



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Influencia del Tipo de Biomasa Vegetal y Condiciones de Pirólisis en las Propiedades del Biochar

Autor: D. María Calvo Porro
Tutor: D. Francisco Lafuente Álvarez

Valladolid, septiembre, 2025



Universidad de Valladolid



ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES

MASTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Influencia del Tipo de Biomasa Vegetal y Condiciones de Pirólisis en las Propiedades del Biochar

Autor: D. María Calvo Porro
Tutor: D. Francisco Lafuente Álvarez

Valladolid, septiembre, 2025



Resumen:

El biochar es un tipo de carbón vegetal que se obtiene de la pirólisis de biomasa en condiciones de ausencia de oxígeno. Se dispone actualmente de un conocimiento considerable sobre las características y propiedades generales del biochar y sobre los diversos empleos que se le pueden dar como enmienda agrícola, mitigación del cambio climático y remediación de contaminantes. No obstante, la información acerca de cómo influyen las condiciones de producción —como la temperatura de pirólisis o el tiempo de residencia y las características de la biomasa empleada en la obtención del biochar —sigue siendo limitada. Estas variables pueden modificar de manera notable aspectos fundamentales del producto final, como su composición, estabilidad, capacidad de retención de nutrientes o eficacia en aplicaciones concretas.

En este trabajo de revisión se pretende analizar la influencia de dichos parámetros y así comprender cómo pueden afectar a las propiedades resultantes del biochar. Este conocimiento puede servir como base para seleccionar con mayor precisión los usos más adecuados del material y, al mismo tiempo, para orientar la elección de las condiciones de producción que permitan optimizar sus beneficios en distintos contextos.

Palabras clave: biochar; agrichar; pirólisis; temperatura; biomasa; enmienda; cambio climático

Abstract:

Biochar is a type of charcoal obtained from the pyrolysis of biomass under oxygen-limited conditions. At present, there is considerable knowledge regarding the general characteristics and properties of biochar, as well as its various applications, such as agricultural amendment, climate change mitigation, and contaminant remediation. Nevertheless, information on how production conditions—such as pyrolysis temperature, residence time, and the characteristics of the biomass used—affect the properties of the resulting biochar remains limited. These variables can significantly alter fundamental aspects of the final product, including its composition, stability, nutrient retention capacity, and effectiveness in specific applications.

This research work aims to analyze the influence of these parameters in order to better understand how they may affect the resulting properties of biochar. Such knowledge may serve as a basis for more accurately selecting the most appropriate uses of the material, while at the same time guiding the choice of production conditions that optimize its benefits in different contexts.

Keywords: biochar; agrichar; pyrolysis; temperature; biomass; soil amendment; climate change



GLOSARIO DE TÉRMINOS:

Biochar: También denominado biocarbón. Carbón orgánico producido mediante pirólisis de biomasa y en condiciones de ausencia o limitación de oxígeno.

Rendimiento de biochar: indicador de la cantidad de biochar que se produce a partir de una determinada masa de biomasa consumida. Se expresa en tanto por ciento.

Ratio O/C y H/C: es la relación molar entre los átomos de oxígeno o hidrógeno respecto al carbono. El ratio H/C indica el grado de aromaticidad y estabilidad del biochar y el ratio O/C la reactividad del biochar y su resistencia a la degradación.

Syngas o gas de síntesis. Corresponde a las emisiones gaseosas que se producen durante el proceso de pirólisis.

Bioaceite. Es la fase líquida que se genera el proceso de producción de biochar

Tiempo de residencia: es el tiempo que tarda la biomasa en pirolizarse y producir biochar. También se define como el tiempo que permanece la biomasa en el horno de pirólisis.

Velocidad de calentamiento: velocidad a la que aumenta la temperatura del material durante el proceso de pirólisis, normalmente expresado en grados Celsius por minuto.

CIC: Capacidad de intercambio catiónico. Se define como la cantidad de cationes que pueden quedarse adsorbidos en la superficie del biochar por unidad de peso de biochar. Es un indicador indirecto del efecto sobre la fertilidad que puede tener el biochar.

Conductividad eléctrica: Es una propiedad física que mide la capacidad de un material para permitir el paso de la corriente eléctrica a través de él. En el caso del biochar, es un indicador indirecto relacionado con el contenido en sales solubles presentes el biochar, pues a mayor contenido en sales, mayor conductividad eléctrica



ÍNDICE DE CONTENIDOS:

1	INTRODUCCIÓN	1
2	OBJETIVOS	2
3	SITUACION Y/O ESTADO DE LA TÉCNICA	2
3.1	Descripción del biochar. Características y propiedades	2
3.2	Usos del biochar	3
3.3	Alternativas de uso al biochar	5
3.4	Parámetros de caracterización del biochar:	6
3.5	Proceso de descomposición de la biomasa vegetal	7
3.6	Procesos de producción de biochar (gasificación, pirólisis...)	10
3.6.1	Gasificación	10
3.6.2	Carbonización hidrotermal	10
3.6.3	Torrefacción	11
3.6.4	Pirólisis	11
3.6.4.1	Pirólisis lenta	12
3.6.4.2	Pirólisis rápida	12
3.6.4.3	Pirólisis intermedia	13
3.7	Comparativa entre los diferentes procesos de producción:	13
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	14
4.1	Efecto del pretratamiento de la biomasa	15
4.2	Efecto de la velocidad de calentamiento	16
4.3	Efecto del tiempo de residencia	16
4.4	Efecto de la presión	16
4.5	Efecto de la atmósfera (gas carrier)	16
4.6	Efecto del horno de pirólisis	17
4.7	Efecto de la temperatura de pirólisis	17
4.8	Efecto de la materia prima	21
4.9	Edad del biochar	24
4.10	Mejora de las propiedades del biochar	24
5	CONCLUSIÓN	25
6	REFERENCIAS	27

1 INTRODUCCIÓN

Con el desarrollo de la economía y la mejora del nivel de vida se generan cada vez más residuos orgánicos de origen agrícola, forestal o alimentario (biorresiduos) (Zhou et al., 2021) y se incrementan las necesidades energéticas, que en la actualidad dependen en gran medida de los combustibles fósiles, no renovables que contribuyen al cambio climático (Lehmann, 2007).

Se estima que la cantidad de residuos orgánicos generados anualmente a nivel global es de más de 2.000 millones de toneladas, de las cuales casi 650-950 se producen en Europa (Perea-Moreno et al., 2019; Greinert et al., 2019; Kalak, 2023). La mayoría de estos residuos provienen de la industria agroalimentaria, aunque la industria maderera también genera un considerable impacto (Kalak, 2023). Las tecnologías empleadas para el tratamiento de estos desechos son principalmente el compostaje, incineración o el depósito en vertedero, siendo estas dos últimas fuentes importantes de contaminación al liberar gases de efecto invernadero y otros gases contaminantes como H_2S , NH_3 y SO_2 en el proceso (Zhou et al., 2021), por lo que es necesario desarrollar otras opciones menos contaminantes, como la producción de biochar (Premalatha et al., 2023; Köves et al., 2024). En el caso de Europa, en 2017 el 70 % de los biorresiduos fueron incinerados, el 12 % destinados a producir biogas, otro 12 % a producir biocombustibles y el 6 % restante fueron compostados o depositados en vertederos (Zhou et al., 2021).

La producción de biochar es una tecnología actual que no solo disminuye la liberación de gases de efecto invernadero, sino que contribuye al secuestro de carbono a largo plazo (Lehmann, 2007; Fryda & Visser, 2015; Shalini et al., 2020) y genera un bioproducto con valor añadido (Sherwood, 2020) que beneficia a la sociedad y a las comunidades locales de agricultores y ganaderos (Duque-Acevedo et al., 2020).

Esta tecnología es una tendencia al alza y se está viendo favorecida por las políticas actuales de descarbonización, economía circular y mitigación del cambio climático (Perea-Moreno et al., 2019; Greinert et al., 2019; Kalak, 2023).

Lima et al demostraron que la pirólisis de 1 m³ de restos de madera de *Dillenia excelsa* equivale a reducir las emisiones de 1687 kg de CO₂ equivalente (Lima et al., 2020) pues cerca del 50 % del carbono presente en la materia prima original queda retenido en el biochar (Lehmann, 2007) y se estima que solamente en Estados Unidos la producción de biochar puede alcanzar las 160.000-250.000 toneladas (Köves et al., 2024).

Sin embargo, debido a la gran variabilidad en la composición de los diferentes biochares producidos, conocer en detalle cómo afectan parámetros como la temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, atmósfera o cómo las características de la biomasa o su pretratamiento pueden influir en las características del biochar que se va a producir, y por lo tanto, en la efectividad de los usos asignados es necesario para poder determinar antes de la producción de biochar qué parámetros son los más convenientes para el uso que se le pretende dar (Amenaghawon et al., 2021; Igliński et al., 2023; Aboelela et al., 2023).

Es por ello por lo que este trabajo se centra en recopilar y detallar cómo influyen algunos de los parámetros de operación en la producción de biochar y cómo influye la materia prima y su tratamiento previo en las propiedades finales que tendrá el biochar producido, con el objetivo de poder determinar qué metodología de producción es la más adecuada en función del uso final del biochar, o, en su defecto, estimar en qué uso tendrá mayor efectividad si el biochar ya ha sido producido.

2 OBJETIVOS

El presente trabajo de investigación tiene como propósito analizar en profundidad la influencia que ejercen los parámetros fundamentales del proceso de pirólisis, así como las características intrínsecas y las condiciones iniciales de la biomasa vegetal utilizada, sobre las propiedades fisicoquímicas y estructurales del biochar resultante.

La pirólisis, entendida como un proceso termoquímico de descomposición de la materia orgánica en ausencia parcial o total de oxígeno, presenta una alta sensibilidad a factores como la temperatura de operación, el tiempo de residencia, la velocidad de calentamiento y la atmósfera de reacción. Estos parámetros, en interacción con la naturaleza de la materia prima, determinan la calidad, el rendimiento y la funcionalidad del biochar producido.

En este contexto, uno de los objetivos específicos de la investigación consiste en establecer con precisión cuáles de estos parámetros ejercen una mayor influencia sobre las propiedades finales del biochar, tales como su estabilidad estructural, su superficie específica, su porosidad y su contenido de carbono estable para así determinar aquellos factores que deben ser controlados con mayor rigurosidad durante el proceso de pirólisis.

Por último, se intentará definir las condiciones operativas más adecuadas para la obtención de un biochar con características particulares, en función de las diversas aplicaciones en las que se puede emplear el biochar, como la mejora de suelos agrícolas, la captura de carbono o la remediación ambiental.

3 SITUACION Y/O ESTADO DE LA TÉCNICA

3.1 Descripción del biochar. Características y propiedades

El biochar, también conocido como biocarbón, es un tipo de carbón vegetal que se obtiene de la descomposición térmica, habitualmente mediante pirólisis, en ausencia o limitación de oxígeno a partir de biomasa de distinta procedencia y generalmente a temperaturas moderadas (Yaashikaa et al., 2020).

El biochar se caracteriza por su alto contenido en carbono de origen orgánico (Singh et al., 2022), la mayor parte del cual (cerca del 75 %) es altamente recalcitrante (Méndez, 2017) y se encuentra en forma de carbono aromático policíclico (CAP), que es capaz de permanecer más de 1000 años en el suelo antes de descomponerse (Hernández, 2023). El otro 25 % restante se encuentra en forma de carbono semi-persistente y puede permanecer hasta 50 años en el suelo antes de comenzar a degradarse (Méndez, 2017; Hernández, 2023).

Además, presenta una baja relación H/C y O/C, lo que indica su estabilidad y aromaticidad (Benavente, 2022; Khater et al., 2024).

Es por ello por lo que el biochar es altamente estable y resistente a la degradación y descomposición microbiana (Lehmann, 2007), lo que le permite actuar como sumidero de carbono (Méndez, 2017) y convierte en una gran alternativa para el secuestro de carbono y la mitigación del cambio climático (Shalini et al., 2020).

Además de su alto contenido en carbono, el biochar se caracteriza por presentar una elevada área superficial y porosidad y una baja densidad aparente (Khan et al., 2020; Khater et al., 2024), propiedades que le confiere un buen uso en la remediación de contaminantes y enmiendas de suelos (Santa-Olalla, 2020; Yaashikaa et al., 2020).

El biochar presenta generalmente un pH alcalino, y una alta capacidad de intercambio catiónico (CIC) y capacidad de retención hídrica (Elangovan et al., 2022; Khater et al., 2024) y también

un bajo contenido en nitrógeno, hidrógeno y oxígeno (Pandey et al., 2020; Khan et al., 2020; Khater et al., 2024).

Sin embargo, el biochar es un material de composición variable porque las propiedades y características finales que va a presentar dependen en gran medida de la temperatura de pirólisis (Lehmann, 2007; Tomczyk et al., 2020), del tipo de materia prima de partida (Yaashikaa et al., 2020; Benavente, 2022) y sus características (Zhang et al., 2021; S. F. Ahmed et al., 2024) y de otros parámetros como tiempo de residencia o velocidad de calentamiento (Visser et al., 2024; Souza et al., 2025), de si existe un pretratamiento previo de la biomasa o del tipo de horno de pirólisis (Zhu et al., 2017).

Su proceso de producción puede realizarse mediante múltiples estrategias y condiciones, y además de generarse biochar también se genera una fracción gaseosa denominada syngas o gas de síntesis y una fracción líquida denominada bioaceite (Itoh et al., 2020; Yaashikaa et al., 2020).

3.2 Usos del biochar

Debido a las numerosas características y propiedades del biochar, existen múltiples usos para los que el biochar es completamente válido.

Entre ellos, se encuentra la **remediación de contaminantes**. Gracias a la elevada área superficial, porosidad y presencia de grupos carboxílicos y fenólicos se pueden quedar adsorbidos en la superficie porosa del biochar agentes contaminantes inorgánicos como metales pesados (Tomczyk et al., 2020; Joseph et al., 2021; Zhou et al., 2021; Amalina et al., 2022; Visser et al., 2024) y otros contaminantes de origen orgánico como pesticidas organoclorados, hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP), fármacos (Ahmad et al., 2012; Shaaban et al., 2018; Souza et al., 2025).

Sin embargo, la capacidad de adsorción de contaminantes es mayor cuanto menor sea la polaridad y mayor la aromaticidad y el contenido en carbono del biochar, por lo que los procesos que suceden a altas temperaturas son las que más favorecen la adsorción de contaminantes orgánicos y los producidos a bajas temperaturas tienden a retener más contaminantes de origen inorgánico (Ahmad et al., 2012; Yaashikaa et al., 2020; Visser et al., 2024).

El biochar también se puede emplear como catalizador para la producción de biodiesel y de otras reacciones químicas (Zhang et al., 2021; Amalina et al., 2022) y en descontaminación de y purificación de aguas, eliminando metales pesados, antibióticos, colorantes y microplásticos (Tan et al., 2016; Awogbemi & Kallon, 2023).

Además, el biochar tiene un poder calorífico cercano a 34 MJ/kg, semejante al carbón convencional, por lo que puede emplearse como fuente de calor o energía (Czajczyńska et al., 2017).

Otra de las posibles aplicaciones del biochar es la **mitigación del cambio climático**, porque la producción de biochar se considera una tecnología carbono-negativa porque evita la liberación a la atmósfera de gases como CO₂ (dióxido de carbono), CH₄ (metano) y óxidos de nitrógeno (N₂O) (Hui, 2021; Zhang et al., 2021; Amalina et al., 2022). La enmienda de suelos con biochar ha demostrado disminuir significativamente la emisión de óxidos de nitrógeno, especialmente óxido nitroso (N₂O) entre un 19 % y 38 % (Shakoor et al., 2021; Dawar et al., 2021). Además, debido a la alta tasa de residencia del biochar, el carbono recalcitrante que compone el biochar tarda en liberarse cientos de años a la atmósfera (Hui, 2021; Zhang et al., 2021; Zhou et al., 2021).

Sin embargo, uno de los usos principales del biochar es su empleo como **enmienda agrícola** (Gallo-Saravia et al., 2018; Singh et al., 2022). En la Ilustración 1 aparecen algunos de los principales efectos de la aplicación de biochar al suelo (Premalatha et al., 2023)

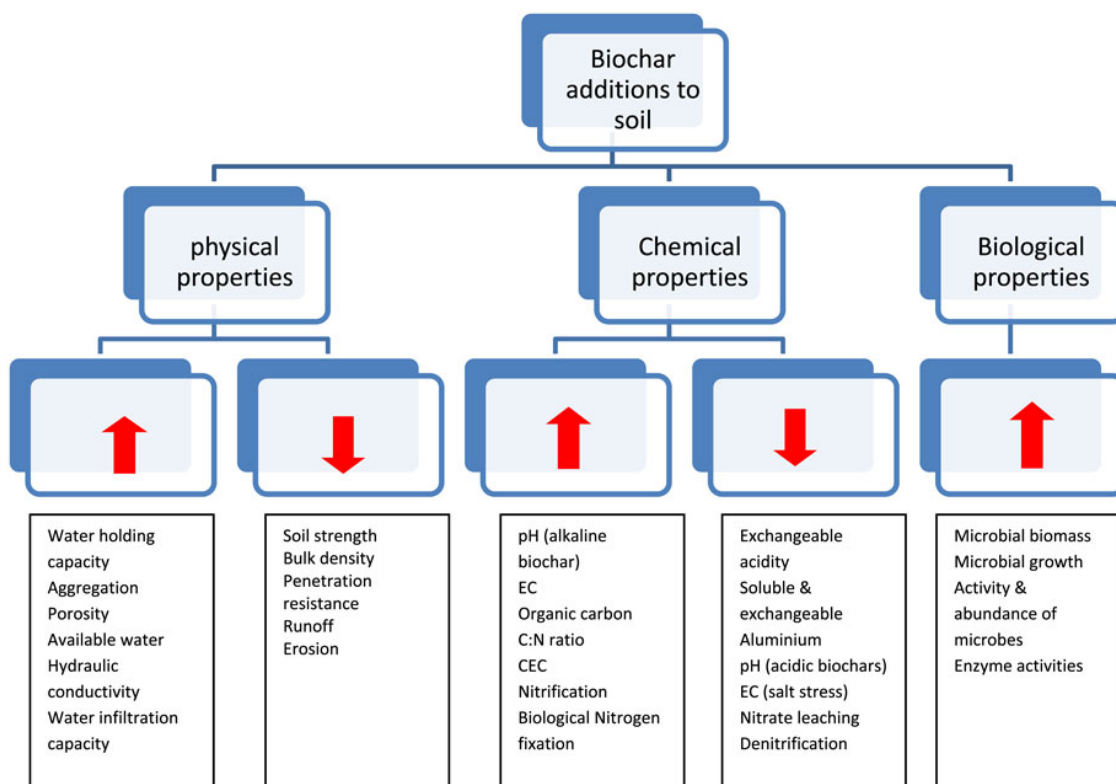


Ilustración 1. Representación gráfica de los principales efectos observados del empleo de biochar como enmienda de suelos. Se observan efectos en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Obtenido de Premalatha et al., 2023.

El biochar aplicado con fines agrícolas, denominado también agrichar, tiene un gran impacto sobre las propiedades fisicoquímicas del suelo (Gallo-Saravia et al., 2018; Singh et al., 2022; Premalatha et al., 2023).

La aplicación de biochar mejora la estructura del suelo (Zhang et al., 2021), disminuye la densidad aparente del suelo (Abenza, 2012; Albuquerque et al., 2013) y favorece la formación de agregados del suelo e incrementa la porosidad (Omondi et al., 2016; Shaaban et al., 2018; Hui, 2021).

Por otra parte, la aplicación de biochar al suelo incrementa el contenido en materia orgánica del suelo (Benavente, 2022), la capacidad de intercambio catiónico (Abenza, 2012; Y. Wang et al., 2013), la conductividad eléctrica (Olmo Prieto, 2016; Curiel, 2016), mejora la fertilidad del suelo al (Gallo-Saravia et al., 2018; Del Amo, 2018; Hernández, 2023) reduciendo la degradación del suelo (Lehmann, 2007) e incrementa el tiempo de residencia de los nutrientes y su disponibilidad (Premalatha et al., 2023).

El biochar incrementa el contenido en nitrógeno total y la relación C/N (Benavente, 2022), en potasio (Premalatha et al., 2023), en fósforo (Lehmann, 2007; Kalus et al., 2019) y otros nutrientes (Gilces Reyna, 2014; Shaaban et al., 2018; Hui, 2021; Joseph et al., 2021), por lo que es recomendado para suelos especialmente degradados o con poca fertilidad (Glaser et al., 2002; Zhao et al., 2013). También se ve incrementada la capacidad de retención de agua en la superficie porosa (Jeffery et al., 2011; Adhikari et al., 2023).

El biochar aumenta el pH del suelo gracias a los carbonatos y silicatos presentes que reaccionan con los protones del suelo neutralizando el pH (Zhou et al., 2021; Amalina et al., 2022) e incrementa la capacidad de almacenamiento de agua del suelo (Méndez, 2017; Ruiz Márquez,

2022; Kotuš et al., 2022), reduciendo el efecto de la erosión y escorrentía (Abenza, 2012; Premalatha et al., 2023) así como la generación de lixiviados (Azzi et al., 2021).

En lo que respecta a la vegetación y a la comunidad microbiana del suelo, la aplicación de biochar puede favorecer el desarrollo radicular y vegetal de las especies vegetales (Abenza, 2012; Olmo Prieto, 2016; Khater et al., 2024), la germinación, el desarrollo en longitud y diámetro foliar (Gilces Reyna, 2014), la producción de frutos hortícolas (Gallo-Saravia et al., 2018; Hui, 2021; Zhang et al., 2021; Singh et al., 2022). No se han detectado efectos negativos de la aplicación de biochar (Moreno, 2017). Además, la aplicación de biochar también favorece el desarrollo y el incremento de la diversidad de las comunidades microbianas del suelo (Zhang et al., 2021; Joseph et al., 2021; Melo Lozano & Afanasjeva, 2022) pues sirve como un microhábitat para los microorganismos del suelo y los protege de la depredación (Zhu et al., 2017). También se ve incrementada la actividad de rutas enzimáticas asociadas al ciclaje de fósforo potasio y nitrógeno (Curiel, 2016; Shaaban et al., 2018; Hui, 2021; Zhang et al., 2021) y la abundancia de comunidades de macroinvertebrados (Shaaban et al., 2018).

Sin embargo, es importante tener en cuenta que los efectos observados pueden depender de la estación de año de aplicación, condiciones climáticas o dosis (Kalus et al., 2019; Azzi et al., 2021).

Conocer exactamente la influencia real de la temperatura u otras condiciones de pirólisis y de las características de la materia prima de partida permite estimar las características finales que tendría el biochar producido y los efectos o usos que podría recibir (Wang et al., 2013; Huang et al., 2021)

3.3 Alternativas de uso al biochar

Existen múltiples alternativas para el tratamiento de la biomasa orgánica, especialmente aquella procedente de residuos agrícolas o forestales.

La incineración es una práctica muy extendida, rápida y de coste bajo en la que el único objetivo es eliminar el residuo original para evitar su acumulación. El principal problema de esta tecnología es que genera grandes cantidades de gases atmosféricos contaminantes como CO₂, CH₄, NO_x, SO_x y especialmente, material particulado de tamaño inferior a 2,5 micras, que contribuye al cambio climático y perjudica a la salud humana (Chen et al., 2015; Pinakana et al., 2024).

En la siguiente figura (Ilustración 2), obtenido de Sharma et al 2015, se aprecian los principales mecanismos de conversión de la biomasa (Sharma et al., 2015)

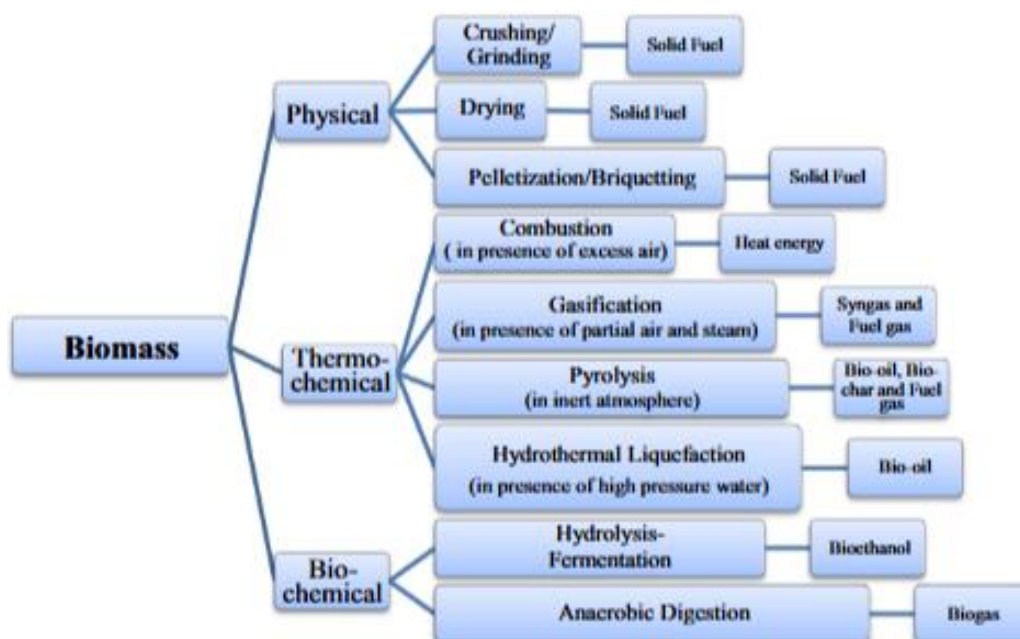


Ilustración 2. Principales tecnologías de conversión de la biomasa. Se aprecian metodologías físicas, químicas y biológicas (bioquímicas). Obtenido de Sharma et al, 2015

El compostaje es otra alternativa en la que mediante la acción de microorganismos se transforma el residuo en una enmienda o fertilizante orgánico que puede mejorar la calidad del suelo en el que se aplique (Karić et al., 2022; Waqas et al., 2023), aunque requiere de superficies de tratamiento muy altas y también puede ser necesaria el tratamiento de los gases en el proceso, entre los que se encuentra el CO₂ y en ocasiones, H₂S (Waqas et al., 2023).

La retirada de los residuos al vertedero es la opción más fácil y barata inicialmente pues no requiere de una gran infraestructura. Sin embargo, si el vertedero no se encuentra bien aislado e impermeabilizado, se pueden generar malos olores y corrientes de lixiviados tóxicos y de gases contaminantes (Blair & Mataraarachchi, 2021).

Otra alternativa es la producción de biocombustibles como biogás, biodiesel biohidrógeno o bioetanol (Mishra et al., 2023; Guo et al., 2024).

La tecnología de producción de biochar es mucho más limpia pues no libera o libera menos gases de efecto invernadero en el proceso y permite valorizar el residuo, es decir, se obtiene un producto final que puede tener un uso concreto en la lucha contra el cambio climático o problemas de fertilidad en los suelos (Zhou et al., 2021).

3.4 Parámetros de caracterización del biochar:

Para determinar la estabilidad y aromaticidad del biochar se analizan habitualmente las **relaciones H/C y O/C**, que indica la relación atómica entre el número de átomos de hidrógeno o de oxígeno respecto a los átomos de carbono presentes en el biochar (Li et al., 2023).

La relación H/C se emplea para indicar el grado de aromaticidad, es decir, de estabilidad del biochar (Tu et al., 2022; Li et al., 2023). Cuanto menor sea el valor de la relación, mayor contenido en estructuras aromáticas posee el biochar y, por lo tanto, más estable y funcional es y mayor potencial de secuestro de carbono tiene (Li et al., 2023; Tu et al., 2022; Zhu et al., 2017).

La relación O/C indica la recalcitrancia y la hidrofobicidad del biochar. Cuanto menor sea, menos biodegradable es el biochar y más tiempo permanece en el suelo antes de degradarse (Ahmed & Hameed, 2020; Das et al., 2021; Tu et al., 2022). Valores cercanos a 0,4 indican una

vida media de entre 100 y 1000 años, pero si el valor es inferior a 0,2 la vida media del biochar aumenta por encima de los 1000 años (Pariyar et al., 2020; Ippolito et al., 2020).

El ratio N/C también indica la recalcitrancia del biochar, pues cuanto menor sea el contenido en nitrógeno, menos fácilmente biodegradable es y más estable permanece en el suelo (Zhu et al., 2017).

El ratio máximo H/C fijado por IBI es de 0,7 mientras que el O/C es de 0,4 (Curiel, 2016; Hernández, 2023).

Otro de los parámetros más empleados para caracterizar el proceso de producción de biochar es el rendimiento de producción, que se define como la proporción de biochar que se ha producido a partir de una determinada masa de biomasa consumida (Khater et al., 2024; Ibitoye et al., 2024).

Por último, en lo referente a la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y la conductividad eléctrica (CE), la primera representa la cantidad de cationes que puede absorber el biochar en su superficie (Zhang et al., 2021) y actúa como un indicador del efecto sobre la fertilidad del suelo y sobre cómo se comportarían los nutrientes del suelo al añadirlo (Balmuk et al., 2023).

La conductividad eléctrica indica la cantidad de sales solubles presentes en el biochar, y, por tanto, un indicador de la cantidad de sales que puede aportar al suelo o a la vegetación (Balmuk et al., 2023).

3.5 Proceso de descomposición de la biomasa vegetal

La biomasa vegetal se compone principalmente de tres moléculas diferentes: hemicelulosa, celulosa y lignina a diferentes proporciones (Leng et al., 2019; Yaashikaa et al., 2020; Visser et al., 2024). Los diferentes tipos de materias primas responden de manera heterogénea a condiciones particulares de pirólisis debido a variaciones de celulosa ($(C_5H_8O_4)_m$), hemicelulosas ($(C_5H_8O_4)_n$), lignina [$C_9H_{10}O_3(OCH_3)_{0,9-1,7}$] $_n$ y contenidos minerales inorgánicos (Hassan et al., 2020).

La celulosa es un compuesto importante que estabiliza la estructura de las células vegetales. Es un polisacárido lineal de alto peso molecular y elevado grado de polimerización formado por monómeros de glucosa unidos por enlaces β -1,4. Es apolar a temperatura ambiente, pero adquiere polaridad con el aumento de la temperatura (Gollakota et al., 2018; Visser et al., 2024).

La hemicelulosa es un polisacárido ramificado que enlaza la celulosa con la lignina. No tiene una estructura cristalina (es amorfo) y se compone de monómeros de glucosa, manosa, arabinosa, xilosa o ácido glucurónico (Amalina et al., 2022; Visser et al., 2024). El contenido en hemicelulosa varía significativamente entre la biomasa leñosa y herbácea (Gollakota et al., 2018; Visser et al., 2024).

La lignina es un polímero amorfo, sin estructura definida, hidrófobo y de alto peso molecular (Amalina et al., 2022) con una gran cantidad de grupos funcionales en su estructura (Tomeczyk et al., 2020). Se compone de tres monómeros aromáticos (p-hidroxifenilo, guayacil y siringilo) muy resistentes a la degradación biológica (Gollakota et al., 2018; Visser et al., 2024) y su principal función es mantener rigidez estructural (Amalina et al., 2022).

En la siguiente figura, obtenida de Kambo & Dutta, 2015, se aprecia la distribución de los tres componentes y su grado de unión.

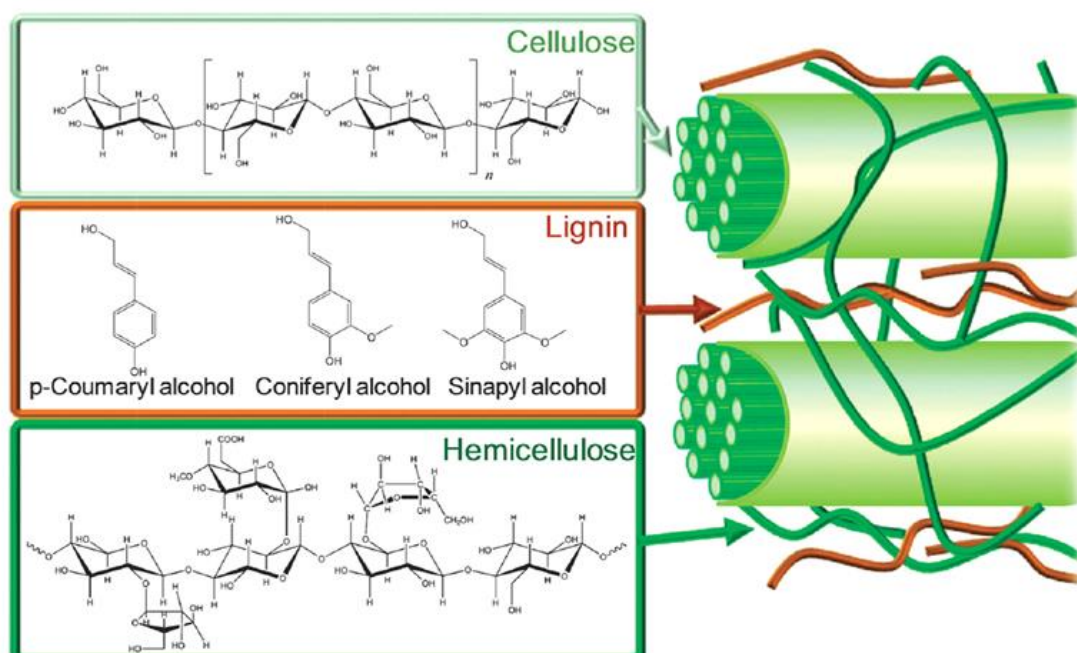


Ilustración 3. Representación gráfica del grado de unión entre la celulosa, hemicelulosa y lignina en la biomasa. Obtenido de Kambo et Dutta, 2015

El proceso de descomposición de la biomasa vegetal sucede en tres etapas, que se pueden apreciar con la realización de curvas de análisis termogravimétrico (Rafiq et al., 2016; Tu et al., 2022).

Según se va incrementando la temperatura, hacia los primeros 130 °C se produce una considerable pérdida de peso debido a la pérdida de humedad que provoca la formación de grupos -CO; -COOH e hidropéroxido (Rafiq et al., 2016; Tomczyk et al., 2020; Zhou et al., 2021).

Con el aumento de la temperatura a 200 °C se produce la volatilización de los compuestos volátiles y material adherido a la materia prima (Yaashikaa et al., 2020; Das et al., 2021; Zhou et al., 2021; Tu et al., 2022).

A temperaturas de 200-400 °C sucede lo que se denomina descomposición primaria. A de 200-300 °C sucede la degradación de la hemicelulosa y hacia los 300-400 °C se descompone la hemicelulosa, aunque es a partir de los 400 °C a la temperatura a la que se ha degradado la mayor parte de la celulosa y hemicelulosa (Kim et al., 2012; Pariyar et al., 2020; Zhou et al., 2021; Amalina et al., 2022; Visser et al., 2024).

La hemicelulosa, rica en grupos funcionales carboxilo, va perdiendo grupos funcionales hidroxilo y metoxi a medida que se va descomponiendo (Chen et al., 2015; Yaashikaa et al., 2020; Amalina et al., 2022) y produce oligosacáridos y compuestos como acético, fórmico o xilosa (Pecha & Garcia-Perez, 2020) que sufren reacciones de descarboxilación, despolimerización y aromatización (Yaashikaa et al., 2020; Armah et al., 2022).

El proceso de descomposición de la celulosa es rápido (Pecha & Garcia-Perez, 2020) y en él se producen compuestos volátiles (Sun et al., 2017), alquitrán, cetonas, acetol, aldehídos (Armah et al., 2022), y levoglucosano, (Pecha & Garcia-Perez, 2020) que se deshidrata para generar hidroximetilfurfural y furfural (Hassan et al., 2020; Armah et al., 2022), los cuales pueden emplearse para producir productos líquidos y gaseosos como bioaceite y gas de síntesis (Yaashikaa et al., 2020). En el proceso de descomposición de la celulosa también se liberan hidrocarburos ácidos, H₂, CO, CO₂ y algo de CH₄ (Lehmann, 2007).

Es a partir de los 500 °C cuando comienza a degradarse la lignina (Kim et al., 2012; Tomczyk et al., 2020; Zhou et al., 2021) y se descomponen las ceras, resinas y grasas de la materia prima (Kim et al., 2012; Pecha & Garcia-Perez, 2020). El proceso de descomposición de la lignina es mucho más complejo porque el enlace β -4 de la lignina se rompe generando radicales libres que capturan protones, originando otros compuestos secundarios que pueden propagar en cadena los compuestos de carbono alifático (Hassan et al., 2020; Yaashikaa et al., 2020). Cuando la lignina se descompone, se produce principalmente carbono aromático (Sun et al., 2017; Pecha & Garcia-Perez, 2020; Armah et al., 2022), por lo que cuanto mayor sea el contenido en lignina, mayor rendimiento de biochar se obtendrá (Amalina et al., 2022).

A temperaturas de pirólisis inferiores a 500 °C, la lignina no se convierte en un hidrocarburo aromático policíclico hidrófobo y el carbón se vuelve más inestable e hidrófilo (Tomczyk et al., 2020). Por encima de 600-800 °C se degradan completamente las estructuras alifáticas, como el carboxilo, cetona, o éster (Hassan et al., 2020) y se pierden gran parte de los átomos no carbonosos como calcio, magnesio o potasio (Hassan et al., 2020).

Por eso, los biocharres desarrollados a bajas temperaturas suelen ser hidrófilos debido a que están presentes muchos de esos grupos funcionales (Hassan et al., 2020) y los biocharres desarrollados a altas temperaturas presentan estructuras y esqueletos aromáticos (Hassan et al., 2020).

En lo que respecta al contenido en nutrientes la temperatura de volatilización varía en función del elemento. Por ejemplo, en el caso del nitrógeno puede volatilizar a temperaturas de 200 °C, mientras que en el caso del fósforo o potasio se requieren de temperaturas superiores a 700-800 °C (Premalatha et al., 2023).

La Ilustración 4 recopila las principales propiedades características de la celulosa, hemicelulosa y lignina (Kambo & Dutta, 2015).

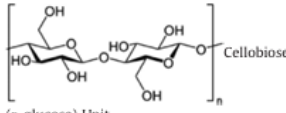
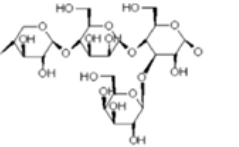
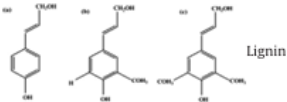
Compound	Cellulose	Hemicellulose	Lignin
Chemical structure	 (n-glucose) Unit	 - Xylose - β (1,4) - Mannose - β (1,4) - Glucose - - α (1,3) - Galactose -	 monomers (a) trans-p-coumaryl alcohol, (b) coniferyl alcohol, and (c) sinapyl alcohol
Molecular formula	(C ₆ H ₁₀ O ₅) _n	C ₅ H ₁₀ O ₅	(a) C ₉ H ₁₀ O ₂ , (b) C ₁₀ H ₁₂ O ₃ , and (c) C ₁₁ H ₁₄ O ₄
Typical composition in biomass	(i) Hardwood: 39–54% (ii) Softwood: 41–50% (iii) Agricultural: 24–50%	(i) Hardwood: 15–36% (ii) Softwood: 11–27% (iii) Agricultural :22–35%	(i) Hardwood:17–29% (ii) Softwood:27–30% (iii) Agricultural:7–29%
Structural formation	A homopolymer of n-glucose subunits. Cellulose is linked by β -1,4 glycosidic bonds forming long chains.	A heteropolymer of Xylose, Mannose, Glucose, and Galactose. Xylan, the dominating component in hemicellulose, is linked by β -(1→4)-glycosidic or α -(1→2)-bonded 4-O-methylglucuronic acids. Also may contain acetyl group attached to it.	A heteropolymer built up of three different phenyl-propane monomers groups: p-coumaryl, coniferyl and sinapyl alcohol. This complex polymer is oriented by a different degree of methoxylation of above-mentioned monomers forming a large molecular structure(s).
Hydrophobicity	Medium	Low	High
Calorific value	17–18 MJ/kg	17–18 MJ/kg	23.3–26.6 MJ/Kg
Thermal stability and solubility in water	Cellulose is non-soluble in water under standard conditions. It can be hydrolyzed in subcritical water around 180 °C and around 300–400 °C in standard conditions.	Owing to its amorphous structure, thermal breakdown of hemicellulose is relatively easier. It can be hydrolyzed in water around 160 °C and around 200–300 °C under standard conditions.	Lignin is the most thermo-chemically stable component in wood and highly insoluble in water. Its degradation/hydrolysis starts in near or supercritical water or around 600 °C in ambient conditions.
Applications	Paper manufacturing, textiles, biofuels, chromatography, binding/composite materials, etc.	Mainly includes animal feed, food packaging, health care and bio-refinery industry.	Manufacturing of adhesive compounds and bioenergy.

Ilustración 4. Propiedades físicas y químicas de los componentes de la biomasa lignocelulósica, Obtenido de Kambo et Dutta, 2015

El pH de los biocharres aumenta con el aumento de la temperatura debido a la pérdida de la materia volátil en el biochar, a la acumulación de sales inorgánicas como sodio, potasio, magnesio y calcio y a la formación de carbonatos (Tu et al., 2022). El pH va variando en las diferentes etapas. En un inicio, a 200-400 °C, con la descomposición de la hemicelulosa y

celulosa, se produce una disminución del pH del producto (Tomczyk et al., 2020). Posteriormente, a 400-500 °C aumenta el pH debido a la separación de las sales alcalinas de la matriz orgánica y a 600 °C se estabiliza cuando todas las sales alcalinas se liberan de la estructura pirolítica (Tomczyk et al., 2020).

En lo que respecta al grado de carbonización del biochar, por debajo de 400 °C el carbón no posee las propiedades del biochar y por encima de 600 °C la estructura del carbón queda alterada y no tiene tanta capacidad de absorción, por lo que temperaturas de 450-550 °C pueden ser las óptimas para la producción de biochar (Lehmann, 2007).

3.6 Procesos de producción de biochar (gasificación, pirolisis...)

La transformación de restos leñosos y otros tipos de biomasa en biochar se lleva a cabo empleando diferentes tratamientos térmicos que provocan cambios en su estructura, obteniéndose como productos biochar, bioaceite y gas, que varían en proporción según la técnica empleada y los fines perseguidos (Wang et al., 2020).

Existen varios métodos para la obtención de biochar, como la gasificación, torrefacción y la carbonización hidrotermal, (Yaashikaa et al., 2020; Visser et al., 2024) aunque la más destacada es la pirólisis al ser con la que mayores rendimientos y calidad se obtiene (Yaashikaa et al., 2020; Capareda, 2022; Visser et al., 2024).

Cada uno de los procesos tiene unas características y rendimientos específicos que influyen directamente en las propiedades fisicoquímicas del biochar (Yaashikaa et al., 2020).

3.6.1 Gasificación

El principal objetivo de la gasificación es la obtención de un gas de síntesis (syngas) compuesto principalmente por CO (monóxido de carbono), H₂, CO₂, CH₄, vapor de agua y trazas de hidrocarburos (Czajczyńska et al., 2017; Capareda, 2022; Visser et al., 2024), etano, propano y propeno (Czajczyńska et al., 2017). El gas generado posee un valor calorífico de 40-50 MJ/kg (Czajczyńska et al., 2017), por lo que es muy rentable económica y ambientalmente sostenible (Ahmed et al., 2024).

El proceso sucede a temperaturas elevadas, normalmente superiores a 800 °C y cercanas hasta los 1200-1400 °C y tiempos de residencia de apenas unos segundos (Yaashikaa et al., 2020). Habitualmente, cuanto mayor es la temperatura, menos es el contenido en hidrocarburos, CO₂, CH₄ y mayor el contenido de CO y H₂ (Armah et al., 2022).

El rendimiento de biochar es mínimo (Visser et al., 2024), apenas un 5 % (Köves et al., 2024), aunque el biochar que se obtiene presenta una elevada área superficial y porosidad (Wiedner et al., 2013; Visser et al., 2024).

El rendimiento de bio-aceite es del 10 % y el del propio gas de síntesis es del 85 % (Köves et al., 2024). Para incrementar la eficiencia de la gasificación es necesario una baja relación O/C (Armah et al., 2022).

El proceso de gasificación requiere solamente de un aporte de energía inicial pues el propio gas generado en el proceso puede emplearse para mantener la temperatura en la gasificación (Capareda, 2022).

3.6.2 Carbonización hidrotermal

La carbonización hidrotermal es un tipo de pirólisis húmeda (Wang et al., 2020; Ahmed et al., 2024) en el que la biomasa se descompone termoquímicamente en un residuo carbonoso denominado hidrochar (Gollakota et al., 2018). El proceso sucede en condiciones anaerobias en presencia de agua (Ahmed et al., 2024; Ibitoye et al., 2024), a temperaturas moderadas de 180-250 °C (Yaashikaa et al., 2020), y presiones elevadas de presiones de 2 a 20 MPa (Mumme

et al., 2011) y tiempos de residencia de hasta 60 minutos (Cha et al., 2016; Gollakota et al., 2018; Ibitoye et al., 2024).

Si las temperaturas superan los 350-400 °C sucede un proceso de licuefacción hidrotermal en el que se obtiene una fracción líquida denominada bio-aceite (Visser et al., 2024) con gran capacidad energética (Gollakota et al., 2018; Mishra et al., 2023).

El proceso de carbonización hidrotermal es más rápido que la pirólisis tradicional, aunque requiere del aporte de mucha energía y está limitado a ciertas materias primas (Ibitoye et al., 2024). Sin embargo, parte de esta energía se puede suplir con la fase gaseosas (syngas) generado en el proceso (Gollakota et al., 2018).

La presencia de agua favorece la ruptura por hidrólisis de los enlaces de las moléculas de celulosa liberando los monómeros de glucosa. Después, el contenido en agua se pierde por evaporación y suceden las reacciones de descarboxilación y desaminación que favorecen la eliminación de oxígeno (Gollakota et al., 2018; Ahmed et al., 2024) y reacciones de condensación para generar estructuras aromáticas (Cha et al., 2016; Ahmed et al., 2024).

El rendimiento de producción de biochar es elevado pero el biochar generado presenta baja estabilidad (Liu & Balasubramanian, 2014; Mishra et al., 2023) y con menor superficie específica e hidrofobicidad (Wiedner et al., 2013; Wang et al., 2019).

3.6.3 Torrefacción

El proceso de torrefacción es una pirólisis incompleta que sucede a temperaturas de 200-300 °C con tiempos de residencia inferiores a 30 minutos y velocidades de calentamiento rápidas (Yaashikaa et al., 2020; Khairy et al., 2024). Permite obtener rendimientos de biochar cercanos al 50-60 % (Capareda, 2022), aunque es mucho más denso (Ibitoye et al., 2024) e hidrofóbico (Yaashikaa et al., 2020).

El proceso consta de varias fases. La biomasa se va calentando poco a poco hasta los 120 °C para eliminar el agua presente en la biomasa y según se va incrementando la temperatura van sucediendo las reacciones de hidrólisis y descomposición de la celulosa, hemicelulosa y lignina y se liberan compuestos volátiles ligeros (Yaashikaa et al., 2020; Mishra et al., 2023).

La descomposición y volatilización de la materia orgánica es mayor a altas temperaturas y también se incrementa el contenido en carbono fijado, área superficial, estabilidad y porosidad (Tran & Bui, 2016) y el contenido en cenizas (Khairy et al., 2024), aunque a temperaturas más bajas se obtiene mayor rendimiento de biochar y de bioaceite (Cha et al., 2016; Potnuri et al., 2023).

El proceso de torrefacción puede realizarse con biomasa húmeda, en la que suceden reacciones de hidrólisis en las que se descompone la hemicelulosa y celulosa, y la lignina apenas se ve afectada (Lin et al., 2023) o puede realizarse sobre biomasa seca, en la que se descompone la lignina (Lin et al., 2023).

3.6.4 Pirólisis

La pirólisis es el principal proceso de descomposición térmica empleado para producir biochar. Sucede en ausencia de oxígeno, en muchas ocasiones en atmósfera inerte de N₂ a presión atmosférica y a temperaturas variables entre 400 y 900 °C dependiendo del tipo de pirólisis (Czajczyńska et al., 2017; Wang et al., 2020; Visser et al., 2024).

La composición y proporción de las distintas fases generadas (biochar, bioaceite y gas de síntesis) dependen de las condiciones del funcionamiento de la temperatura de pirólisis, velocidad de calentamiento o tiempo de residencia (Cha et al., 2016; Li et al., 2023) y de la materia prima (Chen et al., 2015).

La fracción de bioaceite se compone generalmente de azúcares, ácidos, alcoholes, cetonas, fenoles, furanos y derivados y otros compuestos (Czajczyńska et al., 2017) y se genera a partir de la condensación de los hidrocarburos y otros compuestos aromáticos (Armah et al., 2022; Visser et al., 2024). Tiene un valor calorífero de 30-35 MJ/kg por lo que puede ser empleado producir calor o electricidad (Czajczyńska et al., 2017; Mishra et al., 2023).

El proceso de pirólisis sucede en dos etapas, la primaria y la secundaria (Al-Rumaihi et al., 2022). En la primera fase se rompen los enlaces químicos de la materia prima, se liberan los compuestos volátiles más reactivos y las cadenas poliméricas de la hemicelulosa y celulosas se despolimerizan en monómeros. En la siguiente etapa los compuestos inestables generados en la primera etapa sufren reacciones de ruptura (craqueo) y recombinación hasta formar moléculas de mayor peso molecular más estables, que compondrán el biochar definitivo (Al-Rumaihi et al., 2022).

El proceso de pirólisis es especialmente recomendable para la producción de biochares con alta área superficial y alta capacidad de retención de metales pesados y, por lo tanto, emplearlos como enmienda de suelos (Liu & Balasubramanian, 2014; Mishra et al., 2023; Ercan et al., 2023).

3.6.4.1 Pirólisis lenta

Emplea temperaturas relativamente bajas (350-600 °C), tiempos de residencia elevados (varias horas e incluso días) (Kambo & Dutta, 2015; Yaashikaa et al., 2020; Al-Rumaihi et al., 2022; Visser et al., 2024) y bajas tasas de calentamiento (Yaashikaa et al., 2020; Rodriguez et al., 2024) que permiten que la conducción del calor sea homogénea por toda la biomasa, lo que permite maximizar el rendimiento y minimizar las pérdidas de carbono (Cha et al., 2016; Armah et al., 2022; Rodriguez et al., 2024).

Es el método de producción convencional (Cueto García, 2016) que normalmente presenta sistemas de recolección de los gases generados (Rodriguez et al., 2024). Esta técnica de pirólisis es la que más rendimiento de biochar permite obtener (Benavente, 2022; Li et al., 2023; Visser et al., 2024), pero los rendimientos de bioaceite y singas son poco eficientes (Al-Rumaihi et al., 2022; Ibitoye et al., 2024).

Además, los biochares producidos a temperaturas bajas tienen una mayor tasa de recuperación de carbono y otros nutrientes que se tienden a perder a altas temperaturas (Tomczyk et al., 2020).

3.6.4.2 Pirólisis rápida

Este tipo de pirólisis es la preferida si el objetivo es la producción de bio-aceite pues supone cerca del 75 % de los productos generados (Armah et al., 2022; Visser et al., 2024). Este bioaceite presenta un pH muy bajo, cercano a 3 y es altamente reactivo y denso (Bridgwater, 2012).

La biomasa se descompone a temperaturas muy altas, superiores a 800 °C, con tiempos de residencia de apenas unos minutos (Visser et al., 2024) o segundos (Bridgwater, 2012) y con velocidades de calentamiento muy grandes (Al-Rumaihi et al., 2022), lo que provoca que los compuestos volátiles orgánicos sufran un craqueo térmico y se volatilicen en el gas de síntesis (Al-Rumaihi et al., 2022; Li et al., 2023).

En este caso, el rendimiento de biochar es mínimo, apenas un 15 % (Cha et al., 2016; Armah et al., 2022) y tiene un elevado contenido en cenizas (Bridgwater, 2012; Mishra et al., 2023). Además, debido a la gran volatilización producida, los fragmentos de biochar producidos tienen menor tamaño que los producidos a bajas temperaturas (Kim et al., 2012).

Esos gases generados pueden condensarse para formar el bioaceite (Al-Rumaihi et al., 2022; Visser et al., 2024) o pueden licuar directamente si la temperatura es muy alta (Bridgwater, 2012; Wang et al., 2020).

Si las temperaturas son muy altas, se genera un syngas con altos contenidos en monóxido de carbono, dióxido de carbono e hidrocarburos ligeros con un poder calorífero de 10-15 MJ/kg (Czajczyńska et al., 2017; Zhang et al., 2020).

3.6.4.3 Pirólisis intermedia

La pirólisis intermedia presenta características combinadas de las dos tipos de pirólisis mencionadas. Permite obtener rendimientos elevados de biochar y un menor contenido en bioaceite o syngas (Li et al., 2023; Visser et al., 2024) y de mejor calidad (Armah et al., 2022; Li et al., 2023).

Se emplea en el caso de que se desee obtener rendimientos aceptables de productos sólidos (biochar) y líquidos (bioaceite) (Armah et al., 2022).

3.7 Comparativa entre los diferentes procesos de producción:

Hay diferencias en los principales procesos de pirólisis existentes, tal y como se presentan en la siguiente tabla recopilatoria (Tabla 1).

Tabla 1. Comparativa de los principales parámetros de proceso de los distintos tipos de pirólisis. Trabajo propio obtenido a partir de la recopilación bibliográfica de diversas fuentes

	PIRÓLISIS LENTA	PIRÓLISIS INTERMEDIA	PIRÓLISIS RÁPIDA
TEMPERATURA (°C)	350-600 °C	500-700 °C	800-1000 °C
TIEMPO DE RESIDENCIA	2-12 horas	30-60 min	Inferior a 2-5 minutos
VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO	2-5 °C/min	10-20°/min	200-1000 °C/min
PRODUCTO OBJETIVO	Biochar	Biochar y bioaceite	Bioaceite

También existen diferencias entre las distintas metodologías de producción de biochar.

Por ejemplo, la gasificación genera biochar con mayor carbonización (carbono estable), área superficial, porosidad, capacidad de retención de agua y más alcalinos, pero con menores ratios O/C e H/C que la pirólisis (Fryda & Visser, 2015), precisamente porque las temperaturas son tan altas que volatilizan prácticamente todos los elementos excepto los metales pesados de la materia prima y el carbono que no se perdido (Fryda & Visser, 2015).

Por otra parte, la pirólisis, al trabajar a temperaturas normalmente superiores a las de la carbonización hidrotermal, genera biochar con mayor contenido en carbono y cenizas, mayor área superficial, tamaño de poros, mayor pH, pero con menor rendimiento, y con menores relaciones H/C y O/C, es decir, más aromáticas y estables (Kambo & Dutta, 2015).

Dentro de los procesos de pirólisis, la pirólisis rápida genera fragmentos de biochar de menor tamaño que la pirólisis lenta (K. Kim et al., 2012).

En la Tabla 2 se recopila un resumen de las diferencias encontradas.

Influencia del Tipo de Biomasa Vegetal y Condiciones de Pirólisis en las Propiedades del Biochar

Tabla 2. Tabla resumen realizada a partir de una revisión bibliográfica múltiple de fuentes como Ahmed et al, 2024; Czajczyńska et al, 2017; Al-Rumaihi et al, 2022 o Amalina et al, 2022, entre otros

	PIRÓLISIS LENTA	PIRÓLISIS RÁPIDA	CARBONIZACIÓN HIDROTHERMAL	TORREFACCIÓN	GASIFICACIÓN
TEMPERATURA (°C)	350-500	600-900	180-220	225-300	800-1300
TIEMPOS DE RESIDENCIA	Altos (horas a días)	Bajos (10-30 seg)	Alto (1-16 horas)	10-60 min	10-20 seg
RENDIMIENTO DE BIOCHAR (%)	35	10-15	60-65	55	10
RENDIMIENTO DE SYNGAS (%)	30	15-20	10	25	85
RENDIMIENTO DE BIOACEITE (%)	35	70	25-30	20	5
CONTENIDO EN CARBONO (%)	85-90 %	70-80 %	70-80 %	55 %	—
OBJETIVO DE PRODUCCIÓN	Biochar	Bioaceite	Biochar en biomásas húmedas	Biochar	Syngas
OTROS DETALLES DEL PROCESO	Genera biocharres con considerable rendimiento y con alto contenido en carbono y cenizas, alta porosidad y bajo ratio O/C y H/C	El syngas generado es rico en CO, CO ₂ , e hidrocarburos con un valor calorífico de 10-15 MJ/kg. El bioaceite tiene elevado poder calorífico (30-35 MJ/kg) puede usarse como combustible	Permite trabajar con biomásas húmedas		El syngas generado tiene un poder calorífico de 40-50 MJ/kg debido a su alto contenido en metano, propano, etano.
RESUMEN	Producción de biochar que pueda ser aplicado como solución a problemas ambientales	Útil si se desea obtener un bioaceite que funcione como un combustible	Útil para materias primas húmedas, pero requiere de trabajo a altas presiones	Poco rendimiento de biochar y aplicaciones limitadas	Útil como forma de gestión del residuo y especialmente si solo se desea obtener energía (syngas)

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El rendimiento de producción de biochar, así como los efectos de su aplicación, depende principalmente de las características de la biomasa de partida (Al-Rumaihi et al., 2022), así como de las condiciones del proceso, como la temperatura (Yaashikaa et al., 2020), velocidad de calentamiento (Pariyar et al., 2020) o tiempo de residencia (Ahmad et al., 2012; Czajczyńska et al., 2017).

En general, los parámetros del propio proceso de producción de biochar influyen más sobre el rendimiento de producción, mientras que las características de la biomasa influyen en su calidad (Yaashikaa et al., 2020).

4.1 Efecto del pretratamiento de la biomasa

En muchas ocasiones es necesario realizar un pretratamiento a la biomasa antes de realizar la pirólisis o las otras alternativas metodológicas (Kim et al., 2012), que incluye el secado para eliminar la humedad, reducción del tamaño de las partículas (Chen et al., 2015) y el homogeneizado (Kim et al., 2012).

La reducción del tamaño de las partículas de la materia prima antes de la pirólisis mejora el rendimiento de producción de biochar (Del Amo, 2018; Mishra et al., 2023) porque favorece que la temperatura se reparta homogéneamente por toda la biomasa (Del Amo, 2018), lo que aumenta la velocidad de calentamiento (Mankar et al., 2021) y reduce ligeramente el rendimiento de producción de biochar al lograrse una mayor carbonización (Chen et al., 2015).

Los biochares generados a partir de biomasa previamente triturada y homogeneiza presentan mayores áreas superficiales (Mankar et al., 2021), mayores capacidades de adsorción de partículas contaminantes (Liao & Thomas, 2019) y de nutrientes (de Jesus et al., 2019; Zhou et al., 2021).

Un mayor tamaño de la biomasa, por el contrario, genera más gradientes térmicos y tiempos de residencia más altos que resultan en la generación de reacciones químicas secundarias que favorecen la producción de syngas en lugar de biochar (Sharma et al., 2015). Además, al ser desigual la difusión del calor de la energía existirán fragmentos mejor carbonizados que otros (Sharma et al., 2015).

El secado por calentamiento previo de la biomasa reduce la energía necesaria para realizar la pirólisis y genera biochares con mayor contenido en carbono, y, por lo tanto, con mejores propiedades para el secuestro de carbono (Ahmad et al., 2012; Chen et al., 2022; da Silva et al., 2025).

La congelación de la biomasa, por otra parte, favorece el rendimiento de producción de biochar (Meng & Wang, 2020) y la activación física por vapor incrementa la porosidad del biochar (Amalina et al., 2022; Mishra et al., 2023), el área superficial (Sajjadi et al., 2019; Barszcz et al., 2024), la hidrofobicidad, y el contenido en grupos funcionales del biochar por la generación de óxidos e hidróxidos superficiales debido al contacto con los átomos de oxígeno de las moléculas de agua (Zhou et al., 2021; Amalina et al., 2022).

En lo que respecta al pretratamiento químico, la adición de agentes químicos es la formas más empleada y eficaz para mejorar la densidad y porosidad del biochar (Zhou et al., 2021).

El lavado con ácidos elimina los metales alcalinotérreos que catalizan reacciones no deseadas en la pirólisis produciendo mejores rendimientos de biochar (Cen et al., 2019; Pagano et al., 2023; Mishra et al., 2023), con mayor contenido en grupos ácidos (Amalina et al., 2022), en compuestos como levoglucosano, furfural y fenoles (Cen et al., 2019; Lu et al., 2020), mayor área superficial y capacidad de adsorción (Zhou et al., 2021) y menor contenido en cenizas y estructuras aromáticas y alifáticas (Lu et al., 2020; Amalina et al., 2022; Mishra et al., 2023).

La adición de álcalis como hidróxido de sodio o calcio reduce el contenido en grupos ácidos y fenoles del biochar (Fidel et al., 2017), al igual que la adición de óxido de calcio (Chen et al., 2015) y también puede incrementar la porosidad, el área superficial de la biomasa (J. S. Kim et al., 2016; Lorenci et al., 2020) y favorece una degradación más eficiente de la lignina (Fidel et al., 2017; Zhou et al., 2021; Amalina et al., 2022). Además, los biochares son más alcalinos (Loow et al., 2016; Amalina et al., 2022) y tienen una mejor capacidad de adsorción de contaminantes (Yuan et al., 2011; Fidel et al., 2017).

4.2 Efecto de la velocidad de calentamiento

Una velocidad de calentamiento baja, es decir, incrementos de temperatura lentos mejora los rendimientos de producción de biochar (Mohanty et al., 2013; Amalina et al., 2022; Modak et al., 2024) al tener mejor conducción del calor (Visser et al., 2024) y con una carbonización más completa y homogénea, con mayor contenido en nutrientes y alcalinidad, y, por tanto, más recomendables como enmiendas (Mohanty et al., 2013).

Por el contrario, una mayor velocidad de calentamiento favorece la generación de biochar más porosos (Mohanty et al., 2013; Souza et al., 2025), con menor contenido en materia volátil (Chen et al., 2015). Con tasas de calentamiento altas se reduce el rendimiento de producción de biochar (Chen et al., 2015) y un mayor rendimiento de producción de bioaceite y gas de síntesis (Chen et al., 2015; Visser et al., 2024)

4.3 Efecto del tiempo de residencia

El efecto del tiempo de residencia se ve condicionado por la temperatura de proceso (Yaashikaa et al., 2020).

Generalmente, tiempos de residencia prolongados a temperaturas bajas reducen el rendimiento de producción de biochar porque la biomasa está expuesta al calor durante más tiempo y volatilizan más compuestos (Sun et al., 2017; Visser et al., 2024), generando mejores rendimientos de gas de síntesis y bioaceite (Chen et al., 2015). El efecto del tiempo de residencia a temperaturas altas apenas se observa (Sun et al., 2017).

Independientemente de la intensidad de los cambios observados, el aumento del tiempo de residencia incrementa la porosidad y área superficial del biochar, el pH, el contenido en cenizas y en carbono fijado mientras que disminuye el contenido en materia volátil (Sharma et al., 2015; Sun et al., 2017; Amalina et al., 2022) y los ratios H/C y O/C (Y. Wang et al., 2013; Huang et al., 2021).

4.4 Efecto de la presión

Un aumento de la presión durante el proceso de pirólisis puede modificar la estabilidad, capacidad de intercambio catiónico (CIC), densidad y retención de agua (Leng & Huang, 2018; Balmuk et al., 2023).

Un aumento de la presión genera mayor producción de gases y bioaceite (Basile et al., 2014; Balmuk et al., 2023) y una menor producción de biochar (Yadav et al., 2019; Balmuk et al., 2023), que presenta menor contenido en volátiles (Maliutina et al., 2018; Balmuk et al., 2023). Si las presiones son bajas, se produce menor vapor y menor volatilización de material inorgánico, produciendo una mayor cantidad de biochar (Mishra et al., 2023).

4.5 Efecto de la atmósfera (gas carrier)

Una atmósfera basada en CO₂ favorece la formación de microporos en el biochar, incrementando el área superficial (Premchand et al., 2023b). Además, se favorece la formación de estructuras aromáticas y la liberación de compuestos volátiles del biochar (Premchand et al., 2023b) y se reduce el contenido en grupos funcionales oxigenados, reduciendo las relaciones O/C y O/H del biochar e incrementando su estabilidad (Premchand et al., 2023a, 2023b).

Por el contrario, una atmósfera basada en nitrógeno atmosférico produce biochar con mayor contenido en materia volátil y más grupos funcionales oxigenados (Marx et al., 2014; Premchand et al., 2023a). El rendimiento de producción de biochar es menor (Yadav et al., 2019; Aktar et al., 2022; Premchand et al., 2023b) porque los vapores de la pirólisis se mueven

más rápido y se limita el número de reacciones secundarias que incrementan la producción de biochar (Yadav et al., 2019).

En atmósferas con aire limitado se producen biocharres con más carbono y ácidos húmicos, aunque con menor rendimiento que los producidos con flujos de dióxido de carbono o nitrógeno (Zhang et al., 2023).

Si se emplea CO₂ como gas carrier se genera más bioaceite que con nitrógeno, y con un mayor contenido en azúcares, cetonas, aldehídos (Zhang et al., 2023; Mishra et al., 2023).

Además del efecto del gas carrier, la velocidad de entrada de este también influye en el rendimiento, pues generalmente cuanto mayor sea el caudal de gas que entra, menos cantidad de biochar se produce (Yadav et al., 2019).

4.6 Efecto del horno de pirólisis

El tipo de horno empleado para realizar el proceso también tiene su influencia en el proceso de producción de biochar debido a la diferencia en la transferencia de calor de cada uno de ellos (Chen et al., 2015; Czajczyńska et al., 2017)

La pirólisis al vacío trabaja a presiones de 5 kPa y es difícil de realizar con éxito (Czajczyńska et al., 2017).

Los hornos de pirólisis rotatorios están diseñados para pirólisis lentas y permiten un continuo mezclado de la materia prima (Chen et al., 2015). Además, también permiten ajustar la entrada en base a las características de los residuos de entrada (Chen et al., 2015; Cueto García, 2016).

Los hornos de lecho fijo son los más simples y se diseñan para escala laboratorio. Estos reactores se calientan de forma externa y tienen como gas carrier N₂, pero no presentan un sistema de mezclado que reparta el calor de forma homogénea y no trabajan de forma continua (Chen et al., 2015; Raza et al., 2021). Se usan principalmente a modo de prueba para determinar las características más importantes que afectan al proceso de pirólisis de una biomasa concreta (Czajczyńska et al., 2017). Solamente funcionan con lotes pequeños (Yadav et al., 2019; Raza et al., 2021).

Los reactores de lecho fluidizado tienen velocidades de calentamiento mayores a las de lecho flujo y permiten el mezclado de la materia prima (Chen et al., 2015; Czajczyńska et al., 2017; Raza et al., 2021).

4.7 Efecto de la temperatura de pirólisis

La temperatura de proceso ejerce mucha influencia en las características del biochar obtenido y está relacionada con el resto de los parámetros de proceso, pues habitualmente, cuanto mayor es la temperatura a la que se lleva a cabo el proceso de producción de biochar, menor es tiempo requerido (Babu & Chaurasia, 2003; Joseph et al., 2021) y menor es el rendimiento de producción de biochar y mayor el de syngas y bioaceite (Czajczyńska et al., 2017; Amalina et al., 2022).

En el caso del gas de síntesis o syngas, el aumento de la temperatura produce un incremento de la emisión de gases como CO, CO₂ y CH₄ (Das et al., 2021).

Generalmente, un aumento de la temperatura de pirólisis genera una mayor volatilización y descomposición de los componentes de la biomasa, lo que se relaciona con un menor rendimiento de producción de biochar (Souza et al., 2025; Tu et al., 2022) y una mayor producción de cenizas (Rafiq et al., 2016; Wei et al., 2019; Pariyar et al., 2020). A altas temperaturas es la lignina el componente de la biomasa que más se descompone, porque el resto

de los componentes estructurales ya se han volatilizado antes (Ahmad et al., 2012; Khater et al., 2024).

Esto produce un menor contenido en oxígeno e hidrógeno debido a la evaporación del agua (Shaaban et al., 2018; Visser et al., 2024) que retira las fracciones más lábiles del oxígeno e hidrógeno (Pariyar et al., 2020) así como una disminución del contenido en nitrógeno en el biochar (Shaaban et al., 2018) lo que está relacionado con una disminución de las relaciones H/C y O/C y un aumento de la relación C/N (Hassan et al., 2020; Shaaban et al., 2018) y se traduce en una mayor estabilidad, hidrofobicidad y aromaticidad del biochar (Rafiq et al., 2016; Pariyar et al., 2020; Balmuk et al., 2023).

A su vez, las relaciones H/C y O/C están relacionadas. Das et al., 2021 demostraron que existe una relación directa entre el aumento de la relación H/C y el aumento de la relación O/C.

Los átomos de hidrógeno y oxígeno que se liberan de la biomasa se transfieren al gas de síntesis en forma de H_2 y vapor de agua además de otros gases (Pariyar et al., 2020).

Por otra parte, con el aumento de la temperatura también se produce una mayor eliminación de compuestos alifáticos de la materia prima como grupos éster, alcoholes, fenoles, cetonas, alcanos y también de grupos ácidos, que junto a la pérdida de H y O, contribuye al aumento del área superficial y porosidad del biochar (Ahmad et al., 2012; Chen et al., 2015; Li, Gupta, et al., 2023). Estos grupos habitualmente pasan a la fracción líquida del bioaceite (Chen et al., 2015). Debido a esta mayor hidrofobicidad disminuye la capacidad de retención de agua del biochar (Enders et al., 2012; Das et al., 2021; Huang et al., 2021).

Los poros del biochar se dividen en microporos (<2 nm), mesoporos (2–50 nm) y macroporos (>50 nm) (Zhang et al., 2021). Los macroporos provienen de los espacios propios de la materia prima, mientras que los microporos se generan en el proceso de pirólisis (Lehmann, 2007).

La pérdida de grupos funcionales ácidos y la formación de grupos funcionales hidrofóbicos debido al aumento de la temperatura produce un incremento en el pH del biochar (Ahmad et al., 2012; Li et al., 2023; Tomczyk et al., 2020). A mayores, una mayor temperatura favorece la ruptura de enlaces $C=C$; $C\equiv C$; $C=O$ y la formación de anillos aromáticos que incrementan el pH (Hassan et al., 2020; Li et al., 2023).

Como se puede observar en la Ilustración 5, una mayor temperatura de pirólisis incrementa el área superficial del biochar (Lehmann, 2007; Pariyar et al., 2020; Zhang et al., 2021) y la capacidad de intercambio catiónico debido a la presencia de grupos carboxílicos situados en los grupos aromáticos que generan puntos de intercambio en la superficie (Wei et al., 2019; Zhang et al., 2020; Pariyar et al., 2020)

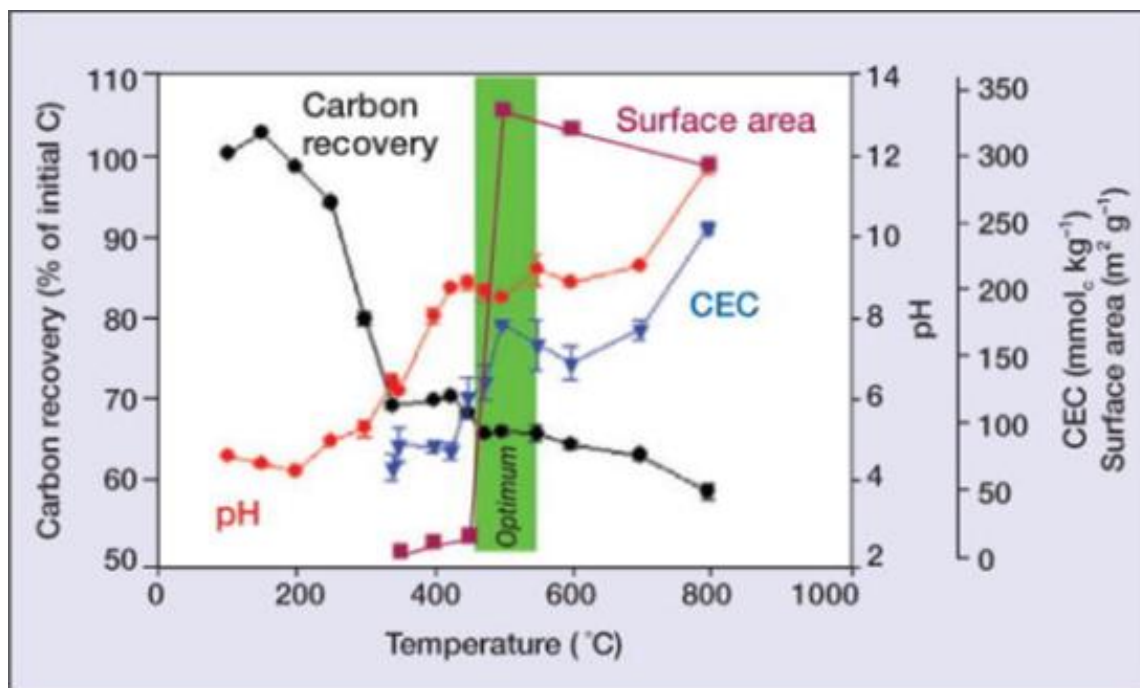


Ilustración 5. Representación gráfica del incremento de la temperatura sobre el área superficial, capacidad de intercambio catiónico y porcentaje de carbono recuperado. Obtenido de Lehmann, 2007

Este aumento del área superficial incrementa la capacidad de adsorción del biochar, especialmente de fósforo (Lehmann, 2007; Jindo et al., 2014) aunque también de otros nutrientes (Enders et al., 2012; El-Naggar et al., 2019).

Gran parte del contenido del biochar generado a altas temperaturas es carbono orgánico altamente estable que procede de la descomposición de la lignina (Curiel, 2016). La proporción de carbono altamente recalcitrante (aromático) se ve incrementada en el biochar cuanto mayor es la temperatura de pirólisis (Ahmad et al., 2012; Zhang et al., 2020) y aunque la presencia de nitrógeno, oxígeno e hidrógeno disminuyen respecto a la biomasa inicial (Curiel, 2016), la presencia de calcio, sodio, fósforo, magnesio y potasio incrementan con la temperatura (Rafiq et al., 2016; Zhang et al., 2020).

Por otra parte, también se ve incrementada la conductividad eléctrica y la capacidad neutralizante del biochar (Jindo et al., 2014; Das et al., 2021; Balmuk et al., 2023), la densidad aparente del biochar (Khater et al., 2024), el contenido en PAHs (hidrocarburos aromáticos policíclicos) de alto peso molecular (Zhang et al., 2020) mientras que el contenido en materia volátil disminuye (Jindo et al., 2014; Rafiq et al., 2016; Das et al., 2021; Ibitoye et al., 2024)

En las siguientes gráficas (Ilustración 6), recopiladas de Li et al, 2023, se observan los principales cambios producidos en el biochar debido al aumento de la temperatura (Li et al., 2023).

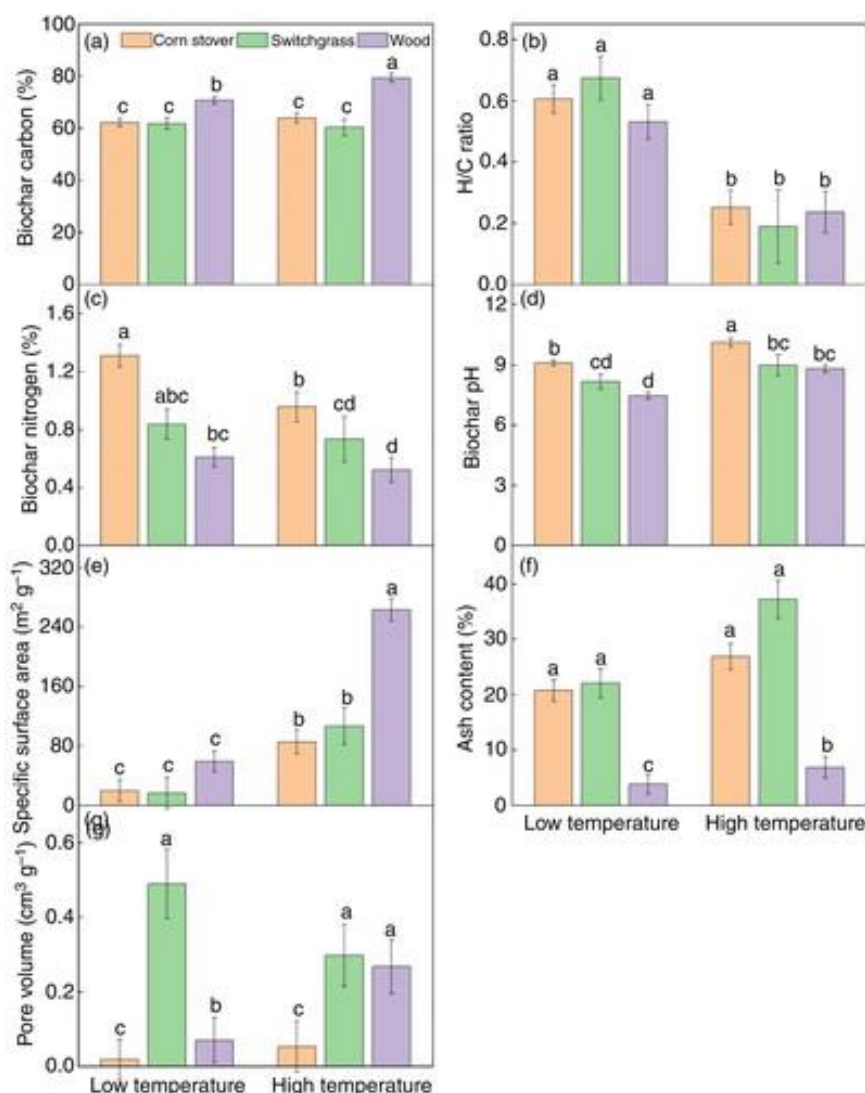


Ilustración 6. Gráficas obtenidas de Li et al., 2023. Aparece representado el efecto de la temperatura de pirólisis en varias materias primas para varios parámetros de análisis

Sin embargo, cabe destacar por encima de los 700 °C la estructura del carbón se encuentra tan alterada que casi no tiene capacidad de adsorción o retención de agua y nutrientes (Lehmann, 2007) y que a partir de 1000 °C deja de poder volatilizarse más materia y se estanca el incremento de parámetros como la superficie específica o porosidad (Yaashikaa et al., 2020; Visser et al., 2024; Souza et al., 2025).

A bajas temperaturas, por el contrario, es mayor la formación de compuestos de bajo peso molecular (Zhang et al., 2020) y la lignina no logra descomponerse por completo por lo que una parte considerable del carbono presente en el biochar no es recalcitrante, lo que confiere de mayor hidrofiliidad al biochar (Enders et al., 2012; Jindo et al., 2014; Tomczyk et al., 2020). Además, tienen mayor contenido en H y O, lo que confiere a los biochar producidos a bajas temperaturas una mayor capacidad de intercambio catiónico que los producidos a altas temperaturas (Tomczyk et al., 2020).

Por debajo de los 400 °C el carbón no presenta las características asociadas al biochar porque la materia prima no ha sufrido las reacciones de descomposición necesarias que proporcionan dichas propiedades (Lehmann, 2007).

Además, aumenta el contenido en compuestos orgánicos solubles de bajo peso molecular, como alcoholes, aldehídos, cetonas o compuestos fenólicos (Joseph et al., 2021).

Los biochar producidos a bajas temperaturas, es decir, inferiores a 500 °C son más ácidos (Cueto García, 2016).

Por último, es importante destacar el efecto de la temperatura sobre el contenido en hidrocarburos aromáticos policíclicos del biochar. Los hidrocarburos aromáticos policíclicos, conocidos con las siglas HAPs, representan un grave problema ambiental y de salud pública debido a su alta toxicidad, gran persistencia y elevada capacidad de bioacumulación en organismos vivos (Abdel-Shafy & Mansour, 2016). Son contaminantes orgánicos persistentes generados principalmente por la combustión incompleta de materia orgánica (Abdel-Shafy & Mansour, 2016; Patel et al., 2020) y su emisión está muy relacionada con la temperatura a la que sucede el proceso de combustión o pirólisis (Alharbi et al., 2023).

En general, la concentración de hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAHs) aumenta con la temperatura hasta alcanzar un máximo a los 400-450 °C (Keiluweit et al., 2012; Lyu et al., 2016), con un valor aproximado de 860 mg/kg (Lyu et al., 2016). A partir de esta temperatura la concentración va disminuyendo lentamente hasta llegar al mínimo de 590 mg/kg con temperaturas de 700 °C (Lyu et al., 2016). Esto se debe cuando las temperaturas bajas, los HAPs no han volatilizado y permanecen en el biochar, y a medida que aumenta la temperatura disminuye la recondensación de los compuestos y aumenta la volatilización, perdiéndose (Greco et al., 2021). Por ello, a bajas temperaturas es más habitual encontrar hidrocarburos aromáticos de 5 y 6 anillos en el biochar y a temperaturas más altas solamente de 2 y 3 anillos (Lyu et al., 2016).

Atendiendo a la investigación de Lyu et al (2016), los biochar producidos a temperaturas superiores a 600 °C contendrían menos HAP y cumplirían con los límites de HAP para aplicaciones agrícolas (Alharbi et al., 2023), aunque los hidrocarburos presentes en los biochar producidos a bajas temperaturas se encuentran inmóviles en la superficie del biochar y son poco biodisponibles (Dutta et al., 2017).

4.8 Efecto de la materia prima

Hay una gran cantidad de fuentes de biomasa diferentes a partir de las cuales se puede producir biochar (Yaashikaa et al., 2020; Al-Rumaihi et al., 2022; Visser et al., 2024) y su composición en celulosa, hemicelulosa y lignina, así como la composición elemental incluirá en las propiedades y calidad del biochar producido (Hassan et al., 2020; Joseph et al., 2021; Visser et al., 2024) y en la composición de las emisiones contaminantes emitidas en el proceso de producción (Rodriguez et al., 2024).

Algunas de las materias primas más empleadas para producir biochar son residuos agrícolas, leñosos, lodos de depuradora, algas, cartón, estiércol de ganado, residuos industriales alimentarios (Ahmed & Hameed, 2020; Czajczyńska et al., 2017). Conocer la composición exacta de la biomasa de partida es muy importante porque la lignina, celulosa y hemicelulosa se descomponen a distintas temperaturas y con diferentes rendimientos (Gollakota et al., 2018; Tomczyk et al., 2020; Visser et al., 2024). Por ejemplo, la hemicelulosa se descompone a temperaturas de 200-300 °C, la celulosa a temperaturas de 300-500 °C y la lignina a temperaturas superiores a 500 °C, por lo que conocer el contenido medio de cada una de ellas en la biomasa ayudará a saber qué propiedades y características tendrá el biochar (Visser et al., 2024).

En primer lugar, uno de los parámetros que más se ve influido por el tipo y composición de la biomasa empleada es el rendimiento de producción de biochar (Hassan et al., 2020; Khater et al., 2024). Por norma general, cuanto mayor es el contenido en azúcares, carbono y lignina, mayor es el rendimiento de obtención de biochar (Al-Rumaihi et al., 2022; Khater et al., 2024; Tomczyk et al., 2020; Tu et al., 2022) y menor el contenido en cenizas y compuestos volátiles (Gallo-Saravia et al., 2018; Yaashikaa et al., 2020). Por otra parte, un mayor contenido en

cenizas se asocia con mayores pH, CIC, conductividad eléctrica pero menor porosidad y área superficial (Benavente, 2022).

Un mayor contenido en humedad de la biomasa, como sucede en la biomasa lignocelulósica (Das et al., 2021) aumenta la energía requerida para alcanzar las temperaturas de pirólisis dificulta el proceso de carbonización. Además, los átomos de oxígeno e hidrógeno que componen el agua se pierden al principio del proceso, lo que puede hacer que la pérdida aparente de biomasa sea mayor de lo que realmente es (Tomczyk et al., 2020; Zhao et al., 2013).

Las materias primas de origen vegetal ya sean de origen herbáceo o leñoso, tienen un mayor porcentaje en carbono estable y menor contenido en nitrógeno que los residuos animales como excrementos (Jindo et al., 2014; Pariyar et al., 2020; Al-Rumaihi et al., 2022) y precisamente por ello, presentan mayores rendimientos de producción de biochar (con mayores contenidos en carbono) y menor producción de ceniza (Al-Rumaihi et al., 2022) que los producidos con excrementos animales (Zhao et al., 2013). También presentan valores de pH más ácidos que se van incrementando con la temperatura y ratios H/C y O/C más estables (Enders et al., 2012; Zhou et al., 2021; Mishra et al., 2023).

Dentro de los residuos de origen vegetal, los residuos herbáceos como paja, restos de tallos o cáscaras de frutas y frutos secos presentan contenidos elevados de hemicelulosa y celulosa y poca lignina, mientras que los residuos de madera presentan contenidos superiores en lignina (Das et al., 2021; Tu et al., 2022). La lignina presenta una elevada resistencia térmica a la descomposición, por lo que es a partir de los residuos de madera de los que se generan mayores rendimientos de producción de biochar (Ahmed & Hameed, 2020; Das et al., 2021; Tu et al., 2022).

Los biochares producidos a partir de madera tienen más área superficial y densidad, pero menor porosidad que los de materias primas de origen animal o herbáceas (Ippolito et al., 2020; Videgain Marco, 2021). Esto se debe a que presentan mayor contenido en lignina y celulosa (Zhao et al., 2013; Li et al., 2023). También tienen un mayor contenido en O e H (Amalina et al., 2022; Balmuk et al., 2023), aunque menor contenido en nitrógeno y cenizas (Li et al., 2023). Presentan mayor contenido en carbono fijado, lo que les confiere mayor poder calorífero y mayor capacidad de secuestro de carbono (El-Naggar et al., 2019; Tu et al., 2022). También presentan menor pH y conductividad eléctrica (Fryda & Visser, 2015; Khater et al., 2024) y requieren de un tiempo de residencia mayor para ser producidos (Joseph et al., 2021).

Los biochares de restos herbáceos presentan valores superiores de porosidad, pH y capacidad de intercambio catiónico (Ippolito et al., 2020; Balmuk et al., 2023) y son de estos de los que mayor rendimiento se suele obtener (Videgain Marco, 2021; Khater et al., 2024). Presentan además mayor conductividad eléctrica por su alto contenido en sales solubles (Tu et al., 2022) y tienen un contenido en cenizas mayor debido a que poseen un mayor componente mineral inorgánico (Tu et al., 2022).

Además, presentan relaciones O/C y H/C superiores, lo que los hace menos aromáticos y más polares que los de biomasa de madera (Kambo & Dutta, 2015; Tomczyk et al., 2020).

Estas diferencias hacen que el biochar de plantas leñosas sea recomendable para la remediación de metales pesados y tratamiento de aguas mientras que el de plantas herbáceas es más recomendable para enmiendas de suelos ácidos (Tu et al., 2022).

En la siguiente tabla (Tabla 3) se muestra un resumen promedio de la composición media en lignina, celulosa y hemicelulosa de las diferentes materias primas de origen vegetal.

Tabla 3. Composición media de diferentes tipos de materias primas vegetales en lo que respecta a hemicelulosa, celulosa y lignina. Obtenida a partir de Li et al, 2013 y Visser et al, 2024, Pecha y García, 2020

	% LIGNINA	% CELULOSA	% HEMICELULOSA
RASTROJO DE MAÍZ	12-17 %	40-48 %	23-29 %
PASTO	12-14 %	38-40 %	30-32 %
MADERA	26-28 %	40-46 %	23-25 %

En la Tabla 4 se puede observar los valores medios de características del biochar obtenido a partir de diferentes materias primas .

Tabla 4. Composición media de los biochares obtenido a partir de materia prima de origen vegetal y animal. Obtenido a partir de los resultados de Zhao et al, 2013; Li et al, 2013; Visser et al, 2024; Cha et al, 2016 y Kumar Mishra et al, 2023

	CONTENIDO EN CARBONO	CARBONO FIJADO	RENDIMIENTO	CENIZAS	PH
ESTIÉRCOL	40-45 %	30-40 %	45-55 %	35-50 %	9-10
PAJA	50-60 %	50-70 %	25-35 %	15-20 %	8.5-10
SERRÍN DE MADERA	65-80 %	70-80 %	20-30 %	10 %	8-9.5

Componentes de la biomasa como hidrógeno, nitrógeno o azufre se volatilizan en la pirólisis, pero otros elementos como fósforo, calcio, potasio, magnesio o silicio permanecen y sus concentraciones aumentan en el biochar resultante (Yaashikaa et al., 2020).

Por otro lado, las materias primas de origen animal, como estiércol, tienen un mayor contenido en nutrientes que los de materias primas vegetales, sobretodo que la madera (Ippolito et al., 2020) y presentan mayor capacidad de intercambio catiónico (Pariyar et al., 2020) y menor relación C/N que los procedentes de materias vegetales (Zhang et al., 2021). La biomasa procedente de excrementos animales tiene menor área superficial y menor contenido en fósforo (Tomczyk et al., 2020; Joseph et al., 2021).

Varios estudios han demostrado que la mezcla de residuos de diferente tipo puede mejorar el rendimiento y propiedades del biochar generado (Ahmed & Hameed, 2020), especialmente aquellas relacionadas con la porosidad y capacidad de adsorción de nutrientes (Ahmed & Hameed, 2020). Se observó que la mezcla que generó mayor rendimiento de biochar fue la mezcla de materias leñosas con residuos agrícolas (Ahmed & Hameed, 2020).

En la Ilustración 7 aparecen cómo se ven afectados parámetros como el contenido en cenizas, área superficial específica, pH y contenido en materia volátil en función de la temperatura de pirólisis.

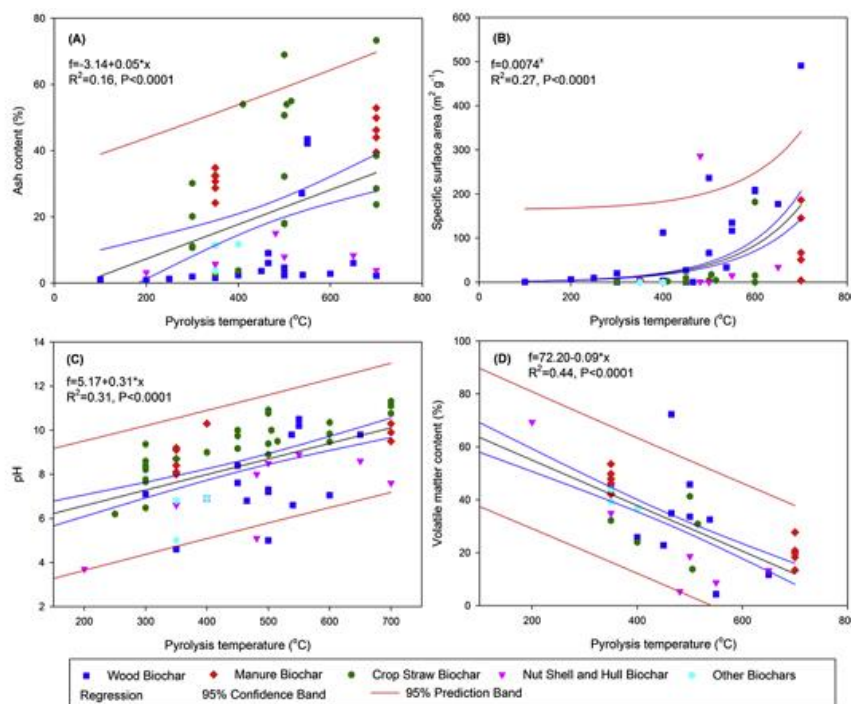


Ilustración 7. Representación gráfica de los valores de pH, contenido en cenizas, área superficial y contenido en materia volátil de materias primas de distinta tipo en función de la temperatura. Obtenido de Zhu et al, 2017.

4.9 Edad del biochar

La capacidad de intercambio catiónico de los biocharres maduros es mayor que la de los biocharres recién preparados porque aumenta el número de cargas negativas generadas en la superficie del biochar con el paso del tiempo (Lehmann, 2007).

4.10 Mejora de las propiedades del biochar

Para mejorar las propiedades del biochar obtenido se puede recurrir a algunas estrategias de activación.

La activación física por vapor de agua o microondas aumenta la porosidad y el área superficial del biochar e incrementa su capacidad de remediación ambiental de contaminantes (Sajjadi et al., 2019).

La activación química por adición de agentes ácidos como HNO_3 , H_3PO_4 , H_2SO_4 y bases como KOH , NaOH introducen y modifican los grupos funcionales del biochar (carboxilos, fenoles, aminos) y pueden incrementar la reactividad del biochar (Sajjadi et al., 2018). Por ejemplo, la adición de KOH mejora el potencial redox del biochar y aumenta la capacidad de adsorción de metales pesados (Lü et al., 2022; Pathy et al., 2023).

La inoculación de biochar con consorcios microbianos acelera el proceso de descomposición de la materia orgánica del biochar (X. Huang et al., 2022) y la combinación con compost mejora la actividad enzimática de los suelos (Trupiano et al., 2017).

Por otra parte, la combinación de biochar con compost mejora la calidad del compost y la fertilidad del suelo. (Méndez, 2017; Hernández, 2023). El biochar acelera la descomposición de la materia orgánica del compost, promoviendo una mayor actividad enzimática y una mayor germinación y desarrollo vegetal (Waqas et al., 2018; Du et al., 2019; Hernández, 2023). Además, el uso conjunto de ambos incrementa la retención de agua, la estabilidad de los agregados respecto a la aplicación individual de biochar (Du et al., 2019; Hernández, 2023).

5 CONCLUSIÓN

Tras la investigación realizada, se puede afirmar que las materias primas basadas en madera, y, por tanto, ricas en lignina, producen biocharres que tienen un mayor contenido en carbono y materia orgánica, pero menor densidad, conductividad eléctrica, pH y contenido en nutrientes que los biocharres procedentes de materias primas herbáceas o basados en estiércol.

Por eso, los biocharres procedentes de madera son empleados como método de secuestro de carbono a largo plazo y para la remediación de contaminantes, mientras que los producidos a partir de restos agrícolas o estiércol se emplean como aporte de nutrientes al suelo o enmienda.

Por otra parte, los biocharres producidos a altas temperaturas tienen una mayor porosidad y área superficial, mayor grado de estabilidad (menores relaciones O/C y H/C), mayor pH y contenido en carbono que los producidos a bajas temperaturas, mientras que los biocharres producidos a bajas temperaturas tienen un mayor contenido en nutrientes e HAPs. Es por ello que los biocharres producidos a altas temperaturas tienen un mayor efecto sobre las propiedades físicas del suelo como la densidad aparente mientras que los producidos a bajas temperaturas tienen mayor efecto sobre la vegetación y los microorganismos del suelo.

Tiempos de residencia cortos pueden reducir la aromaticidad del biochar y evitar la volatilización de una gran parte de los nutrientes, por lo que sería útil si el empleo destinado del biochar fuera su uso como enmienda agrícola.

Respecto al pretratamiento de la biomasa, la trituración de los residuos antes de la pirólisis incrementa la capacidad de adsorción de nutrientes y contaminantes en los biocharres producidos y la adición de ácidos o álcalis a la materia prima antes de pirolizarla incrementa el número de grupos funcionales del biochar.

Respecto a las condiciones del proceso de pirólisis, presiones bajas favorecen la producción de biochar y reducen el rendimiento de producción de syngas y de bio-aceite y atmósferas basadas en CO₂ producen biocharres con más área superficial y menor contenido en materia volátil que atmósferas inertes como N₂.

Por lo tanto, si el objetivo es la obtención de un biochar destinado a la remediación de contaminantes o al tratamiento de aguas, es recomendable que el biochar presente elevada porosidad, área superficial y una alta capacidad de intercambio catiónico. Sin embargo, la capacidad de adsorción del biochar depende en gran medida del tipo de agente contaminante. En el caso de los contaminantes de origen orgánico, es recomendable emplear temperaturas de proceso altas para conseguir una gran porosidad y área de retención de agentes contaminantes, mientras que para la adsorción de contaminantes inorgánicos como metales pesados o contaminantes polares, es mejor emplear temperaturas de pirólisis más bajas para que estén presentes en el biochar grupos funcionales oxigenados que atrapen esos contaminantes. Respecto a la biomasa de partida, se recomienda emplear biomasa lignocelulósica basada en madera, pues es la que produce biocharres de más porosidad. Además, en el caso de que se requiera una mayor presencia de grupos funcionales oxigenados, se puede realizar adiciones de sustancias ácidas.

Si el objetivo es la mitigación del cambio climático o el secuestro de carbono a largo plazo, se requieren biocharres con alta estabilidad y recalcitrancia para que el carbono permanezca en el biochar y no se libere a la atmósfera. Por ello, se requiere emplear procesos de pirólisis a altas temperaturas con biomasa agrícola o forestal para que el contenido en nutrientes sea mínimo y las relaciones O/C y H/C también.

Para el uso de biochar como enmienda agrícola, se requieren materias primas que tengan elevados contenidos en nutrientes, como por ejemplo biomasa agrícola o mezclas de biomasa agrícola con residuos de origen animal como estiércol, que tienen elevados contenidos en nitrógeno. Respecto al proceso de producción, es preferible procesos de pirólisis lenta a temperaturas moderadas o bajas para que los nutrientes no se volatilicen. Si el objetivo es mejorar el pH en suelos ácidos, se recomienda emplear biochar producido a altas temperaturas de pirólisis porque han perdido una gran parte de los componentes volátiles y de los grupos ácidos y presentan valores de pH elevados. También se puede co-aplicar con compost para mejorar las propiedades del suelo.

Por último, si el objetivo es mejorar las propiedades físicas del suelo, como porosidad o densidad, es preferible el uso de biochar de materia prima agrícola producidos a temperaturas de pirólisis altas.

6 REFERENCIAS

- Abdel-Shafy, H. I., & Mansour, M. S. M. (2016). A review on polycyclic aromatic hydrocarbons: Source, environmental impact, effect on human health and remediation. *Egyptian Journal of Petroleum*, 25(1), 107-123. <https://doi.org/10.1016/J.EJPE.2015.03.011>
- Abenza, D. P. (2012). Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta [UAB]. <https://ddd.uab.cat/record/102163>
- Aboeela, D., Saleh, H., Attia, A. M., Elhenawy, Y., Majozi, T., & Bassyouni, M. (2023). Recent Advances in Biomass Pyrolysis Processes for Bioenergy Production: Optimization of Operating Conditions. *Sustainability*, 15(14)(11238), 11238. <https://doi.org/10.3390/SU151411238>
- Adhikari, S., Mahmud, M. A. P., Nguyen, M. D., & Timms, W. (2023). Evaluating fundamental biochar properties in relation to water holding capacity. *Chemosphere*, 328(138620). <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2023.138620>
- Ahmad, M., Lee, S. S., Dou, X., Mohan, D., Sung, J. K., Yang, J. E., & Ok, Y. S. (2012). Effects of pyrolysis temperature on soybean stover- and peanut shell-derived biochar properties and TCE adsorption in water. *Bioresource Technology*, 118, 536-544. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.05.042>
- Ahmed, M., & Hameed, B. (2020). Insight into the co-pyrolysis of different blended feedstocks to biochar for the adsorption of organic and inorganic pollutants: A review. *Journal of Cleaner Production*, 265(121762). <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.121762>
- Ahmed, S. F., Mehejabin, F., Chowdhury, A. A., Almomani, F., Khan, N. A., Badruddin, I. A., & Kamangar, S. (2024). Biochar produced from waste-based feedstocks: Mechanisms, affecting factors, economy, utilization, challenges, and prospects. *GCB Bioenergy*, 16(e13175). <https://doi.org/10.1111/GCBB.13175;PAGE:STRING:ARTICLE/CHAPTER>
- Aktar, S., Hossain, M. A., Rathnayake, N., Patel, S., Gasco, G., Mendez, A., de Figueiredo, C., Surapaneni, A., Shah, K., & Paz-Ferreiro, J. (2022). Effects of temperature and carrier gas on physico-chemical properties of biochar derived from biosolids. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 164(105542). <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2022.105542>
- Albuquerque, J. A., Calero Rodríguez, J. M., Barrón López de la Torre, V., Torrente Castellet, J., Del Campillo García, M. C., Gallardo Correa, A., & Villar Montero, R. (2013). El biocarbón como una herramienta para limitar las emisiones de CO₂ y mejorar las propiedades del suelo en el ámbito Mediterráneo. En *Sociedad Española de Ciencias Forestales* (Ed.), 6o CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL (pp. 1-10). 6CFE01-549. https://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/14659/14502
- Alharbi, H. A., Alotaibi, K. D., EL-Saeid, M. H., & Giesy, J. P. (2023). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and Metals in Diverse Biochar Products: Effect of Feedstock Type and Pyrolysis Temperature. *Toxics*, 11(96). <https://doi.org/10.3390/TOXICS11020096>
- Al-Rumaihi, A., Shahbaz, M., McKay, G., Mackey, H., & Al-Ansari, T. (2022). A review of pyrolysis technologies and feedstock: A blending approach for plastic and biomass towards optimum biochar yield. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 167(112715), 112715. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112715>
- Amalina, F., Syukor Abd Razak, A., Krishnan, S., Sulaiman, H., Zularisam, A. W., & Nasrullah, M. (2022). Advanced techniques in the production of biochar from lignocellulosic biomass and environmental applications. *Cleaner Materials*, 6(100137). <https://doi.org/10.1016/J.CLEMA.2022.100137>
- Amenaghawon, A. N., Anyalewechi, C. L., Okieimen, C. O., & Kusuma, H. S. (2021). Biomass pyrolysis technologies for value-added products: a state-of-the-art review. *Environment, Development and Sustainability* 2021 23:10, 23(10), 14324-14378. <https://doi.org/10.1007/S10668-021-01276-5>
- Armah, E. K., Chetty, M., Adedeji, J. A., Estrice, D. E., Mutsvene, B., Singh, N., Tshemese, Z., Armah, E. K., Chetty, M., Adedeji, J. A., Estrice, D. E., Mutsvene, B., Singh, N., & Tshemese, Z. (2022). Biochar: Production, Application and the Future. En *Itech Open* (Ed.), *Biochar - Productive Technologies, Properties and Applications*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.105070>

- Awogbemi, O., & Kallon, D. V. Von. (2023). Progress in agricultural waste derived biochar as adsorbents for wastewater treatment. *Applied Surface Science Advances*, 18, 100518. <https://doi.org/10.1016/J.APSADV.2023.100518>
- Azzi, E. S., Karlun, E., & Sundberg, C. (2021). Assessing the diverse environmental effects of biochar systems: An evaluation framework. *Journal of Environmental Management*, 286, 112154. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112154>
- Babu, B. V., & Chaurasia, A. S. (2003). Modeling, simulation and estimation of optimum parameters in pyrolysis of biomass. *Energy Conversion and Management*, 44(13), 2135-2158. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(02\)00237-6](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(02)00237-6)
- Balmuk, G., Videgain, M., Manyà, J. J., Duman, G., & Yanik, J. (2023). Effects of pyrolysis temperature and pressure on agronomic properties of biochar. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 169(105858). <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2023.105858>
- Barszcz, W., Łożyńska, M., & Molenda, J. (2024). Impact of pyrolysis process conditions on the structure of biochar obtained from apple waste. *Scientific Reports*, 14(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-61394-8>;SUBJMETA=158,172,704;KWRD=ECOLOGY,ENVIRONMENTAL+SCIENCES
- Basile, L., Tugnoli, A., Stramigioli, C., & Cozzani, V. (2014). Influence of pressure on the heat of biomass pyrolysis. *Fuel*, 137, 277-284. <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2014.07.071>
- Benavente, I. F. (2022). Efectos del uso de biochar sobre el cultivo y las propiedades del suelo en ecosistemas agrícolas semiáridos. Universidad Politécnica de Madrid.
- Blair, J., & Mataraarachchi, S. (2021). A Review of Landfills, Waste and the Nearly Forgotten Nexus with Climate Change. *Environments*, 8(73). <https://doi.org/10.3390/ENVIRONMENTS8080073>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, 38, 68-94. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2011.01.048>
- Capareda, S. C. (2022). Physicochemical characterization of biochar derived from biomass. *Sustainable Biochar for Water and Wastewater Treatment*, 1, 93-134. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822225-6.00013-0>
- Cen, K., Zhang, J., Ma, Z., Chen, D., Zhou, J., & Ma, H. (2019). Investigation of the relevance between biomass pyrolysis polygeneration and washing pretreatment under different severities: Water, dilute acid solution and aqueous phase bio-oil. *Bioresource Technology*, 278, 26-33. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.01.048>
- Cha, J. S., Park, S. H., Jung, S. C., Ryu, C., Jeon, J. K., Shin, M. C., & Park, Y. K. (2016). Production and utilization of biochar: A review. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 40, 1-15. <https://doi.org/10.1016/J.JIEC.2016.06.002>
- Chen, W. H., Nižetić, S., Sirohi, R., Huang, Z., Luque, R., M.Papadopoulos, A., Sakthivel, R., Phuong Nguyen, X., & Tuan Hoang, A. (2022). Liquid hot water as sustainable biomass pretreatment technique for bioenergy production: A review. *Bioresource Technology*, 344(126207). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.126207>
- Chen, Yin, L., Wang, H., & He, P. (2015). Reprint of: Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review. *Waste Management*, 37, 116-136. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2015.01.022>
- Cueto García, M. J. (2016). Potencial de producción de biochar en España a partir de residuos sólidos urbanos y de residuos ganaderos: Estudio de la fijación de carbono [Tesis doctoral]. Universidad Politécnica de Madrid.
- Curiel, M. F. (2016). RESIDUOS DE VID TRANSFORMADOS EN BIOCHAR [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad de Valladolid.
- Czajczyńska, D., Anguilano, L., Ghazal, H., Krzyżyńska, R., Reynolds, A. J., Spencer, N., & Jouhara, H. (2017). Potential of pyrolysis processes in the waste management sector. *Thermal Science and Engineering Progress*, 3, 171-197. <https://doi.org/10.1016/J.TSEP.2017.06.003>
- da Silva, M. A., Abdalla Filho, A. L., Carnier, R., de Oliveira Santos Marcatto, J., Saldanha, M., Coscione, A. R., de Carvalho, T. A., Merlotto, G. R., & de Andrade, C. A. (2025). Low-Temperature Slow Pyrolysis: Exploring Biomass-Specific Biochar Characteristics and Potential for Soil Applications. *Technologies*, 13(3), 100. <https://doi.org/10.3390/TECHNOLOGIES13030100>

Das, S. K., Ghosh, G. K., Avasthe, R. K., & Sinha, K. (2021). Compositional heterogeneity of different biochar: Effect of pyrolysis temperature and feedstocks. *Journal of Environmental Management*, 278(111501). <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2020.111501>

Dawar, K., Saif-ur-Rahman, Fahad, S., Alam, S. S., Khan, S. A., Dawar, A., Younis, U., Danish, S., Datta, R., & Dick, R. P. (2021). Influence of variable biochar concentration on yield-scaled nitrous oxide emissions, Wheat yield and nitrogen use efficiency. *Scientific Reports*, 11(16774). <https://doi.org/10.1038/S41598-021-96309-4>;SUBJMETA=172,449,631,704;KWRD=ENVIRONMENTAL+SCIENCES,PLANT+SCIENCES

de Jesus, S. D., Glaser, B., & Cerri, C. E. P. (2019). Effect of Biochar Particle Size on Physical, Hydrological and Chemical Properties of Loamy and Sandy Tropical Soils. *Agronomy*, 9(4), 165. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY9040165>

Del Amo, E. M. (2018). Producción de biochar a partir de material bioestabilizado [Trabajo de Fin de Grado]. Universidad de Valladolid.

Du, J., Zhang, Y., Qu, M., Yin, Y., Fan, K., Hu, B., Zhang, H., Wei, M., & Ma, C. (2019). Effects of biochar on the microbial activity and community structure during sewage sludge composting. *Bioresource Technology*, 272, 171-179. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.10.020>

Duque-Acevedo, M., Belmonte-Ureña, L. J., Plaza-Úbeda, J. A., & Camacho-Ferre, F. (2020). The Management of Agricultural Waste Biomass in the Framework of Circular Economy and Bioeconomy: An Opportunity for Greenhouse Agriculture in Southeast Spain. *Agronomy*, 10(4), 489. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY10040489>

Dutta, T., Kwon, E., Bhattacharya, S. S., Jeon, B. H., Deep, A., Uchimiya, M., & Kim, K. H. (2017). Polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile organic compounds in biochar and biochar-amended soil: a review. *GCB Bioenergy*, 9(6), 990-1004. <https://doi.org/10.1111/GCBB.12363>

Elangovan, R., Rangasami, S. S., Murugaragavan, R., & Sekaran, N. C. (2022). Characteristics of biochar: A review. *The Pharma Innovation Journal*, 11(12), 243-246. <https://www.thepharmajournal.com/archives/?year=2022&vol=11&issue=12&ArticleId=17164>

El-Naggar, A., El-Naggar, A. H., Shaheen, S. M., Sarkar, B., Chang, S. X., Tsang, D. C. W., Rinklebe, J., & Ok, Y. S. (2019). Biochar composition-dependent impacts on soil nutrient release, carbon mineralization, and potential environmental risk: A review. *Journal of Environmental Management*, 241, 458-467. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2019.02.044>

Enders, A., Hanley, K., Whitman, T., Joseph, S., & Lehmann, J. (2012). Characterization of biochars to evaluate recalcitrance and agronomic performance. *Bioresource Technology*, 114, 644-653. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.03.022>

Ercan, B., Alper, K., Ucar, S., & Karagoz, S. (2023). Comparative studies of hydrochars and biochars produced from lignocellulosic biomass via hydrothermal carbonization, torrefaction and pyrolysis. *Journal of the Energy Institute*, 109(101298). <https://doi.org/10.1016/J.JOEL.2023.101298>

Fidel, R. B., Laird, D. A., Thompson, M. L., & Lawrinenko, M. (2017). Characterization and quantification of biochar alkalinity. *Chemosphere*, 167, 367-373. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2016.09.151>

Fryda, L., & Visser, R. (2015). Biochar for Soil Improvement: Evaluation of Biochar from Gasification and Slow Pyrolysis. *Agriculture* 2015, Vol. 5, Pages 1076-1115, 5(4), 1076-1115. <https://doi.org/10.3390/AGRICULTURE5041076>

Gallo-Saravia, M., Lugo-Sierra, L., & Barrera Zapata, R. (2018). Evaluación de biochar como alternativa de sustrato en cultivos de tomate. *Scientia et Technica*, 23(2), 299-303. <https://doi.org/10.22517/23447214.17691>

Gilces, M. A. (2014). Efectos de la aplicación de biochar y cenizas en las propiedades del suelo [Trabajo de Fin de Máster]. Universidad de Valladolid.

Glaser, B., Lehmann, J., & Zech, W. (2002). Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - A review. *Biology and Fertility of Soils*, 35(4), 219-230. <https://doi.org/10.1007/S00374-002-0466-4>

Gollakota, A. R. K., Kishore, N., & Gu, S. (2018). A review on hydrothermal liquefaction of biomass. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 81, 1378-1392. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.05.178>

- Greco, G., Videgain, M., Di Stasi, C., Pires, E., & Manyà, J. J. (2021). Importance of pyrolysis temperature and pressure in the concentration of polycyclic aromatic hydrocarbons in wood waste-derived biochars. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159(105337). <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2021.105337>
- Greinert, A., Mrówczyńska, M., & Szefer, W. (2019). The Use of Waste Biomass from the Wood Industry and Municipal Sources for Energy Production. *Sustainability*, 11(3083). <https://doi.org/10.3390/SU11113083>
- Guo, J., Zhang, Y., Fang, J., Ma, Z., Li, C., Yan, M., Qiao, N., Liu, Y., & Bian, M. (2024). Reduction and Reuse of Forestry and Agricultural Bio-Waste through Innovative Green Utilization Approaches: A Review. *Forests*, 15(8), 1372. <https://doi.org/10.3390/F15081372>
- Hassan, M., Liu, Y., Naidu, R., Parikh, S. J., Du, J., Qi, F., & Willett, I. R. (2020). Influences of feedstock sources and pyrolysis temperature on the properties of biochar and functionality as adsorbents: A meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 744(140714). <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.140714>
- Hernández, A. G. (2023). Efecto de la aplicación de biochar durante el proceso de compostaje en un sistema de compostaje enpila. Universidad de La Laguna.
- Huang, H., Reddy, N. G., Huang, X., Chen, P., Wang, P., Zhang, Y., Huang, Y., Lin, P., & Garg, A. (2021). Effects of pyrolysis temperature, feedstock type and compaction on water retention of biochar amended soil. *Scientific Reports*, 11(1), 1-19. <https://doi.org/10.1038/S41598-021-86701-5>;SUBJMETA=166,2151,639,704,986;KWRD=CIVIL+ENGINEERING,SOLID+EARTH+SCIENCES
- Huang, X., He, Y., Zhang, Y., Lu, X., & Xie, L. (2022). Independent and combined effects of biochar and microbial agents on physicochemical parameters and microbial community succession during food waste composting. *Bioresource Technology*, 366(128023). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128023>
- Hui, D. (2021). Effects of Biochar Application on Soil Properties, Plant Biomass Production, and Soil Greenhouse Gas Emissions: A Mini-Review. *Agricultural Sciences*, 12(3), 213-236. <https://doi.org/10.4236/AS.2021.123014>
- Ibitoye, S. E., Loha, C., Mahamood, R. M., Jen, T. C., Alam, M., Sarkar, I., Das, P., & Akinlabi, E. T. (2024). An overview of biochar production techniques and application in iron and steel industries. *Bioresources and Bioprocessing*, 11(1), 65. <https://doi.org/10.1186/S40643-024-00779-Z>
- Igliński, B., Kujawski, W., & Kielkowska, U. (2023). Pyrolysis of Waste Biomass: Technical and Process Achievements, and Future Development—A Review. *Energies*, 16(4), 1829. <https://doi.org/10.3390/EN16041829>
- Ippolito, J. A., Cui, L., Kammann, C., Wrage-Mönnig, N., Estavillo, J. M., Fuertes-Mendizabal, T., Cayuela, M. L., Sigua, G., Novak, J., Spokas, K., & Borchard, N. (2020). Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. *Biochar*, 2(4), 421-438. <https://doi.org/10.1007/S42773-020-00067-X/TABLES/6>
- Itoh, T., Fujiwara, N., Iwabuchi, K., Narita, T., Mendbayar, D., Kamide, M., Niwa, S., & Matsumi, Y. (2020). Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on particulate matter emission characteristics during biochar combustion. *Fuel Processing Technology*, 204(106408), 1-8. <https://doi.org/10.1016/J.FUPROC.2020.106408>
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175-187. <https://doi.org/10.1016/J.AGEE.2011.08.015>
- Jindo, K., Mizumoto, H., Sawada, Y., Sanchez-Monedero, M. A., & Sonoki, T. (2014). Physical and chemical characterization of biochars derived from different agricultural residues. *Biogeosciences*, 11(23), 6613-6621. <https://doi.org/10.5194/BG-11-6613-2014>,
- Joseph, S., Cowie, A. L., Van Zwieten, L., Bolan, N., Budai, A., Buss, W., Cayuela, M. L., Graber, E. R., Ippolito, J. A., Kuzyakov, Y., Luo, Y., Ok, Y. S., Palansooriya, K. N., Shepherd, J., Stephens, S., Weng, Z., & Lehmann, J. (2021). How biochar works, and when it doesn't: A review of mechanisms controlling soil and plant responses to biochar. *GCB Bioenergy*, 13(11), 1731-1764. <https://doi.org/10.1111/GCBB.12885>
- Kalak, T. (2023). Potential Use of Industrial Biomass Waste as a Sustainable Energy Source in the Future. *Energies* 2023, Vol. 16, Page 1783, 16(4), 1783. <https://doi.org/10.3390/EN16041783>
- Kalus, K., Koziel, J. A., & Opaliński, S. (2019). A Review of Biochar Properties and Their Utilization in Crop Agriculture and Livestock Production. *Applied Sciences* 2019, Vol. 9, Page 3494, 9(17), 3494. <https://doi.org/10.3390/APP9173494>

- Kambo, H. S., & Dutta, A. (2015). A comparative review of biochar and hydrochar in terms of production, physico-chemical properties and applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 45, 359-378. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.01.050>
- Karić, N., Maia, A. S., Teodorović, A., Atanasova, N., Langergraber, G., Crini, G., Ribeiro, A. R. L., & Đolić, M. (2022). Bio-waste valorisation: Agricultural wastes as biosorbents for removal of (in)organic pollutants in wastewater treatment. *Chemical Engineering Journal Advances*, 9(100239). <https://doi.org/10.1016/J.CEJA.2021.100239>
- Keiluweit, M., Kleber, M., Sparrow, M. A., Simoneit, B. R. T., & Prah, F. G. (2012). Solvent-extractable polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar: influence of pyrolysis temperature and feedstock. *Environmental science & technology*, 46(17), 9341. <https://doi.org/10.1021/ES302125K>
- Khairy, M., Amer, M., Ibrahim, M., Ookawara, S., Sekiguchi, H., & Elwardany, A. (2024). The influence of torrefaction on the biochar characteristics produced from sesame stalks and bean husk. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 14(15), 17127-17148. <https://doi.org/10.1007/S13399-023-03822-9/TABLES/1>
- Khan, A., Khan, S., Lei, M., Alam, M., Khan, M. A., & Khan, A. (2020). Biochar characteristics, applications and importance in health risk reduction through metal immobilization. *Environmental Technology & Innovation*, 20(101121). <https://doi.org/10.1016/J.ETI.2020.101121>
- Khater, E. S., Bahnasawy, A., Hamouda, R., Sabahy, A., Abbas, W., & Morsy, O. M. (2024). Biochar production under different pyrolysis temperatures with different types of agricultural wastes. *Scientific Reports*, 14:2625(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/S41598-024-52336-5>
- Kim, J. S., Lee, Y. Y., & Kim, T. H. (2016). A review on alkaline pretreatment technology for bioconversion of lignocellulosic biomass. *Bioresource technology*, 199, 42-48. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2015.08.085>
- Kim, K., Kim, J.-Y., Cho, T.-S., & Choi, J. W. (2012). Influence of pyrolysis temperature on physicochemical properties of biochar obtained from the fast pyrolysis of pitch pine (*Pinus rigida*). *Bioresource Technology*, 118, 158-162. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2012.04.094>
- Kotuš, T., Horák, J., & Drgoňová, K. (2022). Effect of biochar amendment and nitrogen fertilization on soil CO₂ emission during spring period. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 25(2), 121-128. <https://doi.org/10.2478/AHR-2022-0016>
- Köves, M., Madár, V., Ringer, M., & Kocsis, T. (2024). Overview of Traditional and Contemporary Industrial Production Technologies for Biochar along with Quality Standardization Methods. *Land*, 13(9), 1388. <https://doi.org/10.3390/LAND13091388>
- Lehmann, J. (2007). Bio-energy in the black. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5(7), 381-387. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[381:BITB\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[381:BITB]2.0.CO;2)
- Leng, L., & Huang, H. (2018). An overview of the effect of pyrolysis process parameters on biochar stability. *Bioresource Technology*, 270, 627-642. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.09.030>
- Leng, L., Huang, H., Li, H., Li, J., & Zhou, W. (2019). Biochar stability assessment methods: A review. *Science of The Total Environment*, 647, 210-222. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.07.402>
- Li, Gupta, R., Zhang, Q., & You, S. (2023). Review of biochar production via crop residue pyrolysis: Development and perspectives. *Bioresource Technology*, 369(128423). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2022.128423>
- Li, H., Yan, T., Fu, T., Hao, Y., Li, J., Tan, Y., Li, Z., Peng, Y., Chen, X., Chang, J., Song, Z., Yu, M., Li, X., Li, Y., Song, S., & Zhang, B. (2023). Biochar combined with magnesium fertilizer improves cabbage (*Brassica oleracea* L.) yield by modulating physicochemical characteristics and the bacterial community in acidic soil. *Soil Use and Management*, 39(4), 1422-1436. <https://doi.org/10.1111/SUM.12938>
- Li, L., Long, A., Fossum, B., & Kaiser, M. (2023). Effects of pyrolysis temperature and feedstock type on biochar characteristics pertinent to soil carbon and soil health: A meta-analysis. *Soil Use and Management*, 39(1), 43-52. <https://doi.org/10.1111/SUM.12848>
- Liao, W., & Thomas, S. C. (2019). Biochar Particle Size and Post-Pyrolysis Mechanical Processing Affect Soil pH, Water Retention Capacity, and Plant Performance. *Soil Systems*, 3(1). <https://doi.org/10.3390/SOILSYSTEMS3010014>

- Lima, D., Santos Patricio, E., de Oliveira Barros Junior, U., Reis de Assis, M., Nogueira Xavier, C., Bufalino, L., Fernando Trugilho, P., Ricardo Gherardi Hein, P., & de Paula Protásio, T. (2020). Logging wastes from sustainable forest management as alternative fuels for thermochemical conversion systems in Brazilian Amazon. *Biomass and Bioenergy*, 140(105660). <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2020.105660>
- Lin, S. L., Zhang, H., Chen, W. H., Song, M., & Kwon, E. E. (2023). Low-temperature biochar production from torrefaction for wastewater treatment: A review. *Bioresource Technology*, 387(129588). <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2023.129588>
- Liu, Z., & Balasubramanian, R. (2014). Upgrading of waste biomass by hydrothermal carbonization (HTC) and low temperature pyrolysis (LTP): A comparative evaluation. *Applied Energy*, 114, 857-864. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2013.06.027>
- Loow, Y. L., Wu, T. Y., Jahim, J. M., Mohammad, A. W., & Teoh, W. H. (2016). Typical conversion of lignocellulosic biomass into reducing sugars using dilute acid hydrolysis and alkaline pretreatment. *Cellulose*, 23(3), 1491-1520. <https://doi.org/10.1007/S10570-016-0936-8>
- Lorenci, A. W., Dalmas Neto, C. J., Porto de Souza Vandenberghe, L., de Carvalho Neto, D. P., Novak Sydney, A. C., Letti, L. A. J., Karp, S. G., Zevallos Torres, L. A., & Soccol, C. R. (2020). Lignocellulosic biomass: Acid and alkaline pretreatments and their effects on biomass recalcitrance – Conventional processing and recent advances. *Bioresource Technology*, 304(122848). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.122848>
- Lü, F., Lu, X., Li, S., Zhang, H., Shao, L., & He, P. (2022). Dozens-fold improvement of biochar redox properties by KOH activation. *Chemical Engineering Journal*, 429(132203). <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2021.132203>
- Lu, X., Han, T., Jiang, J., Sun, K., Sun, Y., & Yang, W. (2020). Comprehensive insights into the influences of acid-base properties of chemical pretreatment reagents on biomass pyrolysis behavior and wood vinegar properties. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 151(104907). <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2020.104907>
- Lyu, H., He, Y., Tang, J., Hecker, M., Liu, Q., Jones, P. D., Codling, G., & Giesy, J. P. (2016). Effect of pyrolysis temperature on potential toxicity of biochar if applied to the environment. *Environmental Pollution*, 218, 1-7. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2016.08.014>
- Maliutina, K., Tahmasebi, A., & Yu, J. (2018). Pressurized entrained-flow pyrolysis of microalgae: Enhanced production of hydrogen and nitrogen-containing compounds. *Bioresource Technology*, 256, 160-169. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2018.02.016>
- Mankar, A. R., Pandey, A., Modak, A., & Pant, K. K. (2021). Pretreatment of lignocellulosic biomass: A review on recent advances. *Bioresource Technology*, 334(125235). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125235>
- Marx, S., Chiyanzu, I., & Piyo, N. (2014). Influence of reaction atmosphere and solvent on biochar yield and characteristics. *Bioresource Technology*, 164, 177-183. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2014.04.067>
- Melo Lozano, H. A., & Afanasjeva, N. (2022). Efecto de la aplicación de biochar en la actividad microbiana en suelos: Revisión. *Bioteconología en el Sector Agropecuario y Agroindustrial*, 21(2), 193-209. <https://doi.org/10.18684/rbsaa.v21.n2.2023.2197>
- Méndez, F. A. (2017). Cambio en las propiedades químicas de un biochar de sarmientos de vid por adición a pilas de compostaje. Universidad de Valladolid.
- Meng, F., & Wang, D. (2020). Effects of vacuum freeze drying pretreatment on biomass and biochar properties. *Renewable Energy*, 155, 1-9. <https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2020.03.113>
- Mishra, K., Jaya, P., Narula, A., Minnat Chistie, S., & Ullhas Naik, S. (2023). Production and beneficial impact of biochar for environmental application: A review on types of feedstocks, chemical compositions, operating parameters, techno-economic study, and life cycle assessment. *Fuel*, 343(127968). <https://doi.org/10.1016/J.FUEL.2023.127968>
- Modak, S., Katiyar, P., & Yadav, S. (2024). Distribution and characterization of products obtained from pyrolysis of cooked food waste- Impact of heating rate. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 182(106660). <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2024.106660>
- Mohanty, P., Nanda, S., Pant, K. K., Naik, S., Kozinski, J. A., & Dalai, A. K. (2013). Evaluation of the physiochemical development of biochars obtained from pyrolysis of wheat straw, timothy grass and pinewood:

Effects of heating rate. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 104, 485-493. <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2013.05.022>

Moreno, J. G. (2017). Caracterización de biochar derivado de sarmiento de viña estudio preliminar de su aplicación sobre el desarrollo de plantas gramíneas [Universidad de Zaragoza]. <http://zaguan.unizar.es>

Mumme, J., Eckervogt, L., Pielert, J., Diakité, M., Rupp, F., & Kern, J. (2011). Hydrothermal carbonization of anaerobically digested maize silage. *Bioresource Technology*, 102(19), 9255-9260. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2011.06.099>

Olmo Prieto, M. (2016). Departamento de botánica, ecología y fisiología. Efectos del biochar sobre el suelo, las características de la raíz y la producción vegetal [Tesis doctoral, Universidad de Córdoba]. www.uco.es/publicaciones

Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., & Pan, G. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*, 274, 28-34. <https://doi.org/10.1016/J.GEODERMA.2016.03.029>

Pagano, M., Hernando, H., Cueto, J., Cruz, P. L., Dufour, J., Moreno, I., & Serrano, D. P. (2023). Insights on the acetic acid pretreatment of wheat straw: Changes induced in the biomass properties and benefits for the bio-oil production by pyrolysis. *Chemical Engineering Journal*, 454(140206). <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2022.140206>

Pandey, D., Daverey, A., & Arunachalam, K. (2020). Biochar: Production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. *Journal of Cleaner Production*, 255(120267). <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2020.120267>

Pariyar, P., Kumari, K., Jain, M. K., & Jadhao, P. S. (2020). Evaluation of change in biochar properties derived from different feedstock and pyrolysis temperature for environmental and agricultural application. *Science of The Total Environment*, 713. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.136433>

Patel, A. B., Shaikh, S., Jain, K. R., Desai, C., & Madamwar, D. (2020). Polycyclic Aromatic Hydrocarbons: Sources, Toxicity, and Remediation Approaches. *Frontiers in Microbiology*, 11, 562813. <https://doi.org/10.3389/FMICB.2020.562813/FULL>

Pathy, A., Pokharel, P., Chen, X., Balasubramanian, P., & Chang, S. X. (2023). Activation methods increase biochar's potential for heavy-metal adsorption and environmental remediation: A global meta-analysis. *Science of The Total Environment*, 865(161252). <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2022.161252>

Pecha, M. B., & Garcia-Perez, M. (2020). Pyrolysis of lignocellulosic biomass: oil, char, and gas. *Bioenergy: Biomass to Biofuels and Waste to Energy*, 581-619. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815497-7.00029-4>

Perea-Moreno, M. A., Samerón-Manzano, E., & Perea-Moreno, A. J. (2019). Biomass as Renewable Energy: Worldwide Research Trends. *Sustainability*, 11(3), 863. <https://doi.org/10.3390/SU11030863>

Pinakana, S. D., Raysoni, A. U., Sayeed, A., Gonzalez, J. L., Temby, O., Wladyka, D., Sepielak, K., & Gupta, P. (2024). Review of agricultural biomass burning and its impact on air quality in the continental United States of America. *Environmental Advances*, 16(100546). <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2024.100546>

Potnuri, R., Rao, C. S., Surya, D. V., Sridevi, V., & Kulkarni, A. (2023). Two-step synthesis of biochar using torrefaction and microwave-assisted pyrolysis: Understanding the effects of torrefaction temperature and catalyst loading. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 175(106191). <https://doi.org/10.1016/J.JAAP.2023.106191>

Premalatha, R. P., Poorna Bindu, J., Nivetha, E., Malarvizhi, P., Manorama, K., Parameswari, E., & Davamani, V. (2023). A review on biochar's effect on soil properties and crop growth. *Frontiers in Energy Research*, 11. <https://doi.org/10.3389/FENRG.2023.1092637/XML/NLM>

Premchand, P., Demichelis, F., Chiaramonti, D., Bensaid, S., & Fino, D. (2023a). Biochar production from slow pyrolysis of biomass under CO₂ atmosphere: A review on the effect of CO₂ medium on biochar production, characterisation, and environmental applications. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 11(3), 110009. <https://doi.org/10.1016/J.JECE.2023.110009>

Premchand, P., Demichelis, F., Chiaramonti, D., Bensaid, S., & Fino, D. (2023b). Study on the effects of carbon dioxide atmosphere on the production of biochar derived from slow pyrolysis of organic agro-urban waste. *Waste Management*, 172, 308-319. <https://doi.org/10.1016/J.WASMAN.2023.10.035>

- Rafiq, M. K., Bachmann, R. T., Rafiq, M. T., Shang, Z., Joseph, S., & Long, R. L. (2016). Influence of Pyrolysis Temperature on Physico-Chemical Properties of Corn Stover (*Zea mays* L.) Biochar and Feasibility for Carbon Capture and Energy Balance. *PLOS ONE*, 11(6). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0156894>
- Raza, M., Inayat, A., Ahmed, A., Jamil, F., Ghenai, C., Naqvi, S. R., Shanableh, A., Ayoub, M., Waris, A., & Park, Y. K. (2021). Progress of the Pyrolyzer Reactors and Advanced Technologies for Biomass Pyrolysis Processing. *Sustainability*, 13(19), 11061. <https://doi.org/10.3390/SU131911061>
- Rodriguez, C. F., Page-Dumroese, D. S., Pierson, D., Miller, M., & Miles, T. (2024). Policy and Regulations for Mobile Biochar Production in the United States of America. *Forests*, 15(192), 1-23. <https://doi.org/10.3390/F15010192>
- Ruiz Márquez, N. A. (2022). Evaluación del efecto de la aplicación de biochar en suelos agrícolas basado en la migración de nutrientes [Tesis doctoral]. Universidad Nacional de Colombia.
- Sajjadi, B., Chen, W. Y., & Egiebor, N. O. (2019). A comprehensive review on physical activation of biochar for energy and environmental applications. *Reviews in Chemical Engineering*, 35(6), 735-776. <https://doi.org/10.1515/REVCE-2017-0113/MACHINEREADABLECITATION/RIS>
- Sajjadi, B., Zubatiuk, T., Leszczynska, D., Leszczynski, J., & Chen, W. Y. (2018). Chemical activation of biochar for energy and environmental applications: A comprehensive review. *Reviews in Chemical Engineering*, 35(7), 777-815. https://doi.org/10.1515/REVCE-2018-0003/ASSET/GRAPHIC/J_REVCE-2018-0003_CV_004.JPG
- Santa-Olalla, A. L. (2020). Efectos de la aplicación del biochar en un suelo contaminado por elementos traza [Trabajo Fin de Grado]. Universidad de Sevilla.
- Shaaban, M., Van Zwieten, L., Bashir, S., Younas, A., Núñez-Delgado, A., Chhajro, M. A., Kubar, K. A., Ali, U., Rana, M. S., Mehmood, M. A., & Hu, R. (2018). A concise review of biochar application to agricultural soils to improve soil conditions and fight pollution. *Journal of Environmental Management*, 228, 429-440. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2018.09.006>
- Shakoor, A., Shahzad, S. M., Chatterjee, N., Arif, M. S., Farooq, T. H., Altaf, M. M., Tufail, M. A., Dar, A. A., & Mehmood, T. (2021). Nitrous oxide emission from agricultural soils: ¿Application of animal manure or biochar? A global meta-analysis. *Journal of Environmental Management*, 285(112170). <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2021.112170>
- Shalini, S., Palanivelu, K., Ramachandran, A., & Raghavan, V. (2020). Biochar from biomass waste as a renewable carbon material for climate change mitigation in reducing greenhouse gas emissions—a review. *Biomass Conversion and Biorefinery* 2020 11:5, 11(5), 2247-2267. <https://doi.org/10.1007/S13399-020-00604-5>
- Sharma, A., Pareek, V., & Zhang, D. (2015). Biomass pyrolysis—A review of modelling, process parameters and catalytic studies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 50, 1081-1096. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2015.04.193>
- Sherwood, J. (2020). The significance of biomass in a circular economy. *Bioresource Technology*, 300(122755). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2020.122755>
- Singh, H., Northup, B. K., Rice, C. W., & Prasad, P. V. V. (2022). Biochar applications influence soil physical and chemical properties, microbial diversity, and crop productivity: a meta-analysis. *Biochar*, 4(8), 1-17. <https://doi.org/10.1007/S42773-022-00138-1/FIGURES/7>
- Souza, T. F., Louzada, L. N., Martinho, F. S., Ferreira, G. M. D., & Ferreira, G. M. D. (2025). Heating rate effect on the sorptive properties of biochars from NaOH-modified sugarcane bagasse residues. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 22(9), 7983-7998. <https://doi.org/10.1007/S13762-024-06157-8/METRICS>
- Sun, J., He, F., Pan, Y., & Zhang, Z. (2017). Effects of pyrolysis temperature and residence time on physicochemical properties of different biochar types. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science*, 67(1), 12-22. <https://doi.org/10.1080/09064710.2016.1214745>
- Tan, X. fei, Liu, Y. guo, Gu, Y. ling, Xu, Y., Zeng, G. ming, Hu, X. jiang, Liu, S. bo, Wang, X., Liu, S. mian, & Li, J. (2016). Biochar-based nano-composites for the decontamination of wastewater: A review. *Bioresource Technology*, 212, 318-333. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2016.04.093>

- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19, 191-215. <https://doi.org/10.1007/S11157-020-09523-3/TABLES/3>
- Tran, K. Q., & Bui, H. H. (2016). Thermal Decomposition of Biochar from Oxidative Spruce Torrefaction - A Kinetic Study. *Chemical Engineering Transactions*, 50, 103-108. <https://doi.org/10.3303/CET1650018>
- Trupiano, D., Cocozza, C., Baronti, S., Amendola, C., Vaccari, F. P., Lustrato, G., Di Lonardo, S., Fantasma, F., Tognetti, R., & Scippa, G. S. (2017). The Effects of Biochar and Its Combination with Compost on Lettuce (*Lactuca sativa* L.) Growth, Soil Properties, and Soil Microbial Activity and Abundance. *International Journal of Agronomy*, 2017(3158207). <https://doi.org/10.1155/2017/3158207>
- Tu, P., Zhang, G., Wei, G., Li, J., Li, Y., Deng, L., & Yuan, H. (2022). Influence of pyrolysis temperature on the physicochemical properties of biochars obtained from herbaceous and woody plants. *Bioresources and Bioprocessing*, 9(131), 1-12. <https://doi.org/10.1186/S40643-022-00618-Z/TABLES/2>
- Videgain Marco, M. (2021). Producción y caracterización de biochar. Evaluación de sus efectos sobre el sistema suelo-planta-microorganismos [Tesis Doctoral]. Universidad de Zaragoza.
- Visser, E. D., Seroka, N. S., & Khotseng, L. (2024). Recent Advances in Biochar: Synthesis Techniques, Properties, Applications, and Hydrogen Production. *Processes*, 12(6), 1111. <https://doi.org/10.3390/PR12061111>
- Wang, D., Jiang, P., Zhang, H., & Yuan, W. (2020). Biochar production and applications in agro and forestry systems: A review. *Science of The Total Environment*, 723(137775). <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.137775>
- Wang, Y., Hu, Y., Zhao, X., Wang, S., & Xing, G. (2013). Comparisons of Biochar Properties from Wood Material and Crop Residues at Different Temperatures and Residence Times. *Energy and Fuels*, 27(10), 5890-5899. <https://doi.org/10.1021/EF400972Z>
- Wang, Y., Qiu, L., Zhu, M., Sun, G., Zhang, T., & Kang, K. (2019). Comparative Evaluation of Hydrothermal Carbonization and Low Temperature Pyrolysis of *Eucommia ulmoides* Oliver for the Production of Solid Biofuel. *Scientific Reports*, 9(1). <https://doi.org/10.1038/S41598-019-38849-4>
- Waqas, M., Hashim, S., Humphries, U. W., Ahmad, S., Noor, R., Shoaib, M., Naseem, A., Hlaing, P. T., & Lin, H. A. (2023). Composting Processes for Agricultural Waste Management: A Comprehensive Review. *Processes*, 11(3), 731. <https://doi.org/10.3390/PR11030731>
- Waqas, M., Nizami, A. S., Aburizaiza, A. S., Barakat, M. A., Ismail, I. M. I., & Rashid, M. I. (2018). Optimization of food waste compost with the use of biochar. *Journal of Environmental Management*, 216, 70-81. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.06.015>
- Wei, S., Zhu, M., Fan, X., Song, J., Peng, P., Li, K., Jia, W., & Song, H. (2019). Influence of pyrolysis temperature and feedstock on carbon fractions of biochar produced from pyrolysis of rice straw, pine wood, pig manure and sewage sludge. *Chemosphere*, 218, 624-631. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2018.11.177>
- Wiedner, K., Rumpel, C., Steiner, C., Pozzi, A., Maas, R., & Glaser, B. (2013). Chemical evaluation of chars produced by thermochemical conversion (gasification, pyrolysis and hydrothermal carbonization) of agro-industrial biomass on a commercial scale. *Biomass & Bioenergy*, 59, 264-278. <https://doi.org/10.1016/J.BIOMBIOE.2013.08.026>
- Yaashikaa, P. R., Kumar, P. S., Varjani, S., & Saravanan, A. (2020). A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy. *Biotechnology Reports*, 28, e00570. <https://doi.org/10.1016/J.BTRE.2020.E00570>
- Yadav, K., Jagadevan, S., Yadav, K., & Jagadevan, S. (2019). Influence of Process Parameters on Synthesis of Biochar by Pyrolysis of Biomass: An Alternative Source of Energy. *Recent Advances in Pyrolysis*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.88204>
- Yuan, J. H., Xu, R. K., & Zhang, H. (2011). The forms of alkalis in the biochar produced from crop residues at different temperatures. *Bioresource Technology*, 102(3), 3488-3497. <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2010.11.018>

Zhang, Ni, J., Qian, W., Yu, S., Xiang, Y., Yang, L., & Chen, W. (2023). Pyrolysis Atmospheres and Temperatures Co-Mediated Spectral Variations of Biochar-Derived Dissolved Organic Carbon: Quantitative Prediction and Self-Organizing Maps Analysis. *Molecules*, 28(5), 2247. <https://doi.org/10.3390/MOLECULES28052247/S1>

Zhang, Wang, J., & Feng, Y. (2021). The effects of biochar addition on soil physicochemical properties: A review. *CATENA*, 202, 105284. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2021.105284>

Zhang, X., Zhang, P., Yuan, X., Li, Y., & Han, L. (2020). Effect of pyrolysis temperature and correlation analysis on the yield and physicochemical properties of crop residue biochar. *Bioresource Technology*, 296(122318). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2019.122318>

Zhao, L., Cao, X., Mašek, O., & Zimmerman, A. (2013). Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures. *Journal of Hazardous Materials*, 256-257, 1-9. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2013.04.015>,

Zhou, Y., Qin, S., Verma, S., Sar, T., Sarsaiya, S., Ravindran, B., Liu, T., Sindhu, R., Patel, A. K., Binod, P., Varjani, S., Rani Singhnia, R., Zhang, Z., & Awasthi, M. K. (2021). Production and beneficial impact of biochar for environmental application: A comprehensive review. *Bioresource Technology*, 337(125451). <https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125451>

Zhu, X., Chen, B., Zhu, L., & Xing, B. (2017). Effects and mechanisms of biochar-microbe interactions in soil improvement and pollution remediation: A review. *Environmental Pollution*, 227, 98-115. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2017.04.032>