisis y carbonización. El biochar resultante puede utilizarse para mejorar la calidad del suelo como enmienda principalmente.

2.3.5.2 Gasificación

La gasificación es un método termoquímico de descomposición que convierte el material carbonoso en syngas. Este syngas comprende compuestos como CO , CO_2 , CH_4 , H_2 , con trazas de hidrocarburos en presencia de agentes de gasificación y altas temperaturas. La temperatura de reacción es el factor más significativo en la determinación de la producción de syngas, ya que a medida que aumenta esta, aumenta la producción de monóxido de carbono e hidrógeno, mientras que otros contenidos como metano, dióxido de carbono e hidrocarburos disminuyen. Sin embargo, este método no es el más idóneo para obtener la fracción sólida (biochar) ya que prácticamente todo el resultado viene en forma gaseosa [58].

Para llevar a cabo este proceso es importante secar completamente la biomasa a utilizar, para no aportar vapor de agua a la reacción. Posteriormente se llevan a cabo las reacciones de oxidación y combustión en las plantas de gasificación (Figura 2-16) de la biomasa para obtener el producto final.



Figura 2-16 Planta de gasificación ubicada en Toledo [59]

2.3.5.3 Torrefacción

La torrefacción es una técnica emergente en la producción de biochar. Se caracteriza por un bajo ritmo de calentamiento, y es comúnmente denominado pirólisis suave. Se utiliza aire inerte para eliminar el oxígeno, la humedad y el dióxido de carbono presentes en la biomasa, a una temperatura de 300 °C, mediante diversos procesos de descomposición. Este proceso modifica las propiedades de la biomasa, como el tamaño de partícula, contenido de humedad, área superficial, ritmo de calentamiento, densidad energética, etc. Los pasos que sigue esta técnica son los siguientes, (Figura 2-17):

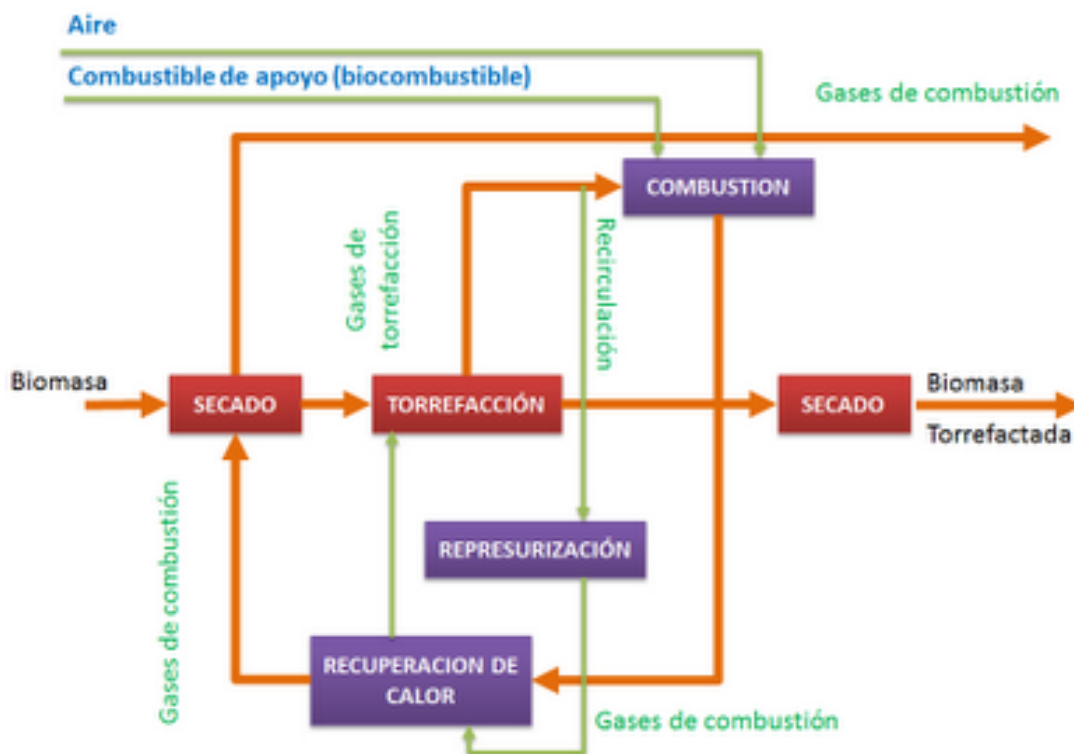


Figura 2-17 Proceso de Torrefacción [60]

Además, existen dos principales métodos de torrefacción:

- Torrefacción con vapor: La biomasa se trata con vapor a una temperatura no superior a 260 °C y un tiempo de residencia de alrededor de 10 minutos.
- Torrefacción oxidativa: En este proceso, la biomasa se trata con agentes oxidantes como gases de combustión, para generar energía térmica. Esta energía térmica se utiliza para alcanzar la temperatura requerida.

2.3.5.4 Carbonización hidrotermal

Este método es el elegido para el desarrollo de este trabajo. Su principal beneficio en comparación con el resto de las técnicas es que el compuesto a valorizar no necesita una fase de secado previo. El producto de este proceso se denomina “hidrochar”, biochar obtenido de materias primas húmedas. A diferentes temperaturas, se producen diferentes tipos de productos con diferentes propiedades: hidrochar a una temperatura por debajo de 250 °C, mediante la carbonización hidrotermal, bio-oil entre 250–400 °C, mediante licuefacción hidrotermal, y productos gaseosos como syngas (CO, CO₂, H₂ y CH₄) producidos a temperaturas por encima de 400 °C, mediante la gasificación hidrotermal. El producto de la hidrólisis experimenta una serie de reacciones, estas incluyen principalmente la deshidratación, fragmentación e isomerización. Posteriormente, la reacción continúa con condensación, polimerización y deshidratación intramolecular para producir el hidrocarbón [54].

Así mismo, este método ofrece una cantidad de beneficios con respecto al resto de técnicas, entre ellas se pueden destacar las siguientes [61]:

- *Proceso suave:* La carbonización hidrotermal se realiza a temperaturas relativamente bajas y en presencia de agua, lo que la hace menos agresiva y más suave en comparación con otras técnicas de pirólisis, como la rápida o lenta.
- *Menor impacto ambiental:* Debido a su naturaleza suave y al uso de agua, la carbonización hidrotermal tiende a tener un menor impacto ambiental en términos de emisiones de gases de efecto invernadero y producción de contaminantes atmosféricos en comparación con otros procesos de pirólisis.
- *Versatilidad en la materia prima:* La carbonización hidrotermal puede utilizar una variedad de materias primas, incluidos residuos orgánicos y biomasa de bajo costo, lo que la hace más versátil y adaptable a diferentes contextos y condiciones.
- *Alto rendimiento:* al elaborarse a temperaturas relativamente bajas, la biomasa al calentarse genera un mayor porcentaje de biocarbón al no desprenderse en compuestos volátiles, con un carbón de alta reactividad y muy poroso [62].
- *Utilización de materia prima húmeda:* A diferencia de otras técnicas que requieren el secado previo de la materia prima para poder ser trata, en la carbonización hidrotermal es posible emplear utilizar esta en su estado natural de humedad lo que supone un importante ahorro en comparación con otras técnicas.

3 DESARROLLO DEL TFG

En el presente apartado se explica la metodología seguida en este Trabajo Fin de Grado, desde los ensayos realizados en el laboratorio hasta las diferentes técnicas de medición de propiedades, describiendo el equipamiento utilizado para ello. En la Figura 3-1 se muestra de manera resumida la metodología empleada. Para ello se parte de las diferentes materias primas, un total de 6 residuos orgánicos, que primeramente son acondicionadas, caracterizadas y posteriormente, sometidos a ensayos de carbonización hidrotérmica (HTC) a tres temperaturas diferentes: 180 °C, 200 °C y 220 °C. Tras la realización de este proceso se obtiene un producto sólido, el biochar, cuyas principales características físicas y químicas son analizadas a fin de determinar sus posibles aplicaciones.

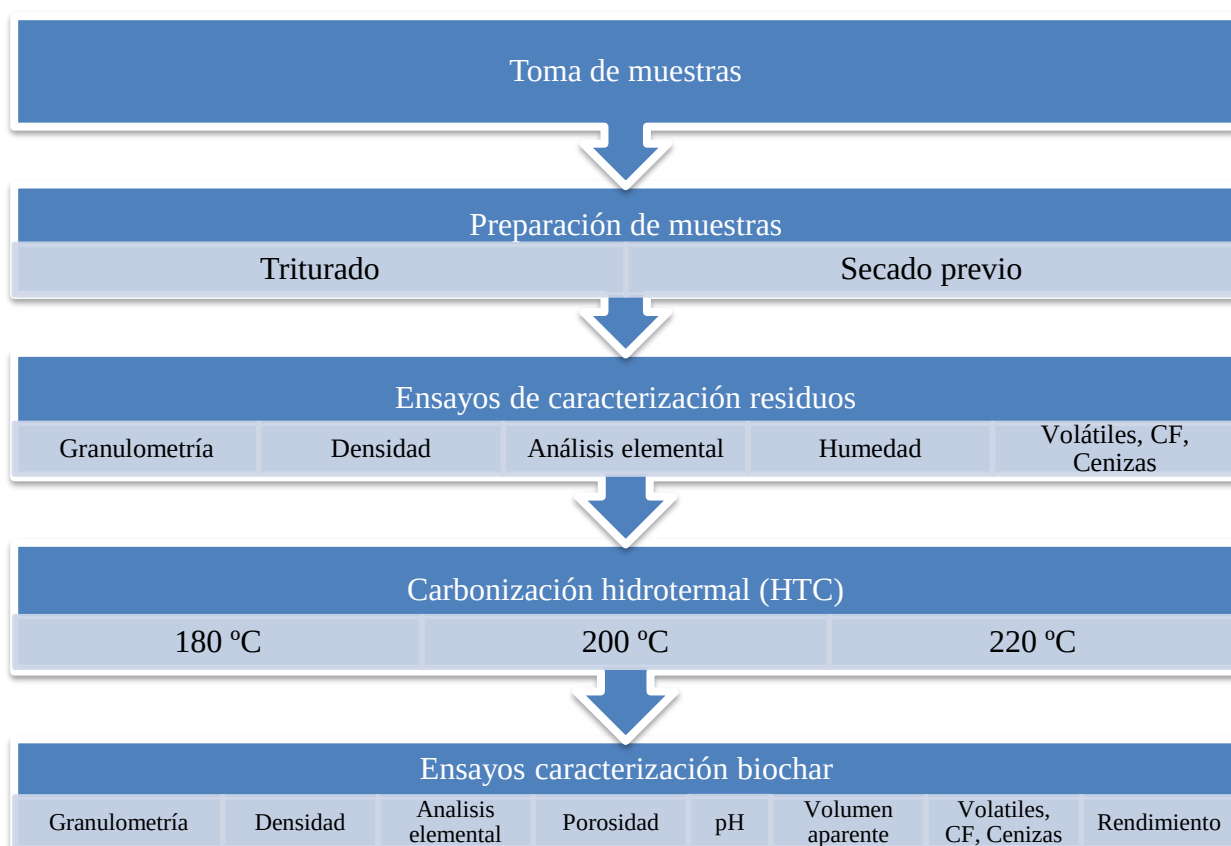


Figura 3-1 Metodología seguida en el TFG

3.1 Residuos utilizados

Para el desarrollo de este trabajo se han seleccionado 6 residuos de origen orgánico siendo, todos ellos, de carácter residual. Estos residuos han sido caracterizados y valorizados mediante carbonización hidrotermal a diferentes temperaturas y bajo diferentes condiciones generando, como producto principal, un biochar cuyas propiedades más relevantes han sido analizadas y estudiadas. Los residuos objeto de estudio aparecen recogidos en la Figura 3-2 y han sido los siguientes: cáscara de naranja, piel de plátano, posos de café, algas secas resultantes de un proceso industrial, cáscaras de pistachos y piel de patata.



Figura 3-2 Residuos utilizados

Cabe destacar que dichos residuos han sido seleccionados debido a su abundancia y facilidad de obtención en un entorno como la ENM, a excepción de los residuos algales procedentes de la empresa CEAMSA (Compañía Española de Algas Marinas), ubicada en Porriño (provincia de Pontevedra) y resultantes del proceso industrial que se lleva a cabo en sus instalaciones para la obtención de hidrocoloides naturales procedentes de macroalgas. A pesar del carácter residual de los mismos, estos 6 materiales son recursos valiosos a partir de los cuales es posible obtener un producto de valor a nivel comercial como es el biochar. La valorización de este tipo de materiales pretende fomentar el aprovechamiento de recursos y la minimización de residuos contribuyendo a lo que se conoce como economía circular.

3.2 Preparación de las muestras

Previamente a la realización de los ensayos de carbonización hidrotermal y a la caracterización de los propios residuos, se han llevado a cabo una serie de acciones necesarias para acondicionar las muestras de cara a su tratamiento posterior.

Primeramente, se han recolectado los diferentes residuos provenientes, en su mayoría, de la propia Escuela Naval Militar de Marín al ser productos de consumo frecuente en este Centro. Con el fin de utilizar todos los residuos en las mismas condiciones, estos compuestos han sido secados en una estufa de marca “INDELAB FI.80” a una temperatura de 105 °C hasta peso constante para extraerles la humedad. Posteriormente, las muestras fueron trituradas hasta conseguir un tamaño más reducido que facilitaba su tratamiento posterior mediante HTC. Una vez acondicionadas las muestras se procedió a la caracterización los residuos. Los residuos secos fueron almacenados en recipientes herméticos hasta su utilización.

3.3 Ensayos de caracterización

3.3.1 Granulometría

Se determinó la distribución granulométrica de las diferentes materias primas empleando para ello una serie de tamices con tamaño de malla comprendido entre 0,05 y 4 mm. Para ello, se tomaron muestras de 50-200 g que se hicieron pasar a través de los diferentes tamices dispuestos de mayor a menor apertura, determinando el porcentaje de material retenido en cada uno de los tamices, lo que permitió confeccionar la curva granulométrica.

3.3.2 Densidad

La densidad viene determinada por la cantidad de materia (m) que ocupa un determinado volumen (v). Para la determinación de este parámetro se empleó una probeta registrando el peso del residuo que fue introducido en su interior hasta enrasar a un volumen determinado. El resultado de la densidad (d) del compuesto viene dado por la ecuación 3.1. El proceso se realizó por triplicado para cada una de las muestras.

$$d \left(\frac{g}{ml} \right) = m \div v \quad (\text{ec. 3.1})$$

3.3.3 Análisis inmediato

Para la determinación del contenido en volátiles, carbono fijo y cenizas se han utilizado un total de 8 crisoles cerámicos con tapas. El proceso seguido ha sido el siguiente:

- Se pesan los crisoles (m_c) y se les añade aproximadamente 2 g del material seco (m_{seco}).
- Posteriormente, se cubren los crisoles con su tapa cerámica y se introducen en una mufla de la marca Nabertherm (Figura 3-3) a 750 °C durante 7 minutos.
- Transcurridos los 7 minutos los crisoles se introducen en el desecador para que enfríen a temperatura ambiente. Una vez fríos se vuelven a pesar, determinando así la diferencia de masa correspondiente a la materia volátil.
- Una vez anotadas las masas de las muestras sin volátiles (m_f), se introducen de nuevo en la mufla a 750 °C durante 2 horas. Transcurridas las 2 horas, todo el carbono ha sido eliminado y solo quedan las cenizas cuya masa es determinada (m_{ash}).

Por lo tanto, el contenido en carbono fijo se obtiene restando al 100 % la masa de cenizas y de volátiles.



Figura 3-3 Mufla de la marca Nabertherm y modelo “up to 3000 °C”.

3.3.4 Análisis elemental

Mediante el análisis elemental se puede determinar los principales elementos que componen una sustancia como son el carbono (C), hidrógeno (H), nitrógeno (N) y azufre (S) de las diferentes muestras, así como el contenido en oxígeno (O) que se determina por diferencia entre el 100 % y la suma de los porcentajes de los elementos citados. Esta analítica fue realizada en el laboratorio del CACTI (Centro de Apoyo Científico_Tecnológico a la Investigación) perteneciente a la Universidad de Vigo. Para ello, se envió una muestra de los diferentes residuos, así como de los productos carbonosos obtenidos (biochar) tras la carbonización hidrotermal. Para la determinación de los citados elementos se empleó un analizador elemental CHNS.

El procedimiento de medida en el microanalizador CHNS fue llevado a cabo de la siguiente manera: se pesaron alrededor de 2 mg de muestra en cápsulas de estaño de tamaño 5x3,5 mm utilizando una microbalanza analítica Metler Toledo Modelo MX5 con sensibilidad de $1,5 \times 10^{-6}$. La composición de carbono, hidrógeno, nitrógeno y azufre (CHNS) se determinó mediante un analizador elemental CHNS de la marca Fisons EA 1108 perteneciente al Servicio de Seguridad Alimentaria y Desarrollo Sostenible del CACTI. Se emplearon flujos de gases de 100 ml/min de helio (He) y 15 ml/min de oxígeno (O₂).

El análisis se basa en la oxidación completa e instantánea de la muestra mediante una combustión "flash" que consigue convertir todos los compuestos orgánicos e inorgánicos en productos de combustión. Los gases de combustión son transportados por un gas portador (He) a través de un horno de reducción y posteriormente de una columna cromatográfica donde son separados los diferentes elementos. Finalmente, los gases son detectados utilizando un detector de conductividad térmica (TCD), que proporciona una señal proporcional a la concentración de cada componente individual.

3.3.5 Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible representa la cantidad de energía desprendida por una sustancia en la reacción de combustión, referida a la unidad de masa de combustible. Es la cantidad de calor que entrega dicha sustancia al oxidarse en forma completa y resulta de interés el conocimiento de este parámetro para los diferentes tipos de biochar obtenidos. Para determinar el poder calorífico superior (PCS), expresado en kcal/kg, se ha utilizado la "fórmula de Dulong para combustibles sólidos y líquidos" que tiene la siguiente expresión [63]:

$$PCS = 8100 \times C + 34400 \times (H - 0 \div 8) + 2500 \times S \quad (\text{ec. 3.2})$$

3.4 Ensayos de carbonización hidrotermal

Para la realización de los ensayos de carbonización hidrotermal se han utilizado reactores de alta presión elaborados en acero inoxidable con cámara de PTFE (politetrafluoroetileno) de 100 ml de capacidad (Figura 3-4) además de la mufla citada en apartados anteriores (Figura 3-3).



Figura 3-4 Reactor HTC

El procedimiento seguido ha consistido en introducir en el reactor hidrotermal cada una de las materias primas previamente acondicionadas (secas y trituradas). Teniendo en cuenta que la carbonización hidrotermal se lleva a cabo en presencia de agua cada reactor fue cargado con la misma cantidad de material que de agua. Una vez cargados y correctamente cerrados, los reactores fueron introducidos en la mufla durante 20 horas, periodo escogido para garantizar que la reacción de carbonización había llegado a su fin. Cada residuo fue ensayado a 3 temperaturas diferentes, 180 °C, 200 °C y 220 °C.

Cabe destacar que el motivo que llevó a escoger la carbonización hidrotermal como técnica idónea para la obtención de biochar es el menor coste asociado a la no necesidad de secado de la materia prima en comparación con otras técnicas, si bien en la primera tanda de ensayos se decidió emplear la materia prima seca para garantizar la reproducibilidad de condiciones en todos los materiales ensayados. Es por ello por lo que, tras la realización de esa primera tanda de ensayos se analizó cuál de las 3 temperaturas estudiadas había resultado más favorable para cada uno de los 6 residuos estudiados, en lo que a términos de rendimiento de biochar se refiere y dicha temperatura fue para llevar a cabo un nuevo ensayo, pero en empleando el residuo húmedo y añadiendo $\frac{1}{4}$ de peso en agua con respecto al peso de la biomasa a utilizar.

Un resumen de los ensayos realizados puede ser observado en la Figura 3-5.

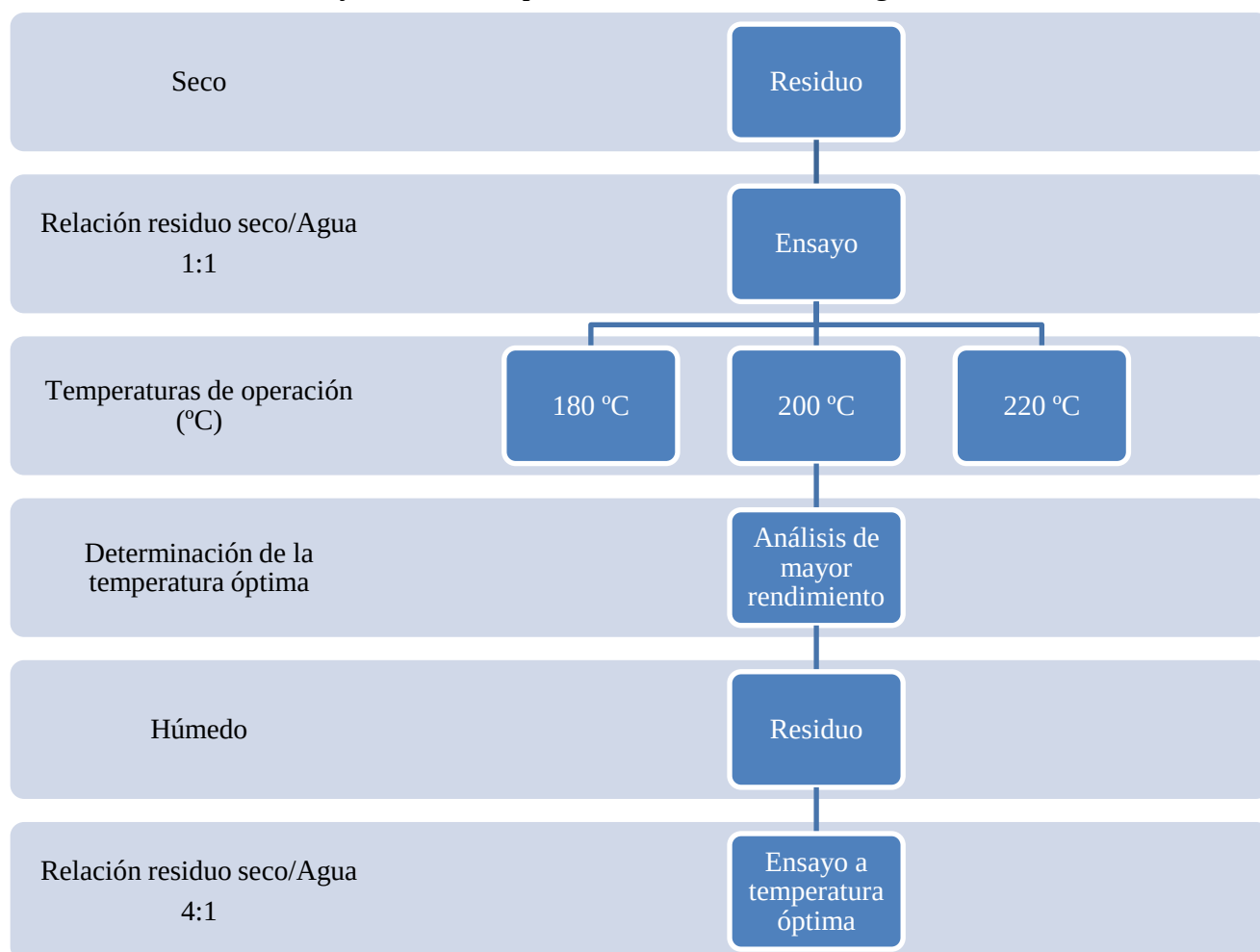


Figura 3-5 Ensayos realizados

Una vez transcurridas las 20 horas, se retiran los reactores de la mufla y se sumergen en un baño de agua con hielo para cortar la reacción. Una vez que los reactores se encuentran a temperatura ambiente, son retirados del baño y se procede a la apertura de estos (Figura 3-6 A). Como resultado de la carbonización hidrotermal se obtiene un producto sólido, el biochar, una fracción líquida y unos

productos gaseosos. Únicamente será objeto de este estudio el producto sólido separando este de la fracción líquida mediante filtración a vacío. La parte líquida es introducida en recipientes cerrados y almacenada en frío para estudios posteriores mientras que la parte sólida es introducida en un horno a 105 °C durante 12 horas para obtener el material seco, biochar. Pasado este tiempo el material es llevado a un desecados hasta que se enfría a temperatura ambiente, momento en el cual es pesado. Una vez realizado el proceso biochar obtenido tiene una apariencia como la que se puede observar en la Figura 3-6 B).



A)



B)

Figura 3-6 A) Reactor tras ensayo en la mufla B) Biochar tras filtrado al vacío y secado

3.4.1 Ensayos caracterización biochar

Se llevaron a cabo una serie de mediciones para caracterizar distintas propiedades correspondientes a los diferentes biochar obtenidos. Entre ellos se incluye granulometría, densidad, análisis inmediato (volátiles, carbono fijo y cenizas) y poder calorífico que serán realizadas siguiendo los procesos descritos en el apartado 3.3. El resto de las propiedades determinadas serán descritas a continuación.

3.4.2 Densidad y porosidad

Se procedió a la determinación de la densidad aparente de los distintos biochar obtenidos, así como a la determinación de su densidad real y porosidad. Tal y como se comentó anteriormente, la densidad es la relación entre la masa de una sustancia y el volumen que ocupa. En el caso del biochar derivado de residuos biomásicos, la densidad aparente es la que se corresponde con el volumen realmente ocupado por este producto sólido en el que se incluyen volumen de poros existentes, los huecos entre las diferentes partículas y el volumen intersticial [64]. La porosidad es la propiedad de un material vinculada a los espacios vacíos de los que dispone en su superficie o estructura [65]. Para determinar estos parámetros se siguieron los pasos que a continuación se detallan:

Se pesó una probeta (M1), se le añadió el contenido del biochar obtenido (M2) y se comprueba el volumen ocupado (V2). Se rellenó la probeta con agua hasta cubrir el contenido de biochar enrasando con este y se pesó el conjunto (M3). Con estos datos se hicieron los cálculos siguientes:

$$M. \text{ biochar } (g) = M2 - M1 \quad (\text{ec. 3.3})$$

$$M. \text{ agua } (g) = M3 - M2 \quad (\text{ec. 3.4})$$

$$V. \text{ agua } (ml) = M. \text{ agua } \div \text{Densidad. agua} \quad (\text{ec. 3.5})$$

$$V. \text{biochar.real (ml)} = V2 - V. \text{agua} \quad (\text{ec. 3.6})$$

Con estos datos las propiedades a determinar fueron:

$$\blacksquare \text{ Densidad aparente (g/ml)} = M. \text{biochar} \div V2 \quad (\text{ec. 3.7})$$

$$\blacksquare \text{ Porosidad (\%)} = (V. \text{agua} \div V2) \times 100 \quad (\text{ec. 3.8})$$

$$\blacksquare \text{ Densidad biochar real (g/ml)} = M. \text{biochar} \div V. \text{biochar.real} \quad (\text{ec. 3.9})$$

3.4.2.1 Volumen aparente

El volumen aparente es la medida del espacio total ocupado por un objeto, incluyendo tanto su masa sólida como los espacios vacíos o porosidades [66]. Para conocerlo se pesa 1 g de material y se coloca en un embudo con papel de filtro. Posteriormente se hace pasar 100 ml de agua, y se mide el volumen de agua que ha caído (V.s). La fórmula utilizada ha sido la siguiente [67]:

$$Va \text{ (ml)} = 100 - V. s \quad (\text{ec. 3.10})$$

3.4.3 Rendimiento del biochar

El rendimiento del biochar se define como la proporción de biochar producido en relación con la cantidad inicial de materia prima utilizada en el proceso de carbonización. Se expresa como un porcentaje y se calcula dividiendo la masa de biochar obtenida entre la masa inicial de la materia prima y luego multiplicando por 100. Para su determinación, se comparó la cantidad de materia seca original (M1), es decir, la cantidad de residuo utilizada en su forma seca, con la masa de biochar obtenida después del secado (M2). La ecuación utilizada para calcular el rendimiento de biochar se expresa como sigue [68], y el resultado se obtiene en porcentaje.

$$Ymb \text{ (\%)} = (M2 \div M1) \times 100 \quad (\text{ec. 3.11})$$

3.4.4 pH

El pH es una medida que indica el nivel de acidez o alcalinidad de una solución. Se calcula basándose en la concentración de iones de hidrógeno presentes en la solución, con valores que van de 0 a 14. Un pH de 7 es neutral, por debajo de 7 indica acidez y por encima de 7 indica alcalinidad.

Se llevó a cabo la medición del pH del biochar obtenido mediante la preparación de una mezcla biochar-agua en una proporción de 1:10 en un vaso de precipitados. Tras agitar la mezcla y permitir un reposo de 10 minutos, se utilizó un medidor de pH digital de la marca PH-2011 para obtener el valor del pH (Figura 3-7).



Figura 3-7 Medición del pH

3.4.5 Análisis estadístico ANOVA

Una vez obtenidos los resultados de los diferentes ensayos, se realizó un análisis estadístico ANOVA de dos factores con una sola muestra por grupo mediante la herramienta de Excel.

El análisis de varianza (ANOVA) de dos factores se utiliza para determinar si hay diferencias significativas entre grupos en función de dos variables independientes. En este caso, serán la temperatura y el tipo de compuesto y como estos afectan en los resultados. El análisis implica:

- Definición de variables: La temperatura y el tipo de compuesto son las variables que se analizan, mientras que los resultados de las diferentes mediciones son las variables dependientes.
- Diseño experimental: Se establecen diferentes grupos experimentales para cada combinación de temperatura y tipo de compuesto.

Volumen aparente ml					
	Residuo	180 °C	200 °C	220 °C	
Cáscara de n	0,28	0,12	0,17	0,1	
Piel plátano	0,32	0,25	0,22	0,24	
Posos de café	0,34	0,19	0,18	0,17	Cáscara de naranja
Algas secas	0,14	0,11	0,12	0,11	Piel plátano
Cáscara de p	0,61	0,42	0,37	0,33	Posos de café
Piel de patata	0,52	0,09	0,08	0,08	Algas secas

Análisis de datos	
Funciones para análisis	
Análisis de varianza de un factor	
Análisis de varianza de dos factores con varias muestras por grupo	
Análisis de varianza de dos factores con una sola muestra por grupo	
Coefficiente de correlación	
Covarianza	
Estadística descriptiva	
Suavización exponencial	
Prueba F para varianzas de dos muestras	
Análisis de Fourier	
Histograma	

Figura 3-8 Análisis ANOVA

- **Análisis de datos:** Se realiza el ANOVA de dos factores para determinar si la temperatura, el tipo de compuesto tienen un efecto significativo en el resultado del ensayo. Se establece un nivel de significancia de 0,05. Esto significa que si el valor p (probabilidad de obtener un resultado igual o mayor que el observado, si la hipótesis nula es cierta) es menor que 0.05, entonces se rechaza la hipótesis nula y concluirás que hay diferencias significativas entre los grupos.
- **Conclusiones:** Si se encuentran diferencias significativas, se concluye que la temperatura y/o el tipo de compuesto afectan el resultado del ensayo. De lo contrario, se concluye que no hay diferencias significativas entre los grupos en función de estas variables.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los resultados específicos de la carbonización hidrotermal obtenidos para cada tipo de residuo, los cuales serán sometidos a un análisis estadístico de varianza para evaluar el conjunto de residuos en su totalidad y la influencia que la temperatura y materia de origen tienen sobre los resultados.

4.1 Datos obtenidos

Se van a exponer los resultados de los diferentes ensayos y caracterizaciones de cada compuesto individualmente, recopilando los valores numéricos en tablas y comentando la lógica de los resultados obtenidos.

4.1.1 Densidad

A continuación, se muestran los datos de densidad medidos en (g/ml) (Tabla 4-1):

	Residuos	180 °C	200 °C	220 °C	Ensayo en base húmeda
Cáscara de naranja	0,28	0,12	0,17	0,10	0,11 (200 °C)
Piel de plátano	0,32	0,25	0,22	0,24	0,22 (180 °C)
Posos de café	0,34	0,19	0,18	0,17	0,16 (200 °C)
Residuo algal	0,14	0,11	0,12	0,11	-
Cáscaras de pistachos	0,61	0,42	0,37	0,33	-
Piel de patata	0,52	0,09	0,08	0,08	0,11 (220 °C)

Tabla 4-1 Densidad del residuo y de los biochar obtenidos.

A la vista de los resultados, el biochar que ha obtenido una mayor densidad ha sido el de cáscaras de pistachos valorizados a 180 °C con un valor de 0,42 g/ml. La menor densidad obtenida ha sido del biochar de la piel de patata valorizada a 200 °C así como a 220 °C, con un valor de 0,08 g/ml. El biochar que ha sufrido una mayor variación de densidad desde el residuo al biochar ha sido la patata, disminuyendo su valor en un 75 %.

Según diversos estudios realizados sobre la materia, comúnmente un aumento de temperatura se asemeja a una disminución de la densidad del biochar. Esto se debe a una reducción en el volumen y masa del compuesto [69]. Este fenómeno se atribuye a la volatilización de diversas sustancias de la materia y al incremento en la porosidad del material, generando un mayor contenido de espacios vacíos dentro del compuesto.

Sin embargo, cada materia tiene una temperatura óptima de valorización que viene determinada principalmente por la composición del propio residuo [68]. En los posos de café, cáscaras de pistachos y en la piel de plátano la densidad se reduce con la temperatura como mencionado. En ellos por lo tanto la temperatura óptima para la obtención de una mayor densidad sería 180 °C o menos. En la piel de patata también se observa esta tónica, pero en este compuesto la densidad sufre una caída significativa por lo que se puede deducir que su temperatura óptima de valorización estaría por debajo de los 180 °C.

En el residuo algal y en las cáscaras de naranja se observa un repunte de la densidad a 200 °C, volviendo esta última a disminuir a 220 °C. Estos dos residuos por lo tanto favorecerían esta temperatura a la hora de obtener una mayor densidad.

4.1.2 Humedad inicial

Para la realización de los ensayos en seco el compuesto fue secado hasta obtener un valor de humedad de 0 %. Sin embargo, la humedad de los residuos en base húmeda fueron los siguientes (Tabla 4-2):

Residuo	Humedad (%)
Cáscara de naranja	71,34
Piel de plátano	77,98
Posos de café	70,62
Piel de patata	81,00

Tabla 4-2 Humedad inicial residuos en base húmeda.

Se puede comprobar que los niveles de humedad son considerables, por lo que su secado completo supondría un importante derroche de energía en caso de realizar estos ensayos a mayor escala.

4.1.3 Rendimiento

Los rendimientos de biochar obtenidos en los diferentes ensayos y expresados en porcentaje (%) se muestran en la siguiente tabla (Tabla 4-3):

Residuo	Ensayo 180 °C	Ensayo 200 °C	Ensayo 220 °C	Ensayo en base húmeda
Cáscara de naranja	21,72	50,88	42,96	35,91 (200 °C)
Piel de plátano	55,85	54,75	45,42	22,95 (180 °C)
Posos de café	43,09	59,56	42,15	60,24 (200 °C)
Residuo algal	70,83	60,08	60,67	-
Cáscaras de pistachos	45,91	56,76	38,07	-
Piel de patata	11,15	25,20	32,20	40,39 (220 °C)

Tabla 4-3 Rendimientos del biochar (%) en los diferentes ensayos

En los ensayos realizados con cáscaras de naranja, se determinó que la temperatura más favorable fue de 200 °C, con un rendimiento del 50,88 %. Este valor fue un 7,92 % mayor que el obtenido a 220 °C, lo que condujo a la elección de 200 °C para el ensayo con el residuo húmedo. Sin embargo, al realizar en el ensayo con residuo húmedo su rendimiento fue menor (35,91 %).

En el caso de las pieles de plátano, el ensayo más favorable fue a 180 °C, con un rendimiento del 55,85 %, casi igual al del ensayo a 200 °C (54,75 %). Se observó una reducción significativa en el rendimiento al realizar el ensayo con material húmedo (22,95 %).

Con los posos de café, la temperatura más favorable fue de 200 °C, con un rendimiento del 59,56 %, un 16 % más alto que el segundo ensayo más favorable a 180 °C. En este caso, el uso de compuestos húmedos aumentó el rendimiento en casi un 20 % si se compara con el rendimiento alcanzado a temperaturas de 180 °C y 200 °C.

En lo que respecta al residuo algal, el ensayo más favorable se realizó a 180 °C, con un rendimiento del 70,83 %, un 10 % más alto que en los otros 2 experimentos conducidos, y se observó que no hubo una gran diferencia entre los ensayos realizados a 200 °C y 220 °C.

En los ensayos con cáscaras de pistachos, la temperatura más favorable fue de 200 °C, con un rendimiento del 56,76 %, un 10 % más alto que el segundo ensayo más favorable a 180 °C. No se realizaron mediciones con compuestos húmedos debido al bajo nivel de humedad de la cáscara de pistacho (7 %).

Finalmente, en los ensayos con piel de patata, el rendimiento aumentó con la temperatura, siendo el más alto a 220 °C, con un 32,2 %. Este resultado va ligado a los resultados de la densidad previamente analizada, donde los biochar generados también mostraban los valores más pequeños de todo el conjunto. Sin embargo, el compuesto húmedo alcanzó un rendimiento del 40,39 %, un 10 % más alto que en base seca. Se sigue una tendencia a la alta debido a que la temperatura más propicia para la descomposición del almidón ronda los 200-250 °C, por lo que a mayores temperaturas de ensayo se obtendrá una mayor cantidad de carbón [61].

Según diversos estudios, el aumento de la temperatura de ensayo está asociada a una disminución en el rendimiento del proceso de carbonización, dado que se produce una mayor generación de gases y la formación de un carbón más reactivo [69]. Sin embargo y al igual que en la densidad, cada elemento posee una temperatura idónea para su valorización. En general se observa como en nuestros ensayos la piel de plátano y los residuos algales cumplen dicha características ya que su temperatura ideal es de 180 °C o menos, mientras que las cáscaras de naranja, los posos de café y las cáscaras de pistachos favorecen más las temperaturas de 200 °C, después de las cuales el rendimiento vuelve a disminuir con el incremento de temperatura.

Es importante destacar que la mayoría de los rendimientos del biochar oscilan entre el 40 % y el 60 %, lo cual concuerda con resultados de estudios previos que abordaron características similares en términos de temperatura, materia prima y tiempo de residencia [70].

Los resultados revelaron que los ensayos realizados con base húmeda, a excepción de aquellos realizados con la patata, exhibieron un menor rendimiento en comparación con aquellos llevados a cabo con base seca. Este fenómeno se atribuye al hecho de que, en la base seca, una proporción mayor de la materia prima se convierte en biochar, dado que se requiere menos energía para evaporar el agua presente en la biomasa [71]. Sin embargo, en el caso de la patata, esta al no haber alcanzado su temperatura óptima favorece la base húmeda a 220 °C ya que el agua es un trasmisor del calor más potente que el aire [74].

4.1.4 Granulometría

Los resultados de la granulometría de los diferentes ensayos han sido valorados en función al porcentaje de material que pasa por cada bandeja del tamiz.

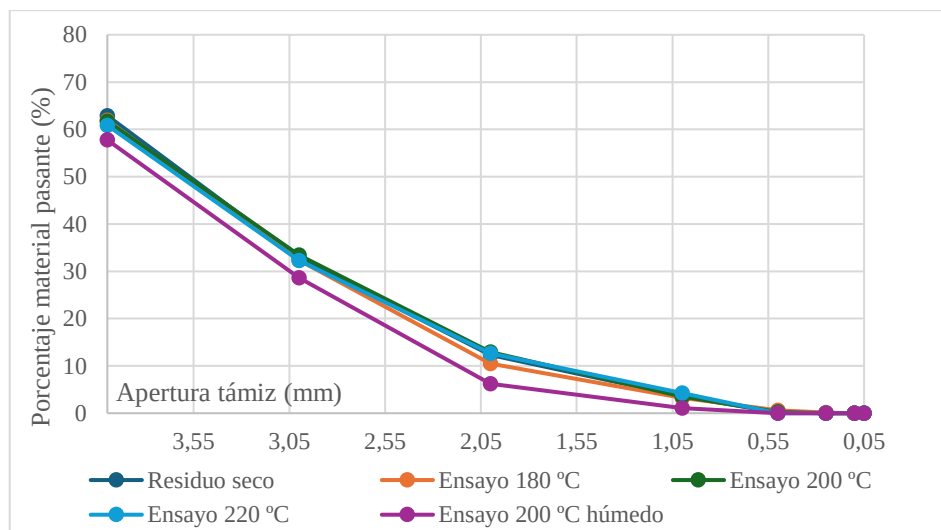


Figura 4-1 Granulometría de los diferentes ensayos con cáscara de naranja

La cáscara de naranja ha generado partículas finas en el proceso de HTC, siendo un biochar de textura consistente con un tamaño predominante mayor a 2 mm como mostrado en la Figura 4-1.

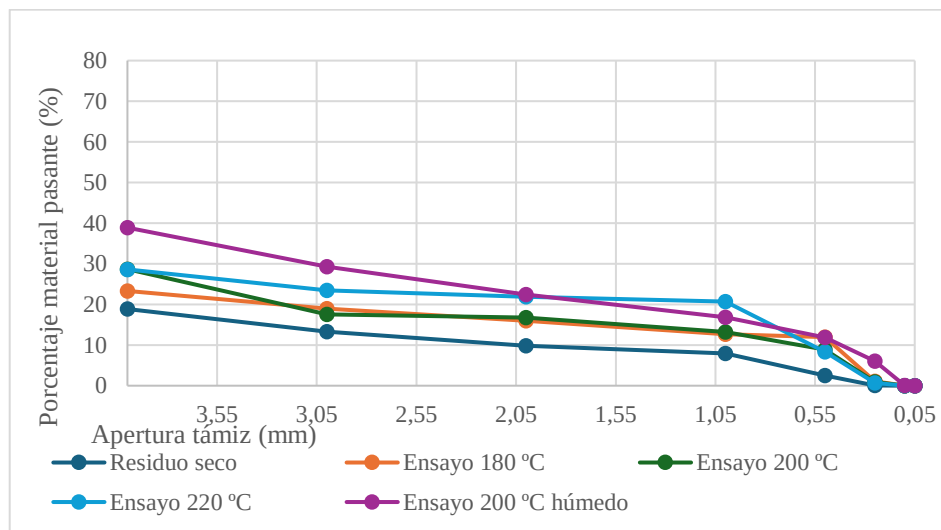


Figura 4-2 Granulometría de los diferentes ensayos con piel de plátano

Se observa en la Figura 4-2 que solo entre un 20-40 % material ha atravesado la primera bandeja del tamiz. Por lo tanto, la piel de plátano ha generado el biochar más consistente y sólido de entre todos los ensayos, predominando partículas con un tamaño mayor a 4 mm lo cual le otorga un valor añadido para su manipulación posterior.

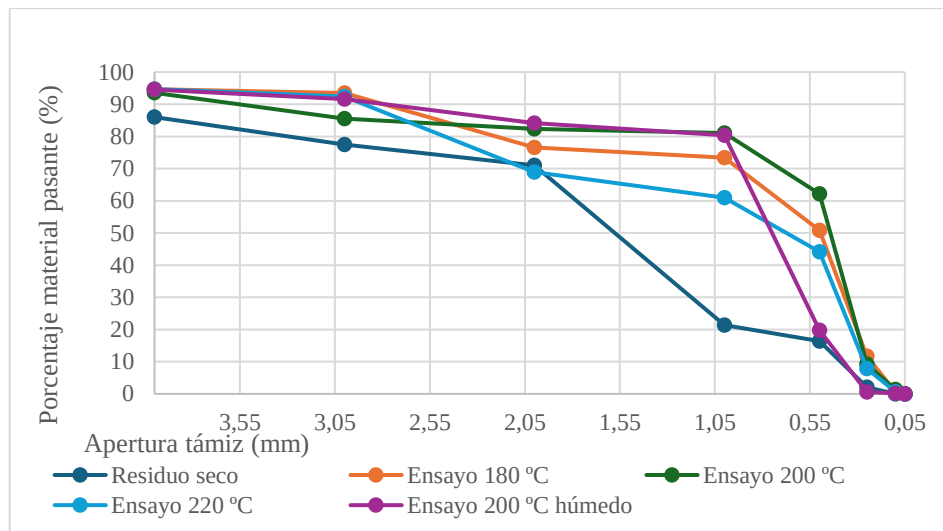


Figura 4-3 Granulometría de los diferentes ensayos con posos del café

Los posos de café, al igual que el propio café molido tiene una textura arenosa con partículas con un tamaño predominante de entre 0,5 y 0,25 mm, explicándose su tamaño por el proceso previo de compactación y triturado de los granos de café de los cuales proceden (Figura 4-3).

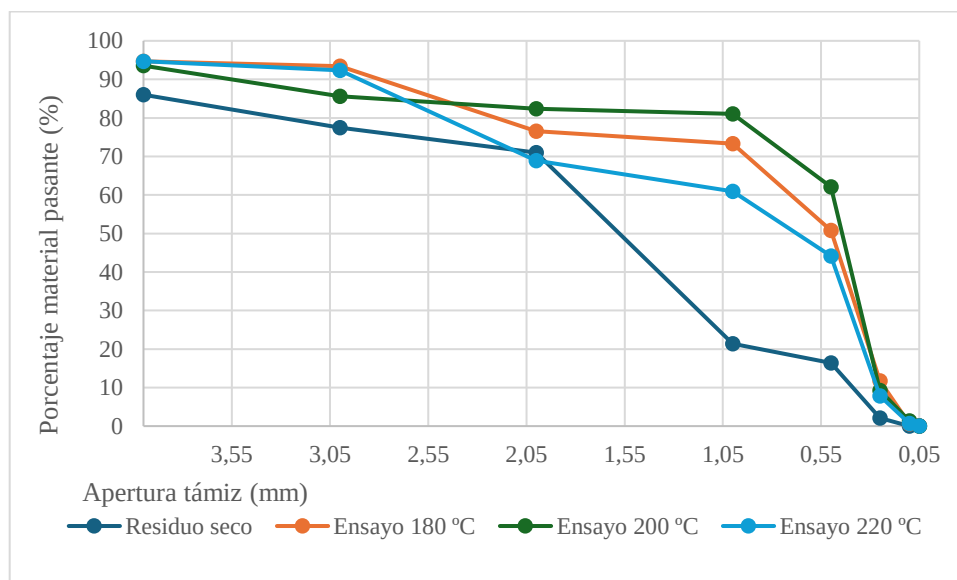


Figura 4-4 Granulometría e los diferentes ensayos con algas secas

Las algas secas son un residuo muy frágil, de una textura esponjosa y ligera parecida al algodón de azúcar. Este material se deshace en partículas arenosas mayoritariamente de entre 1-0,5 mm. Sin embargo, una vez realizados los ensayos, el biochar genera una textura incluso menos estable que se deshace más fácilmente en partículas más pequeñas, predominando estas de un tamaño de 0,25 mm (Figura 4-4).

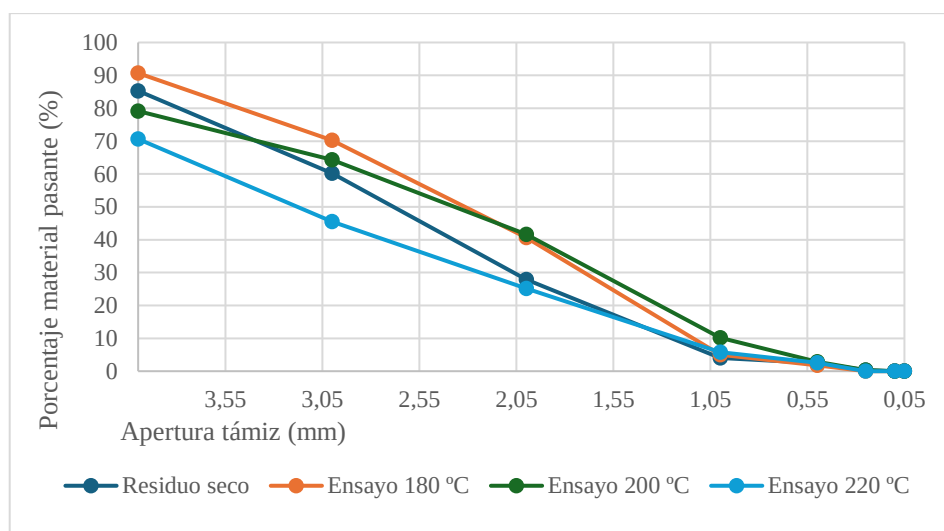


Figura 4-5 Granulometría de los diferentes ensayos con cáscaras de pistachos

Las cáscaras de pistachos mantienen una textura uniforme y sólida con tamaños de partículas de entre 2-3 mm (Figura 4-5).

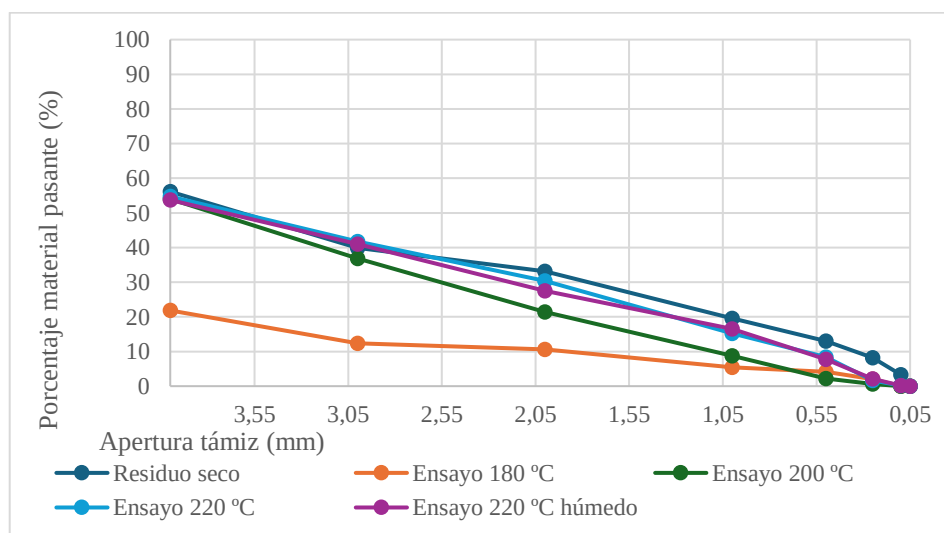


Figura 4-6 Granulometría de los diferentes ensayos con piel de patata

La piel de patata genera un biochar muy fino y frágil, de la textura parecida a una hoja seca y cuyos tamaños se ven repartidos más o menos de una manera uniforme de entre los 4, 3, 2 y 1 mm respectivamente (Figura 4-6).

En general, se puede observar como la cantidad de material pasante no es afectada de manera significativa por los diferentes ensayos, sino por el tamaño original de la partícula del residuo.

4.1.5 pH

A continuación, se muestran los diferentes pH de los biochar obtenidos de cada ensayo (Tabla 4-4):

Residuo	Ensayo 180 °C	Ensayo 200 °C	Ensayo 220 °C	Ensayo en base húmeda
Cáscara de naranja	3,9	4,7	4,8	5,1 (200 °C)
Piel de plátano	4,6	5,6	6	4,8 (180 °C)
Posos de café	4,6	4,9	5,6	4,8 (200 °C)
Residuos algales	7,7	7,5	7,6	-
Cáscaras de pistachos	4,1	5,1	4,9	-
Piel de patata	5,5	5,62	5,8	5,7 (220 °C)

Tabla 4-4 pH de los biochar obtenidos de los diferentes ensayos

A la vista de los resultados el compuesto más ácido es el biochar obtenido en el ensayo a 180 °C siendo este de valor 3,9, mientras que el más alcalino el de los residuos algales a 180 °C con un valor de 7,7.

El pH de la mayor parte de los residuos resulta ser ligeramente ácido. Esto viene dado por que se ha trabajado principalmente con sustancias frutales y vegetales, y se conoce que hasta un 95 % de los alimentos diarios consumidos son de pH ácido [73]. También, las materias primas utilizadas en los ensayos excepto las algas provienen de haber sido cultivadas, siendo las tierras agrícolas donde se tratan del rango de acidez de entre 5,5-7 [74]. Sin embargo, los ensayos con algas secas muestran valores de pH casi neutros, independientemente de la temperatura debido a que este compuesto contiene gran cantidad de cenizas alcalinas y realiza la fotosíntesis, consumiendo CO₂ y liberando oxígeno causando que el pH aumente [75]. Además, el mar, al contrario que las tierras de cultivo, presentan un pH alcalino constante en todo el mundo de un valor alrededor de 8,2 [76].

En general, se puede inferir que, el pH ácido tiende a aumentar con la temperatura, ya que a mayores temperaturas se pierden grupos fenólicos y carboxílicos de naturaleza ácida, y se separan minerales y sales alcalinas de la biomasa de origen [77].

Un biochar ligeramente ácido podría ser beneficioso en aplicaciones agrícolas, especialmente en suelos que requieran una acidificación controlada. Este tipo de biochar podría usarse como enmienda para mejorar la calidad del suelo en cultivos que prefieren condiciones más ácidas, como ciertas variedades de frutas, verduras y plantas ornamentales. Además, el biochar ácido podría actuar como un regulador del pH del suelo, ayudando a mantener un equilibrio adecuado para el crecimiento óptimo de los cultivos [78].

Por otro lado, un biochar alcalino como el obtenido de las algas podría ser útil en aplicaciones de remediación ambiental, particularmente en la neutralización de suelos ácidos o contaminados por lluvia ácida o tras una deforestación. Este tipo de biochar se puede emplear en proyectos de restauración de suelos degradados, donde la alcalinidad del biochar ayudaría a contrarrestar la acidez excesiva del suelo y mejorar sus propiedades físicas, químicas y biológicas. Además, el biochar alcalino podría ayudar a reducir la lixiviación de contaminantes ácidos, como metales pesados, contribuyendo así a la recuperación ambiental [79].

4.1.6 Porosidad y Volumen aparente

En este apartado se presentan los resultados de la porosidad y volumen aparente juntos ya que ambos están ligados. El volumen aparente de un material está directamente relacionado con su porosidad. La porosidad, definida como el volumen de espacios vacíos en relación con el volumen total del material, aumenta con un mayor volumen aparente. Los valores se muestran a continuación (Tabla 4-5) (Tabla 4-6) respectivamente:

Residuo	Ensayo 180 °C	Ensayo 200 °C	Ensayo 220 °C	Ensayo con residuo húmedo
Cáscara de naranja	71,19	70	71,92	70,68 (200 °C)
Piel de plátano	58,70	65,38	60	62,36 (180 °C)
Posos de café	4,32	9,87	11	2,65 (200 °C)
Residuo algal	69,70	73,87	96,70	-
Cáscaras de pistachos	66,67	86,81	97,68	-
Piel de patata	53,51	65,89	80	77,3 (220 °C)

Tabla 4-5 Porosidad de los biochar obtenidos de los diferentes ensayos

Residuo	Ensayo 180 °C	Ensayo 200 °C	Ensayo 220 °C	Ensayo con residuo húmedo
Cáscara de naranja	7	5	5	10 (200 °C)
Piel de plátano	2	4	3	3,7 (180 °C)
Posos de café	1	1	1	1 (200 °C)
Residuo algal	5	8	10	-
Cáscaras de pistachos	2	3,5	5	-
Piel de patata	5,5	6	7,5	7,45 (220 °C)

Tabla 4-6 Volumen aparente de los biochar obtenidos de los diferentes ensayos

Según diversos estudios, el incremento de la temperatura durante la carbonización hidrotérmica generalmente conlleva a un aumento en el porcentaje de porosidad en el biochar resultante. Este fenómeno se atribuye a la mayor descomposición y pérdida de volátiles que experimentan los materiales carbonizados a temperaturas más elevadas, lo que genera una red de poros más extensa. Además, la liberación de gases y agua a temperaturas elevadas puede provocar una expansión de la estructura, facilitando la formación de poros adicionales [80].

Los posos de café, generados mediante trituración y compactación previas de granos de café, tienen una estructura inherentemente incapaz de adsorber líquidos de manera significativa, lo que resulta en un porcentaje de porosidad muy bajo.

Entre los compuestos analizados, las algas secas y las cáscaras de pistachos destacan por presentar niveles significativos de porosidad, que oscilan entre el 69 % y el 96 % para las algas y entre el 66 % y el 97 % para las cáscaras de pistachos. Las algas exhiben una alta porosidad debido a su estructura multicelular y la presencia de células llamadas neumatóforos, que contienen gases para proporcionar flotabilidad. Esta porosidad facilita el intercambio de nutrientes, gases y agua, y contribuye a su flotabilidad y estructura en el agua [81]. Por otro lado, las cáscaras de pistachos, siendo altamente fibrosas, permiten el intercambio de aire y agua con el exterior para favorecer la germinación de las semillas, explicando así la alta concentración de poros en estos materiales [82].

Por otro lado, no se observaron cambios significativos en la porosidad del residuo valorizado en base húmeda, manteniendo un nivel elevado de porosidad.

La alta porosidad del biochar favorece su aplicación en la agricultura debido a su capacidad para retener agua y así proporcionar un ambiente propicio para la actividad microbiana en el suelo. Esto se lleva a cabo debido a que la estructura porosa del biochar facilita a una mayor retención de agua en el suelo y por lo tanto contribuye a mantener niveles óptimos de humedad para el crecimiento de las plantas. Además, esta porosidad proporciona un sustrato adecuado para el desarrollo microbiano, lo que facilita la descomposición de materia orgánica y la liberación de nutrientes esenciales. El aumento de la actividad microbiana mejora la calidad del suelo al promover la formación de agregados estables y la degradación de compuestos orgánicos, lo que resulta en una mayor disponibilidad de nutrientes para las plantas y en una mejora de la estructura y la capacidad de retención de agua del suelo [83].

4.1.7 Análisis inmediato

En este apartado se compara el nivel de volátiles, carbono activo y cenizas de los residuos de partida, así como de los biochar derivados de estos (Tabla 4-7) (Tabla 4-8):

Residuo	Volátiles (%)	CF (%)	Cenizas (%)
Cáscara de naranja	81,72	15,41	2,87
Piel de plátano	75,85	13,11	11,03
Posos de café	83,28	14,81	1,9
Residuo algal	10,34	8,34	81,43
Cáscaras de pistacho	60,32	36,89	2,12
Piel de patata	80,48	13,72	7,21

Tabla 4-7 Análisis inmediato de los residuos

Biochar	Volátiles (%)			CF (%)			Cenizas (%)		
Temperatura ensayo	180 °C	200 °C	220 °C	180 °C	200 °C	220 °C	180 °C	200 °C	220 °C
Cáscara de naranja	51,36	53,71	57,16	45,19	42,36	39,75	3,45	3,93	3,08
Cáscara de naranja húmeda	-	61,67	-	-	21,90	-	-	3,65	-
Piel de plátano	72,31	68,38	68,97	21,95	29,69	22,49	5,74	1,93	8,54
Piel de plátano húmedo	70,67	-	-	25,90	-	-	6,25	-	-
Posos de café	76,04	73,55	66,37	23,07	25,68	33,29	0,88	0,75	0,32
Posos de café húmedos	-	77,67	-	-	26,90	-	-	1,25	-
Residuo algal	6,67	11,76	15,01	6,10	2,29	3,34	87,24	85,95	81,65
Cáscaras de pistachos	79,38	71,56	48,14	20,54	28,37	50,87	0,08	0,07	0,99
Piel de patata	73,67	62,40	66,98	21,78	32,29	35,76	6,54	5,32	9,28
Piel de patata húmeda	-	-	71,87	-	-	24,87	-	-	6,25

Tabla 4-8 Análisis inmediato de los diferentes biochar obtenidos de los ensayos

Como se puede observar, la gran parte de los compuestos estudiados reúne valores similares de volátiles, carbono fijo y cenizas, del orden de 50-80 %, 20-40 % y 0-10 % respectivamente. Estos valores son consistentes en la naranja, el plátano y la patata, que contienen grandes cantidades de volátiles como ésteres (aroma afrutado), alcoholes (aroma afrutado o terroso), aldehídos (aroma ligeramente herbáceo

y amargo), lactonas (aroma a melocotón) y terpenoides (aroma a aceites esenciales), conocidos por influir en el sabor de la fruta y la verdura. La intensidad del sabor se relaciona con la cantidad y composición de estos volátiles [82].

Con el café el alto contenido en volátiles se debe principalmente por su composición rica en carbono y a las reacciones de Maillard que se producen durante el tostado generando una amplia variedad y cantidad de estos volátiles [83].

En cuanto a las cáscaras de pistachos, este compuesto presenta una alta concentración de volátiles y una concentración media de carbono fijo (a 220 °C). Estos materiales, de origen vegetal, presentan una alta concentración de celulosa y hemicelulosa que, junto a que sea un compuesto fibroso hace que la cantidad de carbono fijo presente sea mayor. Por ello, al realizar los ensayos estas fibras se descomponen generando un mayor contenido en volátiles [84].

Las algas destacan por su alto contenido en cenizas en comparación con otras materias primas, atribuible a su abundancia en minerales como carbonatos, cloruros y sulfatos, obtenidos del medio marino donde prosperan. Estos minerales se absorben del agua marina y se depositan en forma de cenizas durante la combustión [85]. Esta característica distintiva del biochar generado de algas, con un contenido de cenizas que supera el 80 %, está determinada principalmente por la composición mineral de la biomasa original. Esta propiedad está también estrechamente vinculada al pH del biochar, pues estudios han demostrado que, a mayor concentración de cenizas, mayor es el pH del compuesto [67], confirmado en nuestro caso al presentar un pH alcalino único de entre todas las muestras. Además, el alto contenido de cenizas implica una concentración elevada de fosfatos, lo que favorece la precipitación de metales en el suelo mediante diversas reacciones químicas. Este aspecto distingue al biochar de algas como un recurso valioso para mejorar la fertilidad del suelo y facilitar la retención de nutrientes en aplicaciones agrícolas [87].

En general se observa que la mayor parte de los residuos valorizados presentan cantidades significativas de compuestos volátiles, lo cual cabría esperar vistos los rendimientos ya la materia que se pierde durante la combustión de los ensayos es volátil. Un alto contenido de volátiles confiere un valor de combustibilidad que será analizado más adelante. También, un alto contenido de volátiles puede tener propiedades desodorizantes o repelentes de plagas, lo que podría ser beneficioso en aplicaciones de control de olores o manejo integrado de plagas. Además, pueden ser valiosos en aplicaciones agrícolas, ya que algunos de ellos sirven como precursores de fitoquímicos beneficiosos para el crecimiento de las plantas [86].

4.1.8 Análisis elemental y poder calorífico

Los resultados de análisis elemental se han llevado a cabo por duplicado y posteriormente se han calculado los poderes caloríficos de los residuos (Tabla 4-9) y de los biochar.

Residuos	% N	% C	% H	% S	% O	PCS (kcal/kg)
Naranja	2,15±0,09	37,03±0,09	6,30±0,09	0,30±0	54,21±0,25	2844,75±0,09
Plátano	2,21±0,11	38,80±0,12	6,08±0,07	0,30±0	52,59±0,07	2981,68±0,11
Patata	2,56±0,08	36,58±0,15	6,29±0,02	0,30±0	54,27±0,05	2800,53±0,08
Pistacho	1,90±0,08	38,34±0,10	5,67±0,06	0,30±0	53,78±0,23	2752,24±0,08
Algas	1,65±0,04	8,08±0,17	1,42±0,01	0,30±0	88,54±0,14	0,00
Café	3,10±0,16	48,38±0,18	7,92±0,02	0,30±0	40,28±0,37	4921,82±0,16

Tabla 4-9 Análisis elemental de los residuos.

Biochar		N (%)			C (%)			H (%)		
Temperatura de ensayo	180 °C	200 °C	220 °C	180 °C	200 °C	220 °C	180 °C	200 °C	220 °C	
Naranja	1,93±0,01	2,00±0,04	1,67±0,02	51,18±0,16	59,82±0,00	53,38±0,11	5,40±0,30	5,82±0,32	5,97±0,32	
Naranja húmedo	-	1,86±0,02	-	-	61,22±0,21	-	-	6,44±0,47	-	
Plátano	2,25±0,15	2,61±0,09	3,08±0,01	50,93±0,15	58,89±0,04	62,14±0,18	6,09±0,20	6,48±0,18	6,74±0,16	
Plátano húmedo	2,62±0,06	-	-	56,95±0,43	-	-	5,95±0,12	-	-	
Patata	3,40±0,01	3,46±0,27	4,18±0,25	44,03±0,10	58,66±0,72	65,39±0,75	6,70±	4,68±0,35	6,08±0,04	
Patata húmedo	-	-	4,95±0,02	-	-	63,57±0,19	-	-	6,74±0,08	
Pistacho	1,07±0,12	0,47±0,01	0,61±0,44	53,43±0,48	57,72±0,09	58,21±1,87	5,61±0,16	5,32±0,08	5,01±0,00	
Algas	0,75±0,01	0,82±0,07	0,70±0,02	18,74±1,14	9,67±0,42	11,21±0,83	2,70±0,19	1,03±0,01	1,55±0,23	
Café	3,11±0,07	3,45±0,18	3,54±0,05	57,67±0,55	60,58±0,56	66,36±0,15	7,87±0,10	7,18±0,06	8,73±0,09	
Café húmedo	-	3,64±0,07	-	-	67,14±0,01	-	-	9,44±0,23	-	

Tabla 4-10 Análisis del N, C e H de los biochar

Biochar	S (%)			O (%)			PCS (kcal/kg)		
Temperatura de ensayo	180 °C	200 °C	220 °C	180 °C	200 °C	220 °C	180 °C	200 °C	220 °C
Naranja	0,30±0	0,3±0	0,3±0	41,18±0,46	32,04±0,28	19,48±0,17	4239,54±0,01	5479,15±0,04	4723,55±0,02
Naranja húmedo	-	0,3±0	-	-	30,16±0,23	-	-	5887,98±0,02	-
Plátano	0,3±0	0,3±0	0,3±0	40,42±0,09	31,70±0,23	38,67±0,43	4489,82±0,15	5645,12±0,09	6166,28±0,01
Plátano húmedo	0,3±0	-	-	34,16±0,26	-	-	5200,28±0,06	-	-
Patata	0,3±0	0,3±0	0,3±0	45,56±0,11	32,84±1,33	27,71±0,33	3920,04±0,01	4955,52±0,27	6362,74±0,25
Patata húmedo	-	-	0,3±0	-	-	24,44±0,10	-	-	6424,28±0,02
Pistacho	0,3±0	0,3±0	0,3±0	39,57±0,45	46,18±0,16	23,88±1,03	4565,57±0,12	3716,71±0,01	4908,01±0,44

Biochar	S (%)			O (%)			PCS (kcal/kg)		
Temperatura de ensayo	180 °C	200 °C	220 °C	180 °C	200 °C	220 °C	180 °C	200 °C	220 °C
Algas	0,3±0	0,3±0	0,3±0	77,45±1,32	88,17±0,50	35,85±2,30	0,00±0,01	0,00±0,07	0,00±0,02
Café	0,3±0	0,03±0	0,03±0	31,04±0,51	28,47±0,68	86,23±0,58	6051,03±0,07	6159,93±0,18	7479,98±0,05
Café húmedo	-	0,3±0	-	-	19,48±0,17	-	-	7855,080,07±	-

Tabla 4-11 Análisis de S, O y poder calorífico del biochar

Tras mediciones, se evidencia que el biochar producido mediante el proceso de carbonización hidrotermal presenta unos altos contenidos de carbono y un elevado poder calorífico. Por otro lado, según lo observado en el análisis inmediato, las algas exhiben un bajo contenido de carbono debido a su naturaleza marina y estructura química, lo que resulta en un elevado contenido de cenizas [84].

El contenido de carbono de todos los biochar se han visto incrementados entre un 10 % y un 30 %. Por lo tanto, se observa que la carbonización hidrotermal genera una biomasa rica en carbono. Se observa que el incremento de la temperatura durante los ensayos ejerce una influencia significativa en el nivel de carbono presente, aumentando este porcentaje también. Este fenómeno se atribuye a la descomposición térmica de la materia orgánica durante la pirólisis, proceso en el cual elementos como el hidrógeno, oxígeno y nitrógeno son perdidos, mientras que el carbono se conserva en mayor proporción. Esta dinámica explica el aumento del contenido de carbono con el incremento de la temperatura en los ensayos de HTC. La preservación del carbono en mayor medida a temperaturas más elevadas contribuye a obtener un biochar con propiedades deseables para diversas aplicaciones, como la mejora del suelo o su uso como combustible [73].

Asimismo, se observa que los biochar derivados de la piel de patata experimentan un incremento mayor a los demás en su contenido de carbono a medida que se aumenta la temperatura [85].

Los estándares de calidad y seguridad para el uso del biochar en diferentes sectores y principalmente sobre el suelo requieren que su contenido de carbono represente más del 50% de su masa seca, lo que plantea que los biochar obtenidos a partir de naranjas a 180 °C y pistachos a 200 °C podrían no cumplir con este requisito por un margen mínimo. Además, se debe asegurar la ausencia de sustancias perjudiciales para suelos y plantas, como metales pesados e hidrocarburos [50].

Destacablemente, los posos de café presentan un poder calorífico superior a los 7000 kcal/kg, especialmente aquellos obtenidos en ensayos con compuesto húmedo. Este poder calorífico sobrepasa incluso el de los biochar derivados de la madera, que se sitúa en aproximadamente 5000–6000 kcal/kg [87]. Este tipo de biochar, caracterizado por combustión y generar escasas cenizas, se perfila como un candidato idóneo para ser empleado como biocombustible destinado a la generación de energía térmica. Los valores óptimos de poder calorífico para la utilización del biochar como combustible oscilan entre los 4700 kcal/kg o más, indicando que la mayoría de los biochar analizados cumplen con el criterio [86].

4.2 Análisis estadístico de varianza

Con el objetivo de evaluar el impacto de los factores como los tipos de residuo y la temperatura en las diferentes mediciones del proceso de carbonización hidrotermal, se ha realizado un análisis estadístico utilizando una prueba de hipótesis y un análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5 %. Las hipótesis para dichos experimentos se detallan a continuación:

- Ho: no existe efecto significativo de la temperatura y el residuo utilizados en el ensayo de carbonización hidrotermal en relación con la propiedad analizada.

- Ha: sí existe efecto significativo de la temperatura y el residuo utilizados en el ensayo de carbonización hidrotermal en relación con la propiedad analizada.

4.2.1 Densidad

En la siguiente tabla se recopilan las diferentes densidades de los ensayos realizados de carbonización hidrotermal (Tabla 4-12):

	Residuo	180 °C	200 °C	220 °C
Cáscara de naranja	0,28	0,12	0,17	0,10
Piel de plátano	0,32	0,25	0,22	0,24
Posos de café	0,34	0,19	0,18	0,17
Residuo algal	0,14	0,11	0,12	0,11
Cáscaras de pistachos	0,61	0,42	0,37	0,33
Piel de patata	0,52	0,09	0,08	0,08

Tabla 4-12 Densidades de los residuos y biochar en base seca

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Residuo	0,24	5,00	0,05	8,58	0,001	2,90
Temperatura	0,15	3,00	0,05	9,14	0,001	3,29
Error	0,08	15,00	0,01			
Total	0,47	23,00				

Tabla 4-13 ANOVA de la densidad

Como se puede observar en la Tabla 4-13, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del residuo en el resultado de la densidad es menor que 0,05 y 0,01, por lo que se descarta la hipótesis nula y se establece que el residuo influye muy significativamente en la densidad obtenida. Por el otro lado, el factor de probabilidad de la temperatura es menor que 0,05 y también 0,01, por lo que se puede descartar la hipótesis nula y se establece que la temperatura también es un factor muy determinante en el resultado de la densidad.

En el análisis teórico, se ha observado que un incremento en la temperatura conduce a una reducción en el volumen y masa y, por ende, en la densidad del biochar. La influencia del tipo de residuo es notable, ya que cuanto mayor sea la densidad del residuo de origen mayor será la del biochar obtenido, siempre y cuando este biochar haya sido valorizado próximo a su temperatura ideal. Por ello, y como analizado con los resultados de la patata, su densidad de residuo y de biochar son altamente distintas debido a las temperaturas de ensayo, que se encuentran lejos de la ideal, por lo que la temperatura de ensayo ha supuesto un factor determinante en este caso.

4.2.2 Análisis del rendimiento

En la siguiente tabla se recopilan los rendimientos (%) de los diferentes ensayos de carbonización hidrotermal (Tabla 4-14):

	180 °C	200 °C	220 °C
Cáscara de naranja	21,72	50,88	42,96
Piel plátano	55,85	54,75	45,42
Posos de café	43,09	59,56	42,15
Algas secas	70,83	60,08	60,67
Cáscara de pistacho	45,91	56,76	38,07
Piel de patata	11,15	25,20	32,20

Tabla 4-14 Rendimientos del biochar de los diferentes ensayos

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Residuo	2852,29	5,00	570,46	6,52	0,0061	3,33
Temperatura	316,90	2,00	158,45	1,81	0,2131	4,10
Error	874,30	10,00	87,43			
Total	4043,50	17,00				

Tabla 4-15 ANOVA del rendimiento

Como se puede observar en la Tabla 4-15, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del residuo en el resultado del rendimiento es menor que 0,05, por lo que se descarta la hipótesis nula y se establece que el residuo si influye significativamente en este proceso. Por otro lado, el factor de probabilidad de la temperatura es mayor que 0,05, por lo que no se puede descartar la hipótesis nula y se debería establecer que la temperatura no es un factor determinante en el resultado del rendimiento.

El análisis estadístico revela que la temperatura no es un factor influyente en el rendimiento del proceso de carbonización hidrotermal. Sin embargo, los resultados obtenidos mediante el análisis de varianza (ANOVA) muestran un valor de 0.2, el cual se sitúa cercano al nivel de significancia convencional de 0.05. Esto sugiere que la temperatura podría tener cierta relevancia, aunque no se puede confirmar con certeza su importancia en el rendimiento.

En conclusión, se puede afirmar que el tipo de residuo y su composición química son los factores más determinantes en el rendimiento del proceso de carbonización hidrotermal. La temperatura ha resultado en un factor de importancia, pero se sabe por diversos estudios que si tiene su influencia en los ensayos [87].

4.2.3 Análisis del pH

En la siguiente tabla se recopilan los pH de los diferentes ensayos de carbonización hidrotermal (Tabla 4-16):

	180 °C	200 °C	220 °C
Cáscara de naranja	3,9	4,7	4,8
Piel plátano	4,6	5,6	6
Posos de café	4,6	4,9	5,6
Algas secas	7,7	7,5	7,6
Cáscara de pistacho	4,1	5,1	4,9
Piel de patata	5,5	5,62	5,8

Tabla 4-16 pH del biochar de los diferentes ensayos

ANÁLISIS DE
VARIANZA

<i>Origen de las variaciones</i>	<i>Suma de cuadrados</i>	<i>Grados de libertad</i>	<i>Promedio de los cuadrados</i>	<i>F</i>	<i>Probabilidad</i>	<i>Valor crítico para F</i>
Residuo	19,08	5,00	3,82	36,21	0,000004	3,33
Temperatura	1,62	2,00	0,81	7,71	0,0094	4,10
Error	1,05	10,00	0,11			
Total	21,76	17,00				

Tabla 4-17 ANOVA del pH

Como se puede observar en la Tabla 4-17, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del residuo en el resultado del pH es menor que 0,05 y 0,01, por lo que se descarta la hipótesis nula y se establece que el residuo influye muy significativamente en el pH obtenido. Por el otro lado, el factor de probabilidad de la temperatura es menor que 0,05 también, por lo que se puede descartar la hipótesis nula y se establece que la temperatura sí es un factor determinante en el resultado del pH.

El tipo de residuo ejerce una influencia significativa en el nivel de acidez del biochar generado, lo que se traduce en una estabilidad en los rangos de pH a lo largo de los diferentes ensayos con un mismo residuo. Esto se debe a que la naturaleza ácida o alcalina del material de origen permanece constante durante el proceso de carbonización hidrotermal. Esta observación ha sido respaldada por numerosos estudios llevados a cabo, los cuales han arrojado resultados similares en cuanto a la acidez del biochar [88].

Por otro lado, la temperatura ejerce un efecto mitigador sobre la acidez del biochar resultante a medida que esta aumenta. Sin embargo, estos cambios en la acidez son relativamente insignificantes, ya que los valores se mantienen prácticamente dentro del mismo rango a lo largo de los diferentes ensayos de un mismo residuo [89].

4.2.4 Análisis de la porosidad

En la siguiente tabla se recopila la porosidad (%) de los diferentes ensayos de carbonización hidrotermal (Tabla 4-18):

	180 °C	200 °C	220 °C
Cáscara de naranja	71,19	70	71,92
Piel plátano	58,70	65,38	60
Posos de café	4,32	9,87	11
Algas secas	69,70	73,87	96,70
Cáscara de pistacho	66,67	86,81	97,68
Piel de patata	53,51	65,89	80

Tabla 4-18 Porosidad del biochar de los diferentes ensayos

ANÁLISIS DE
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Residuo	11322,61	5,00	2264,52	37,91	0,000003	3,33
Temperatura	724,15	2,00	362,07	6,06	0,02	4,10
Error	597,41	10,00	59,74			
Total	12644,16	17,00				

Tabla 4-19 ANOVA de la porosidad

Como se puede observar en la Tabla 4-19, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del residuo en el resultado de la porosidad es menor que 0,05 y 0,01, por lo que se descarta la hipótesis nula y se establece que el tipo de residuo influye muy significativamente en la porosidad. Por el otro lado, el factor de probabilidad de la temperatura es menor que 0,05, por lo que se puede descartar la hipótesis nula y se establece que la temperatura es un factor muy determinante en el resultado de la porosidad.

El factor residuo ha demostrado poseer un nivel de significancia considerablemente más elevado que la temperatura. Aunque la temperatura ejerce cierta influencia, no es el atributo principal que considerar para la formación de porosidades. Estos hallazgos concuerdan con investigaciones previas realizadas en el ámbito de la pirólisis y la carbonización hidrotermal, donde se ha destacado la importancia de la estructura interna del compuesto inicial. Se ha observado que la temperatura puede ampliar los poros al consumir una mayor cantidad de materia durante el ensayo y ampliar sus paredes internas, pero su contribución es secundaria en comparación con las características inherentes del residuo original [79].

4.2.5 Análisis del volumen aparente

En la siguiente tabla se recopila el volumen aparente (ml) de los diferentes ensayos de carbonización hidrotermal (Tabla 4-20):

	180 °C	200 °C	220 °C
Cáscara de naranja	7	5	5
Piel plátano	2	4	3
Posos de café	1	1	1
Algas secas	5	8	10
Cáscara de pistacho	2	3,5	5
Piel de patata	5,5	6	7,5

Tabla 4-20 Volumen aparente del biochar de los diferentes ensayos

ANÁLISIS DE
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Residuo	90,74	5,00	18,15	10,54	0,0010	3,33
Temperatura	6,78	2,00	3,39	1,97	0,19	4,10
Error	17,22	10,00	1,72			
Total	114,74	17,00				

Tabla 4-21 ANOVA del volumen aparente

Como se puede observar en la Tabla 4-21, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del residuo en el resultado del volumen aparente es 0,001, por lo que se descarta la hipótesis nula y se establece que el tipo de residuo influye muy significativamente en el volumen aparente. Por el otro lado, el factor de probabilidad de la temperatura es mayor que 0,05, por lo que no se puede descartar la hipótesis nula y se establece que la temperatura no es un factor determinante en el resultado del volumen aparente.

El volumen de muestra que se ha utilizado para llevar a cabo las mediciones ha sido muy pequeño, por lo que los cambios en este en los diferentes ensayos han sido ligeros, pero sin embargo han seguido la misma tendencia que la porosidad. Por otro lado, el tipo de residuo si ha sido evidenciado como muy importante, siguiendo la misma tónica que la porosidad.

4.2.6 *Análisis elemental del carbón*

En la siguiente tabla vienen reflejados los valores del análisis de contenido en carbono (%) de los diferentes compuestos (Tabla 4-22):

	180 °C	200 °C	220 °C
Cáscara de naranja	51,34	59,82	53,57
Piel plátano	51,08	58,93	62,89
Piel de patata	44,13	59,38	67,28
Algas secas	19,91	10,1	11,37
Cáscara de pistacho	53,92	57,81	59,05
Posos de café	58,22	61,15	66,55

Tabla 4-22 Contenido en carbono del biochar de los diferentes ensayos

ANÁLISIS DE
VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Residuo	4792,11	5,00	958,42	24,24	0,00003	3,33
Temperatura	148,45	2,00	74,22	1,88	0,2031	4,10
Error	395,39	10,00	39,54			
Total	5335,95	17,00				

Tabla 4-23 ANOVA del contenido en carbono

Como se puede observar en la Tabla 4-23, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del residuo en el resultado de contenido de carbono es menor que 0,05 y 0,01, por lo que

se descarta la hipótesis nula y se establece que el tipo de residuo influye muy significativamente en la concentración de carbono. Por el otro lado, el factor de probabilidad de la temperatura es mayor que 0,05, por lo que no se puede descartar la hipótesis nula y se establece que la temperatura es un factor determinante en el contenido de carbono.

Es importante destacar que el contenido de carbono presente en la biomasa original ejerce una influencia significativa en el resultado final, determinando en gran medida si el biochar resultante exhibirá un contenido de carbono más alto o bajo. Este fenómeno se muestra claramente en el ejemplo del contenido de carbono en las algas, el cual es bajo tanto en el residuo original como en el biochar producido.

Por otro lado, la temperatura ejerce influencia de tal modo en que el contenido de carbono aumenta de una manera más o menos lineal según se incrementa la temperatura de ensayo

4.2.7 Poder calorífico

En la siguiente tabla vienen reflejados en (kcal/kg) los poderes caloríficos de los diferentes biochar obtenidos en los ensayos a diferentes temperaturas (Tabla 4-24):

	180 °C	200 °C	220 °C
Cáscara de naranja	4375,88	5602,41	4806,77
Piel plátano	4543,32	5712,56	6285,81
Posos de café	6083,41	6214,53	7488,0
Algas secas	0	0	0
Cáscara de pistacho	4570,67	3758,85	4894,36
Piel de patata	3932,48	4727,25	6615,6

Tabla 4-24 Poder calorífico del biochar de los diferentes ensayos

ANÁLISIS DE VARIANZA

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	F	Probabilidad	Valor crítico para F
Residuo	78524400,29	5,00	15704880,06	36,04	0,000004	3,33
Temperatura	3681320,03	2,00	1840660,01	4,22	0,047	4,10
Error	4357597,79	10,00	435759,78			
Total	86563318,11	17,00				

Tabla 4-25 ANOVA del poder calorífico

Como se puede observar en la Tabla 4-25, el factor de probabilidad que evalúa el nivel de significancia del residuo en el resultado del poder calorífico es menor que 0,05 y 0,01, por lo que se descarta la hipótesis nula y se establece que el tipo de residuo influye muy significativamente en el poder calorífico obtenido. Por otro lado, el factor de probabilidad de la temperatura es menor que 0,05 también, por lo que se puede descartar la hipótesis nula y se establece que la temperatura es un factor también muy determinante en el resultado del poder calorífico.

A mayor contenido de carbono se ha visto que mayor poder calorífico según la ecuación del PCS (ec. 3.2), por lo que son dos factores que están directamente relacionados. También influye el contenido de azufre, pero este factor es menos relevante en la fórmula y además muestra pequeñas concentraciones en el biochar en comparación con el carbono. Esto da como resultado que tanto el tipo de residuo utilizado como la temperatura de ensayo sean relevantes para el poder calorífico siguiendo una tónica

parecida al análisis del contenido en carbono, pero obteniendo un factor de relevancia de la temperatura algo menos relevante que este al no estar intrínsecamente relacionados.

En general se puede inferir de los resultados obtenidos que el tipo de residuo utilizado es lo que más influye a la hora de analizar los resultados obtenidos midiendo las características de los biochar. Esto se puede verificar con los datos obtenidos en el apartado 4.1, donde se comprueba que el factor más influyente en los resultados de la caracterización es la estructura química original del residuo utilizado. Además, estos datos son concordes a otros trabajos realizados de la misma naturaleza [89].

Por otro lado, se ha observado que la temperatura desempeña un papel crucial, principalmente en el pH, la cantidad de carbono y el poder calorífico del biochar. Un aumento en la temperatura de pirólisis conlleva un incremento en el contenido relativo de carbono en la sustancia, lo que se correlaciona con un aumento en el poder calorífico, siendo este último el principal factor para la liberación de energía [85]. Respecto al pH, el aumento de temperatura durante la producción de biochar ocasiona la descomposición de ácidos orgánicos y otros grupos, lo que reduce la capacidad de liberación de protones y la mineralización de minerales presentes en el material de partida, resultando en un aumento del pH del biochar final.

5 CONCLUSIONES

Se han extraído diversas conclusiones sobre los residuos analizados. Los biochar obtenidos en base seca han demostrado poseer una densidad mayor a aquellos obtenidos en base húmeda valorizados con la misma temperatura.

1. En cuanto al rendimiento, la naranja y el plátano han obtenido un menor porcentaje en base húmeda a una misma temperatura, mientras que el café y la patata han obtenido un mayor rendimiento en base húmeda. El plátano y la naranja en base húmeda han reducido su rendimiento por la mitad o más mientras que el café y la patata han aumentado su rendimiento en un porcentaje muy reducido. Por lo tanto, el rendimiento del biochar en base húmeda ha significado en un estancamiento o reducción mientras con respecto al rendimiento a esa misma temperatura en base seca.
2. En cuanto a la granulometría, pH, porosidad y volumen aparente no se han detectado cambios significativos que indiquen que los ensayos en base húmeda presenten unos valores considerablemente diferentes a aquellos realizados en base seca.
3. El factor diferenciador que ha otorgado un valor añadido a los ensayos en base húmeda ha sido el contenido en carbono de los biochar, el cual ha aumentado. Este dato le otorga al biochar una mayor capacidad de poder calorífico lo cual es favorable para una cantidad de usos posteriores como biocombustible o remediación de suelos.
4. En base a los resultados obtenidos se han sacado una serie de conclusiones acerca de la influencia de temperatura y residuos en los resultados obtenidos. El tipo de residuo se ha visto que es esencial en los resultados obtenidos, siendo estos muy influenciados en las características originalmente de la materia que se va a valorizar.
5. Tanto la densidad como el rendimiento se ven reducidos con un incremento de temperatura de ensayo. Por ello la temperatura obtuvo un papel importante en los resultados obtenidos en estos apartados, pero no determinantes ya que estos parámetros se ven afectados mayoritariamente por el tipo de residuo utilizado.
6. El pH por otro lado se ve incrementado a medida que se incrementa la temperatura de ensayo, y a su vez un contenido en pH más alto conlleva un incremento del contenido de cenizas en el biochar obtenido, haciendo de la temperatura un factor muy importante para tener en cuenta para estas dos características.
7. Para la porosidad y el volumen aparente, la temperatura es quizá el factor más determinante, ya que su porcentaje como se ha visto se ve incrementado considerablemente según se va incrementando la temperatura de ensayo.
8. El contenido en carbono del biochar se incrementa según se incrementa la temperatura, por lo menos hasta los 220 °C, por lo que su poder calorífico también se ve incrementado proporcionalmente. Sin embargo, el tipo de residuo influirá mucho en estos dos porcentajes,

ya que como se ha comprobado con los residuos algales, aquellos con bajo contenido en carbono de origen se mantendrán más o menos igual.

5.1 Líneas futura

- Utilizar los biochar obtenidos en aquellos ámbitos que se han estudiado son los más propicios debido a las características de cada uno y comprobar si efectivamente cumplen su función.
- Utilizar temperaturas de ensayo más bajas para la patata y determinar cual sería la más idónea en cuanto al rendimiento se refiere.
- Incrementar las temperaturas de ensayo de los demás residuos hasta 250 °C para observar si el contenido en carbono siguiera aumentando, o si en algún momento este se ve estancado o vuelve a decaer.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] W. B. Gutiérrez, «Crecimiento demográfico y cambio climático», *Apunt. Cienc. Soc.*, vol. 3, n.º 1, Art. n.º 1, jul. 2013, doi: 10.18259/acs.2013001.
- [2] «Ministra Schmidt presenta estrategia que busca aumentar al 66% el reciclaje de residuos orgánicos en Chile - Gob.cl». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.cl/noticias/ministra-schmidt-presenta-estrategia-que-busca-aumentar-al-66-el-reciclaje-de-residuos-organicos-en-chile/>
- [3] «Residuo - Qué es, clasificación, definición y concepto». Accedido: 30 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://definicion.de/residuo/>
- [4] «Medioambiente Coquimbo - ¿Conoces la diferencia entre los términos Basura y Residuo? 🗑️♻️🧐 #masresiduos #menosbasura | Facebook». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.facebook.com/photo/?fbid=2574825072533444&set=a.2673168316032452>
- [5] J. de C. y León, «Definición y tipos de residuos». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://medioambiente.jcyl.es/web/es/calidad-ambiental/definicion-tipos-residuo.html>
- [6] «Residuos agrarios». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://cidta.usal.es/contamin_agua/www1/www1.ceit.es/Asignaturas/Ecologia/Hipertexto/13Residu/130ResAgr.htm
- [7] «RESIDUOS INDUSTRIALES: qué son, ejemplos, tipos, clasificación y manejo», *ecologiaverde.com*. Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/residuos-industriales-que-son-ejemplos-tipos-clasificacion-y-manejo-2714.html>
- [8] «CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS INDUSTRIALES – AMBECO». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ambeco.es/noticias/clasificacion-de-los-residuos-industriales/>
- [9] «e756793c-413f-450a-88a8-24c9d3cae076.pdf». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.insst.es/documents/94886/326827/ntp_372.pdf/e756793c-413f-450a-88a8-24c9d3cae076
- [10] «Residuos sanitarios: qué son, tipos y gestión - Resumen», *ecologiaverde.com*. Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecologiaverde.com/residuos-sanitarios-que-son-tipos-y-gestion-4279.html>
- [11] «Residuos peligrosos ¿como identificarlos y almacenarlos?» Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://higieneambiental.com/residuos-peligrosos-identificarlos>

- [12] «La basura: consecuencias ambientales y desafíos». Accedido: 8 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eco.mdp.edu.ar/institucional/eco-enlaces/1611-la-basura-consecuencias-ambientales-y-desafios>
- [13] @NatGeoES, «La contaminación del agua constituye una crisis mundial creciente. Esto es lo que hay que saber.», National Geographic. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/contaminacion-del-agua>
- [14] «8093a186-d73f-aa5c-d746-b5beebbca9d2.pdf». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.um.es/documents/3456781/18173710/TFM+Ana+Amelia+Franco+del+Pino.pdf/8093a186-d73f-aa5c-d746-b5beebbca9d2?t=1610539468590>
- [15] «210 especies de peces de consumo contienen plásticos». Accedido: 6 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://okdiario.com/naturaleza/210-especies-peces-consumo-contienen-plasticos-6892260>
- [16] «Consecuencias de la generación de residuos - Portal Ambiental de Andalucía», CMAOT. Accedido: 10 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal/areas-tematicas/sensibilizacion-formacion/sensibilizacion-educacion-para-la-sostenibilidad/recapacila/residuos-reciclaje/consecuencias-generacion-residuos>
- [17] «Ley 7/2022, de 8 de abril, de residuos y suelos contaminados para una economía circular.».
- [18] «Ley 22/2011, de 28 de julio, de residuos y suelos contaminados.».
- [19] «El Gobierno pone en marcha el proyecto de ley de prevención de las pérdidas y el desperdicio alimentario». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.mapa.gob.es/es/prensa/ultimas-noticias/el-gobierno-pone-en-marcha-el-proyecto-de-ley-de-prevenci%C3%B3n-de-las-p%C3%A9rdidas-y-el-desperdicio-alimentario/tcm:30-673097>
- [20] «Estas son las claves del proyecto de ley contra el desperdicio alimentario Consumidora», Consumidora. Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.revistaalimentaria.es/consumidora/actualidad/claves-del-proyecto-de-ley-contra-el-desperdicio-alimentario>
- [21] «cartilla_volumen_44_3.pdf». Accedido: 12 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://cl.boell.org/sites/default/files/cartilla_volumen_44_3.pdf
- [22] «Sustentabilidad: Recuperación Energética de los plásticos y sus beneficios – Ecoplas». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ecoplas.org.ar/2017/12/01/sustentabilidad-recuperacion-energetica-de-los-plasticos-y-sus-beneficios/>
- [23] «COM_2017_0034_FIN.SPA.xhtml.1_ES_ACT_part1_v3.docx». Accedido: 13 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/HTML/?uri=CELEX%3A52017DC0034>
- [24] «NTP 276: Eliminación de residuos en el laboratorio: procedimientos generales».
- [25] «¿Por qué los lixiviados de los vertederos son motivo de preocupación? · Litigio Ambiental». Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.napolilaw.com/es/article/por-que-los-lixiviados-de-los-vertederos-son-motivo-de-preocupacion/>
- [26] «L00003-00030.pdf». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2008/312/L00003-00030.pdf>
- [27] «¿Qué es la valorización de residuos? Tipos y ejemplos», REPSOL. Accedido: 15 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/futuro-planeta/valorizacion-de-residuos/index.cshmtl>
- [28] «FIGURA 5.1. Economía lineal versus economía circular», ResearchGate. Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/FIGURA-51-Economia-lineal-versus-economia-circular_fig5_358005840

- [29] «¿Qué es la valorización energética? ¿Para qué sirve? | Aeversu®», Aeversu. Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://aeversu.org/valorizacion-energetica/>
- [30] thecircularcampus, «Waste to energy: ¿Qué significa? | Ecoembes», Ecoembes TheCircularCampus. Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.ecoembesthecircularcampus.com/waste-to-energy-que-significa/>
- [31] «¿QUÉ ES EL BIOGÁS Y CÓMO SE PRODUCE? - SMALLOPS». Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://smallops.eu/que-es-el-biogas-y-como-se-produce/>
- [32] «¿Qué es la valorización energética de residuos propios? | Genia Bioenergy», <https://geniabioenergy.com/>. Accedido: 15 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://geniabioenergy.com/valorizacion-energetica-residuos/>
- [33] «Biometano: qué es y cómo se obtiene», REPSOL. Accedido: 15 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/movilidad-sostenible/biometano/index.cshtml>
- [34] «Nueva planta de biometano en Lérida», Blog. Accedido: 15 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.nedgia.es/blog-gas-natural/nueva-planta-de-biometano-en-lerida-para-avanzar-en-la-eficiencia-energetica/>
- [35] SMV, «Residuos inorgánicos: todo lo que debes saber | SMV», SMV Gestión Residuos en Valencia y toda España. Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.smv.es/que-son-residuos-inorganicos/>
- [36] «Residuos inorgánicos: definición y tipos», ProCycla | Soluciones Ambientales Integradas. Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://procycla.cl/residuos-inorganicos/>
- [37] V. I. S.L., «Blog Lombec: La revolución del compost en la agricultura regenerativa y ecológica.», Lombec. Accedido: 8 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.lombec.com/agricultura-regenerativa-y-compost>
- [38] «El compost y el compostaje -». Accedido: 16 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.compostaenred.org/el-compost-y-el-compostaje/>
- [39] J. Plasencia, «¿Qué es el Biochar, el Oro Negro de la Naturaleza, y por qué la gente está tan emocionada por su potencial?», ClimateTrade. Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://climatetrade.com/es/que-es-el-biochar-y-por-que-la-gente-esta-entusiasmada-con-su-potencial/>
- [40] «Biochar and Compost for Climate Change Adaptation and Mitigation | Article | EESI». Accedido: 22 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.eesi.org/articles/view/biochar-and-compost-for-climate-change-adaptation-and-mitigation>
- [41] A. Escalante Rebolledo *et al.*, «Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo», *Terra Latinoam.*, vol. 34, n.º 3, pp. 367-382, sep. 2016.
- [42] «Terra Preta or Amazon Dark Soil, What it is and its composition», Biochar. Accedido: 13 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://biochar.co.uk/terra-preta/>
- [43] «Biochar: a brief history and developing future», Mongabay Environmental News. Accedido: 13 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://news.mongabay.com/2013/01/biochar-a-brief-history-and-developing-future/>
- [44] B. Camac, O. Kalafatovich, J. Guianella, D. S. Auccahuasi, y F. Antonio, «TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE: INGENIERO AMBIENTAL».
- [45] «Biochar Carbón | Cultivers». Accedido: 24 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cultivers.es/abonos/biochar/>
- [46] «Biochar, el carbón que no se quema - Blog CREAf». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blog.creaf.cat/es/noticias/biochar-el-carbon-que-no-se-quema/>
- [47] «Introducción: uso potencial del biochar en la industria de la horticultura y la agricultura urbana - Horti Generation». Accedido: 7 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://horti-generation.com/es/el-uso-del-biochar-en-la-industria-de-la-horticultura-y-la-agricultura-urbana/>

- [48] «RENS2019-Libro-de-Resumenes_page7.pdf». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/28487/1/RENS2019-Libro-de-Resumenes_page7.pdf
- [49] «Uso del BIOCHAR como mejora del suelo – Verdesmart». Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://verdtech.es/huella-de-carbono/uso-del-biochar-como-mejora-del-suelo/>
- [50] «Biocarbón Biochar, una estrategia de fertilización». Accedido: 28 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.dreiskel.com/biocarbon-biochar/>
- [51] «Biocarbón de residuos agrícolas para eliminar contaminantes emergentes en aguas residuales», Residuos Profesional. Accedido: 28 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/biocarbon-contaminantes-aguas-residuales/>
- [52] A. V. C. Forero y L. S. C. Domínguez, «Evaluación del biochar elaborado a partir de bagazo de caña en filtros con retro lavado para la adsorción y desorción de aniones (fosfatos, sulfatos y nitratos) en aguas potenciadas».
- [53] «MATERIA ORGÁNICA PARA LA PURIFICACIÓN DE LOS RÍOS», Agronomía Sustentable. Accedido: 27 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://agronomiasustentable.wordpress.com/2016/07/10/materia-organica-para-la-purificacion-de-los-rios/>
- [54] P. R. Yaashikaa, P. S. Kumar, S. Varjani, y A. Saravanan, «A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy», *Biotechnol. Rep.*, vol. 28, p. e00570, dic. 2020, doi: 10.1016/j.btre.2020.e00570.
- [55] «Gasificación-y-pirólisis-2017-ESP-1.pdf». Accedido: 12 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Gasificaci%C3%B3n-y-pir%C3%B3lisis-2017-ESP-1.pdf>
- [56] «Biocrude Production through Pyrolysis of Used Tyres». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.hindawi.com/journals/jcat/2014/386371/>
- [57] S. Al Arni, «Comparison of slow and fast pyrolysis for converting biomass into fuel», *Renew. Energy*, vol. 124, pp. 197-201, ago. 2018, doi: 10.1016/j.renene.2017.04.060.
- [58] D. Prabakar *et al.*, «Advanced biohydrogen production using pretreated industrial waste: Outlook and prospects», *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 96, pp. 306-324, nov. 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.08.006.
- [59] «La planta de gasificación de biomasa de Neoelectra de Toledo valoriza más de 380.000 toneladas de residuos industriales y forestales desde 2016 - Reciclaje y gestión de residuos». Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Reciclaje/Articulos/452197-planta-gasificacion-biomasa-Neoelectra-Toledo-valoriza-mas-380000-toneladas-residuos.html>
- [60] «Torrefacción», Torrefacción. Accedido: 5 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://agronomoglobal.blogspot.com/2012/01/torrefaccion.html>
- [61] A. C. M. Villalba y L. D. B. León, «Evaluación de la eficiencia de biochar producido a partir de pirólisis lenta de bagazo de caña como medio filtrante para retención de fenoles en matriz acuosa».
- [62] J. D. Marín Batista, «Valorización de residuos mediante carbonización hidrotermal.: Recuperación de energía y nutrientes.», <http://purl.org/dc/dcmitype/Text>, Universidad Autónoma de Madrid, 2020. Accedido: 14 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=286207>
- [63] «Cálculos de carbón | SGS Spain». Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.sgs.com/es-es/services/calculos-de-carbon>
- [64] «TFGUEx_2015_Cancho_Franco.pdf». Accedido: 2 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: https://dehesa.unex.es/bitstream/10662/3899/1/TFGUEx_2015_Cancho_Franco.pdf
- [65] «Porosidad - Qué es, definición y concepto». Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://definicion.de/porosidad/>

- [66] «Diccionario RAING». Accedido: 3 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://diccionario.raing.es/es/lema/volumen-aparente-0>
- [67] Y. A. Blanco Vargas, A. M. Pedroza Rodríguez, L. A. Díaz Ariza, y R. A. Poutou Piñales, «Desarrollo de un biofertilizante a base de biochar y bacterias fosfato solubilizadoras para el cultivo de *Allium cepa* L.», Pontificia Universidad Javeriana, 2021. doi: 10.11144/Javeriana.10554.53292.
- [68] N. S. Hualca Barahona, «Producción de Biochar a partir de materia orgánica de heces de vacunos y porcinos para la recuperación de aguas contaminadas con metales pesados a nivel de laboratorio.», bachelorThesis, Ecuador: Latacunga: Universidad Técnica de Cotopaxi (UTC), 2023. Accedido: 4 de abril de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://localhost/handle/27000/11333>
- [69] A. C. M. Villalba y L. D. B. León, «Evaluación de la eficiencia de biochar producido a partir de pirólisis lenta de bagazo de caña como medio filtrante para retención de fenoles en matriz acuosa».
- [70] E. Trujillo A *et al.*, «Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas», *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 85, n.º 4, pp. 489-504, oct. 2019, doi: 10.37761/rsqp.v85i4.262.
- [71] L. Arteaga-Pérez, M. Flores, M. Escobar, C. Segura, y A. Gordon, «Análisis comparativo de la torrefacción húmeda y seca de *Pinus radiata*», *Energética*, vol. 46, p. 5, dic. 2015.
- [72] Unimedios, «Sistema de Información de la Investigación - HERMES». Accedido: 27 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.hermes.unal.edu.co/pages/Consultas/Proyecto.xhtml?idProyecto=15711>
- [73] P. Casaubon-Garcín, P. Lamshing-Salinas, F. Isoard-Acosta, S. C. Lemen-Meyer, D. Delgado-Franco, y A. B. Pérez-Lizaur, «pH de los alimentos: ¿una herramienta para el manejo de los pacientes con refl ujo gastroesofágico?».
- [74] «Disponibilidad de Nutrientes y el pH del Suelo | Intagri S.C.» Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrientes-y-el-ph-del-suelo>
- [75] P. Campos, A. Z. Miller, R. López, N. Hagemann, H. Knicker, y J. M. de la Rosa, «Effect of biochar on microbial communities of a trace element contaminated soil». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uevora.pt/rdpc/handle/10174/28487>
- [76] «La importancia del pH en nuestro acuario.» Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://es.linkedin.com/pulse/la-importancia-del-ph-en-nuestro-acuario-alejandrosoria-molina-lj4if>
- [77] P. A. Cely Parra, «Evaluacion del uso de residuos organicos para la produccion de biochar y su aplicacion como enmienda organica», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2016. doi: 10.20868/UPM.thesis.44393.
- [78] «2016000001398.pdf». Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://helvia.uco.es/bitstream/handle/10396/13381/2016000001398.pdf?sequence=1>
- [79] A. Santa-Olalla, «Efectos de la aplicación del biochar en un suelo contaminado por elementos traza», jul. 2020, Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://digital.csic.es/handle/10261/239586>
- [80] «Álvarez Calvo - 2019 - Tratamiento de suelos contaminados por metales med.pdf». Accedido: 28 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/55865/1/MARISA_ALVAREZ_CALVO.pdf
- [81] A. A. Espinosa-Antón, R. M. Hernández-Herrera, M. González-González, A. A. Espinosa-Antón, R. M. Hernández-Herrera, y M. González-González, «Extractos bioactivos de algas marinas como bioestimulantes del crecimiento y la protección de las plantas», *Biotechnol. Veg.*, vol. 20, n.º 4, pp. 257-282, dic. 2020.
- [82] G. A. Martínez Gutiérrez, Y. D. Ortiz Hernández, M. Urrestarazu Gavilán, M. del C. Salas San Juan, y C. Escamirosa Tinoco, «La rotación de cultivos y las propiedades de la cáscara de almendra como sustrato», *Rev. Fitotec. Mex.*, vol. 32, n.º 2, pp. 135-142, jun. 2009.

- [83] «Biochar y sus aplicaciones potenciales en el suelo», TÉCNICA INDUSTRIAL. Accedido: 26 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tecnicaindustrial.es/biochar-y-sus-aplicaciones-potenciales-en-el-suelo/>
- [84] «FV-3.1.-Informe-tecnico-de-resultados.-Algas-utilizadas.pdf». Accedido: 25 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://valoralgae.cetmar.org/wp-content/uploads/2022/09/FV-3.1.-Informe-tecnico-de-resultados.-Algas-utilizadas.pdf>
- [85] J. Sanchez-Hervas, I. Ortiz, A. Márquez, A. Fernández-Fernández, M. Canivell, y E. Ruiz, «Pirólisis de biomasa y residuos como estrategia de producción sostenible y simbiosis industrial en la comunidad de Madrid (España)», *Rev. Tecnol. En Marcha*, dic. 2023, doi: 10.18845/tm.v36i10.7010.
- [86] «Hernández Sobrino - 2010 - Análisis técnico, económico y medioambiental de los.pdf». Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://oa.upm.es/4657/1/FERNANDO_HERNANDEZ_SOBRINO.pdf
- [87] «TFM_ESTEBAN_RUIZ_2019.pdf». Accedido: 29 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/45452/TFM_ESTEBAN_RUIZ_2019.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [88] M. J. Cueto García, «Potencial de producción de biochar en España a partir de residuos de la industria papelera, de lodos de E.D.A.R., de residuos sólidos urbanos y de residuos ganaderos: Estudio de la fijación de carbono», PhD Thesis, Universidad Politécnica de Madrid, 2016. doi: 10.20868/UPM.thesis.39453.
- [89] E. Trujillo A *et al.*, «Producción y caracterización química de biochar a partir de residuos orgánicos avícolas», *Rev. Soc. Quím. Perú*, vol. 85, n.º 4, pp. 489-504, oct. 2019, doi: 10.37761/rsqp.v85i4.262.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

Durante el desarrollo de este trabajo, se han destacado diversas implicaciones sociales, ambientales y económicas relacionadas con la valorización hidrotermal de residuos orgánicos para la generación de biochar. Este proceso representa un enfoque innovador y circular para gestionar los desechos orgánicos y contribuir al desarrollo sostenible en múltiples niveles.

En primer lugar, es importante resaltar el impacto positivo que esta técnica puede tener en la mitigación del cambio climático. El biochar, al ser un producto carbonáceo estable, puede almacenar carbono a largo plazo en el suelo, ayudando así a reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera. Esto se debe a que el carbono contenido en los residuos orgánicos se convierte en una forma más estable y menos propensa a la oxidación una vez convertido en biochar y aplicado al suelo. Además, al mejorar la calidad del suelo, el biochar puede aumentar la captura de carbono a través de la fotosíntesis de las plantas, contribuyendo aún más a la mitigación del cambio climático.

Otro aspecto relevante es la remediación del suelo. El biochar tiene la capacidad de mejorar las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, lo que puede ser beneficioso para suelos degradados o contaminados. Al aplicarse al suelo, el biochar puede aumentar la retención de agua, mejorar la estructura del suelo, aumentar la capacidad de intercambio catiónico y reducir la lixiviación de nutrientes y contaminantes. Esto no solo mejora la productividad agrícola, sino que también puede ayudar a rehabilitar áreas degradadas y prevenir la erosión de dichos suelos.

Además de los beneficios ambientales, la valorización hidrotermal también puede tener un impacto positivo en el ámbito social. Por ejemplo, al convertir residuos orgánicos en un recurso útil como el biochar, se puede reducir la cantidad de desechos que van a parar a los vertederos, lo que a su vez puede disminuir los costos asociados con la gestión de residuos. Esto puede ser especialmente relevante en comunidades con recursos limitados, donde la gestión de residuos puede representar una carga económica y ambiental significativa.

En cuanto a las implicaciones económicas, es importante considerar que la valorización hidrotermal de residuos orgánicos puede generar ingresos adicionales a partir de recursos anteriormente considerados como basura. Al convertir estos residuos en un producto con valor agregado como el biochar, se crea una oportunidad para la generación de ingresos a través de la venta o el uso del biochar en diversas aplicaciones. Además, al reducir los costos asociados con la gestión de residuos, se pueden obtener ahorros significativos a nivel local y regional.

La elección de la temperatura para el ensayo de carbonización hidrotermal también tiene implicaciones económicas importantes. Esta técnica permite utilizar temperaturas relativamente bajas, entre 180-300 °C, lo que la convierte en una opción más económica en comparación con otras técnicas de pirólisis que requieren temperaturas más altas. Además, al seleccionar la temperatura óptima en función del rendimiento y la eficiencia del proceso, se pueden minimizar los costos de producción y maximizar la rentabilidad de la valorización hidrotermal de residuos orgánicos.

Por último, es crucial explorar el potencial de los usos posteriores del biochar para maximizar su valor económico y ambiental. En lugar de desechar los compuestos producidos, se pueden utilizar en aplicaciones que generen beneficios económicos y ambientales adicionales. Por ejemplo, en un ambiente como la propia Escuela Naval militar donde tanta cantidad de residuos orgánicos pueden ser utilizados para generar una cantidad considerable de biochar puede ser utilizado como enriquecedor del suelo en la galería de tiro, como material de filtración para mejorar la calidad del agua, o incluso como combustible renovable para la generación de energía.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

El trabajo realizado proporciona una valiosa reflexión sobre la urgencia de adoptar metodologías de valorización de residuos que no solo fomenten la sostenibilidad ambiental, sino que también aborden aspectos éticos y sociales fundamentales. La elección de la carbonización hidrotermal como enfoque principal resalta la eficacia de utilizar y valorizar los residuos orgánicos de manera más eficiente y limpia, dando lugar a la producción de biochar. Este producto natural, el biochar, puede desempeñar un papel crucial en la reducción de la contaminación atmosférica y del suelo, así como en la minimización de la generación de desechos.

Es especialmente relevante destacar el impacto positivo que estas prácticas pueden tener en países en desarrollo, donde la fertilidad del suelo y la gestión de residuos son desafíos significativos. La implementación de la carbonización hidrotermal ofrece una oportunidad única para mejorar la calidad del suelo y reducir la contaminación, contribuyendo así al desarrollo sostenible de estas regiones. Además, al proporcionar una solución efectiva para la gestión de residuos orgánicos, se pueden crear nuevas oportunidades económicas y mejorar la calidad de vida de las comunidades locales.

Además, al adoptar enfoques de valorización de residuos, se subraya la necesidad de promover prácticas más sostenibles y éticas a nivel global. Al implementar estas metodologías, se está contribuyendo activamente a la mitigación de problemas ambientales y sociales que afectan a todas las regiones del mundo. Esto incluye la reducción de la contaminación, la conservación de los recursos naturales y la promoción de prácticas agrícolas más sostenibles.

Asimismo, es importante reconocer el papel crucial que desempeñan estas iniciativas en la promoción de un cambio de mentalidad hacia una mayor responsabilidad ambiental y social en todas las esferas de la sociedad. Al valorizar los residuos y utilizar recursos de manera más eficiente, se está promoviendo una cultura de consumo responsable y cuidado del medio ambiente. Esto puede tener un impacto positivo a largo plazo en la forma en que las personas interactúan con su entorno y en la forma en que se gestionan los recursos naturales a nivel global.

En resumen, queda claro que enfocarse en la valorización de residuos, especialmente mediante la carbonización hidrotermal, no solo trae consigo ventajas ambientales y económicas, sino que también abre la puerta a importantes reflexiones éticas y sociales. Al considerar estos aspectos, podemos desarrollar soluciones más efectivas y sostenibles para los desafíos que enfrentamos en el ámbito ambiental y social. Este enfoque no solo beneficia al planeta y a la economía, sino que también promueve un cambio cultural hacia una sociedad más consciente y responsable con su entorno. En última instancia, se trata de trabajar juntos para construir un futuro más equitativo y sostenible para las generaciones venideras.