

**Biocarbon: una revisión de literatura sobre sus propiedades,  
métodos de caracterización y aplicaciones**

**Biochar: a review on the properties, characterization methods and  
applications.**

**Ing. Norma Araceli Guel-Najar<sup>1</sup>, Dr. Jorge Carlos Ríos-Hurtado<sup>1\*</sup>, Dra. Aurora Margarita Pat-Espadas<sup>2</sup>, M.C. Juanita Yazmin Guevara-Chávez<sup>1</sup>, M.C. Fatima Pamela Lara-Castillo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Facultad de Metalurgia, Universidad Autónoma de Coahuila

Carretera 57 Km. 5 Estancias de San Juan Bautista Monclova, Coahuila, México, C.P. 25718.

<sup>2</sup>Estación Regional del Noroeste del Instituto de Geología de la UNAM

Luis Donaldo Colosio s/n esquina Madrid, Hermosillo, Sonora, México, C.P. 83200

Correo electrónico: [jorgerios@uadec.edu.mx](mailto:jorgerios@uadec.edu.mx)

El Dr. Jorge Carlos Ríos Hurtado es especialista en el área de materiales para aplicaciones medioambientales y biomédicas. Ha desarrollado proyectos de investigación con materiales a base de carbono como carbón activado, telas de carbón activado y nanotubos de carbono, donde ha tenido proyectos financiados y ha dirigido estudiantes de licenciatura, maestría y doctorado.

**Resumen:** El biocarbón es un material carbonoso el cuál se ha utilizado desde hace un largo tiempo, debido al aumento de graves problemas ambientales, así como el deterioro del suelo, por lo que sus aplicaciones varían, como la remediación del suelo, secuestro de carbono, remoción de contaminantes, producción de biocombustibles, mejoramiento de materiales de construcción, entre muchas otras. Se han realizado diversos estudios e investigaciones para mejorar las propiedades físicas y químicas del biocarbón, así como aumentar su rendimiento y eficacia, todo esto lográndolo a un bajo costo y que el biocarbón sea sustentable para futuras aplicaciones. En esta revisión se presentan la diversidad de materia prima y distintos métodos para la obtención del biocarbón, así como sus propiedades, la modificación, su caracterización y sus aplicaciones.

**Palabras clave:** biocarbón, problemas ambientales, caracterización, aplicaciones, propiedades.

**Abstract:** Biochar is a carbonaceous material that has been used for a long time, due to the increase of serious environmental problems, as well as soil deterioration, so the applications varied, such as soil remediation, carbon sequestration, pollutant removal, biofuel production, improvement of construction materials, among many others. Several studies and research have been carried out to improve the physical and chemical properties of biochar, as well as to increase its performance and efficiency, all of this achieved at a low cost and to make biochar sustainable for future applications. This review presents the diversity of raw materials and different methods for obtaining biochar, as well as its properties, modification, characterization, and applications.

**Keywords:** biochar, environmental issues, characterization, applications, properties.

## **1. Introducción**

Debido a los innumerables beneficios del biocarbón como material de fácil producción, bajo costo y amplia disponibilidad ha sido acreedor a una extensa variedad de investigaciones, principalmente para la remediación del suelo y de los contaminantes en el medio ambiente (Zhou y col., 2021), los cuales son provocados en gran medida por el aumento de la urbanización y la industrialización. Por estos motivos, se han buscado formas más eficientes y económicas para producirlo a partir de una gran variedad de materia prima, como madera, residuos agrícolas y residuos sólidos urbanos, así como diferentes métodos termoquímicos para su elaboración y condiciones, sin embargo para su uso en diversas aplicaciones cuenta con algunas limitaciones las cuales se pueden mejorar mediante modificación física y química (Fang y col., 2021), así como la generación de biocarbones compuestos (Shukla y col., 2021).

El biocarbón es un prometedor sustituto y una alternativa para el carbón activado debido a sus amplias propiedades como elevada área superficial, estructura porosa, diferentes tamaños de poro, fracciones no carbonizadas y diversos grupos funcionales en su superficie (Rajec y col., 2016). Estas propiedades lo hacen beneficioso para ser utilizado en gran diversidad de aplicaciones, para un mejor uso del biocarbón es necesario determinar sus propiedades físicas y químicas, ya que estas características controlan su interacción con otros materiales y determinan sus capacidades (Novak y Johnson, 2018).

De acuerdo a las propiedades del biocarbón se determinará la aplicación que se la dará a este, el biocarbón cuenta con una amplia variedad de aplicaciones y estudios relacionados a estas, entre las que se encuentra la remediación de suelos contaminados (Anae y col., 2021), tratamiento de aguas residuales (Cheng y col., 2021), mitigación de gases de efecto invernadero (Lefebvre y col., 2021), secuestro de carbono en el suelo (Xu y col., 2021), productividad de cultivos (Azeem y col., 2021), producción de biocombustibles (Velusamy

y col., 2021), en el sector de construcción (Maljaee y col., 2021), entre muchas otras aplicaciones.

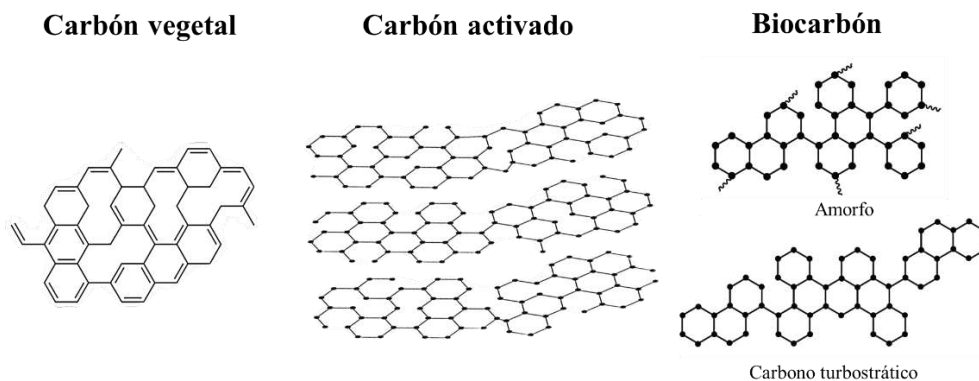
Esta revisión tiene como objetivo brindar información sobre el proceso de producción del biocarbón, sus principales propiedades, los métodos de modificación, las diferentes técnicas de caracterización y la diversidad de aplicaciones para futuros trabajos de investigación.

## 2. Biocarbón

En la literatura se encuentran diferentes definiciones para el uso de la palabra biocarbón, la definición más utilizada es la establecida por la International Biochar Initiative (IBI) el cual lo define como “Un material sólido que se obtiene de la conversión termoquímica de biomasa en un entorno limitado de oxígeno” (IBI, 2013).

Existen algunos términos muy parecidos por lo que es esencial poder distinguir las diferencias entre carbón vegetal, carbón activado y biocarbón, en la Figura 1 se muestran las estructuras de los diferentes materiales. El carbón vegetal (CV) es un material sólido con alto contenido en carbono que se obtiene al carbonizar la biomasa (materia orgánica). Es un combustible que se utiliza principalmente para producir energía, como materia prima (carburo de calcio, cal, cemento, etc.), en la industria metalúrgica (actúa como endurecedor y separador en la fabricación del acero y aleaciones metálicas), como combustible (ej. uso doméstico y para gasógenos) y como aditivo o pigmento en la industria alimentaria (Díaz Batalla y col., 2010; Lee y col., 2019). El carbón activado (CA) es un carbón vegetal el cual ha sido activado ya sea mediante activación física o química. En la activación física se utilizan gases oxidantes (ej.  $H_2O$ ,  $CO_2$  o aire) y en la activación química se utilizan reactivos químicos (ej.  $KOH$ ,  $K_2CO_3$ ,  $H_3PO_4$ , etc.), esta activación se realiza para aumentar sus características y propiedades, por ejemplo; la formación de grupos funcionales (ej.  $-OH$ ,  $-C=O$ ,  $-O-$ ,  $-NH_2$ ,  $-COOH$ , etc.), el área superficial y la microporosidad (Ahmad y col., 2014; Moreno y col., 2021). Entre sus principales aplicaciones se encuentra el tratamiento de agua contaminada, remoción de contaminantes en fase gaseosa, en procesos médicos como en el

tratamiento de intoxicaciones, de cáncer, inhibición bacteriana y eficiencia antimicrobiana, además de utilizarse como catalizadores y soportes de catalizadores (Jjagwe y col., 2021; Lewoyehu, 2021; Moreno y col., 2021).



**Figura 1.** Comparación entre las estructuras del carbón vegetal, carbón activado y el biocarbón.

El biocarbón es un tipo de carbón vegetal y es muy similar al carbón activado en cuanto a su producción por pirólisis, pero a diferencia de este, el biocarbón no se carboniza completamente ( $\approx 95\%$  de carbono y  $\approx 5\%$  de otros elementos), ya que el H y el O adicionales aún se encuentran presentes en su estructura, además el biocarbón no se trata con oxígeno y puede o no modificarse o activarse (Gope y Saha, 2021; Singh Yadav y col., 2023; Tareq y col., 2019). La parte no carbonizada (elementos inorgánicos o ceniza) puede interactuar con los diversos contaminantes del medio ambiente, sin embargo, estos elementos inorgánicos obstruyen los poros del biocarbón, disminuyendo el área superficial y la eficiencia de adsorción. Por otra parte un biocarbón con alto contenido de ceniza se puede emplear como catalizador (Gope y Saha, 2021; Li y col., 2023).

Las características y propiedades del biocarbón dependen principalmente del tipo de materia o biomasa utilizada, el método de producción, la temperatura y el tiempo de residencia (Gope y Saha, 2021; Tareq y col., 2019). El biocarbón es un material orgánico rico en carbono que

se prepara al calentar la biomasa (derivados agrícolas, estiércol, lodos de aguas residuales, entre otros), este se ha utilizado para la remediación y mejora del suelo, secuestro de carbono, realización de compostas a partir de residuos sólidos orgánicos, descontaminación del agua, como catalizador y activador, materiales de electrodos y modificadores de electrodos (Wang y Wang, 2019).

Algunas de las características distintivas del biocarbón es su alta capacidad de adsorción, alta superficie específica, microporosidad y su capacidad de intercambio iónico (Oliveira y col., 2017).

### **3. Características y propiedades del biocarbón**

El biocarbón es un producto sólido con alto contenido en carbón, de color negro, el cual no tiene una forma definida a temperaturas de  $\approx 400$  °C, mientras que a temperaturas de  $\approx 800$  °C presenta una estructura de carbono turbostrático (Escalante y col., 2016; Shanmugam y col., 2022). La materia prima (biomasa) y el tipo de proceso así como las condiciones (temperatura, tiempo de residencia, etc.) determinarán las características y propiedades fisicoquímicas del biocarbón (Bruckman y Pumpanen, 2019; Oliveira y col., 2017; Tang y col., 2013). Entre las principales propiedades del biocarbón se encuentra el área superficial, porosidad, pH, carga superficial y grupos funcionales, que se describirán a continuación.

#### **3.1. Área superficial y porosidad**

El biocarbón se compone de poros, los cuales se forman después del proceso de pirólisis debido al proceso de deshidratación y liberación de componentes volátiles. De acuerdo con la IUPAC (por sus siglas en inglés, International Union of Pure and Applied Chemistry) los poros se dividen conforme a su tamaño, estos son los microporos, mesoporos y macroporos, los cuales cuentan con tamaños de  $d < 2$  nm,  $2-50$  nm ( $2$  nm  $< d < 50$  nm) y  $d > 50$  nm respectivamente. En la Figura 2 se presenta una esquematización sobre el tamaño de poros.



**Figura 2.** Esquemática de la porosidad de un biocarbón.

El área superficial del biocarbón se debe a su porosidad, entre más pequeño es el poro mayor será su área superficial (Ahmad y col., 2014; Leng y col., 2021). Al incrementar la temperatura de pirólisis, aumenta el área superficial y el volumen de poros del biocarbón, debido a que las altas temperaturas eliminan y agrietan las sustancias que bloquean los poros dando lugar a una superficie más extensa (Ahmad y col., 2014; Tomczyk y col., 2020). La descomposición de la materia prima orgánica (celulosa y lignina) también tiene un gran efecto en el área superficial, los macroporos se forman principalmente debido al contenido de lignina en la materia prima, mientras que los microporos se forman debido al contenido de celulosa (Steiner y col., 2016).

Los poros y el área superficial del biocarbón influyen grandemente en su capacidad de adsorción. El tamaño del poro es muy importante, ya que si el contaminante o lo que se desea adsorber (adsorbato) tiene un tamaño superior al poro, este no lo va a poder adsorber (Tareq y col., 2019).

### 3.2.pH

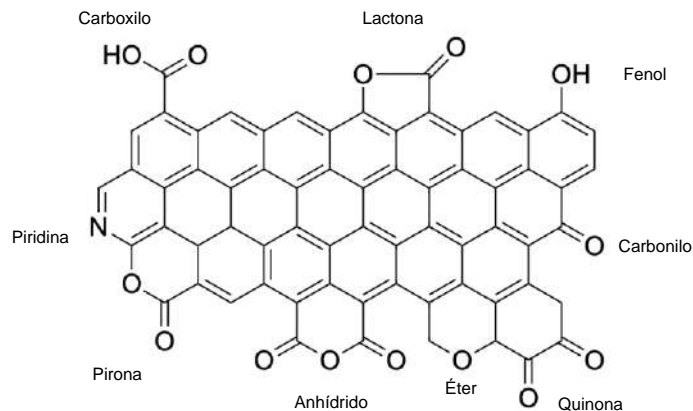
Dependiendo la materia prima y la temperatura de pirólisis será el pH del biocarbón. La mayoría de biocarbones son alcalinos ( $\text{pH} > 7$ ) pero existen excepciones dependiendo la materia prima utilizada. La biomasa por lo general es ligeramente ácida o básica (generalmente con un pH de 5-7.5), al aumentar la temperatura en el proceso de pirólisis, se incrementa el contenido de ceniza y se desprenden los grupos funcionales ácidos (como carboxilo, formilo o hidroxilo), lo que aumenta el pH del biocarbón (Tareq y col., 2019; Weber y Quicker, 2018).

### **3.3.Carga superficial**

La carga superficial del biocarbón depende en gran medida del valor del pH especialmente cuando se utiliza en soluciones acuosas, para la adsorción de iones inorgánicos. En un pH de 4-12 el biocarbón tiene cargas negativas, cuando se encuentra en condiciones acidas intensas el biocarbón mantiene cargas positivas. En el proceso de pirólisis, al aumentar la temperatura se desaparecen algunos grupos funcionales (grupo carboxilo, hidroxilo, etc.) de la superficie del biocarbón, provocando una disminución en las cargas negativas superficiales (Ghodake y col., 2021; Tareq y col., 2019; Yaashikaa y col., 2019). Las cargas negativas aumentan la capacidad de intercambio catiónico en la superficie del biocarbón (Qiu y col., 2021a).

### **3.4.Grupos funcionales**

Al calentar la biomasa a temperaturas de entre 350 y 650 °C sus enlaces químicos se rompen y reordenan, provocando la formación de nuevos grupos funcionales entre los que se encuentran los grupos carboxilo, quinona, éter, hidroxilo, lactona, anhídrido, pirona, piridina, fenol, entre otros más (Tomczyk y col., 2020). Los grupos funcionales se describen en la Figura 3.



**Figura 3.** Grupos funcionales superficiales en el biocarbón.

El biocarbón que se produce a temperaturas altas (entre 600 y 700 °C), debido a la deshidratación y desoxigenación de la biomasa, tiene una menor cantidad de grupos funcionales que contienen hidrogeno (H) y oxígeno (O), por lo que la capacidad de intercambio catiónico disminuye y la capacidad de intercambio aniónico aumenta. El biocarbón producido a temperaturas bajas (entre 300 y 400 °C) presenta mayor capacidad de intercambio catiónico (Pandey y col., 2020; Tomczyk y col., 2020). De acuerdo con la materia prima utilizada en la producción del biocarbón se pueden encontrar diferentes grupos funcionales en su superficie. Los grupos carboxilo, carbonilo, amino, e hidroxilo, son afines a los cationes metálicos (ej.  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ) (Qiu y col., 2021b).

#### 4. Materia prima (biomasa) para la elaboración del biocarbón

La elección de la materia prima o biomasa de la que estará elaborado (fabricado) el biocarbón es una elección muy importante ya que cada una de esta cuenta con diferentes propiedades fisicoquímicas lo que determinará las características y propiedades del biocarbón. Los biocarbones se pueden producir de una amplia variedad de materia prima entre los que se encuentran los residuos orgánicos, residuos agrícolas, residuos agroindustriales, residuos de alimentos, lodos de depuradora, cultivos bioenergéticos, residuos forestales, estiércol de ganado y residuos agrícolas de biomasa lignocelulósica (bagazo de caña de azúcar, residuos de papel, residuos de cartón, rastrojo de maíz, paja de trigo, entre muchos otros) (Ghodake y

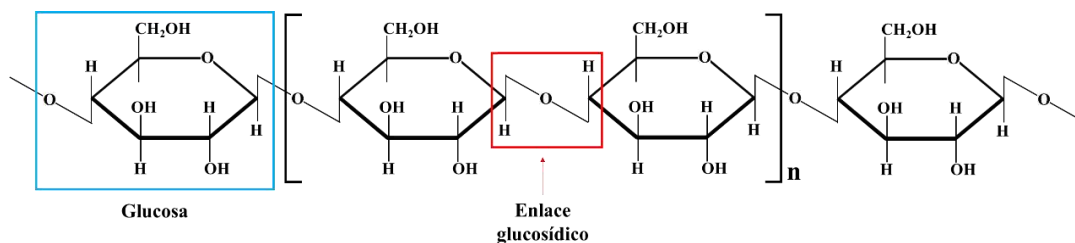
col., 2021; Gope y Saha, 2021). A continuación, se describirán las fuentes vegetales debido a los beneficios que estas representan.

La biomasa lignocelulósica es una opción adecuada debido a que es un recurso renovable y presenta alta disponibilidad, su fuente principal son los residuos agrícolas y los residuos forestales. Los componentes principales de la biomasa lignocelulósica son la hemicelulosa, la celulosa y la lignina (S y P, 2019; Yaashikaa y col., 2019), además de pequeñas cantidades de ceniza y extractos (Wang y col., 2017), los porcentajes en peso de estos componentes varían de acuerdo a la materia prima, en la Tabla 1 se muestran diversas materias primas y su composición (%) de biomasa lignocelulósica.

**Tabla 1.** – Composición lignocelulósica, ceniza y extractos (Ex) de diferentes materias primas.

Materia prima	Componente químico (%)					Referencia
	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina	Ceniza	Ex	
Hierba de elefante	39.14	19.9	6.18	6.9	-	(Braga y col., 2014)
Cáñamo	53.86	10.60	8.76	5.25	-	(Kikas y col., 2016)
Roble	43.2	21.9	35.4	0.2	1.6	(Yu y col., 2017)
Pino	45.6	24.0	26.8	1.1	5.7	(Yu y col., 2017)
Cáscara de nuez	20.47	20.16	45.93	4.48	6.22	(Zhang y col., 2020)

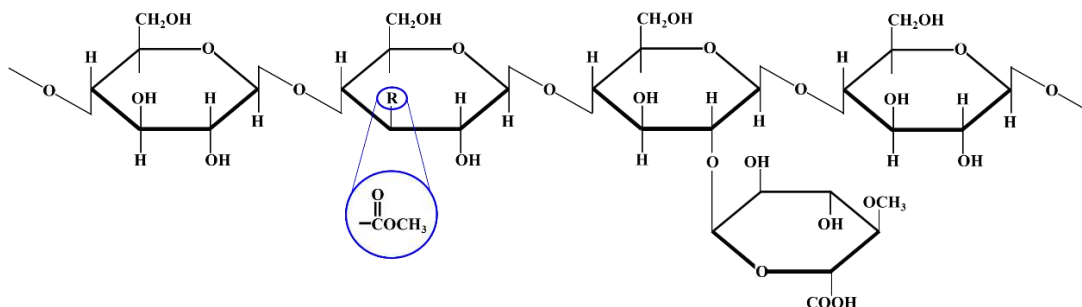
La celulosa es el principal componente estructural de la biomasa lignocelulósica, la cual forma las paredes celulares primarias de las plantas verdes. Es el polímero orgánico que más abunda en la naturaleza, es un polisacárido de cadena lineal de unidades repetidas de D-glucosa (piranosa) que se conectan por enlaces acetilo (enlace glucosídico  $\beta(1\rightarrow4)$ ), la estructura de la celulosa se muestra en la Figura 4. La celulosa es muy poco soluble en agua debido a que sus moléculas son largas y lineales. Las cadenas de celulosa (20-300) se agrupan y forman fibras de celulosa, estas se unen por enlaces de van der Waals y enlaces de hidrógeno creando microfibrillas. Estas microfibrillas largas le dan fuerza y forma a la pared celular, ya que estas están situadas como una malla entrecruzada. Los enlaces de hidrogeno formados proporcionan a la celulosa una estructura cristalina, lo que le brinda resistencia mecánica y estabilidad química. Su estructura cristalina le proporciona a la planta fuerza y dureza a las raíces, tallos y hojas (Dhyani y Bhaskar, 2019; Pecha y Garcia-Perez, 2020).



**Figura 4.** Estructura de la celulosa. Adaptado de Benaimeche y col., (2020).

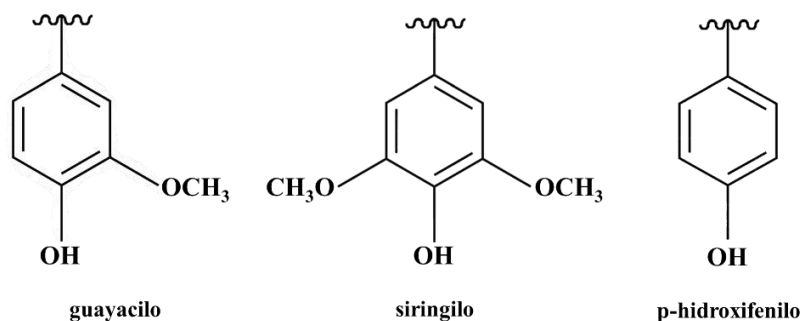
La hemicelulosa es el segundo compuesto más abundante en la biomasa lignocelulósica, lo que constituye de un 25-33% dependiendo la materia vegetal. Esta rodea a la celulosa y crea una conexión entre la celulosa y la lignina. La hemicelulosa está compuesta de azúcares al igual que la celulosa, pero a diferencia de esta la hemicelulosa está formada por diferentes tipos de monómeros (como manosa, arabinosa, glucosa, galactosa, xilosa, y ácido glucurónico) lo que la convierte en un heteropolisacárido, como se muestra en la Figura 5. La hemicelulosa tiene una estructura amorfa, las cadenas se pueden ramificar, cuentan con poca resistencia física, tiene una gran capacidad de absorber agua por lo que se dice que es

soluble, su composición varía de acuerdo con la especie vegetal (Badui Dergal, 2006; Dhyani y Bhaskar, 2018, 2019; Pecha y Garcia-Perez, 2020).



**Figura 5.** Estructura de la hemicelulosa. Adaptado de Flaris y Singh, (2009).

La lignina es un polímero fenólico que tiene una matriz aromática, reticulada y tridimensional, el cual cuenta con una diversidad de monómeros de fenilpropano sustituidas con “hidroxilo” y “metoxi” con enlaces diferentes. Su estructura química varía de una planta a otra debido a que sus unidades estructurales no suelen repetirse de forma regular, sus principales unidades son guayacilo, siringilo y p-hidroxifenilo (ver Figura 6). La lignina se encuentra presente en la capa exterior de las fibras y tiene como propósito brindarle rigidez estructural y mantener unidas las fibras de los polisacáridos, así como para el transporte de agua y en defensa microbiana. En la estructura interna de la planta, la hemicelulosa recubre las microfibrillas de celulosa, los espacios vacíos que quedan de esta unión se llenan de lignina, la cual ayuda a unir a la celulosa y la hemicelulosa dentro de la pared celular y así protegerlas cuando el agua pase a través de la planta (Chávez Sifontes y Domine, 2013; Dhyani y Bhaskar, 2018; Pecha y Garcia-Perez, 2020). Si la cantidad de lignina es mayor a la de la celulosa el biocarbón tendrá un alto rendimiento, asimismo si la biomasa contiene un mayor contenido de lignina generara en el biocarbón una mayor porosidad (Gope y Saha, 2021).



**Figura 6.** Unidades principales de la lignina.

La ceniza es una pequeña cantidad de compuestos inorgánicos que se encuentran presentes en la biomasa. Esta se compone principalmente de fósforo, calcio, potasio, cloro, silicio, magnesio, azufre, sodio, etc. La cantidad de cenizas encontradas en la biomasa es variada, pero puede alcanzar hasta un 15% en residuos agrícolas y biomasa herbácea (Dhyani y Bhaskar, 2018, 2019).

Los extractos son los productos naturales adyacentes a la pared celular de la biomasa lignocelulósica, como por ejemplo los aceites esenciales, proteínas, almidones, pectinas, azúcares simples, saponinas, grasas, glucósidos, ceras, alcaloides, gomas, mucílagos, fenólicos, terpenos y resinas, estos se pueden extraer muy fácilmente al utilizar disolventes inertes (acetona, agua fría, solución de alcohol benceno y éter). Estos extractos se forman debido a los procesos metabólicos de las plantas, sus funciones son como reserva de energía, intermediarios en el metabolismo y actúan como defensores de las plantas contra los microbios y los insectos (Dhyani y Bhaskar, 2018, 2019).

## 5. Producción de biocarbón

Los métodos comunes para la obtención de biocarbones son la pirolisis, la gasificación y la carbonización hidrotermal (Wang y Wang, 2019). La pirolisis, la gasificación y la carbonización hidrotermal son algunos de los métodos de producción (Wang y Wang, 2019), estos se describirán a continuación.

La pirólisis es la degradación de la biomasa por medio del calor en ausencia de oxígeno, como resultado de este proceso se obtiene gas de síntesis, residuo líquido (bioaceite), y residuo sólido (biocarbón) (Escalante y col., 2016). De acuerdo al tiempo y temperatura la pirólisis se puede clasificar como pirolisis lenta, media y rápida, siendo la pirolisis lenta la que favorece el rendimiento de biocarbón en comparación con la pirolisis rápida (Inyang y Dickenson, 2015; Pan y col., 2021).

La temperatura es uno de los factores más importantes en el proceso ya que esta causa la pérdida de carbono cuando se está preparando y afecta directamente la estructura de los poros y la micromorfología del biocarbón (Xie y col., 2021). En la Tabla 2 se muestran las diferencias en los tres tipos de pirólisis (Afanasjeva y col., 2018; Dhyani y Bhaskar, 2019).

**Tabla 2.** – Tipos de pirólisis, condiciones y rendimiento de productos.

Tipo de pirólisis	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Rendimiento del producto (%)		
			Líquido	Gas	Sólido
Lenta	300-400	horas-días	25-30	25-35	30-40
Intermedia	300-500	5-30 s	40-50	25	25-30
Rápida	400-950	1-2 s	60-75	13-20	12-20

El rendimiento de los productos obtenidos del proceso de pirólisis (gas de síntesis, bioaceite y biocarbón) dependen de la composición de la biomasa lignocelulósica. La celulosa, hemicelulosa y la lignina se descomponen a diferentes temperaturas, las cuales siguen diferentes mecanismos de reacción (reacciones de condensación, deshidratación, deshidrogenación, producción de coque, rompimiento, aromatización y reorganización) y diferentes velocidades de descomposición (Afanasjeva y col., 2018; Dhyani y Bhaskar, 2019). En la Tabla 3 se muestran las temperaturas de descomposición de la biomasa lignocelulósica mediante el proceso de pirólisis (Yaashikaa y col., 2019).

**Tabla 3.** – Temperatura de descomposición de la biomasa lignocelulósica

Biomasa lignocelulósica	Temperatura de descomposición (°C)
Celulosa	305-375
Hemicelulosa	200-350
Lignina	250-500

En la gasificación, la biomasa, se quema en una sucesión de dos reacciones, la primera es la carbonización con gasificación, por ejemplo, en la madera consiste en la conversión de esta a carbón, lo que es equivalente a la pirólisis lenta. Después de la conversión a carbón, la segunda reacción se realiza a una temperatura mayor que la primera, convirtiendo el carbón formado en ceniza y se le conoce como gasificación de carbón. Si hay exceso de oxígeno el carbón será consumido y solo quedarán cenizas, en cambio sí hay poca cantidad de oxígeno, solo una parte del carbón será consumido y algunos remanentes saldrán por el fondo del gasificador (Escalante y col., 2016). Este proceso de combustión parcial de la biomasa se da a temperaturas de 600-1200 °C y a un tiempo de residencia de 10 a 20 s. Los productos obtenidos son principalmente una combinación de gases ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  y  $CO_2$ ), por ejemplo, gas de síntesis, también se obtiene biocarbón con un rendimiento menor al 10% y ceniza (Afanasjeva y col., 2017; Lee y col., 2019).

La carbonización hidrotermal o torrefacción húmeda es un tratamiento que se lleva a cabo a temperaturas entre 200 °C y 250 °C, así como a elevada presión (2-10 MPa), en ausencia de oxígeno y utilizando agua en estado subcrítico como medio. El producto obtenido se denomina hidrocarburo, el cual presenta mayor densidad de masa y energía en comparación a la biomasa bruta. La principal ventaja de este tratamiento es que puede convertir la biomasa húmeda sin la necesidad de utilizar un proceso de secado de alta energía antes o durante el

proceso de degradación por pirólisis y que requiere menos energía que otros tratamientos térmicos. Las principales aplicaciones del hidrocarburo obtenido son la mejora del suelo, el secuestro de carbono, la bioenergía, producción y remediación de la contaminación de las aguas residuales (Álvarez y col., 2020; Aragon-Briceño y col., 2021).

## **6. Modificación del biocarbón**

El biocarbón cuenta con características y propiedades físicas y químicas diferentes, las cuales ayudan a remover contaminantes, estas propiedades se pueden mejorar mediante modificación o activación, ya sea a la materia prima (antes del proceso de pirólisis) o al biocarbón (después del proceso de pirólisis). El biocarbón se puede modificar por activación física, química, así como la creación de biocarbones compuestos, principalmente se modifican para incrementar la superficie del biocarbón, el área superficial y el volumen de poros.

### **6.1 Activación física**

El proceso de activación física se realiza al biocarbón (posterior al proceso de pirólisis). Esta activación consta de dos procesos o pasos importantes, el primero es la carbonización de la biomasa y la segunda es la modificación por agentes en estado gaseoso ( $O_2$ ,  $CO_2$ ,  $N_2$ , etc.). La activación por medio de gases depende del biocarbón y las condiciones al realizar el proceso. Además de los agentes gaseosos la activación física se puede realizar con vapor. Este consiste en circular vapor sobrecalentado a temperaturas entre 650 y 950 °C a través de los poros del biocarbón (Yaashikaa y col., 2019; Zoroufchi y col., 2020).

Los principales factores por considerar en esta modificación son el vapor o gas, la temperatura y el tiempo. Al realizar la activación física se incrementa el área superficial y el volumen de los poros del biocarbón, asimismo se incrementan los grupos funcionales, la polaridad y la hidrofobicidad en la superficie. En la activación con vapor se intercambia el oxígeno del agua con el carbono para generar óxidos superficiales e hidrogeno, mientras que

en la activación con gas, se eliminan los compuestos volátiles y se agrandan los poros (Amalina y col., 2022; Yaashikaa y col., 2019; Zoroufchi y col., 2020).

## 6.2 Activación química

La activación química se utiliza con más frecuencia en comparación con la activación física, debido a que se necesita menor temperatura para su activación y se obtiene un mayor rendimiento del biocarbón (Guo y Rockstraw, 2007). La activación se puede realizar antes o después del proceso de pirólisis (en la materia prima o el biocarbón) (Zoroufchi y col., 2020), este proceso de activación consiste en mezclar la materia prima o el biocarbón con un agente químico, ya sea un ácido o una base (Cha y col., 2016), con la finalidad de modificar la estructura y los poros de la superficie, así como introducir grupos funcionales (Zoroufchi y col., 2020).

La activación ácida consiste en impregnar la materia prima o el biocarbón en una solución con el agente ácido en una proporción de 1:10 (materia prima o biocarbón:ácido) para remojo variable (Tareq y col., 2019) a una temperatura de hasta 120 °C (Yaashikaa y col., 2019). Entre los ácidos comúnmente utilizados se encuentra el ácido fosfórico ( $H_3PO_4$ ) el cual es el más utilizado debido a que presenta una naturaleza ecológica, ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ), ácido clorhídrico (HCl) y ácido nítrico ( $HNO_3$ ) (Tareq y col., 2019). En esta activación con ácidos se eliminan las impurezas y los residuos metálicos de la superficie del carbón, se generan en la superficie del biocarbón grupos funcionales carboxílicos lo que favorece la adsorción de cationes (Zoroufchi y col., 2020).

En la activación con bases (álcalis) se han realizado un gran número de métodos para el proceso en el que se varió la temperatura, la concentración de base y la duración. Los agentes químicos básicos usualmente usados son hidróxido de potasio (KOH) e hidróxido de sodio (NaOH) (Tareq y col., 2019; J. Wang y Wang, 2019). En esta activación se eliminan las cenizas de la superficie, incrementa el área superficial del biocarbón y se generan grupos

hidroxilo (grupos funcionales que contienen oxígeno) ayudando la adsorción de oxianiones (Wang y Wang, 2019; Zoroufchi y col., 2020).

## **7. Biocarbones compuestos**

Los biocarbones compuestos implican la creación de grupos funcionales totalmente nuevos que no existían anteriormente en la superficie del biocarbón, esto se hace para modificar las propiedades superficiales del biocarbón y aumentar la capacidad de adsorción de numerosos contaminantes. Los biocarbones compuestos se obtienen a partir de la interacción, modificación o funcionalización de su superficie con óxidos metálicos, arcillas, materiales carbonosos (óxido de grafeno o nanotubos de carbono), compuestos orgánicos (quitosano o aminoácidos) o microorganismos (biopelículas) (Huang y col., 2021; Sizmur y col., 2017). A continuación, se describen y/o explican los diferentes agentes para su modificación.

### **7.1. Óxidos metálicos**

El objetivo de modificar biocarbones con óxidos metálicos es garantizar una distribución uniforme del metal sobre la superficie del biocarbón y así aumentar el área superficial del óxido metálico, estos pueden cambiar y mejorar las características de adsorción, catalíticas y de magnetismo. Por sus propiedades magnéticas se pueden utilizar para reciclar el biocarbón, ya que los óxidos metálicos de hierro pueden aumentar las características magnéticas de los biocarbones de manera que se puedan recolectar/recuperar al ponerse en contacto con un material imantado.

Los metales comúnmente usados son hierro, magnesio, aluminio y manganeso (Sizmur y col., 2017; Wang y Wang, 2019). El hierro es el metal más usado para la impregnación de óxidos metálicos, este es uno de los metales más abundantes en la naturaleza. Los minerales de hierro más importantes son la ferrihidrita, ferroxihita, lepidocrocita, akaganeita, goethita, hematita y la magnetita, ya que esta es responsable de las propiedades magnéticas de las rocas (Cornell y Schwertmann, 2003; Lu y col., 2011).

### **7.2. Arcillas**

Los minerales arcillosos son materiales económicos, fáciles de extraer, no tóxicos, con atractivas propiedades físicas y químicas que incluye la forma y el tamaño de las partículas (estructura laminar), así como el área y la química superficial. Estos minerales al ser impregnados al biocarbón pueden modificar su composición y sus propiedades físicas de acuerdo con la arcilla utilizada, incrementando la capacidad de adsorción del biocarbón, adsorbiendo diversos contaminantes (tintes orgánicos, antibióticos, metales pesados, entre otros) presentes en el suelo y agua a través del intercambio iónico (Sizmur y col., 2017; Yao y col., 2014; Zhao y col., 2023).

Entre los principales minerales arcillosos se encuentra la bentonita, la caolinita, y la montmorillonita, las cuales se caracterizan por su alta área superficial, su capacidad de intercambio catiónico y su capacidad de adsorción (Arif y col., 2021; Marcínczyk y col., 2022; Yao y col., 2014).

#### **7.4. Materiales carbonosos**

Los materiales carbonosos como el grafeno y los nanotubos de carbono muestran excelentes propiedades fisicoquímicas. El grafeno presenta una gran área superficial, resistencia mecánica, interacciones  $\pi$ - $\pi$ , alta movilidad de electrones ( $e^-$ ), conductividad térmica y una extraordinaria capacidad de absorción (Fang y col., 2020). Los nanotubos de carbono se componen a partir de láminas de grafeno enrolladas entre si brindándole forma cilíndrica, presentando una alta área superficial, gran cantidad de sitios activos, tamaño de poro ajustable (estructura porosa), flexibilidad, afinidad electrónica y resistencia mecánica, sin embargo, comparado al grafeno presenta una menor capacidad de adsorción (Soffian y col., 2022).

Los biocarbones mejoran significativamente sus propiedades fisicoquímicas al combinar ambos materiales (biocarbón/material carbonoso), aumentando sus propiedades mecánicas, el área superficial, la porosidad y la capacidad de adsorción de contaminantes orgánicos e inorgánicos (Sizmur y col., 2017; Wang y Wang, 2019). No obstante, el alto costo al preparar el grafeno y los nanotubos de carbono restringen su aplicación (Wang y Wang, 2019).

#### **7.5. Compuestos orgánicos**

Al incorporar grupos aminos a la superficie del biocarbón, puede mejorar la capacidad de absorción al crear fuertes lazos con la superficie del biocarbón como con los contaminantes de la solución. Esta incorporación se puede lograr mediante simples reacciones químicas o al mezclar biocarbones con polímeros ricos en grupos amino, como polietilenimina o quitosano (Sizmur y col., 2017).

### **7.6. Microorganismos**

La modificación se puede realizar mediante el empleo de microbios como las bacterias (Yaashikaa y col., 2019), el biocarbón al ser un material inerte de gran superficie cuenta con las condiciones necesarias para favorecer la colonización y el crecimiento de biopelículas con propiedades favorables. La inoculación de microorganismos se ha realizado principalmente para facilitar la biodegradación de contaminantes orgánicos en el medio ambiente (Sizmur y col., 2017).

### **8. Caracterización del biocarbón**

Para determinar la composición elemental, propiedades fisicoquímicas, de superficie y estructurales del biocarbón, así como su capacidad para la remediación ambiental u otras aplicaciones (aplicabilidad) se realiza el análisis o caracterización (fisicoquímica, superficial y estructural) del biocarbón (Igalavithana y col., 2017; Yaashikaa y col., 2020), el cual consiste en utilizar diferentes técnicas o instrumentos como análisis termogravimétrico (TGA, de Thermo-gravimetric analysis), las técnicas de plasma de acoplamiento inductivo (ICP, de inductively-coupled plasma), análisis del área superficial específica mediante BET (Brunauer-Emmett-Teller), microscopía electrónica de barrido (SEM, de Scanning electron microscopy), espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS, de Energy dispersive X-ray spectrometer), espectroscopia infrarroja por transformada de Fourier (FTIR, de Fourier transform infrared spectroscopy), espectroscopia Raman, espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS, de X-ray photoelectron spectroscopy), difracción de rayos X (XRD, de X-ray diffraction), microscopía electrónica de transmisión (TEM, de Transmission electron microscopy), entre otras más.

### **8.1. Análisis de proximidad**

El análisis de proximidad o proximal se utiliza para determinar la humedad, el contenido de carbono fijo, materia residente, ceniza y la materia volátil presentes en el biocarbón (Ghodake y col., 2021; Igalavithana y col., 2017). La ceniza se compone de compuestos inorgánicos (minerales) y la materia volátil se compone de elementos orgánicos principalmente de carbono (C), hidrogeno (H), oxígeno (O) y azufre (S) (Igalavithana y col., 2017). El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica la cual mide el cambio de masa de la biomasa que se somete a un ambiente a altas temperaturas (Ghodake y col., 2021), se utiliza para determinar el contenido de humedad, ceniza y materia volátil, mientras que la cantidad de materia residente se obtiene al calcular la diferencia entre el peso inicial de la muestra y la cantidad de humedad, la materia volátil y la cantidad de cenizas (Igalavithana y col., 2017).

### **8.2. Análisis final o definitivo**

Este análisis se usa para determinar las cantidades individuales de los elementos orgánicos del biocarbón (C, H, O, N y S) y de la ceniza, para así conocer la composición elemental detallada del biocarbón. Para determinar las cantidades de C, H, O, N y S respectivamente es importante restar los contenidos de humedad y ceniza obtenidos en el análisis de proximidad.

La ceniza se compone de diferentes minerales, y se puede dividir en solubles en ácido y no solubles en ácido. La cantidad de elementos o minerales presentes en la ceniza se determina por la biomasa o materia prima que se utiliza para la elaboración del biocarbón (Igalavithana y col., 2017). Algunas de las técnicas para detectar, identificar y conocer la cantidad de las especies inorgánicas del biocarbón y de la ceniza, son las técnicas de plasma de acoplamiento inductivo con espectrometría de masas (ICP-MS), plasma de acoplamiento inductivo con espectrometría de emisión atómica (ICP-AES) y plasma de acoplamiento inductivo con espectrometría de emisión óptica (ICP-OES) (Ghodake y col., 2021).

### **8.3. Análisis fisicoquímico**

Las propiedades físicas y químicas del biocarbón dependen del tipo de materia prima utilizada, así como de las condiciones en el proceso de producción del biocarbón (Ahmad y col., 2014). Algunas de las propiedades fisicoquímicas del biocarbón son el pH, área superficial, densidad aparente y porosidad.

El pH varía considerablemente debido a la materia prima utilizada, así como la temperatura en la producción del biocarbón, a mayor temperatura se obtiene un pH más alto debido a la pérdida elevada de materia volátil y a la mejora de cationes básicos (Haris y col., 2021). Para la determinación del pH se han utilizado diferentes métodos, el más común consiste en mezclar una pequeña cantidad de biocarbón y agua desionizada en una proporción de 1:20 (Igalavithana y col., 2017).

Para determinar el área superficial del biocarbón se utilizan diversos métodos, los más usuales son la adsorción de CO<sub>2</sub> (a una temperatura de 273K (Weber y Quicker, 2018)) el cual se utiliza para caracterizar poros con un tamaño menor a 2 nm, y la adsorción de N<sub>2</sub> (a una temperatura de 77 K) vía análisis del área superficial específica mediante BET (Brunauer-Emmett-Teller) para caracterizar microporos y mesoporos del biocarbón (Brewer y col., 2014), esta técnica no puede caracterizar macroporos (Leng y col., 2021).

La densidad aparente del biocarbón está relacionada con la temperatura del proceso de producción del biocarbón, ya que con el aumento de temperatura se generan nuevos poros y el valor de la densidad aparente disminuye debido a la porosidad del biocarbón y el bajo peso (Igalavithana y col., 2017), esto se puede determinar mediante el método de porosimetría de mercurio, el cual además de determinar la densidad aparente, determina los parámetros de la estructura de poros y la porosidad (Igalavithana y col., 2017; Yang y col., 2021).

#### **8.4. Análisis superficial**

Para conocer la morfología del biocarbón se utiliza la técnica de microscopía electrónica de barrido (SEM), la cual muestra la imagen de la superficie del biocarbón proporcionando

información acerca de los poros, materiales y fisuras presentes en su superficie (Novak y Johnson, 2018). Esta técnica se puede utilizar antes y/o después del proceso de adsorción (Yaashikaa y col., 2020).

Para determinar los elementos presentes en la superficie del biocarbón se utiliza la técnica conjunta de microscopía electrónica de barrido (SEM) y espectroscopia de rayos X de energía dispersiva (EDS), comúnmente se utiliza para determinar los elementos presentes después de adsorber contaminantes, la desventaja de esta técnica es que no es adecuado para determinar contaminantes orgánicos (Yaashikaa y col., 2020).

La espectroscopía infrarroja por transformada de Fourier (FTIR) es una técnica vibratoria, la cual determina los grupos funcionales (carboxilo, hidroxilo, carbonilo, etc.) presentes en la superficie del biocarbón, así como su mineralogía (Haris y col., 2021; Igalavithana y col., 2017).

La espectroscopía Raman se emplea para identificar las estructuras amorfas y del grafito, la distribución de defectos estructurales y la forma y el tamaño de los nanomateriales. Las bandas Raman denominadas banda G ( $1575\text{ cm}^{-1}$ ) y banda D ( $1360\text{ cm}^{-1}$ ) se utilizan para diferenciar diferentes alótropos, así como conocer sus características estructurales, de composición y de conductividad. La banda G aparece debido al modo de simetría  $E_{2g}$  de la red de carbono hexagonal y la banda D es la medida del desorden de la red del carbono (Igalavithana y col., 2017; Roy y col., 2021). La espectroscopia Raman es una técnica con alto grado de sensibilidad, fácil preparación de la muestra y una menor interferencia, sin embargo, tiene un elevado costo (Yaashikaa y col., 2020).

Los biocarbones tienen grupos funcionales de tipo ácido y básico en su superficie (Xiong y col., 2021), la titulación de Boehm se utiliza para la caracterización de grupos funcionales ácidos, el cuál divide a estos grupos en tres categorías, las cuales son carboxílico, lactónico y fenólico (Tsechansky y Graber, 2014).

Para conocer los estados de enlace químico, la estructura electrónica y los compuestos químicos superficiales del biocarbón se utiliza la técnica de espectroscopia de fotoelectrones de rayos X (XPS) (Huang y Best, 2014; Igalavithana y col., 2017).

### **8.5. Análisis estructural/molecular**

El análisis termogravimétrico (TGA) es una técnica para evaluar la estabilidad térmica de la materia prima (biomasa) y el biocarbón (Subratti y col., 2021), así como su estabilidad estructural (Igalavithana y col., 2017). Con el aumento de la temperatura en la elaboración del biocarbón se descompone la biomasa lignocelulósica (celulosa, hemicelulosa y lignina), por lo que se degradan térmicamente (Kristanto y col., 2021), el TGA detecta la pérdida de peso del biocarbón debido a la degradación térmica de la biomasa, provocado por el aumento de la temperatura y la velocidad de calentamiento (Igalavithana y col., 2017).

Para determinar la estructura y fases cristalinas del biocarbón se utiliza la técnica de difracción de rayos X (XRD) (Yaashikaa y col., 2020), esta técnica proporciona información sobre las fases mineralógicas del biocarbón que influyen en sus propiedades para su posterior aplicación (Amen y col., 2020; Sahoo y col., 2021). La microscopía electrónica de transmisión (TEM) se emplea para caracterizar la morfología del biocarbón (Ma y col., 2021) y así conocer la estructura del biocarbón y su composición química (Calderón, 2020) a través imágenes (Calderón, 2020; Walther, 2017).

Otra técnica empleada para conocer la composición de la estructura del biocarbón es la resonancia magnética nuclear (NMR, de Nuclear magnetic resonance), principalmente se utiliza para determinar la cantidad de hidrocarburos aromáticos y alifáticos en el biocarbón, así como detalles sobre los grupos funcionales que se encuentran presentes, una desventaja de esta técnica es que se pueden interrumpir las señales del NMR debido a la presencia de elementos (minerales) ferromagnéticos (Igalavithana y col., 2017; Yaashikaa y col., 2020).

La técnica de fluorescencia de rayos X (XRF, de X-ray fluorescence spectroscopy) determina la composición química del biocarbón (Ahn y col., 2021), esta técnica es especialmente útil para identificar componentes inorgánicos y para el análisis de la composición de cenizas en el biocarbón (Igalavithana y col., 2017).

## **9. Aplicaciones del biocarbón**

Debido a las distintivas características y propiedades del biocarbón como área superficial, porosidad, tamaño de poros, volumen de poros, grupos funcionales, entre otras más, y a su fácil y económica elaboración, cuenta con una amplia variedad de aplicaciones, su principal aplicación es en el mejoramiento del suelo, además de remediación de contaminantes en el medio ambiente, en la agricultura, catálisis, supercondensadores, tratamiento de aguas residuales, secuestro de carbón, mitigación del cambio climático, mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero, en materiales de construcción y materiales portadores de microorganismos (Igalavithana y col., 2017; Yaashikaa y col., 2020), a continuación se mencionan algunas de sus aplicaciones.

### **9.1. Aplicaciones en el suelo**

Debido al aumento de dióxido de carbono en el ambiente, así como la elevada descomposición de residuos orgánicos en el suelo han provocado un grave problema, por lo que se han realizado diversos estudios para la remediación de este problema. El biocarbón debido a su composición y estructura han demostrado ser de gran utilidad, ya que este aumenta la productividad de los cultivos, mejora la fertilidad del suelo y su estructura, así como la reducción de los gases de efecto invernadero e impulsa el secuestro de carbono (Zhang y col., 2019), además de otras funciones.

Existen investigaciones donde utilizaron biocarbones para remediar suelos contaminados por metales pesados, Tang y col., (2022) realizaron experimentos de campo para indagar los efectos de un biocarbón ordinario y uno modificado con polietilenimina, para la remediación del suelo contaminado por cadmio (Cd), en el cual se obtuvo que el efecto del biocarbón

modificado tuvo mayores mejoras en el suelo que el biocarbón ordinario, además de efectos importantes sobre las actividades de la ureasa, hidrogenasa y la fosfatasa del suelo, el efecto del biocarbón modificado sobre el cadmio fue más significativo, el biocarbón podría mejorar la estabilidad del suelo y disminuir la cantidad de cadmio en el trigo.

Se han realizado investigaciones en las cuales se utilizan biocarbones para reducir la toxicidad de fungicidas en el suelo, Zhang y col., (2021) utilizaron un biocarbón procedente de paja de maíz para estudiar los efectos del biocarbón sobre los microbios presentes en el suelo contaminado con piraclostrobina, además de estudiar la agregación, las actividades enzimáticas y la lombriz de tierra (*Eisenia fetida*), en este estudio demostró que el biocarbón aumentó el contenido de macroagregados del suelo, así como la mejora de las poblaciones microbianas y las actividades enzimáticas. Además, se aceleró la degradación de la piraclostrobina del suelo y eliminó su toxicidad para los microorganismos presentes. El biocarbón y las lombrices de tierra juntos mejoran las condiciones del suelo y aceleran la degradación del contaminante (piraclostrobina).

Existe una gran cantidad de investigaciones, algunas de ellas para mejorar las propiedades del suelo. Ahmad y col., (2022) estudiaron el efecto del biocarbón proveniente de lodos de depuradora sobre los nutrientes del suelo, la población microbiana y la biomasa vegetal, a partir de este estudio se concluyó que los lodos de depuradora son un grave problema ambiental ya que contienen metaloides. El biocarbón ayuda a retener la humedad del suelo y proveen nutrientes esenciales (como P, Zn, Mn y Mg) a las plantas, por lo que ayuda al crecimiento de las plantas *Trigonella foenum-graecum* y *Cicer arietinum*, así como la mejora del microbio beneficioso que ayuda en el crecimiento, además el biocarbón modificó las propiedades químicas y físicas del suelo, mejoró la composición de la población bacteriana y el ciclo de nutrientes del suelo.

## 9.2. Otras aplicaciones

El biocarbón tiene una amplia variedad de aplicaciones como el tratamiento de aguas residuales, ya sea de contaminantes orgánicos e inorgánicos. El uso del biocarbones elaborados a partir de madera y biomasa de maíz se utilizaron para eliminar compuestos farmacéuticos activos, fragmentos de ARN y ADN de agua residuales (Bimová y col., 2021).

Además, el biocarbón se ha utilizado para aminorar las emisiones de gases de efecto invernadero ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{NH}_3$ ) durante el compostaje, el cual a tenido efectos positivos. La materia prima y las condiciones de producción, el tamaño y la cantidad de biocarbón influyen significativamente para reducir los gases de efecto invernadero (GEI) durante el compostaje, los residuos de cultivos y biomasa leñosa tienen mayor efecto en la reducción de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{NH}_3$  y  $\text{N}_2\text{O}$  durante el compostaje, el biocarbón que se genera a temperaturas entre 200 y 500 °C son más beneficioso para reducir las emisiones de  $\text{NH}_3$  y los biocarbones que se generan a temperaturas entre 500 y 900 °C son más eficaces para reducir las emisiones de  $\text{N}_2\text{O}$  y  $\text{CH}_4$  (Yin y col., 2021).

Debido al aumento de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) en la atmósfera, se han incrementado los niveles de emisiones que provocan el calentamiento global, el biocarbón se ha empleado para reducir estas emisiones (Panwar y col., 2019). Yang y col., (2020) informó que al crear y utilizar biocarbón junto con la variedad de plantas en tierras de cultivo degradadas y abandonadas, interactúan con los factores bióticos y abióticos del ecosistema los cuales ayudan a maximizar los impactos positivos en el secuestro de carbono y en las emisiones de GEI.

Hay un incremento en la demanda de fuentes de energía renovables y sostenibles, ya que el supercondensador es un dispositivo de almacenamiento de energía ha ganado especial atención debido a su alta densidad de potencia, su estabilidad de ciclo y su capacidad de carga y descarga (Li y col., 2021). El biocarbón debido a su capacidad de almacenamiento de energía se emplea como electrodo de supercondensador, Ma y col., (2021) prepararon un biocarbón a partir de la saponina del té, mediante la técnica de pirólisis y se activó

químicamente, el biocarbón cuenta con una estructura porosa y un excelente rendimiento electroquímico, se concluyó que este biocarbón tiene un gran potencial para aplicarlo como material de electrodo superconductor ecológico y de bajo costo.

Otra de las aplicaciones del biocarbón es en los materiales de construcción, hay diversos materiales de construcción en los que el biocarbón mejora sus propiedades (Igalavithana y col., 2017). Se ha demostrado que el biocarbón puede aumentar la resistencia a la flexión así como el aumento de la energía de fractura de los compuestos cementosos (Restuccia y col., 2020).

### **Conclusiones**

Este trabajo contribuye en la revisión del estado del arte de las diferentes propiedades, la caracterización fisicoquímica y aplicaciones del biocarbón, debido a que el rápido aumento de la urbanización e industrialización ha generado un grave problema ambiental a nivel mundial por lo que el uso del biocarbón se ha vuelto vital para tratar de remediar estos problemas. A pesar de las diversas aplicaciones del biocarbón, con el incremento de problemas por solucionar se ha visto en la necesidad de realizar estudios más meticulosos y rigurosos para solucionarlos, donde el biocarbón sea una opción factible debido a su bajo costo, sus propiedades específicas y su sustentabilidad, generando nuevas áreas de oportunidad para su aplicación y de esta manera generar y aportar nuevos conocimientos para posteriores investigaciones.

### **Agradecimientos**

Guel-Najar agradece la beca (620952) otorgada por el CONACyT. Los autores agradecen al FONCyT (COAH-2021-C15-C013) por el apoyo otorgado para la realización de esta revisión y el proyecto de investigación.

## Referencias

- Afanasjeva, N., Castillo, L. C., & Sinisterra, J. C. (2017). Biomasa Lignocelulósica. Parte I: Transformación de biomasa. *Journal of Science with Technological Applications*, 3: 27–43.
- Afanasjeva, N., Castillo, L. C., & Sinisterra, J. C. (2018). Lignocellulosic biomass. Part II: Tendence in the biomass pyrolysis. *Journal of Science with Technological Applications*, 5: 4–22. <https://doi.org/10.34294/J.JSTA.18.5.31>
- Ahmad, A., Chowdhary, P., Khan, N., Chaurasia, D., Varjani, S., Pandey, A., & Chaturvedi, P. (2022). Effect of sewage sludge biochar on the soil nutrient, microbial abundance, and plant biomass: A sustainable approach towards mitigation of solid waste. *Chemosphere*, 287: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132112>
- Ahmad, M., Rajapaksha, A. U., Lim, J. E., Zhang, M., Bolan, N., Mohan, D., Vithanage, M., Lee, S. S., & Ok, Y. S. (2014). Biochar as a sorbent for contaminant management in soil and water: A review. *Chemosphere*, 99: 19–33. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2013.10.071>
- Ahn, Y., Cho, D. W., Ahmad, W., Jo, J., Jurng, J., Kurade, M. B., Jeon, B. H., & Choi, J. (2021). Efficient removal of formaldehyde using metal-biochar derived from acid mine drainage sludge and spent coffee waste. *Journal of Environmental Management*, 298: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113468>
- Álvarez, M. L., Gascó, G., Palacios, T., Paz-Ferreiro, J., & Méndez, A. (2020). Fe oxides-biochar composites produced by hydrothermal carbonization and pyrolysis of biomass waste. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 151: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104893>
- 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>

- Amen, R., Bashir, H., Bibi, I., Shaheen, S. M., Niazi, N. K., Shahid, M., Hussain, M. M., Antoniadis, V., Shakoor, M. B., Al-Solaimani, S. G., Wang, H., Bundschuh, J., & Rinklebe, J. (2020). A critical review on arsenic removal from water using biochar-based sorbents: The significance of modification and redox reactions. *Chemical Engineering Journal*, *396*: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.125195>
- Anae, J., Ahmad, N., Kumar, V., Thakur, V. K., Gutierrez, T., Yang, X. J., Cai, C., Yang, Z., & Coulon, F. (2021). Recent advances in biochar engineering for soil contaminated with complex chemical mixtures: Remediation strategies and future perspectives. *Science of the Total Environment*, *767*: 1–25. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144351>
- Aragon-Briceño, C. I., Pozarlik, A. K., Bramer, E. A., Niedzwiecki, L., Pawlak-Kruczek, H., & Brem, G. (2021). Hydrothermal carbonization of wet biomass from nitrogen and phosphorus approach: A review. *Renewable Energy*, *171*: 201–415. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.02.109>
- Arif, M., Liu, G., Yousaf, B., Ahmed, R., Irshad, S., Ashraf, A., Zia-ur-Rehman, M., & Rashid, M. S. (2021). Synthesis, characteristics and mechanistic insight into the clays and clay minerals-biochar surface interactions for contaminants removal-A review. *Journal of Cleaner Production*, *310*: 127548. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.127548>
- Azeem, M., Hassan, T. U., Tahir, M. I., Ali, A., Jeyasundar, P. G. S. A., Hussain, Q., Bashir, S., Mehmood, S., & Zhang, Z. (2021). Tea leaves biochar as a carrier of *Bacillus cereus* improves the soil function and crop productivity. *Applied Soil Ecology*, *157*: 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103732>
- Benaimeche, O., Seghir, N. T., Sadowski, Ł., & Mellas, M. (2020). The Utilization of Vegetable Fibers in Cementitious Materials. In *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*, *2*: 649–662. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12->

803581-8.11596-6

- Bimová, P., Roupcová, P., Klouda, K., Matejová, L., Stanová, A. V., Grabicová, K., Grabic, R., Majová, V., Híveš, J., Špalková, V., Gemeiner, P., Celec, P., Konečná, B., Bírošová, L., Krahulcová, M., & Mackulak, T. (2021). Biochar - An efficient sorption material for the removal of pharmaceutically active compounds, DNA and RNA fragments from wastewater. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(4): 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105746>
- Braga, R. M., Melo, D. M. A., Aquino, F. M., Freitas, J. C. O., Melo, M. A. F., Barros, J. M. F., & Fontes, M. S. B. (2014). Characterization and comparative study of pyrolysis kinetics of the rice husk and the elephant grass. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, 115(2): 1915–1920. <https://doi.org/10.1007/s10973-013-3503-7>
- Brewer, C. E., Chuang, V. J., Masiello, C. A., Gonnermann, H., Gao, X., Dugan, B., Driver, L. E., Panzacchi, P., Zygourakis, K., & Davies, C. A. (2014). New approaches to measuring biochar density and porosity. *Biomass and Bioenergy*, 66: 176–185. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.03.059>
- Bruckman, V. J., & Pumpanen, J. (2019). Biochar use in global forests: opportunities and challenges. In *Developments in Soil Science*: 427–453. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63998-1.00017-3>
- Calderón, H. A. (2020). Microscopía electrónica de transmisión para observar átomos: principios y desarrollo. *Mundo Nano. Revista Interdisciplinaria En Nanociencias y Nanotecnología*, 13(25): 133–156. <https://doi.org/10.22201/ceiich.24485691e.2020.25.69649>
- 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>
- Cheng, S., Liu, Y., Xing, B., Qin, X., Zhang, C., & Xia, H. (2021). Lead and cadmium clean

removal from wastewater by sustainable biochar derived from poplar saw dust. *Journal of Cleaner Production*, 314: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128074>

Cornell, R. M., & Schwertmann, U. (2003). The Iron Oxides. In *The Iron Oxides: Structure, Properties, Reactions, Occurrences and Uses*. Wiley-VCH. [https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=dIMuE3\\_klW4C&oi=fnd&pg=PA1&ots=11hQUhW\\_gJ&sig=2LKf3DA6djJITHTqkvpP4ZK02II&redir\\_esc=y#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=dIMuE3_klW4C&oi=fnd&pg=PA1&ots=11hQUhW_gJ&sig=2LKf3DA6djJITHTqkvpP4ZK02II&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false)

Dhyani, V., & Bhaskar, T. (2019). Pyrolysis of Biomass. In *Biofuels: Alternative Feedstocks and Conversion Processes for the Production of Liquid and Gaseous Biofuels*: 217–244. Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816856-1.00009-9>

Díaz Batalla, M., Gonzales Asencios, A., Sifuentes Yepes, D., & Gonzales Mora, E. (2010). El carbón vegetal: alternativa de energía y productos químicos. *Xilema*, 23(1): 95–103.

Escalante, A., Pérez, G., Hidalgo, C., López, J., Campo, J., Valtierra, E., & Etchevers, J. (2016). Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo. *Terra Latinoamericana*, 34: 367–382. <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>

Fang, Q., Ye, S., Yang, H., Yang, K., Zhou, J., Gao, Y., Lin, Q., Tan, X., & Yang, Z. (2021). Application of layered double hydroxide-biochar composites in wastewater treatment: Recent trends, modification strategies, and outlook. *Journal of Hazardous Materials*, 420: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126569>

Fang, Z., Gao, Y., Bolan, N., Shaheen, S. M., Xu, S., Wu, X., Xu, X., Hu, H., Lin, J., Zhang, F., Li, J., Rinklebe, J., & Wang, H. (2020). Conversion of biological solid waste to graphene-containing biochar for water remediation: A critical review. *Chemical Engineering Journal*, 390: 124611. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2020.124611>

Flaris, V., & Singh, G. (2009). Recent developments in biopolymers. *Journal of Vinyl and*

*Additive Technology*, 15(1): 1–11. <https://doi.org/10.1002/VNL.20171>

- Ghodake, G. S., Shinde, S. K., Kadam, A. A., Saratale, R. G., Saratale, G. D., Kumar, M., Palem, R. R., AL-Shwaiman, H. A., Elgorban, A. M., Syed, A., & Kim, D. Y. (2021). Review on biomass feedstocks, pyrolysis mechanism and physicochemical properties of biochar: State-of-the-art framework to speed up vision of circular bioeconomy. *Journal of Cleaner Production*, 297: 1–38. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126645>
- Gope, M., & Saha, R. (2021). Removal of heavy metals from industrial effluents by using biochar. In *Intelligent Environmental Data Monitoring for Pollution Management: 25–48*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819671-7.00002-6>
- Guo, Y., & Rockstraw, D. A. (2007). Physicochemical properties of carbons prepared from pecan shell by phosphoric acid activation. *Bioresource Technology*, 98(8): 1513–1521. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.06.027>
- Haris, M., Hamid, Y., Usman, M., Wang, L., Saleem, A., Su, F., Guo, J. K., & Li, Y. (2021). Crop-residues derived biochar: Synthesis, properties, characterization and application for the removal of trace elements in soils. *Journal of Hazardous Materials*, 416: 1–21. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.126212>
- Huang, J., & Best, S. (2014). Ceramic biomaterials for tissue engineering. In *Tissue Engineering Using Ceramics and Polymers*, 2: 3 - 34. <https://doi.org/10.1533/9780857097163.1.3>
- Huang, W. H., Lee, D. J., & Huang, C. (2021). Modification on biochars for applications: A research update. *Bioresource Technology*, 319: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124100>
- IBI. (2013). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar that is Used in Soil. *International Biochar Initiative, April*: 1–48. <http://www.biochar-international.org/characterizationstandard>

- Igalavithana, A. D., Mandal, S., Niazi, N. K., Vithanage, M., Parikh, S. J., Mukome, F. N. D., Rizwan, M., Oleszczuk, P., Al-Wabel, M., Bolan, N., Tsang, D. C. W., Kim, K. H., & Ok, Y. S. (2017). Advances and future directions of biochar characterization methods and applications. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(23): 2275–2330. <https://doi.org/10.1080/10643389.2017.1421844>
- Inyang, M., & Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: A review. In *Chemosphere*, 134: 232–240. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.03.072>
- Jjagwe, J., Olupot, P. W., Menya, E., & Kalibbala, H. M. (2021). Synthesis and Application of Granular Activated Carbon from Biomass Waste Materials for Water Treatment: A Review. *Journal of Bioresources and Bioproducts*, 6(4): 292–322. <https://doi.org/10.1016/j.jobab.2021.03.003>
- Kikas, T., Tutt, M., Raud, M., Alaru, M., Lauk, R., & Olt, J. (2016). Basis of energy crop selection for biofuel production: Cellulose vs. lignin. *International Journal of Green Energy*, 13(1): 49–54. <https://doi.org/10.1080/15435075.2014.909359>
- Kristanto, J., Azis, M. M., & Purwono, S. (2021). Multi-distribution activation energy model on slow pyrolysis of cellulose and lignin in TGA/DSC. *Heliyon*, 7(7): 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e07669>
- Lee, J., Sarmah, A. K., & Kwon, E. E. (2019). Production and Formation of Biochar. In *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*: 3–18. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00001-7>
- Lefebvre, D., Williams, A., Kirk, G. J. D., Meersmans, J., Sohi, S., Goglio, P., & Smith, P. (2021). An anticipatory life cycle assessment of the use of biochar from sugarcane residues as a greenhouse gas removal technology. *Journal of Cleaner Production*, 312: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127764>
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H.

- (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment*, 763: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>
- Lewoyehu, M. (2021). Comprehensive review on synthesis and application of activated carbon from agricultural residues for the remediation of venomous pollutants in wastewater. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 159: 105279. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105279>
- Li, X., Zhang, J., Liu, B., & Su, Z. (2021). A critical review on the application and recent developments of post-modified biochar in supercapacitors. *Journal of Cleaner Production*, 310: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127428>
- Li, Y., 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>
- Lu, B., Guo, H., Li, P., Liu, H., Wei, Y., & Hou, D. (2011). Comparison study on transformation of iron oxyhydroxides: Based on theoretical and experimental data. *Journal of Solid State Chemistry*, 184(8): 2139–2144. <https://doi.org/10.1016/j.jssc.2011.06.008>
- Ma, Z. W., Liu, H. Q., & Lü, Q. F. (2021). Porous biochar derived from tea saponin for supercapacitor electrode: Effect of preparation technique. *Journal of Energy Storage*, 40: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.102773>
- Maljaee, H., Madadi, R., Paiva, H., Tarelho, L., & Ferreira, V. M. (2021). Incorporation of biochar in cementitious materials: A roadmap of biochar selection. *Construction and Building Materials*, 283: 1–18. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122757>
- Marcińczyk, M., Ok, Y. S., & Oleszczuk, P. (2022). From waste to fertilizer: Nutrient recovery from wastewater by pristine and engineered biochars. *Chemosphere*, 306: 135310. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135310>

- Moreno, A., Ríos, J. C., & Flores, S. E. (2021). Carbón activado: generalidades y aplicaciones. *CienciAcierta*, 17(66): 88–114.
- Novak, J. M., & Johnson, M. G. (2018). Elemental and spectroscopic characterization of low-temperature (350°C) lignocellulosic- and manure-based designer biochars and their use as soil amendments. In *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*: 37–58. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00003-0>
- Oliveira, F. R., Patel, A. K., Jaisi, D. P., Adhikari, S., Lu, H., & Khanal, S. K. (2017). Environmental application of biochar: Current status and perspectives. *Bioresource Technology*, 246: 110–122. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.08.122>
- Pan, X., Gu, Z., Chen, W., & Li, Q. (2021). Preparation of biochar and biochar composites and their application in a Fenton-like process for wastewater decontamination: A review. In *Science of the Total Environment*, 754: 1–17. Elsevier B.V. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142104>
- Pandey, D., Daverey, A., & Arunachalam, K. (2020). Biochar: Production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization. *Journal of Cleaner Production*, 255: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120267>
- Panwar, N. L., Pawar, A., & Salvi, B. L. (2019). Comprehensive review on production and utilization of biochar. *SN Applied Sciences*, 1(2): 1–19. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0172-6>
- Qiu, B., Tao, X., Wang, H., Li, W., Ding, X., & Chu, H. (2021a). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081>
- Qiu, B., Tao, X., Wang, H., Li, W., Ding, X., & Chu, H. (2021b). Biochar as a low-cost adsorbent for aqueous heavy metal removal: A review. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 155: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2021.105081>

- Rajec, P., Roskopfová, O., Galamboš, M., Frišták, V., Soja, G., Dafnomili, A., Noli, F., Đukić, A., & Matović, L. (2016). Sorption and desorption of pertechnetate on biochar under static batch and dynamic conditions. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 310(1): 253–261. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4811-8>
- Restuccia, L., Ferro, G. A., Suarez-Riera, D., Sirico, A., Bernardi, P., Belletti, B., & Malcevski, A. (2020). Mechanical characterization of different biochar-based cement composites. *Procedia Structural Integrity*, 25: 226–233. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.04.027>
- Roy, D., Kanojia, S., Mukhopadhyay, K., & Eswara Prasad, N. (2021). Analysis of carbon-based nanomaterials using Raman spectroscopy: principles and case studies. *Bulletin of Materials Science*, 44(1): 1–9. <https://doi.org/10.1007/s12034-020-02327-9>
- S, R., & P, B. (2019). The potential of lignocellulosic biomass precursors for biochar production: Performance, mechanism and wastewater application—A review. *Industrial Crops and Products*, 128: 405–423. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2018.11.041>
- Sahoo, S. S., Vijay, V. K., Chandra, R., & Kumar, H. (2021). Production and characterization of biochar produced from slow pyrolysis of pigeon pea stalk and bamboo. *Cleaner Engineering and Technology*, 3: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100101>
- Shanmugam, V., Sreenivasan, S. N., Mensah, R. A., Försth, M., Sas, G., Hedenqvist, M. S., Neisiany, R. E., Tu, Y., & Das, O. (2022). A review on combustion and mechanical behaviour of pyrolysis biochar. *Materials Today Communications*, 31: 103629. <https://doi.org/10.1016/J.MTCOMM.2022.103629>
- Shukla, P., Giri, B. S., Mishra, R. K., Pandey, A., & Chaturvedi, P. (2021). Lignocellulosic biomass-based engineered biochar composites: A facile strategy for abatement of emerging pollutants and utilization in industrial applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 152: 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111643>

- Singh Yadav, S. P., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, *11*: 100498. <https://doi.org/10.1016/J.JAFR.2023.100498>
- Sizmur, T., Fresno, T., Akgül, G., Frost, H., & Moreno-Jiménez, E. (2017). Biochar modification to enhance sorption of inorganics from water. In *Bioresource Technology*, *246*: 34–47. Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2017.07.082>
- Soffian, M. S., Abdul Halim, F. Z., Aziz, F., A. Rahman, M., Mohamed Amin, M. A., & Awang Chee, D. N. (2022). Carbon-based material derived from biomass waste for wastewater treatment. *Environmental Advances*, *9*: 100259. <https://doi.org/10.1016/J.ENVADV.2022.100259>
- Steiner, C., Bayode, A. O., & Ralebitso-Senior, T. K. (2016). Feedstock and Production Parameters: Effects on Biochar Properties and Microbial Communities. In *Biochar Application: Essential Soil Microbial Ecology*: 41–54. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803433-0.00002-3>
- Subratti, A., Vidal, J. L., Lalgee, L. J., Kerton, F. M., & Jalsa, N. K. (2021). Preparation and characterization of biochar derived from the fruit seed of *Cedrela odorata* L and evaluation of its adsorption capacity with methylene blue. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, *21*: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.scp.2021.100421>
- Tang, B., Xu, H., Song, F., Ge, H., Chen, L., Yue, S., & Yang, W. (2022). Effect of biochar on immobilization remediation of Cd-contaminated soil and environmental quality. *Environmental Research*, *204*: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2021.111840>
- Tang, J., Zhu, W., Kookana, R., & Katayama, A. (2013). Characteristics of biochar and its application in remediation of contaminated soil. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, *116*(6): 653–659. <https://doi.org/10.1016/j.jbiosc.2013.05.035>
- Tareq, R., Akter, N., & Azam, M. S. (2019). Biochars and Biochar Composites: Low-Cost

- Adsorbents for Environmental Remediation. In *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications*: 169–209. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00010-8>
- Tomczyk, A., Sokołowska, Z., & Boguta, P. (2020). Biochar physicochemical properties: pyrolysis temperature and feedstock kind effects. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 19(1): 191–215. <https://doi.org/10.1007/S11157-020-09523-3>
- Tsechansky, L., & Graber, E. R. (2014). Methodological limitations to determining acidic groups at biochar surfaces via the Boehm titration. *Carbon*, 66: 730–733. <https://doi.org/10.1016/j.carbon.2013.09.044>
- Velusamy, K., Devanand, J., Senthil Kumar, P., Soundarajan, K., Sivasubramanian, V., Sindhu, J., & Vo, D. V. N. (2021). A review on nano-catalysts and biochar-based catalysts for biofuel production. *Fuel*, 306: 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.121632>
- Walther, T. (2017). Transmission Electron Microscopy of Nanostructures. In *Microscopy Methods in Nanomaterials Characterization*: 105–134. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/b978-0-323-46141-2.00004-3>
- Wang, J., & Wang, S. (2019). Preparation, modification and environmental application of biochar: A review. *Journal of Cleaner Production*, 227: 1002–1022. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.282>
- Wang, S., Dai, G., Yang, H., & Luo, Z. (2017). Lignocellulosic biomass pyrolysis mechanism: A state-of-the-art review. *Progress in Energy and Combustion Science*, 62: 33–86. <https://doi.org/10.1016/J.PECS.2017.05.004>
- Weber, K., & Quicker, P. (2018). Properties of biochar. *Fuel*, 217: 240–261. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.12.054>
- Xie, R., Zhu, Y., Zhang, H., Zhang, P., & Han, L. (2021). Effects and mechanism of pyrolysis

- temperature on physicochemical properties of corn stalk pellet biochar based on combined characterization approach of microcomputed tomography and chemical analysis. *Bioresource Technology*, 329: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124907>
- Xiong, J., Xu, J., Zhou, M., Zhao, W., Chen, C., Wang, M., Tan, W., & Koopal, L. (2021). Quantitative Characterization of the Site Density and the Charged State of Functional Groups on Biochar. *ACS Sustainable Chemistry and Engineering*, 9(6): 2600–2608. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c09051>
- Xu, H., Cai, A., Wu, D., Liang, G., Xiao, J., Xu, M., Colinet, G., & Zhang, W. (2021). Effects of biochar application on crop productivity, soil carbon sequestration, and global warming potential controlled by biochar C:N ratio and soil pH: A global meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 213: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105125>
- 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: 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.btre.2020.e00570>
- Yaashikaa, P. R., Senthil Kumar, P., Varjani, S. J., & Saravanan, A. (2019). Advances in production and application of biochar from lignocellulosic feedstocks for remediation of environmental pollutants. *Bioresource Technology*, 292: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.122030>
- Yang, C., Liu, J., & Lu, S. (2021). Pyrolysis temperature affects pore characteristics of rice straw and canola stalk biochars and biochar-amended soils. *Geoderma*, 397: 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115097>
- Yang, Y., Hobbie, S. E., Hernandez, R. R., Fargione, J., Grodsky, S. M., Tilman, D., Zhu, Y. G., Luo, Y., Smith, T. M., Jungers, J. M., Yang, M., & Chen, W. Q. (2020). Restoring Abandoned Farmland to Mitigate Climate Change on a Full Earth. *One Earth*, 3(2):

176–186. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2020.07.019>

Yao, Y., Gao, B., Fang, J., Zhang, M., Chen, H., Zhou, Y., Creamer, A. E., Sun, Y., & Yang, L. (2014). Characterization and environmental applications of clay–biochar composites. *Chemical Engineering Journal*, 242: 136–143. <https://doi.org/10.1016/J.CEJ.2013.12.062>

Yin, Y., Yang, C., Li, M., Zheng, Y., Ge, C., Gu, J., Li, H., Duan, M., Wang, X., & Chen, R. (2021). Research progress and prospects for using biochar to mitigate greenhouse gas emissions during composting: A review. *Science of the Total Environment*, 798: 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.149294>

Yu, J., Paterson, N., Blamey, J., & Millan, M. (2017). Cellulose, xylan and lignin interactions during pyrolysis of lignocellulosic biomass. *Fuel*, 191: 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2016.11.057>

Zhang, L., Yang, Z., Li, S., Wang, X., & Lin, R. (2020). Comparative study on the two-step pyrolysis of different lignocellulosic biomass: Effects of components. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 152: 104966. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2020.104966>

Zhang, Q., Li, S., Saleem, M., Ali, M. Y., & Xiang, J. (2021). Biochar and earthworms synergistically improve soil structure, microbial abundance, activities and pyraclostrobin degradation. *Applied Soil Ecology*, 168: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2021.104154>

Zhang, Z., Zhu, Z., Shen, B., & Liu, L. (2019). Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. *Energy*, 171: 581–598. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.035>

Zhao, L., Sun, Z.-F., Pan, X.-W., Tan, J.-Y., Yang, S.-S., Wu, J.-T., Chen, C., Yuan, Y., & Ren, N.-Q. (2023). Sewage sludge derived biochar for environmental improvement: Advances, challenges, and solutions. *Water Research X*, 18: 100167.

<https://doi.org/10.1016/J.WROA.2023.100167>

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: 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.125451>

Zoroufchi, K., Motalebi Damuchali, A., Soltan, J., & McPhedran, K. N. (2020). Treatment of aqueous arsenic – A review of biochar modification methods. *Science of the Total Environment*, 739: 1–20. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139750>