



Pirólisis: una revisión de conceptos y aplicaciones en la gestión de residuos sólidos

Pyrolysis: a review of concepts and applications in solid waste management

Karla Vilca¹, Stephani Rodríguez¹, Ulvio Atarama², Cristian Cueva³, Wendy Jackeline Concha⁴, Miguel Angel Atausupa⁴, Wildor Gosgot⁵

RESUMEN

La gestión de residuos sólidos es un desafío ambiental a nivel mundial debido a que generan contaminación de aguas y suelos, así como emisiones de gas de efecto invernadero, lo cual se incrementará con el crecimiento de las ciudades y población. Es por ello, que el tratamiento de estos, especialmente la fracción orgánica, mediante el proceso de pirólisis se presenta como una alternativa sostenible con beneficios significativos como la obtención de subproductos, como el biocarbón, que tiene diversos campos de aplicación en aguas, suelos y cambio climático. En esta revisión, se explora en la primera sección los procesos de pirólisis, materia prima y subproductos. En la siguiente sección se analizan las aplicaciones del biocarbón, como subproducto, en el tratamiento de agua, suelo y reducción de gases de efecto invernadero. Finalmente, realiza un análisis técnico, económico y ambiental del proceso pirolítico. Por ende, la gestión de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales a través de pirólisis, es un proceso sostenible, rentable y replicable.

Palabras clave: biocarbón, pirólisis, residuos sólidos orgánicos municipales, aplicaciones de biocarbón.

ABSTRACT

Solid waste management is a worldwide environmental challenge because it generates water and soil contamination, as well as greenhouse gas emissions, which will increase with the growth of cities and population. For this reason, the treatment of solid waste, especially the organic fraction, through the pyrolysis process is presented as a sustainable alternative with significant benefits such as obtaining by-products, like biochar, which has diverse fields of application in water, soil and climate change. In this review, the first section explores pyrolysis processes, feedstock and by-products. The next section analyzes the applications of biochar, as a by-product, in the treatment of water, soil and reduction of greenhouse gases. Finally, it performs a technical, economic and environmental analysis of the pyrolytic process. Therefore, the management of the organic fraction of municipal solid waste through pyrolysis is a sustainable, profitable and replicable process.

Keywords: biochar, pyrolysis, organic municipal solid waste, biochar applications.

¹Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú

²Red Peruana de Energías Renovables

³Universidad Nacional del Callao, Callao, Perú.

⁴Universidad San Antonio Abad del Cusco, Cusco, Perú

⁵Universidad Nacional Toribio Rodríguez de Mendoza de Amazonas, Instituto de Investigación para el Desarrollo Sustentable de Ceja de Selva

* Autor de correspondencia. E-mail: wildor.gosgot@untrm.edu.pe

I. INTRODUCCIÓN

La gestión de residuos sólidos es una de las tareas más difíciles para las autoridades distritales, provinciales y regionales, debido a la creciente generación de residuos, la manipulación y gestión inadecuadas de los mismos, la insuficiencia de conocimientos técnicos y la falta de conciencia pública. En todo el mundo, las personas abandonan magnitudes crecientes de residuos, y su composición es muy compleja (Chandrupa y Das, 2012).

Entonces, gestionar sosteniblemente estos residuos es un desafío que se afronta en el mundo, por ello, buscar una tecnología que transforme estos residuos en productos que se utilicen en la actividad humana es el camino hacia el cuidado del ambiente. Existen múltiples tecnologías para tratar residuos sólidos orgánicos, pero estas poseen desventajas como la emisión de GEI y otros contaminantes, así como la reducción del valor de residuos (Dunnigan *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2021). Sin embargo, en la actualidad, se viene explorando la pirólisis como de las tecnologías de producción de biocarbón de desechos orgánicos, presentando ventajas y oportunidades importantes, además de diversos campos de aplicación (Yang *et al.*, 2018, Zhou *et al.*, 2021)

De acuerdo a la Iniciativa Internacional de Biocarbón, este es definido como un material sólido obtenido de la biomasa a través de conversión termoquímica con oxígeno limitado (Lee *et al.*, 2018). Por otro lado, definen al biochar como un material sólido carbónico con un alto grado de aromatización y una fuerte capacidad de anti descomposición (Wang *et al.*, 2018). Además, se considera el biocarbón como un producto novedoso debido a sus variadas aplicaciones desde la captura y almacenamiento de carbono, así como la mejora de suelos y su fertilidad (Lee *et al.*, 2018).

En Perú, en la región de Cusco la municipalidad distrital de Machu Picchu viene gestionando la fracción orgánica de los residuos sólidos municipales en una planta de valorización de residuos sólidos orgánicos "Planta Pirolizadora", obteniendo como producto el biocarbón, es por ello que este análisis busca revisar la información relacionada a la obtención de biochar,

subproductos y sus aplicaciones a partir del proceso de pirólisis; en base al caso de estudio mencionado se analiza la sostenibilidad, costos de operación y replicabilidad.

II. PROCESOS TERMOQUÍMICOS DE MATERIA ORGÁNICA

Se incluye dentro de los procesos termoquímicos la pirólisis, torrefacción (seca o húmeda), gasificación y procesamiento hidrotermal, generando diferentes productos. Por lo tanto, para tener una buena calidad de biocarbón es importante elegir el proceso y condiciones de producción adecuadas, ya que estas afectan las propiedades químicas, físicas y biológicas del mismo (Lee *et al.*, 2018; Yang *et al.*, 2018; Zhou *et al.*, 2021)

Pirólisis

Proceso termoquímico en el que materiales orgánicos son sometidos a temperaturas superiores a 400°C en condiciones de bajo o nulo oxígeno, convirtiendo estos materiales a sólidos y líquidos de alta densidad energética. Las transformaciones físicas que ocurren durante este proceso, dependen de la composición del sustrato, la proporción de lignina, celulosa y hemicelulosa, así como de las condiciones del reactor (Escalante *et al.*, 2016).

Torrefacción seca

Se entiende a torrefacción seca como una técnica para la producción de biocarbón la cual emplea una velocidad de calentamiento baja, por eso es a veces denominada pirólisis suave. Sin embargo, el mecanismo que se emplea es un proceso incompleto de pirólisis, sucede a una temperatura de 200 a 300°C, con un tiempo de residencia menor a 30 min, con una velocidad de calentamiento menor a 50°C/min. Este proceso se divide en cuatro fases: calentamiento, secado, torrefacción y enfriamiento (Yaashikaa *et al.*, 2020).

Gasificación

Proceso en que la biomasa se incinera en una secuencia de dos reacciones. En primer lugar, se da la carbonización con gasificación de la madera, conversión que también ocurre en la pirólisis lenta; obteniendo

carbón. En segundo lugar, se lleva a cabo la gasificación del carbón, donde el carbón se convierte en ceniza (Escalante *et al.*, 2016).

Carbonización hidrotermal

La carbonización hidrotermal o torrefacción húmeda, obtiene biocarbón a través de un proceso similar al de pirólisis, sin embargo, se diferencia en la presencia de agua subcrítica en el proceso para la descomposición de materia prima (Lee *et al.*, 2018). Este proceso se considera rentable y con una alta eficiencia de producción de

biocarbón, además opera a una temperatura baja entre 180 a 250 ° C (Yaashikaa *et al.*, 2020 y Lee *et al.*, 2018).

III. EFICIENCIA DE LOS PROCESOS TERMOQUÍMICOS

En la eficiencia de estos procesos intervienen factores como la temperatura, tiempo de residencia, velocidad de calentamiento; estos influyen en el rendimiento de la generación de los subproductos de cada proceso (Tabla 1).

Tabla 1. Eficiencia de los procesos termoquímicos

Proceso	Temperatura (°C)	Tiempo de residencia	Velocidad de calentamiento (°C/min)	Rendimiento (%)			Referencia
				Biocarbón	Bioaceite	Syngas	
Lenta	300-800	> 60min	5-7	30-55	-	-	(Ghodake <i>et al.</i> , 2021)
	300-800	> 60min	5-7	35-50	-	-	(Lee <i>et al.</i> , 2018)
	300	25min	6-48	25-65	-	-	(Hasan <i>et al.</i> , 2021; Lu <i>et al.</i> , 2020)
	300-700	>2s	-	35	30	35	(Cantrell <i>et al.</i> , 2012; Yaashikaa <i>et al.</i> , 2020)
Pirólisis Rápida	400-600	1-10 s	300-800	16-37	-	-	(Ghodake <i>et al.</i> , 2021)
	400-600	0.5-10 s	300-800	15-35	-	-	(Lee <i>et al.</i> , 2018)
	400-700	25min	10-100	10-25	40-70	10-20	(Hasan <i>et al.</i> , 2021; Sipra <i>et al.</i> , 2018)
	500-1000	-	-	12	75	13	(Cantrell <i>et al.</i> , 2012; Yaashikaa <i>et al.</i> , 2020)
Flash	400-1000	2-3s	1000	11-22	-	-	(Ghodake <i>et al.</i> , 2021)
	400-1000	<2s	1000	10-20	-	-	(Lee <i>et al.</i> , 2018)
	700-900 o más	<0.5s	1000	10-15	10-20	60-80	(Garcia <i>et al.</i> , 2020; Hasan <i>et al.</i> , 2021; Katakai <i>et al.</i> , 2018)
	300-600	<30min	-	37	-	-	(Nunoura 2005; Yaashikaa <i>et al.</i> , 2020,)
Torrefacción seca	200-300	30 min-4h	10-15	60-80	-	-	(Lee <i>et al.</i> , 2018)
	290	10-60min	-	80	0	20	(Bergman <i>et al.</i> , 2005; Yaashikaa <i>et al.</i> , 2020)
Gasificación	750-1000	10-20s	1000	14-25	-	-	(Ghodake <i>et al.</i> , 2021)
	600-1200	10-20s	50-100	<10	-	-	(Lee <i>et al.</i> , 2018)
	750-900	10-20s	-	10	5	85	(Klinghoffer <i>et al.</i> , 2015; Yaashikaa <i>et al.</i> , 2020)
Carbonización hidrotermal	180-260	5 min -12h	5-10	45-70	5-20	2-5	(Lee <i>et al.</i> , 2018)
	180-300	1-16h	-	50-80	5-20	2-5	(Funke y Ziegler, 2010; Yaashikaa <i>et al.</i> , 2020)

IV. FUENTES DE MATERIA PRIMA PARA LA PIRÓLISIS

Existen numerosos materiales para la obtención del

biocarbón. No obstante, no todo desecho se considera materia prima adecuada para producirlo. Entre las principales materias primas, encontramos: el estiércol

animal, los residuos agrícolas y forestales, los residuos biológicos industriales y los organismos marinos y acuáticos (Zhou *et al.*, 2021); tales como: algas, cáscara de nueces, de naranja y lodos residuales (Brick, 2010) además de plantas secas, desechos de arroz, desechos de papel, y desperdicios orgánicos de una ciudad (Escalante *et al.*, 2016).

En el caso de Machupicchu, la materia prima son los residuos sólidos orgánicos municipales, que son ingresados a la planta de valorización de residuos sólidos orgánicos “Planta Pirolizadora” donde serán transformadas en biochar. Cabe resaltar que el empleo de biomasa residual en la producción de biocarbón es práctico porque la materia prima residual no compite con los cultivos alimentarios y energéticos ni por la tierra cultivable (Lee *et al.*, 2018).

V. PRODUCTOS DE LA PIRÓLISIS DE LOS RESIDUOS

Se obtienen como productos además del biocarbón, syngas y bioaceites, estos se pueden obtener a través de procesos pirolíticos lentos, rápidos o flash. Los productos como el syngas y bioaceite son considerados parte de las energías renovables (Lee *et al.*, 2018, Zhou *et al.*, 2021).

Syngas

El syngas está compuesto de monóxido y dióxido de carbono e hidrógeno. El nombre del producto es la abreviación de gas natural sintético (SNG). Este gas se forma a través del proceso de gasificación, siendo un proceso altamente endotérmico y requiere altas temperaturas (Kataki *et al.*, 2018)

Biocarbón

Es un compuesto rico en carbono obtenido a partir de biomasa calentada a una temperatura entre 300 a 1000 °C, en condiciones de poco oxígeno (Kataki 2018). Esto puede ser alcanzado a través de procesos como la torrefacción seca, carbonización hidrotermal y pirólisis lenta; estos son los que tienen mayor rendimiento de producción, siendo de 60-80, 45-70 y 35-50% respectivamente (Lee *et al.*, 2018). Este producto está compuesto de carbono, hidrógeno, oxígeno, nitróge-

no, azufre y cenizas (Kataki *et al.*, 2018).

Durante la producción de biocarbón, existen factores que influyen tales como la materia prima, temperatura, velocidad de calentamiento, tiempo de residencia, tamaño de las partículas, efecto de los catalizadores, presión, pH inicial, entre otros. (Zhou *et al.*, 2021)

Uno de los factores más influyentes es la temperatura, ya que una menor temperatura de reacción disminuye la eficiencia de los pirolizadores; por otro lado, la velocidad de calentamiento y tamaño de partícula influyen en la composición del syngas o gas de síntesis (Hasan *et al.*, 2021).

La elección de materia prima de biomasa, junto a los métodos de pretratamiento, afectan en el rendimiento y la calidad del biocarbón (Ghodake *et al.*, 2021). Además, según el tipo de biomasa, puede contener diferentes formas de agua o vapor de agua; un mayor contenido de humedad puede inhibir la formación de biocarbón y aumentar la cantidad de energía requerida para el proceso (Jafri *et al.*, 2018), siendo preferible el uso de biomasa con un bajo contenido de humedad para lograr que sea económicamente viable (Yaashikaa2020).

Bioaceites

El bioaceite es un líquido, mezcla de compuestos, obtenido de la condensación de vapores producidos a través del proceso de pirólisis. Al ser un biocombustible con un poder calorífico de 40-50% del de los combustibles hidrocarburos, es considerado como un potencial sustituto de los mismos (Kataki *et al.*, 2018). En la Tabla 2 se observa el rendimiento de diferentes residuos municipales y la temperatura a la que se obtiene un mayor rendimiento. En el proceso pirolítico de residuos sólidos orgánicos municipales, se obtiene un mayor rendimiento de biocarbón (75%) a una temperatura de 500°C.

V. APLICACIONES DEL BIOCARBÓN

Dentro de las aplicaciones del biocarbón, la eliminación de contaminantes del suelo y ambiente acuoso son de las más importantes, lo cual es determinado según el tipo de biomasa y temperatura

Tabla 2. Principales fuentes de materia prima orgánica y rendimiento de productos durante el proceso de pirólisis.

Residuo	Temperatura (°C)	Rendimiento (%)			Referencia
		Bioaceite	Biocarbón	Syngas	
Residuos Municipales Mixtos	500	22	34	44	(Hasan <i>et al.</i> , 2021; Li <i>et al.</i> ,2011)
	550	8	65	27	(Hasan <i>et al.</i> , 2021; Li <i>et al.</i> ,1999)
	650	5	54	41	(Hasan <i>et al.</i> , 2021; Li1999)
	750	3	41	56	(Hasan <i>et al.</i> , 2021; Li <i>et al.</i> ,1999)
	850	1	36	63	(Hasan <i>et al.</i> , 2021; Li <i>et al.</i> , 1999)
Fracción orgánica de residuos sólidos municipales	700	40	22	38	(Yang <i>et al.</i> , 2018)
	500	56	32	12	(Park <i>et al.</i> , 2021)
	500	60	32	7	(Opatokun <i>et al.</i> ,2015)
	500	60	32	7	(Opatokun <i>et al.</i> ,2016)
	800	62	23	15	(Grycová <i>et al.</i> ,2016)
	500	75	5	20	(Ben Hassen-Trabelsi <i>et al.</i> , 2014)
	600	30	24	45	(González <i>et al.</i> , 2009)
	600	36	35	29	(Liu <i>et al.</i> , 2014)
	700	33	26	37	(Serio <i>et al.</i> , 2008)
700	30	33	37	(Xu <i>et al.</i> , 2020)	
Estiércol de cerdo	200	-	98	-	(Liu <i>et al.</i> , 2015)
	300	-	57.5	-	(Liu <i>et al.</i> ,2015)
	400	-	38.5	-	(Lee <i>et al.</i> , 2018; Liu <i>et al.</i> , 2015)
	500	-	35.8	-	(Liu <i>et al.</i> ,2015)
	500	-	38.5	-	(Liu <i>et al.</i> ,2015; Zhao <i>et al.</i> , 2013)
Estiércol de vaca	500	-	57.2	-	(Liu <i>et al.</i> ,2015; Zhao <i>et al.</i> , 2013)
Residuos de papel	500	-	36.6	-	(Zhao <i>et al.</i> , 2013)

de pirólisis aplicada (Yaashikaa *et al.*, 2020).

Por las propiedades del biocarbón, en cuanto a suelos, interviene en la remediación y mejora de sus propiedades (Gautam *et al.*, 2021), enmienda del mismo, secuestro de carbono y nuevos productos, considerados aditivos renovables, tales como sorbentes, fertilizantes y agentes de bioaumentación, que tienen como fin la mejora del hábitat microbiano (Ghodake *et*

al., 2021); por otro lado, también se observó que puede reducir los metales pesados y contaminantes orgánicos, debido a sus propiedades como la estructura y superficie de contacto (Wang *et al.*, 2018). Los beneficios del biocarbón tiene dos grandes propiedades, permite a las plantas crecer bien y es extremadamente estable pues es perdurable en el tiempo durante cientos y hasta miles de años. (Lehmann *et al.*, 2011).

Tabla 3. Aplicaciones de biocarbón

Aplicación	Descripción	Referencias
Catalizador ácido a base de biocarbón para la producción de biodiesel	El biochar se usa como material de apoyo en la elaboración de catalizadores ácidos, tras procesos de esterificación y transesterificación	(Dehkhoda <i>et al.</i> , 2010; Li <i>et al.</i> , 2013)
Catalizadores a base de biocarbón para la limpieza de alquitrán	Biochar preparado a base de catalizadores sólidos sulfados. Se evidencia su reuso. Catalizadores de carbono ácido en los cuales el biochar producido se usa para la elaboración de biodiesel. Entre los tipos de catalizadores se encuentran hechos a base de metales, zeolita, alkaLi <i>et al.</i> y níquel.	(Asadullah. 2014; Han <i>et al.</i> , 2014; Klinghoffer <i>et al.</i> , 2015; Mani <i>et al.</i> , 2013; Wang <i>et al.</i> , 2011)
Biocarbón como biofertilizantes	Aumenta la capacidad de intercambio catiónico, incrementando la fertilidad del suelo.	(Barrow, 2012; Ippolito <i>et al.</i> , 2016; Sohi <i>et al.</i> , 2010; Yuan <i>et al.</i> , 2011)
Material Adsorbente	El biochar tiene una gran superficie de contacto y una red porosa bien organizada, lo que le permite la remoción de metales pesados.	(Li <i>et al.</i> , 2010; Mohan <i>et al.</i> , 2011)
Material de almacenamiento	Uso de biochar activado para la preparación de electrodos de supercapacitores.	(Dehkhoda <i>et al.</i> , 2014; Gu <i>et al.</i> , 2015; Zhang <i>et al.</i> , 2014)
Celda combustible microbiana	Preparación de biochar a partir de lodos de desagüe. Asimismo, se elaboró biochar grafitico, en ambos casos reduciendo el costo de producción y la huella de carbono a largo plazo.	(Huggins <i>et al.</i> , 2015; Yuan <i>et al.</i> , 2015)

Tratamiento de aguas

El biocarbón tiene muchas aplicaciones entre ellas para el tratamiento de aguas contaminadas como, por ejemplo, el biocarbón preparado con lodos activados de residuos de petróleo facilita la biodegradación de los compuestos orgánicos y además se desarrollaron comunidades microbianas favorables con una mayor abundancia de degradadores de petróleo y desnitrificadores (Wang *et al.*, 2020). La combinación de biocarbón de cáscara de café con lodos activados para crear un sistema de lodos tiene potencial para eliminar el amonio en aguas residuales con baja relación C/N y alta concentración de amonio (Vu *et al.*, 2021) y la alta tasa de producción de biomasas de algas producidas es atractiva para su conversión en biocarbón volátil. Para producir biocarbón a base de microalgas, son adecuadas las técnicas de conversión termoquímica, como la torrefacción, la pirólisis y la carbonización hidrotérmica, y las modificaciones están destinadas a optimizar su rendimiento y sus propiedades (Xu *et al.*, 2020).

Tratamiento de suelos

El suelo es un recurso esencial para la actividad agrícola, la cual satisface la demanda global de alimentos y,

por lo tanto, necesita condiciones adecuadas para obtener el mayor rendimiento (FAO, 2015, Hungria *et al.*, 2016). Sin embargo, debido al bajo contenido de nutrientes y mineralización acelerada de la materia orgánica del suelo (Renner, 2007), los suelos se encuentran con problemas de degradación afectando la productividad de los cultivos (Trupiano *et al.*, 2017).

El biocarbón se ha descrito como una posible herramienta para la mejoría fertilidad del suelo y la posible absorción de elementos tóxicos (Ennis 2012). Varios estudios han demostrado que la aplicación de este en el suelo puede (i) mejorar sus propiedades físicas y químicas (Aslam *et al.*, 2014) ; ii) mejorar la disponibilidad de nutrientes de las plantas y el crecimiento y rendimiento correlacionados (Biederman y Harpole, 2013) La mezcla de biochar a suelos infértiles ha tenido efectos positivos, por ejemplo, aumentando su capacidad de retener fósforo (P) y disminuyendo la lixiviación de nitrógeno (N), asimismo, puede aportar a la biodisponibilidad del mismo, contribuyendo a la reducción en el uso de fertilizantes nitrogenados. (Zhang *et al.*, 2016, Zheng *et al.*, 2013)

VI. CONSIDERACIONES TÉCNICAS, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

Los residuos orgánicos municipales son una de las materias primas más rentables y ecológicas a comparación con otras fuentes de energía renovable (Hasan *et al.*, 2021). Se produce biocarbón a partir de esta como sustrato y a través de métodos termoquímicos, como la pirólisis, mejorando el desarrollo de las áreas rurales y también benefician a las pequeñas y grandes empresas; siendo una solución para la gestión de residuos y también teniendo beneficios en la disminución de gases de efecto invernadero y baja de costos en la gestión de residuos sólidos (Yaashikaa *et al.*, 2020, Shah *et al.*, 2021). Es así que el proceso de pirólisis, es rentable y sostenible, ya que se conecta a otros sistemas de producción, alineándose a la economía circular en el ámbito social, económico y ambiental (Yaashikaa *et al.*, 2020, Lee *et al.*, 2018).

Para implementar una planta pirolizadora, es clave su viabilidad comercial, donde el costo de producción juega un rol importante. El costo asociado a producción de la planta puede dividirse en dos grupos principales: a) Inversión de capital o costo fijo (módulo de pirólisis, manejo y almacenamiento de materia prima, y desarrollo de instalaciones), b) costos operativos o variables (recolección de materia prima, mantenimiento, transporte, mano de obra, servicios públicos) (Kataki *et al.*, 2018).

Por otro lado, también es importante la tecnología del proceso, tamaño de la planta y materia prima (Kataki *et al.*, 2018). Según lo analizado en el caso de estudio, la materia prima tiene un costo reducido, y el tamaño de la planta es mediano. Sin embargo, debido a la ubicación y accesibilidad al área, es que puede ver un aumento en los costos operativos, sumado a ello, se puede ver un incremento en el costo de producción según la metodología de selección de residuos orgánicos. Finalmente, al tener un bajo costo de producción, amplia disponibilidad y aplicaciones variadas, es que su potencial está atrayendo la atención (Tang *et al.*, 2019) y puede ser considerada una alternativa rentable considerando los factores mencionados.

Las estrategias de residuos sólidos en los países subdesarrollados se encuentran en una etapa aún temprana (Kaza *et al.*, 2018, Wainaina *et al.*, 2020), reflejadas principalmente en estrategias de compostaje y vertederos, a pesar de ello, el potencial de recuperación de recursos es alto, por lo cual necesario implementar tecnologías híbridas modernas que se integren a planes provinciales o nacionales de gestión de residuos (Babu *et al.*, 2021).

VI. CONCLUSIONES

La gestión de la fracción orgánica de residuos sólidos municipales a través de pirólisis, de acuerdo a la revisión, es un proceso sostenible, rentable y replicable. Sostenible, debido a la accesibilidad de la materia prima, beneficios ambientales y conexión a otros sistemas de producción, fomentando la economía circular. Rentable, en virtud a su bajo costo de producción, disponibilidad de materia prima, y con potencial de aplicación variado, siempre y cuando, se consideren como factores clave la tecnología del proceso, tamaño de la planta, materia prima y accesibilidad. Replicable en la región, ya que la materia prima se define como rentable y accesible a escala municipal. Considerando ello, se puede decir que la aplicación de este proceso puede ser una solución viable al reto global de gestión de residuos sólidos, con diversas aplicaciones ambientales, contribuyendo a la forestación de parques y jardines de la ciudad y a la reducción de GEI como principales aportes al desarrollo sostenible.

VII. CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Todos los autores participaron en la redacción del manuscrito inicial, revisión bibliográfica, y en la revisión y aprobación del manuscrito final.

VIII. CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Afzal, M. Z., X. F. Sun, J. Liu, C. Song, S. G. Wan y, A.

- Javed. 2018. "Enhancement of ciprofloxacin sorption on chitosan/biochar hydrogel beads". *Science of the Total Environment* 639 (1) : 5 6 0 - 5 6 9 . D O I : 10.1016/j.scitotenv.2018.05.129
- Amin, F. R., Y. Huang, Y. He, R. Zhang, G. Liu y C. Chen. 2016. "Biochar applications and modern techniques for characterization". *Clean Technologies and Environmental Policy* 18 (2 0 1 6) : 1 4 5 7 - 1 4 7 3 . 10.1016/j.chemosphere.2013.10.071
- Ahmad, J., F. Patuzzi, U. Rashid, M. Shahabz, C. Ngamcharussrivichai y M. Baratieri. 2021. "Exploring untapped effect of process conditions on biochar characteristics and applications". *Environmental Technology & Innovation* 2 1 (1) : 1 0 1 - 3 1 0 . D O I : 10.1016/j.eti.2020.101310
- Alam, O. y X. Qiao. 2020. "An in-depth review on municipal solid waste management, treatment and disposal in Bangladesh". *Sustainable Cities and Society* 52 (2): 101-775. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101775
- Alonos- Gómez, L., A. Cruz, D. Jiménez, Á. Ocampo y S. Parra. 2016." Biochar como enmienda en un oxisol y su efecto en el crecimiento de maíz". *Revista UDCA Actualidad & Divulgación Científica* 19(2): 341-349.
- Amoah-Antwi, C.J., J. Kwiatkowska, SF. Thornton, O. Fenton, G. Malina y E. Szara. 2020. "Restoration of soil quality using biochar and brown coal waste: A review". *Science of the Total Environment* 722 (1): 137-852. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.137852
- Asadullah, M., 2014 "Biomass gasification gas cleaning for downstream applications: A comparative critical review". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (1) : 1 1 8 - 1 3 2 . D O I : 10.1016/j.rser.2014.07.132
- Asadullah, M., S.I. Ito, K. Kunimori, M. Yamada y K. Tomishige,. 2020. "Biomass Gasification to Hydrogen and Syngas at Low Temperature: Novel Catalytic System Using Fluidized-Bed Reactor". *Journal of Catalysis* 208 (2): 255–259. DOI: 10.1006/jcat.2002.3575
- Aslam Z., M. Khalid and M. Aon. 2014. "Impact of Biochar on Soil Physical Properties". *Scholarly Journal of Agricultural Science* 4 (5): 280-284.
- Babu, R., P. Veramendi y E.R. Rene. 2021. "Strategies for resource recovery from the organic fraction of municipal solid waste". *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering* 3 (1) : 1 0 0 0 9 8 . D O I : 10.1016/j.cscee.2021.100098
- Barrow, C.J. 2012. "Biochar: Potential for countering land degradation and for improving agriculture". *Applied Geography* 34 (2): 21–28. DOI: 10.1016/j.apgeog.2011.09.008
- Ben Hassen-Trabelsi, A., T. Kraiem, S. Naoui y H. Belayouni. "Pyrolysis of waste animal fats in a fixed-bed reactor: Production and characterization of bio-oil and bio-char". *Waste Management*, 34.1(2014):210–218.
- Bergman, P. C. A., A. Boersma, R. Zwart y J.H.A. Kiel. 2005. "Torrefaction for biomass co-firing in existing coal-fired power stations". In *Energy research Centre of the Netherlands* 1 (1): 17-21.
- Biederman, L.A. y W.S. Harpole. 2006. "Biochar and its effects on plant productivity and nutrient cycling: a meta-analysis". *GCB Bioenergy* 5(1): 202-214. DOI: 10.1111/gcbb.12037
- Brick, S. 2010. "Biochar: Assessing the promise and risks to guide U.S. policy". *Natural Resources Defense Council. USA*. 1(1):1-24.
- Cantrell, K. B., P.G. Hunt, M. Uchimiya, J.M. Novaky K.S. Ro. 2012. "Impact of pyrolysis temperature and manure source on physicochemical characteristics of biochar". *Bioresource Technology* 1 0 7 (1) : 4 1 9 - 4 2 8 . D O I : 10.1016/j.biortech.2011.11.084
- Ccahua, K. 2018. "Aplicación de Biochar en Mezclas

- y Sustratos”. *Readlyc.org* 1 (1): 1-12. DOI: 10.22517/23447214.17691
- Chandrappa, R. y D.B. Das. 2012. *Solid waste management: Principles and practice*. Springer Science & Business Media. 11(6): 393-411. DOI: 10.1007/978-3-642-28681-0
- Chen, D., L. Yin, H. Wang and P. He. 2014. “Pyrolysis technologies for municipal solid waste: A review”. *Waste Management* 34 (12): 2466 – 2486 . DOI : 10.1016/j.wasman.2014.08.004
- Dehkoda, A.M., A.H. West, y N. Ellis. 2010. “Biochar based solid acid catalyst for biodiesel production”. *Applied Catalysis. A General* 382 (2): 197–204. DOI: 10.1016/j.apcata.2010.04.051
- Dunnigan, L., B. J. Morton, P. J. Ashman, X. Zhang y C. W. Kwong, 2018. “Emission characteristics of a pyrolysis-combustion system for the co-production of biochar and bioenergy from agricultural wastes”. *Waste Management* 77 (1) : 59 - 66 . DOI : 10.1016/j.wasman.2018.05.004
- Ennis C., A. G. Evans, M. Islam, T. K. Ralebitso and E. Senior. 2012. “Biochar: Carbon Sequestration, Land Remediation, and Impacts on Soil Microbiology”. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 42 (22): 2311 - 2364 . DOI : 10.1080/10643389.2011.574115
- Escalante, A., G. Pérez, C. Hidalgo, J.López, J. Campo, E. Valtierra y J. D. Etchevers 2016. “Bio-carbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo”. *Terra Latinoamericana* 34(3): 367-382.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) .2015. *Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables* . <https://www.fao.org/soils-2015/news/news-detail/es/c/277721/> (Consultada el 24 de noviembre 2021)
- Fiallos-Ortega, L. R., L.G. Flores, N. Duchi, C.I. Flores, A. Baño y L. Estrada. 2015. “Restauración ecológica del suelo aplicando biochar (carbón vegetal), y su efecto en la producción de Medicago sativa”. *Ciencia y Agricultura* 12 (2): 13-20. DOI: 10.19053/01228420.4349
- Funke, A. y F. Ziegler. 2010. “Hydrothermal carbonization of biomass: A summary and discussion of chemical mechanisms for process engineering”. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4 (2): 160–177. DOI: 10.1002/bbb.198
- García, A. M., I. Santé, X. Loureiro and D. Miranda. 2020. “Green infrastructure spatial planning considering ecosystem services assessment and trade-off analysis. Application at landscape scale in Galicia region (NW Spain)”. *Ecosystem Services* 43 (1): 101115. DOI: 10.1016/j.ecoser.2020.101115
- Gautam, R. K., M. Goswami, R.K. Mishra, P. Chaturvedi, M.K. Awashthi, R.S. Singh, B.S. Giri y A. Pandey. 2021. “Biochar for remediation of agrochemicals and synthetic organic dyes from environmental samples: A review”. *Chemosphere* 272 (1): 129917. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2021.129917
- González, J. F., S. Román, J. M. Encinar y G. Martínez. 2009. “Pyrolysis of various biomass residues and char utilization for the production of activated carbons”. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 85 (1-2): 134–141. DOI: 10.1016/j.jaap.2008.11.035
- Ghodake, G. S., S. K. Shinde, A.A. Kadam, R.C. Saratale, G.D. Saratale, M. Kumar, R.R. Palem, H.A. AL-Shwaiman, A.M. Elgorban, A. Syed y D.Y. Kim. 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: 126645. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.126645

- Grycová, B., I. Koutník. y A. Prysycz. 2016. “Pyrolysis process for the treatment of food waste”. *Bioresource Technology* 218: 1203–1207. DOI: 10.1016/j.biortech.2016.07.064
- Gu, X., Y. Wang, C. Lai, J. Qiu, S. Li, Y. Hou, W. Martens, N. Mahmood y S. Zhang. 2015. “Microporous bamboo biochar for lithium-sulfur batteries”. *Nano Research*, 8(1):129–139.
- Han, J., X. Wang, J. Yue, S. Gao y G. Xu. 2014. “Catalytic upgrading of coal pyrolysis tar overchar-based catalysts”. *Fuel Processing Technology*, 122: 98–106. DOI: 10.1016/j.fuproc.2014.01.033
- Hasan, M. M., M.G. Rasul, M.M.K. Khan, N. Ashwath y M.I. Jahirul. 2021. “Energy recovery from municipal solid waste using pyrolysis technology: A review on current status and developments”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 145: 111073. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111073
- Huggins, T., H. Wang, J. Kearns y P. Jenkins. 2014. “Ren.Biochar as a sustainable electrode material for electricity production in microbial fuel cells”. *Bioresource Technology* 157 (1): 114–119. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2014.01.058>
- Huggins, T.M., J.J. Pietron, H. Wang, Z.J. Ren y J.C. Biffinger. 2015. “Graphitic biochar as a cathode electrocatalyst support for microbial fuel cells”. *Bioresource Technology*, 195(1): 147–153. DOI: 10.1016/j.biortech.2015.06.012
- Hungria, M., M. Nogueira y R. Araujo. 2016. “Inoculation of *Brachiaria* spp. with the plant growth-promoting bacterium *Azospirillum* brasilense: An environment-friendly component in the reclamation of degraded pastures in the tropics”. *Agriculture Ecosystems & Environment* 221: 125–131. DOI: 10.1016/j.agee.2016.01.024
- Ippolito, J.A., M.E. Stromberger, R.D. Lentz y R.S. Dungan. 2016. “Hardwood biochar and manure co-application to a calcareous soil”. *Chemosphere* 142 (2): 84–91. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.05.039
- Jafri, N., W.Y. Wong, V. Doshi, L.W. Yoon y K.H. Cheah. 2018. “A review on production and characterization of biochars for application in direct carbon fuel cells”. *Process Safety and Environmental Protection* 118 (1): 152–166. DOI: 10.1016/j.psep.2018.06.036
- Jayawardhana, Y., S.R. Gunatilake, K. Mahatantila, M.P. Ginige y M. Vithanage. 2019. “Sorptive removal of toluene and m-xylene by municipal solid waste biochar: Simultaneous municipal solid waste management and remediation of volatile organic compounds”. *Journal of Environmental Management* 238 (1): 323–330. DOI: 10.1016/j.jenvman.2019.02.097
- Jayawardhana, Y., S.S. Mayakaduwa, P. Kumarathilaka, S. Gamage, y M. Vithanage. “Municipal solid waste-derived biochar for the removal of benzene from landfill leachate”. *Environmental Geochemistry and Health* 41 (4): 1739–1753.
- Kataki, R., N.J. Bordoloi, R. Saikia, D. Sut, R. Narzari, L. Gogoi y N. Bhuyan. 2018. “Waste Valorization to Fuel and Chemicals Through Pyrolysis: Technology, Feedstock, Products and Economic Analysis”. *Energy, Environment, and Sustainability* 1(3): 477–514.
- Kaza, S., L. Yao, P. Bhada y F. Woerden. 2018. “What a waste 2.0: una instantánea global de la gestión de residuos sólidos hasta 2050”. *Publicaciones del Banco Mundial* 6 (2): 219–305. DOI: 10.1596/978-1-4648-1329-0
- Klinghoffer, N. B., M. J. Castaldi y A. Nzihou. 2015. “Influence of char composition and inorganics on catalytic activity of char from biomass gasification”. *Fuel*, 157 (2): 37–47. DOI: 10.1016/j.fuel.2015.04.036

- Ro, K. S., I.M. Lima, G. B. Reddy y M. A Jackson. 2015. "Removing Gaseous NH₃ Using Biochar as an Adsorbent". *Agriculture* 5 (4): 991–1002. DOI: 10.3390/agriculture5040991
- Laird, D. A., R. C. Brown J. E. Amonette and J. Lehmann. 2009. "Review of the pyrolysis platform for coproducing bio-oil and biochar". *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 3 (5):547-562. DOI: 10.1002/bbb.169
- Lal, R. 2004. "Soil carbon sequestration impact on global climate change and food security". *Science*, 304 (5): 1623-1627. DOI: DOI: 10.1126/science.1097396
- Lee, J., A.K. Sarmah y E. E. Kwon. 2018. "Production and formation of biochar". *Biochar from Biomass and Waste: Fundamentals and Applications* 1 (1) :3–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811729-3.00001-7>
- Lee, J. W., B. Hawkins, D.M. Day y D.C. Reicosky. 2010. "Sustainability: the capacity of smokeless biomass pyrolysis for energy production, global carbon capture and sequestration". *Energy & Environmental Science* 3 (11):1695-1705. DOI: 10.1039/C004561F
- Lehmann, J., M.C. Rillig, J. Thies, C.A. Masiello, W. Hockaday y D. Crowley. 2011. "Biochar effects on soil biota – A review". *Soil Biology and Biochemistry* 43 (9):1812-1836. DOI: 10.1016/j.soilbio.2011.04.022
- Li, A. M., X. D. Li, S.Q. Li, Y. Ren, Y. Chi, J.H. Yan y K.F. Cen. 1999. "Pyrolysis of solid waste in a rotary kiln: Influence of final pyrolysis temperature on the pyrolysis products". *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis* 50 (2):149–162. DOI: 10.1016/S0165-2370(99)00025-X
- Li, L., Yao., You, S., Wang, C., Chong y X. Wang. 2019. "Optimal design of negative emission hybrid renewable energy systems with biochar production". *Applied Energy*, 243 (2): 233 - 249 . DOI : 10.1016/j.apenergy.2019.03.183
- Li, S., A. Sanna y J.M. Andresen. 2011. "Influence of temperature on pyrolysis of recycled organic matter from municipal solid waste using an activated olivine fluidized bed". *Fuel Processing Technology* 92 (9): 1776–1782. DOI: 10.1016/j.fuproc.2011.04.026
- Li, Z., Q. Tang, T., Katsumi, X. Tang, T. Inui, S. Imaizumi. 2010. "Leaf char: An alternative adsorbent for Cr (III)". *Desalination* 264 (1-2):70–77. DOI: 10.1016/j.desal.2010.07.006
- Liu, H., X. Ma, L. Li, Z.F. Hu, P. Guo y Y.Jiang. 2014. "The catalytic pyrolysis of food waste by microwave heating". *Bioresource Technology* 166 (3) : 45 – 50 . DOI : 10.1016/j.biortech.2014.05.020
- Lu, J. S., Y. Chang, C.S. Poon, D. J. Lee. 2020. "Slow pyrolysis of municipal solid waste (MSW): A review". *Bioresource Technology*, 312 (2020) : 123615 . DOI : 10.1016/j.biortech.2020.123615
- Mani, S., J.R. y Kastner, A. Juneja. 2013. "Catalytic decomposition of toluene using a biomass derived catalyst". *Fuel Processing Technology* 114 : 118 – 125 . DOI : 10.1016/j.fuproc.2013.03.015
- Masiello CA and E.R.M. Druffel. 1998. "Black carbon in deep-Sea sediments". *Science*. 280 (2) : 1911 - 3 . DOI : 10.1126/ciencia.280.5371.1911
- Mohan, D., S. Rajput, V.K. Singh, P.H. Steele y C.U. Pittman. 2011. "Modeling and evaluation of chromium remediation from water using low-cost bio-char, a green adsorbent". *Journal of Hazardous Material*, 188 (1-3): 319–333. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2011.01.127
- Nunoura, T., S.R. Wade, J.P. Bourke y M.J. Antal. 2005. "Studies of the Flash Carbonization Process. 1. Propagation of the Flaming Pyrolysis Reaction and Performance of a Catalytic Afterburner". *Industrial and Engi-*

- neering Chemistry Research*, 45 (2):585–599. DOI: 10.1021/ie050854y
- Opatokun, S. A., T. Kan, A. Al Shoaibi, C.Srinivasakannan y V. Strezov. 2016. “Characterization of Food Waste and Its Digestate as Feedstock for Thermochemical Processing”. *Energy and Fuels*, 30, 3 (2016): 1589–1597. DOI: 10.1021/acs.energyfuels.5b02183
- Opatokun, S. A., V. Strezov y T. Kan. 2015. “Product based evaluation of pyrolysis of food waste and its digestate”. *Energy* 92:349–354. DOI: 10.1016/j.energy.2015.02.098
- Pariona-Palomino, J., W. Matos y E. Huilca. 2020. “Biochar como tecnología de emisión negativa frente al cambio climático”. *South Sustainability*, 1 (2): 1-8. DOI: 10.21142/SS-0102-2020-014
- Park, C., N. Lee, J. Kim y J. Lee. “Co-pyrolysis of food waste and wood bark to produce hydrogen with minimizing pollutant emissions”. *Environmental Pollution* 270 (1):116045. DOI: 10.1016/j.envpol.2020.116045
- Penido, E. S., G.C. Martins, T. B. M. Mendes, L. C. A., Melo, I. do Rosário Guimarães y L. R. G. Guilherme. 2019. “Combining biochar and sewage sludge for immobilization of heavy metals in mining soils”. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 172 (1): 326–333. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2019.01.110
- Renner, R. 2007. “Rethinking biochar”. *Environment Science and Technology* 41 (1): 5932-5933.
- Sakhiya, A. K., A. Anand y P. Kaushal. 2020. “Production, activation, and applications of biochar in recent times”. *Biochar* 2 (3): 253-285.
- Shah, A. V., V.K. Srivastava, S.S. Mohanty y S. Varjani. 2021. “Municipal solid waste as a sustainable resource for energy production: State-of-the-art review”. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 9 (4): 105717. DOI: 10.1016/j.jece.2021.105717
- Schmidt, M.W.I y A.G. Noack. 2000. “Black Carbon in Soils and Sediments: Analysis, Distribution, Implications, and Current Challenges”. *Global Biogeochemical Cycles*, 14 (3):777-793. DOI: 10.1029/1999GB001208
- Serio, M., E. Kroo, E. Florczak, M. Wójtowicz, K. Wignarajah, J. Hogan y J. Fisher. 2008. “Pyrolysis of mixed solid food, paper, and packaging wastes”. *SAE Technical Papers*, 724 (2): 1-8.
- Smith, P. 2016. “Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies”. *Global Change Biology* 22 (3): 1315-1324. DOI: 10.1111/gcb.13178
- Sipra, A. T., N. Gao y H. Sarwar. 2018. “Municipal solid waste (MSW) pyrolysis for bio-fuel production: A review of effects of MSW components and catalysts”. *Fuel Processing Technology* 175 : 131–147. DOI: 10.1016/j.fuproc.2018.02.012
- Sohi, S.P., E. Krull, E. Lopez y R. Bol. 2010. “Chapter 2 - A Review of Biochar and Its Use and Function in Soil”. *Advances in Agronomy*. 105 (1): 47–82. 10.1016/S0065-2113(10)05002-9.
- Tang, Y., M.S. Alam, K.O. Konhauser, D.S. Alessi, S. Xu, W.J. Tian y Y. Liu. 2019. “Influence of pyrolysis temperature on production of digested sludge biochar and its application for ammonium removal from municipal wastewater”. *Journal of Cleaner Production* 209: 927–936. 10.1016/j.jclepro.2018.10.268
- Trupiano, D., C. Cocozza, S. Baronti, C. Amendola, F. P. Vaccari, G. Lustrato, S. Di Lonardo, F. Fantasma, R. Tognetti y G. S. Scippa. 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 (1): 1-12. 10.1155/2017/3158207
- Vu, N.-T., T.H. Ngo, T.T. Nguyen y K.U. Do. 2021. “Performances of coffee husk biochar addition in a lab-scale SBR system for treating low

- carbon/nitrogen ratio wastewater”. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 1-10.
- Wang B., B. Gao y J. Fang. 2018. “Recent advances in engineered biochar productions and applications”. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 47 (22): 2158 – 2207 DOI: 10.1080/10643389.2017.1418580
- Wang, X., J. Ming, C.M. Chen, B.A. Yoza, Q.W. Li, J.H. Liang, G.M. Gadd y Q. H. Wang. 2020 “Rapid aerobic granulation using biochar for the treatment of petroleum refinery wastewater”. *Petroleum Science* 17 (5):1411–1421.
- Wainaina, S., M.K. Awasthi, S. Sarsaiya, H. Chen, E. Singh, A. Kumar, B. Ravindran, S.K. Awasthi, T. Liu, Y. Duan, S. Kumar, Z. Zhang y M.J. Taherzadeh.2020. “Resource recovery and circular economy from organic solid waste using aerobic and anaerobic digestion technologies”. *Bioresour Technol* 301: 122778. DOI: 10.1016/j.biortech.2020.122778
- Woolf, D., J.E. Amonette, F.A. Street-Perrott, J. Lehmann y S. Joseph. 2021. “Sustainable biochar to mitigate global climate change”. *Nature Communications* 1 (1): 1-9.
- Xu, F., X. Ming, R. Jia, M. Zhao, B. Wang, Y. Qiao y Y. Tian.2020. “Effects of operating parameters on products yield and volatiles composition during fast pyrolysis of food waste in the presence of hydrogen”. *Fuel Processing Technology* 210 (2): 106558. DOI: 10.1016/j.fuproc.2020.106558
- Yaashikaa, P. R., P.S. Kumar, S. Varjani y A. Saravanan. 2020. “A critical review on the biochar production techniques, characterization, stability and applications for circular bioeconomy”. *Biotechnology Reports* 28: e00570. DOI: 10.1016/j.btre. 2020.e00570
- Yang, Y., S. Heaven, N. Venetsaneas C.J. Banks y A.V. Bridgwater.2018. “Slow pyrolysis of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Characterisation of products and screening of the aqueous liquid product for anaerobic digestion”. *Applied Energy*, 213 (3), 158–168. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.01.018
- Yang, Q., O. Mašek, L. Zhao, H. Nan, S. Yu, J. Yin y X. Cao. 2021. “Country-level potential of carbon sequestration and environmental benefits by utilizing crop residues for biochar implementation”. *Applied Energy* 282 (2): 116275. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116275
- Yang, X., A.D. Igalavithana, S.E. Oh, H. Nam, M. Zhang, C.H. Wang, E.E. Kwon, D.C. Tsang y Y. S Ok. 2018. “Characterization of bioenergy biochar and its utilization for metal/metalloid immobilization in contaminated soil”. *Science of the Total Environment* 640–641 (1) : 704 – 713 . DOI : 10.1016/j.scitotenv.2018.05.298
- Yao, H., J. Lu, J. Wu, Z. Lu, P.C. Wilson y Y. Shen. 2013. “Adsorption of Fluoroquinolone Antibiotics by Wastewater Sludge Biochar: Role of the Sludge Source”. *Water, Air, & Soil Pollution* 224 (1): 1-9.
- Yuan, J.-H., R.K. Xu, N. Wang y J.Y. Li. 2011. “Amendment of Acid Soils with Crop Residues and Biochars”. *Pedosphere* 21(3):302–308. DOI: 10.1016/S1002-0160(11)60130-6
- Yuan, Y., T. Liu, P. Fu, J. Tang y S. Zhou. 2015. “Conversion of sewage sludge into highperformance bifunctional electrode materials for microbial energy harvesting”. *Journal of Materials Chemistry A* 3 (16): 8475–8482.
- Zhang, C., L. Liu, M. Zhao, H. Rong y Y. Xu. 2018. “The environmental characteristics and applications of biochar”. *Environmental Science and Pollution Research* 25 (22): 21525-21534.
- Zhang, H., C. Chen, E. Gray, S. Boyd, H. Yang y D. Zhang. 2016. “Roles of biochar in improving phosphorus availability in soils: A phosphate

- adsorbent and a source of available phosphorus”. *Geoderma*. 276 (3): 1-6. DOI: 10.1016/j.geoderma.2016.04.020
- Zhao, L., X. Cao, O. Mašek y A. Zimmerman. 2013. “Heterogeneity of biochar properties as a function of feedstock sources and production temperatures”. *Journal of Hazardous Materials* 256–257 (1) : 1–9 . DOI : 10.1016/j.jhazmat.2013.04.015
- Zheng, H., Z. Wang, X. Deng, S. Herbert y B. Xiang. 2013. “Impacts of adding biochar on nitrogen retention and bioavailability in agricultural soil”. *Geoderma* 206 (1) :32-39 .DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.04.018
- Zhou, Y., S. Qin, S. Verma, T. Sar, S. Sarsaiya, B. Ravindran, T. Liu, R. Sindhu, A.K. Patel, P. Binod, S. Varjani, R. Rani Singhnia, Z. Zhang y M.K. Awasthi. 2021. “Production and beneficial impact of biochar for environmental application: A comprehensive review”. *Bioresour. Technol.* 337 (1): 1–12. DOI : 10.1016/j.biortech.2021.125451
- Zenero M.D.O., S.V. Novais, B. Balboni, G.F.C. Barrili, F.D. Andreote y C.E.P. Cerri. 2021. “Short-term biochar effects on greenhouse gas emissions and phosphorus availability for maize”. *Agrosystems Geosciences and Environment* 4 (1) :1–16. DOI: 10.1002/agg2.20142