



FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES
CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

“EL BIOCARBÓN Y SU USO EN LA RECUPERACIÓN DE
SUELOS ÁRIDOS”

Trabajo de Investigación para optar el grado de:
BACHILLER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presentado por:

Ruiz Perez Katerin

Asesor:

Ing. Gomero Osorio Luis

Lima – Perú

2019



RESOLUCIÓN DIRECTORAL ACADÉMICA DE CARRERA N°128-2019-DACIA-DAFCA-CIENTIFICA

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES / CARRERA DE INGENIERIA AMBIENTAL

Lima 30 de septiembre de 2019

VISTO:

La revisión realizada y la aprobación de Trabajo de Investigación titulado: **El biocarbón y su uso en la recuperación de suelos áridos**, presentado por:

- **Katerin Ruiz Perez**

CONSIDERANDO:

Que, de acuerdo al Reglamento General de la Universidad Científica del Sur y los reglamentos de pregrado para obtener el grado de Bachiller en **Ingeniería Ambiental** en la **Facultad de Ciencias Ambientales**, se debe desarrollar un trabajo de investigación.

Que, de acuerdo a la normativa vigente de la Universidad Científica del Sur, en uso de las atribuciones conferidas al Director Académico de Carrera.

SE RESUELVE:

Aprobar e inscribir el trabajo de investigación titulado: **El biocarbón y su uso en la recuperación de suelos áridos** con N° de registro de la carrera: **016-FCA-IAM**.

Nombrar al docente/colaborador **Ing. Luis Abraham Gomero Osorio** como asesor de dicho trabajo de investigación.

Regístrese, comuníquese y archívese,



Mg. Gonzalo Francisco Flores Roca
Director Académico de Carrera
Ingeniería Ambiental

EL BIOCARBÓN Y SU USO EN LA RECUPERACIÓN DE LOS SUELOS ÁRIDOS

Ruiz Katerin¹, Gomero Luis¹

¹*Facultad de Ciencias Ambientales, Universidad científica del Sur, Lima, Perú*

Katerinruizperez@gmail.com

I. RESUMEN

En Perú la recuperación de ecosistemas degradados es un objetivo para responder a los desafíos ambientales de la actualidad, por eso la recuperación de los suelos áridos es de gran importancia. Existen métodos físicos, biológicos y químicos que ayudan a recuperar la calidad de los suelos, como la aplicación de biocarbón. Este es un producto de la pirolisis que posee características únicas, como el elevado contenido de carbón, gran superficie específica y porosidad. Las experiencias de recuperación de suelos utilizando el biocarbón han presentado resultados positivos, como la mejora de las propiedades físicas (porosidad del suelo, estructura y retención hídrica), químicas (pH, conductividad eléctrica y capacidad de intercambio catiónico) y biológicas (aumento de la actividad de microorganismo), lo que permite un aumento en la rendimiento de las plantas. Por otro lado, una utilidad adicional del biocarbón es que la biomasa utilizada para su producción procede de residuos orgánicos que a veces ocasionan problemas de contaminación ambiental. La producción del biocarbón y su aplicación como enmienda del suelo ha sido poco utilizada en Perú, por eso el desarrollo de este es un desafío tecnológico y ambiental que permitiría aumentar el índice de recuperación de los suelos áridos.

Palabras clave: Biocarbón, pirolisis, biomasa, enmienda del suelo, suelos áridos, propiedades fisicoquímicas, restauración, lomas costeras.

II. ABSTRACT

In Peru, the recovery of degraded ecosystems is an objective to respond to today environmental challenges, so the recovery of arid soils is of great importance. There are physical, biological and chemical methods that help to recover soil fertility, such as the application of biochar. This is a product of pyrolysis that has unique characteristics, such as high carbon content, large surface area and porosity. Experiences of soil recovery with biochar have presented positive results, such as the improvement of physical properties (soil porosity, structure and water retention), chemical (pH, electrical conductivity and cation exchange capacity) and biological (increase in activity of microorganisms, which allows an increase in the yield of plants. On the other hand, an additional benefit of biochar is that the biomass used for its production comes from organic waste that sometimes cause problems of environmental contamination. The production of biochar and its application as a soil amendment has been little used in Peru, so the development of this is a technological and environmental challenge that would increase the rate of recovery of arid soils.

Keywords: Biochar, pyrolysis, biomass, soil amendment, arid soils, physicochemical properties, restoration, coastal hills.

III. REVISIÓN TEÓRICA

Los suelos áridos se desarrollan bajo condiciones de aridez (falta de agua en el suelo y bajo índice de humedad) que obstaculiza el desarrollo de vegetación (Ayala, Maya, y Troyo, 2018), estos suelos se pueden encontrar en distintos ecosistemas como sabanas, desiertos, lomas, etc. En Perú los suelos áridos se encuentran en el ecosistema de lomas costeras, pero este presenta una gran peculiaridad en comparación con otros ecosistemas áridos a causa de la presencia de la corriente marina de aguas frías del océano Pacífico sur y de la cordillera de los Andes (Nieuwland & Mamani, 2017). Estos factores ocasionan que el ecosistema presente un índice alto de humedad y escasez de agua (García, Miyashiro, Orejón, & Pizarro, 2014) y suelos salinos (Chavarry & Vazquez, 2015).

El ecosistema de lomas costeras han sido degradadas desde la época colonial hasta la actualidad, debido a la ocupación urbana informal y la tala de árboles (Del Castiilo, 2016). Estas acciones alteran las funciones del equilibrio natural, como por ejemplo la alta diversidad biológica y la estabilización de los suelos (García et al., 2014), por eso la restauración de las lomas resulta de gran importancia, ya que su objetivo es revertir el deterioro causado a los recursos renovables del ecosistema (Monta, 2000).

La restauración de las lomas costeras involucra un grupo de procedimientos y técnicas cuyo fin es restaurar de manera integral los sistemas ecológicos (Fiallos-Ortega et al., 2016) permitiendo responder a los desafíos ambientales y urbanísticos actuales (Nieuwland & Mamani, 2017). Una de las actividades para lograr la restauración de las lomas costeras es mejorar las características del suelo, ya que estos contienen alta cantidad de sales y baja presencia de nutrientes, además tienen textura arenosa, con pH

ligeramente alcalino, baja estabilidad de los agregados, mínima capacidad de intercambio catiónico y nulo contenido de materia orgánica (Ayala et al., 2018), estas características dificultan implementar actividades de reforestación.

En la actualidad, existen métodos físicos, biológicos y químicos para la mejorara de los suelos entre los que se encuentran el uso de enmiendas químicas, aplicación de ácidos y la adición de abonos orgánicos (biocarbón) (Manzano Banda, Rivera Ortiz, Briones Encinia, & Zamora Tovar, 2014).

3. El biocarbón

El biocarbón es el producto con elevado contenido de carbono que se obtiene después del calentamiento de la biomasa en ausencia de oxígeno (Cha et al., 2016). El término biocarbon se diferencia del carbón tradicional (combustible), ya que en la producción del biocarbón se emplea restos orgánicos (estiércol, residuos agrícolas, etc.).

3.1. *Materia prima para la producción de biocarbón*

La materia prima utilizada en la producción del biocarbón define sus características físicas y químicas, por eso estos presentan una gran heterogeneidad. Los materiales que ha tenido mayor utilidad en la elaboración del biocarbón son los residuos forestales, agroindustriales, agrícolas y ganaderos (Paco, 2012). Entre los residuos agrícolas se encuentran los desechos de aceituna o arroz, cascara de naranja, hojas, virutas de madera y plantas secas. Además, se puede utilizar lodos residuales de las plantas de tratamiento de aguas residuales y los desperdicios urbanos de tipo orgánico (Escalante et al., 2016).

La utilización de los residuos orgánicos forestales, agroindustriales, agrícolas y ganaderos para la producción del biocarbón es una nueva alternativa para el manejo

adecuado de estos, ya que en la actualidad la disposición final de los residuos genera impactos negativos sobre el ambiente que son la emisión de gases de efecto invernadero, partículas suspendidas y la generación de olores desagradables producto de la descomposición aeróbica o anaeróbica (Chávez & Rodríguez, 2016).

Un ejemplo de la utilización de residuos agrícolas es la que describe Marín, García, & Barreuzeta-Unda (2018) donde utiliza como materia prima el raquis del banano y la cáscara de la mazorca del cacao. Otro modelo es el que menciona Herrera et al. (2018) donde se utiliza la coronta de maíz, cáscara de café y exoesqueleto de langostino que son residuos agroindustriales.

3.2. Procesos para obtener el biocarbón

El biocarbón se produce mediante el proceso de pirolisis, combustión, gasificación y carbonización hidrotérmica (Escalante et al., 2016).

a) La pirolisis

El proceso más ordinario para producir el biocarbón, este consiste en degradar térmicamente la biomasa en un rango de temperatura de 400 a 600 °C y con ausencia del oxígeno o muy baja estequiometría (Tripathi, Sahu, & Ganesan, 2016). Durante la descomposición térmica, la celulosa hemicelulosa y la lignina que comprenden la biomasa experimentan sus propias vías de reacción, que incluyen reticulación, despolimerización y fragmentación a su propia temperatura, produciendo productos sólidos, líquidos y gaseosos. Los productos sólidos y líquidos se denominan biocarbón y bioaceites, respectivamente, mientras que la mezcla gaseosa que contiene CO, CO₂, H₂ y los hidrocarburos C₁-C₂ se denominan gas de síntesis (Cha et al., 2016)

El rendimiento y las propiedades físicas-químicas del biocarbón producido son determinadas por las condiciones de pirolisis (temperatura de reacción, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia) y las características de la biomasa (composición, distribución de tamaño de partícula y de tamaño de poro). Por otro lado, este proceso se clasifica, según la velocidad y tiempo de calentamiento de la biomasa, en pirolisis lenta y pirolisis rápida.

La pirolisis lenta se caracteriza por una velocidad de calentamiento lenta y un tiempo de residencia prolongado. En este proceso la biomasa se calienta hasta una temperatura de 400–500 °C y con una velocidad de calentamiento de aproximadamente 0,1 a 1 °C/s durante un tiempo que oscila entre 5 y 30 minutos. Este tipo de pirolisis favorece la formación de carbón, pero los productos líquidos y gaseosos también se forman en una pequeña cantidad (Tripathi et al., 2016).

La pirolisis rápida es un proceso en donde la biomasa se calienta a una temperatura de 850–1250 °C con una velocidad de calentamiento de 10–200 °C durante un corto período de tiempo que varía entre 1 y 10 segundos. La pirolisis rápida se utiliza para la producción de biocombustible, ya que el rendimiento del producto oleoso en la pirolisis rápida domina el rendimiento de la sal y el producto gaseoso (Bridgwater, 2012). Una pirolisis rápida típica produce 60–75% de producto líquido, 15–25% de biocarbón y 10–20% de productos gaseosos no condensables.

b) La combustión

La combustión es un proceso en el que se obtiene la energía química almacenada en la biomasa en forma de calor, este proceso asegura la completa oxidación de la biomasa.

La combustión de la biomasa tiene lugar dentro del rango de temperatura de 800 °C a

1000 °C, recuperando casi toda la energía química disponible en energía térmica sin dejar energía no convertida en el gas de combustión y muy poca energía no convertida en ceniza (Escalante et al., 2016). Por otro lado, la combustión tiene mayor factibilidad para la biomasa con contenido de humedad al 50 %, por eso se recomienda un tratamiento previo de la biomasa antes de la combustión aumenta la eficiencia del proceso de combustión (Tripathi et al., 2016).

c) La gasificación

La gasificación es un proceso termoquímico en el que los contenidos carbonosos de la biomasa se convierten en combustible gaseoso en presencia de un medio gaseoso como oxígeno, aire, nitrógeno, dióxido de carbono, vapor o alguna mezcla de estos gases a una temperatura elevada que oscila entre los 700 y 900 °C (Cha et al., 2016).

d) La carbonización hidrotérmica

La carbonización hidrotérmica es un procedimiento que tiene lugar en el agua a temperatura elevadas desde los 160 °C hasta los 800 °C (Qian, Kumar, Zhang, Bellmer, & Huhnke, 2015). La materia prima se mezcla con agua y se coloca en un reactor cerrado y la temperatura se eleva después de un cierto tiempo para la estabilización. La presión se eleva por encima de 1 atm para que el agua se mantenga en forma líquida (Tripathi et al., 2016).

El rendimiento de biocarbón varía de 30% a 60% dependiendo de las propiedades de la materia prima, la temperatura de reacción y la presión. Dado que carbonización hidrotérmica requiere agua, este puede ser un método rentable de producción de biocarbon para materias primas con alto contenido de humedad (Qian et al., 2015).

3.3. *Modificación del biocarbón*

El biocarbón producido por los procesos térmicos (pirólisis, combustión, gasificación y carbonización hidrotérmica) es activado por métodos físicos o químicos para aumentar la fracción de poros, su área específica o formar grupos funcionales antes de su uso como abono para el suelo (Cha et al., 2016). En activación química el biocarbón es mezclado con sustancias químicas como el ácido fosfórico (H_3PO_4) y el cloruro de zinc ($ZnCl_2$), pero el más utilizado es el H_3PO_4 debido a que proporciona una capacidad de intercambio de cationes química y térmicamente estable (Yanping & Rockstraw, 2005).

Mientras tanto, en la activación física se utiliza gas como el CO_2 y ozono, para activar el biocarbón a temperaturas superiores de 700 °C. Esta activación tiene dos pasos, en el primer paso el biocarbón se descompone selectivamente permitiendo así que los poros finos encerrados se liberen y en el segundo paso; el carbón cristalinoide que contiene los poros finos es sometido a reacciones de activación para formar los macroporos (Cha et al., 2016).

3.4. *Características del biocarbón*

a) *Composición estructural*

La composición estructural del biocarbón depende estrictamente de la materia prima y el proceso térmico al que se somete esta, pero en términos generales el biocarbon tiene una forma rígida, color negro (Escalante et al., 2016), estructura amorfa (Qiu, McComb, & Bell, 2008). La estructura de cada partícula del biocarbón está compuesta por dos fracciones: láminas de grafeno cristalino apiladas y estructuras aromáticas amorfas ordenadas al azar. Además, los anillos aromáticos tienen incorporados átomos de H, O,

N, P Y S que se encuentran en forma de heteroátomos, debido a la carga química de la superficie del biocarbón (Verheijen, Jeffery, Bastos, Van der Velde, & Diafas, 2009).

b) Características químicas

La composición química del biocarbón presente un alto índice de heterogeneidad, ya que tiene componentes estables y endebles; como por ejemplo el carbono, materia volátil, materia mineral (ceniza) y humedad (Sohi, Krull, Lopez-Capel, & Bol, 2010) . Por otro lado, el biocarbón presenta una estructura aromática con alto grado de grupos químicos (Solís, Morales, Ayala, & Durán de Bazúa, 2012) que permite mantener su estabilidad química. Otras características químicas son la gran superficie específica y capacidad de intercambio catiónico que permite retener cationes. (Wang & Wang, 2019).

c) Características físicas

Las características físicas del biocarbón están relacionadas a la forma en la que se relacionan con el suelo, por eso las principales características son la elevada capacidad de retención hídrica (Rosado, Paneque, Miller, López, & Knicker, 2016), el alto grado de porosidad con microporos (< 2nm), mesoporos cuyo tamaño empieza en los 50 nm y macroporos con diámetro mayor a 50nm (Wang & Wang, 2019) permitiendo formar hábitats para los microorganismos.

No obstante, se debe tener en cuenta que el biocarbón presentará cambios en sus propiedades físicas, químicas y estructurales conforme pase en tiempo “proceso de envejecimiento” (Lehmann & Joseph, 2009).

3.5. Mecanismo de incorporación del biocarbón al suelo

Los mecanismos de mayor utilidad son la técnica del arado del suelo y la técnica manual, estas consideran un conjunto de factores como el tipo de suelo, las condiciones climáticas (temperatura y humedad), las prácticas de cultivo, la erodabilidad y tipo de suelo (Balta, 2014). Además, se considera la profundidad que puede ser superficial o profunda, en la incorporación superficial (0-30 cm) se obtiene una homogenización completa con el suelo, en cambio en la incorporación profunda (> 30 cm) el biocarbón se introduce muy cercana de las raíces obteniendo así una mayor captación de nutrientes por parte de la planta (Escalante et al., 2016).

Por otro lado, la cantidad y la repetitividad de la aplicación del biocarbón debe estar basado en resultados experimentales según el tipo de cultivo, ya que el efecto del biocarbón tiene la propiedad de recalcitrante que le permite perdurar por un largo periodo en el suelo (Major, 2011).

3.6. Efectos sobre las propiedades del suelo

a) Efectos en las propiedades físicas

Los efectos del biocarbón en el suelo son múltiples, entre los que se encuentra la mejora del área superficial, la estructura la distribución del tamaño de los poros, la densidad aparente, capacidad de retención del agua (Cha et al., 2016) y la resistencia a la penetración

El aumento del área superficial contribuye a la formación de complejos (aniones y cationes) con metales y elementos del suelo, lo que aumenta la capacidad de retención de nutrientes del suelo (Mukherjee & Lal, 2013). Mientras tanto, la disminución de la densidad aparente se debe a que el biocarbón presenta menor densidad que los

minerales presentes en el suelo y tiene una distribución mayor de macro, meso y microporos (Paco, 2012).

b) Efectos en las propiedades químicas

La presencia del biocarbón en el suelo genera un aumento en 20% de la capacidad de intercambio catiónico y el cambio de hasta 1 unidad en el valor del pH (Laird et al., 2010). Asimismo, se ha observado una mayor capacidad de la conductividad eléctrica y concentraciones de aniones y cationes solubles (Cha et al., 2016).

Por otro lado, el biocarbón permite la mejora de la calidad del suelo ácido, ya que este presenta grupos funcionales fenólicos, carboxilo e hidroxilo, que reaccionan con los iones H^+ en el suelo para reducir la concentración de iones H^+ y aumentar el pH del suelo (Qian et al., 2015). Además, se le atribuye el suministro de componentes inorgánicos como el calcio (Ca), potasio (K), magnesio (Mg) y fósforo (P) y la mitigación de la lixiviación de los nutrientes (Zhang, Zhu, Shen, & Liu, 2019).

c) Efectos en la biota del suelo

La aplicación del biocarbón permite gestionar la biodiversidad en los suelos (Lehmann et al., 2011), ya que las enmiendas orgánicas impactan en la estructura trófica de la red alimenticia del suelo. La abundancia microbiana mejoró después de la adición de biocarbón, esto debido a los cambios del pH y el contenido de agua del suelo (Abujabhah, Bound, Doyle, & Bowman, 2016).

3.7. Experiencias de recuperación de suelos

Existen numerosas experiencias en la recuperación de suelos utilizando el biocarbón, como es el caso que describe Fiallos-Ortega et al. (2016) donde utilizó biocarbón para la restauración ecológica del suelo y evaluó este resultado con el crecimiento de la alfalfa

Medicago sativa, el resultado de esta evaluación fue el aumento la cobertura basal en 39,35 % y la cobertura aérea en 86,0%.

Otra experiencia en el uso de biocarbón es el que describe Jones, Rousk, Edwards-Jones, DeLuca, & Murphy,(2012), que estudiaron en impacto multianual de biocarbón en la calidad del suelo con énfasis en el ciclo del carbono y nitrógeno durante tres años; encontrando como resultado el aumento de la respiración del suelos, tasa de crecimiento de los microorganismos y el rendimiento de las plantas cultivada (gramíneas). Por su parte Mohamed et al.,(2015) estudiaron los efectos del biocarbón de bambú para la recuperación de suelos agrícolas contaminados de Cd; se obtuvo como resultado la disminución de Cd en el suelo debido al aumento de las tasas de biocarbón.

IV. CONCLUSIÓN

En síntesis, esta revisión evidencia que el biocarbón es un producto que proporciona numerosos beneficios al suelo, mejorando su calidad a través de la influencia en las propiedades físicas, químicas y biológicas. Además, la producción del biocarbón a partir de los residuos orgánicos es una medida adecuada para la disposición final de estos, generando a su vez una disminución en los costos de aplicación, mayor rentabilidad y una reducción en los impactos ambientales. Por otra parte, el biocarbón tiene un gran horizonte para probar su eficiencia en la recuperación del ecosistema lomas costeras, por eso en Perú es importante impulsar la tecnología para producir biocarbón y poder usarlo como mejorador de los suelos áridos.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abujabbeh, I. S., Bound, S. A., Doyle, R., & Bowman, J. P. (2016). Effects of biochar and compost amendments on soil physico-chemical properties and the total community within a temperate agricultural soil. *Applied Soil Ecology*, *98*, 243–253. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2015.10.021>
- Ayala, F., Maya, Y., & Troyo, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Revista Terra Latinoamericana*, *36*(2), 93. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i2.334>
- Balta, R. (2014). *El carbon activado y el biocarbon en la asimilacion del cadmio por el tomate. Tesis de Posgrado*. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3874/balta-crisologo-rafael-ananias.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Bridgwater, A. V. (2012). Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*, *38*, 68–94. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>
- 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>
- Chavarry, A., & Vazquez, L. (2015). *Forestación en zona árida*. Lima.
- Chávez, Á., & Rodríguez, A. (2016). Aprovechamiento de residuos agrícolas y forestales. *Revista Academia & Virtualidad*, *9*(2), 90–107. Retrieved from <http://bbibliograficas.ucc.edu.co:2063/lib/ucooperativasp/detail.action?docID=11045964&p00=elias+castells>
- Del Castillo Ruiz, J. D. (2016). *Estudio de la variación espacio-temporal de la comunidad vegetal de las lomas de Carabayllo (Lima, Perú) durante el 2013 como contribución a su gestión (Tesis de pregrado)*. Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/3167/F40-C37-T.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- 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. Retrieved from <http://www.scielo.org.mx/pdf/tl/v34n3/2395-8030-tl-34-03-00367.pdf>
- Fiallos-Ortega, L. R., Flores-Mancheno, L. G., Duchí-Duchí, N., Flores-Mancheno, C. I., Baño-Ayala, D., & Estrada-Orozco, L. (2016). Restauración ecológica del suelo aplicando biochar (carbón vegetal), y su efecto en la producción de Medicago sativa. *Ciencia Y Agricultura*, *12*(2), 13–20. <https://doi.org/10.19053/01228420.4349>
- García, R., Miyashiro, J., Orejón, C., & Pizarro, F. (2014). Crecimiento urbano, cambio climático y ecosistemas frágiles: el caso de las lomas de Villa María del Triunfo en Lima Sur. *Perú Hoy*, 275–297.

- Herrera, E., Feijoo, C., Alfaro, R., Solís, J., Gómez, M., Keiski, R., & Cruz, G. (2018). Producción de biocarbón a partir de biomasa residual y su uso en la germinación y crecimiento en vivero de *Capparis scabrida* (Sapote). *Scientia Agropecuaria*, 9(4), 569–577. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.04.13>
- Jones, D., Rousk, J., Edwards-Jones, G., DeLuca, T. H., & Murphy, D. V. (2012). Biochar-mediated changes in soil quality and plant growth in a three year field trial. *Soil Biology and Biochemistry*, 45, 113–124. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.10.012>
- Laird, D. A., Fleming, P., Davis, D. D., Horton, R., Wang, B., & Karlen, D. L. (2010). Impact of biochar amendments on the quality of a typical Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3–4), 443–449. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.013>
- Lehmann, J., & Joseph, S. (2009). Biochar for Environmental Management. In *Biochar for Environmental management* (Vol. 2). Londres.
- Lehmann, J., Rillig, M. C., Thies, J., Masiello, C. A., Hockaday, W. C., & Crowley, D. (2011). Biochar effects on soil biota - A review. *Soil Biology and Biochemistry*, 43(9), 1812–1836. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.04.022>
- Major, J. (2011). Biochar for soil quality improvement, climate change mitigation and more. *Linea* [Http://Biochar-Atlantic.Org/Assets/Pdf/BiocharSoilFertility.Pdf](http://Biochar-Atlantic.Org/Assets/Pdf/BiocharSoilFertility.Pdf). *Pdf Consulta*, 3, 1–45.
- Manzano Banda, J. I., Rivera Ortiz, P., Briones Encinia, F., & Zamora Tovar, C. (2014). Rehabilitación de suelos salino-sódicos: estudio de caso en el distrito de riego 086, Jiménez, Tamaulipas, México. *Terra Latinoamericana*, 32, 211–219.
- Marín, J., García, R., & Barrezueta-Unda, S. (2018). Elaboracion de biocarbón obtenido a partir de la cáscara cacao y raqui de banano. *Revista Científica Agroecosistemas*, 6(3), 75–81.
- Mohamed, I., Zhang, G. shi, Li, Z. guo, Liu, Y., Chen, F., & Dai, K. (2015). Ecological restoration of an acidic Cd contaminated soil using bamboo biochar application. *Ecological Engineering*, 84, 67–76. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.009>
- Monta, M. (2000). Conservación ecológica de suelos en zonas áridas y semiáridas de México. *Ciencia y Desarrollo*, 27(154), 18.
- Mukherjee, A., & Lal, R. (2013). Biochar Impacts on Soil Physical Properties and Greenhouse Gas Emissions. *Agronomy*, 3(2), 313–339. <https://doi.org/10.3390/agronomy3020313>
- Nieuwland, B., & Mamani, J. M. (2017). Las lomas de Lima: enfocando ecosistemas desérticos como espacios abiertos en Lima metropolitana. *Espacio y Desarrollo*, 133(29), 109–133. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201701.005>
- Paco, D. (2012). *Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta. Tesis de fin de carrera*. Barcelona: Universidad Autónoma de Barcelona.
- Qian, K., Kumar, A., Zhang, H., Bellmer, D., & Huhnke, R. (2015). Recent advances in utilization of biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42, 1055–1064.

<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.074>

- Qiu, S., McComb, A. J., & Bell, R. W. (2008). Ratios of C, N and P in soil water direct microbial immobilisation-mineralisation and N availability in nutrient amended sandy soils in southwestern Australia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 127(1–2), 93–99. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2008.03.002>
- Rosado, J., Paneque, M., Miller, A. Z., López, R., & Knicker, H. (2016). Evaluación de la alteración de biochars utilizados como enmienda de un cultivo de girasol bajo condiciones de clima mediterráneo. *Red Española de Compostaje*, 245–249. Retrieved from http://digital.csic.es/bitstream/10261/152373/1/Evaluacion_alteracion_biochar_VJorREC_2016.pdf
- Sohi, S. P., Krull, E., Lopez-Capel, E., & Bol, R. (2010). A review of biochar and its use and function in soil. *Advances in Agronomy*, 105(1), 47–82. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(10\)05002-9](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)05002-9)
- Solís, J., Morales, M., Ayala, R., & Durán de Bazúa, M. D. C. (2012). Obtención de carbón activado a partir de residuos agroindustriales y su evaluación en la remoción de color del jugo de caña. *Red de Revistas Científicas de América Latina, El Caribe, España y Portugal*, 27(1), 36–48.
- Tripathi, M., Sahu, J. N., & Ganesan, P. (2016). Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 55, 467–481. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.122>
- Verheijen, F., Jeffery, S., Bastos, A. C., Van der Velde, M., & Diafas, I. (2009). Biochar Application to Soils: A critical scientific review of effects on soil properties, processes and functions. In *JRC Scientific and Technical Reports*. <https://doi.org/10.2788/472>
- 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>
- Yanping, G., & Rockstraw, D. (2005). 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>
- Zhang, Z., Zhu, Z., Shen, B., & Liu, L. (2019). Insights into biochar and hydrochar production and applications: A review. *Energy*, 581–598. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.01.035>