

Impacto del biocarbón en el suelo agrícola

Impact of biochar on agricultural soil

Tatiana C. Puentes-Escobar¹, Adalberto Rodríguez Carlosama²

¹ 0000-0002-0112-1096, Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de las Pasifloras de Colombia – CEPASS, San Agustín, Colombia, tatiana.puentes@cep-pass.org

² 0000-0002-7161-8284, Corporación Centro de Desarrollo Tecnológico de las Pasifloras de Colombia – CEPASS, San Agustín, Colombia, adalberto.rodriguez@cep-pass.org

Fecha de recepción: 09/06/2021
Fecha de aceptación del artículo: 23/07/2021

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.7540>

Cómo citar

Puentes Escobar, T. C., & Rodríguez Carlosama, A. (2021). Impacto del biocarbón en el suelo agrícola. *Avances Investigación En Ingeniería*, 18(2). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.2.7540>

Resumen

Como resultado de las inadecuadas prácticas de manejo agrícola, el suelo sufre erosión, acidificación, contaminación por metales pesados y plaguicidas, compactación, salinización, encharcamiento, pérdida de materia orgánica, entre otros. Dentro de las estrategias para la recuperación edáfica están la intensificación ecológica y las enmiendas orgánicas, como residuos de cultivos, abonos verdes y de animales, biosólidos, compostaje y digestión anaeróbica. Una estrategia puntual es el empleo del biocarbón, que puede verse como una combinación de fertilización química y biorremediación. El presente artículo se enfoca en describir el impacto del uso del biocarbón en el equilibrio de las propiedades de los suelos agrícolas, revisando los fenómenos físicos, químicos y biológicos desde su incorporación, así como su origen y las tecnologías actuales para su producción. El biocarbón presenta macro y microporos propios que mejoran la estructura del suelo y propiedades como el pH, la capacidad de intercambio catiónico, contenido de carbono orgánico, y es aportante de nutrientes.

Palabras clave: agricultura, biocarbón, degradación, suelos agrícolas.

Abstract

As a result of poor agricultural management practices, the soil suffers degradation evidenced by erosion, acidification, contamination by heavy metals and pesticides, compaction, salinization, waterlogging, or loss of organic matter, among others. Among the strategies for soil amendment are ecological intensification and organic amendments such as crop residues, green manures and animals, biosolids, composting and anaerobic digestion. A specific strategy is the use of biochar, which can be seen as a combination of chemical fertilization and bioremediation. This manuscript focuses on describing the impact of the use of biochar on the balance of the properties of agricultural soils, reviewing the physical, chemical, and biological phenomena since its incorporation, as well as its origin and current technologies for its production. Biochar has its own macro and micropores that improve soil structure and properties such as pH, cation exchange capacity, organic carbon content, and is a contributor of nutrients.

Keywords: agricultural soils, agriculture, biochar, degradation.

Introducción

El suelo como recurso natural ha sido ampliamente explotado con una escalabilidad cada vez mayor [1]. Belalcázar Serrano [2] presentó la degradación de los suelos en zonas cultivadas como uno de los problemas directamente relacionados con la producción agrícola que, en ocasiones, ha llevado a la disminución de la calidad edáfica.

Las diferentes situaciones en las que se desequilibran las propiedades de los suelos abarcan prácticas de riego inapropiadas, conversión de pastizales en tierras de cultivo, sellado y compactación de suelos productivos, uso excesivo de fertilizantes y pesticidas, labranza mecánica, entre otros [3].

Dentro de este contexto, algunas de las estrategias para la remediación de las propiedades edáficas del suelo son la intensificación ecológica y las enmiendas orgánicas como residuos de cultivos, abonos verdes y de animales, biosólidos, compostaje y digestión anaeróbica [4].

De la misma forma, el biocarbón ha sido propuesto para mejorar la calidad del suelo [5]. Este sólido se define como el producto de la descomposición térmica de biomasa en ausencia de oxígeno [6], por lo que el biocarbón resultante tendrá variaciones fisicoquímicas en función del proceso y la biomasa utilizados [7].

Los trabajos desarrollados en el mundo sobre biocarbón presentan los beneficios de su uso en una visión de manejo agronómico enfocado en la productividad y conservación de los agroecosistemas [8]. En relación con esto, en China se determinó que la aplicación del biocarbón, como mejorador de la calidad de los suelos, aumenta la disponibilidad de agua y materia orgánica en el suelo, mejora el ciclo de nutrientes, reduce la densidad aparente, actúa como agente de encalado y reduce la lixiviación de nutrientes al agua subterránea, según Muhammad et al., citados en [9].

En Latinoamérica, el biocarbón procesado a altas temperaturas se ha empleado para la retención de metales como el mercurio, pues ha demostrado ser eficiente en retener contaminantes [10]. Asimismo, se demostró que la aplicación del biocarbón como enmienda edáfica es una alternativa orgánica de bajo costo [11].

En el ámbito local, el aplicar biocarbón en una plantación de madera impactó en las propiedades del suelo, como la retención y disponibilidad de agua, el incremento en la disponibilidad de nutrientes como nitrógeno, potasio, fósforo, calcio, magnesio y manganeso; así como en la absorción de estos elementos, y mejora de propiedades como el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) y el contenido de materia y carbono orgánico [12].

En función de estas consideraciones, el objetivo del presente artículo de reflexión es describir el impacto del uso del biocarbón en los suelos agrícolas. Por ello, en los siguientes apartados se describe el suelo y sus impactos, el origen del biocarbón, las biomasas y los procesos para la transformación del biocarbón, así como sus bondades en la agricultura.

I. El suelo y sus impactos

De acuerdo con la Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo [13], el suelo se define como un cuerpo natural que comprende sólidos, líquidos y gases que ocurren en la superficie de la Tierra. De esta manera, es el hábitat de macro y microorganismos que desempeñan procesos permanentes de tipo biótico y abiótico, que cumplen funciones y prestan servicios ecosistémicos vitales para la sociedad y el planeta [14].

Es decir, los suelos son indispensables y determinantes para la estructura y el funcionamiento de los ciclos del agua, del aire y de los nutrientes, así como para conservar la biodiversidad, según Van Miegroet y Johnson, citados en [15]. También son fundamentales para la tierra, el territorio y la cultura, porque dan soporte a la vida y a las actividades humanas y permiten garantizar los derechos ambientales de las generaciones presentes y futuras [15].

Adicionalmente, se resalta como un servicio esencial del suelo la captura de carbono, el cual se estima en dos tercios del carbono fijado del planeta. De ahí que sea fundamental para el mantenimiento del equilibrio ecológico de nuestro hábitat [16]. Por otra parte, la producción de alimentos depende de la disponibilidad y calidad del suelo, pues de ahí proviene el 95 % de los alimentos [17].

Sin embargo, en las últimas décadas, el suelo viene sufriendo impactos desfavorables. Según Primavesi [18], se ha identificado que la agricultura convencional genera erosión, inundaciones, sequías, aumento de plagas y enfermedades, al igual que plantas con poca resistencia a estas. Se considera que todo esto es el resultado de una mala gestión del suelo. Refiere la mencionada autora que una de las consecuencias de ello es la pérdida de la regulación de la temperatura, la cual debería en las zonas tropicales en los de 32 °C. Pero si el suelo está insolado, la temperatura puede llegar hasta los 56 °C y, en casos extremos, hasta los 74 °C. A esta temperatura, en la práctica, es imposible que una planta consiga crecer.

De igual manera, la degradación de los suelos implica una disminución o alteración negativa de sus servicios y funciones ecosistémicas y ambientales (figura 1), las cuales pueden ser de tipo físico, químico o biológico. En la degradación física se destacan la erosión, la compactación [15] y la pérdida de la calidad de la estructura del suelo, que afecta de manera directa la filtración del agua y, en cambio, favorece la escorrentía y el arrastre de partículas finas, como la materia orgánica [13].



Figura 1. Las implicaciones de la degradación de los suelos. Fuente: elaboración propia

En cuanto a la degradación química, se resaltan la salinización de los suelos, la acidificación y la contaminación, debido, en general, al uso excesivo de riego y fertilizantes, y como consecuencias de las actividades mineras e industriales. Y en la degradación biológica, el efecto es la pérdida de materia orgánica, que influye en la disminución de la actividad biológica y en procesos de descomposición y mineralización [15].

En la actualidad, la situación que presentan los suelos en Colombia es crítica. Se considera que el 40%, equivalente a 45,3 millones de hectáreas de la superficie continental e insular, presenta algún grado de degradación [15]. La agricultura continua, el uso de sistemas de labranza y el monocultivo de especies (como arroz, sorgo y maíz) en vastas zonas del territorio provocaron el deterioro de las propiedades de los suelos y el incremento de la superficie afectada por procesos erosivos [13].

Aunado a esta situación, se ha evidenciado la pérdida de los servicios ecosistémicos asociados a los suelos, como la provisión, regulación y soporte; su relación con la pérdida de materia orgánica, y nutrientes que llevan a una disminución de la productividad; la menor retención de humedad en los suelos, la alteración de los ciclos hidrogeológicos y la alteración de los ciclos biogeoquímicos; la pérdida de capacidad de almacenamiento de dióxido de carbono u otros gases de efecto invernadero, y la depuración de contaminantes de los suelos [15].

En este sentido, es urgente promover la conservación del suelo, entendida como el mantenimiento de sus múltiples funciones a través de acciones de generación de conocimiento, preservación, restauración, manejo y uso sostenible del suelo, tal como lo señala la política colombiana para la gestión sostenible [19].

2. El origen del biocarbón

En los primeros acercamientos a la historia del biocarbón se evidenció que carbón vegetal y biocarbón son términos que se usan indistintamente, y aunque por su naturaleza se podría decir que el carbón

vegetal es tan antiguo como el fuego en la historia humana, el origen del biocarbón es mucho más reciente, y se le antepone el prefijo *bio* para diferenciar su aplicación y destacar su origen biológico. Ello lo diferencia del carbón vegetal destinado a combustible [20].

Este producto tuvo su origen al ser redescubiertas las tierras negras de los indios amazónicos de Brasil, según Woods [21], denominadas *terra preta do índio*, por Smith y Hartt, en 1879 y 1885, respectivamente, ya que el biocarbón ha sido presentado como el aportante de las propiedades a estos suelos.

Según Glaser et al. [22], las altas concentraciones de biocarbón en la *terra preta* provinieron principalmente del carbón de cocina y restos de incendios y productos no combustibles. Por su parte, Morcote-Ríos y León [23] afirmaron que el biocarbón no es el único aportante de estos suelos, debido a que los colores más oscuros de estos horizontes se deberían más al efecto de las cenizas de los fogones.

En conclusión, estos suelos los desarrollaron los indígenas depositando materiales orgánicos, derivados de la quema de diferentes tipos de biomásas, como los restos de esqueletos de pescado, lo cual los transformaba en suelos fértiles al agregársele cierta riqueza de nutrientes [24].

3. Biomásas

La biomasa como materia prima para la producción de biocarbón es un término aplicable a todos los materiales derivados de plantas y animales [25]. En el ámbito rural se pueden encontrar biomásas como estiércoles de origen animal o cascarilla de arroz y de café, coronta de maíz, bambú o guadua, pino o acícula de pino, cáscara de cacao o de nueces, raquis de banano, bagazo de caña de azúcar, cuesco de palma de aceite, entre otras de origen vegetal.

En contraste, en el ámbito urbano, las biomásas pueden provenir de los residuos municipales y de las industrias agropecuarias y manufactureras [28]. Ello evidencia la diversidad de biomásas que son susceptibles de ser transformadas.

De acuerdo con Schmidt y Noack, citados por Escalante Rebolledo et al. [8], los componentes orgánicos que conforman la biomasa original influyen directamente en las propiedades químicas y físicas del biocarbón formado, lo que define a su vez los efectos benéficos del biocarbón y su tiempo de residencia en el suelo.

Así, pues, cualquier biomasa puede ser tenida en cuenta a la hora de producir biocarbón. Sin embargo, es necesario considerar para su selección factores como las características propias de cada región para conocer la disponibilidad de biomasa y su transportabilidad, las actividades agrícolas, agroindustriales e industriales de la zona, para saber las cantidades que puedan ser aprovechadas, y los usos alternos que puedan hacer competencia a la producción del biocarbón.

Hay que mencionar, además, que, a la hora de elegir una biomasa para transformarla, es importante que se le realice una caracterización fisicoquímica y efectuar un análisis termogravimétrico, donde se estudie su comportamiento en atmósfera inerte, que registre la pérdida de peso y velocidad de calentamiento [27], para determinar la composición relativa de la biomasa: lignina, celulosa y hemicelulosas [28].

4. Procesos de obtención del biocarbón

Los procesos de obtención del biocarbón representan la mayor parte del costo del sistema de producción. En un estudio donde se evaluaron diferentes escenarios en los que la biomasa se transforma, se determinó que es equivalente al 36 % [29].

Dentro de estos escenarios, la pirólisis es el proceso más empleado para la obtención del biocarbón, y se han desarrollado diversos mecanismos para aplicarlo. Sin embargo, también se han utilizado otros procesos como la carbonización hidrotérmica.

Según Ridhuan et al. [30], la pirólisis se define comúnmente como una descomposición termoquímica que ocurre con poco o en ausencia de oxígeno. En la literatura se encuentran diferentes tipos de pirólisis; los más comunes son la pirólisis rápida o *flash* y lenta o convencional [31]. Asimismo, se encuentran otros procesos que son menos comunes, como la pirólisis catalítico, la pirólisis ultrarrápida, la pirólisis al vacío, la hidropirólisis y la metanopirólisis, y en desarrollo la pirólisis rápida asistida por energía solar.

La pirólisis rápida genera mejores rendimientos si lo que se requiere es obtener un producto líquido. Es un proceso caracterizado por la alta velocidad (200 °C/min) y un tiempo corto de residencia de la fase de vapor (alrededor de 2 segundos) [32] que provoca la formación de un residuo rico en carbono (biocarbón) y una fracción volátil compuesta por gases y vapores orgánicos condensables (bioaceite) [33].

Por otro lado, si se requiere un mejor rendimiento de producto sólido, el mecanismo indicado es la pirólisis lenta, que se caracteriza por lapsos de calentamiento de la biomasa pausados, temperaturas bajas y largo tiempo de residencia de sólidos y gas [34].

En la región latinoamericana y africana se han reportado dos tipos de hornos de pirólisis lenta: el *Kon-Tiki Quechua* y el Hoyo Empedrado [35]. Con el *Kon-Tiki* se ha desarrollado una pirólisis de cortina de llama, un nuevo tipo de tecnología de producción del biocarbón de bajo costo con combustión de gas de pirólisis [36].

En cuanto a la carbonización hidrotérmica, uno de los estudios acerca del proceso fue realizado en México, por Velázquez-Maldonado et al. [37], donde a la humedad inicial de la biomasa se le adiciona agua para obtener una humedad final del 50 %. Este proceso se ha llegado a considerar el más fiel al proceso natural que se llevó a cabo en el periodo geológico del carbonífero, en el cual se formaron las mayores acumulaciones de carbón mineral [38].

En efecto, los procesos mencionados para la obtención del biocarbón han sido ampliamente desarrollados y sus mecanismos son más sofisticados, si se comparan con aquellos que tienen una naturaleza artesanal y cuyo objetivo es llegar a las comunidades con un proceso accesible de producción del biocarbón.

5. Efectos del biocarbón en las propiedades del suelo

Los suelos, independientemente del origen de su degradación, están perdiendo su potencial agrícola. Sin embargo, la discusión podría enfocarse en torno a la calidad de las propiedades del suelo. En la revisión de la literatura sobre el tema se evidenció que el biocarbón se ha empleado con diferentes fines, pero los que corresponden a la sostenibilidad del suelo repercuten en sus propiedades físicas, químicas y biológicas.

En primer lugar, se ha comprobado que los efectos en las propiedades físicas del suelo están relacionados con la estructura morfológica del biocarbón, ya que, debido al tamaño de sus partículas, la distribución del tamaño de los poros de la matriz del suelo puede ser modificada y mejorar la calidad del suelo [39].

Cabe resaltar que el tamaño de la partícula del biocarbón varía dependiendo de la temperatura de transformación. Las partículas de biocarbón más finas corresponden a temperaturas altas (550 °C), las cuales aumentan las áreas de superficie específicas y reducen la gravedad específica del suelo compuesto [40].

En concordancia, los macroporos del biocarbón desempeñan un papel importante en el suelo, debido a que son relevantes para funciones como la aireación y el movimiento de las raíces, así como para ofrecer la posibilidad de retención de nutrientes, lo que favorece una mejora de la productividad [41].

Igualmente, Ganesan et al. [40] demostraron que las curvas de retención de agua de un suelo con adición de biocarbón muestran una mejor respuesta en comparación con un suelo desnudo. Estos autores evaluaron la densidad seca máxima y el contenido de humedad óptimo para un suelo desnudo, que fueron de 17 kN/m³ y 17,2 %, respectivamente. Después de la adición de biocarbón, la densidad seca máxima disminuyó a 15,5-13,1 kN/m³; mientras que el contenido de humedad óptimo aumentó a 19,1 %-25,2 % [40].

En segundo lugar, el impacto en las propiedades químicas está dado por los grupos funcionales activos, el carbono orgánico y el contenido mineral del biocarbón [39]. Es decir, considerando su alto contenido de cenizas y su área de superficie, proporcionaría encalado y un aumento en el suministro y retención de nutrientes a largo plazo [42].

Cabe resaltar que en el biocarbón están presentes cantidades de potasio, fósforo, magnesio, calcio, cobre, zinc e hierro, que tienen potencial como fertilizante, según Mwampamba et al. (citados en [9]), de acuerdo con el tipo de biomasa. Las concentraciones de estos elementos inorgánicos dependen de la temperatura de pirólisis, como se evidencia en la figura 2, donde se observa la caracterización de algunos elementos del biocarbón producido a partir del endocarpio de la palma Licuri (*Syagrus coronata*) [41].

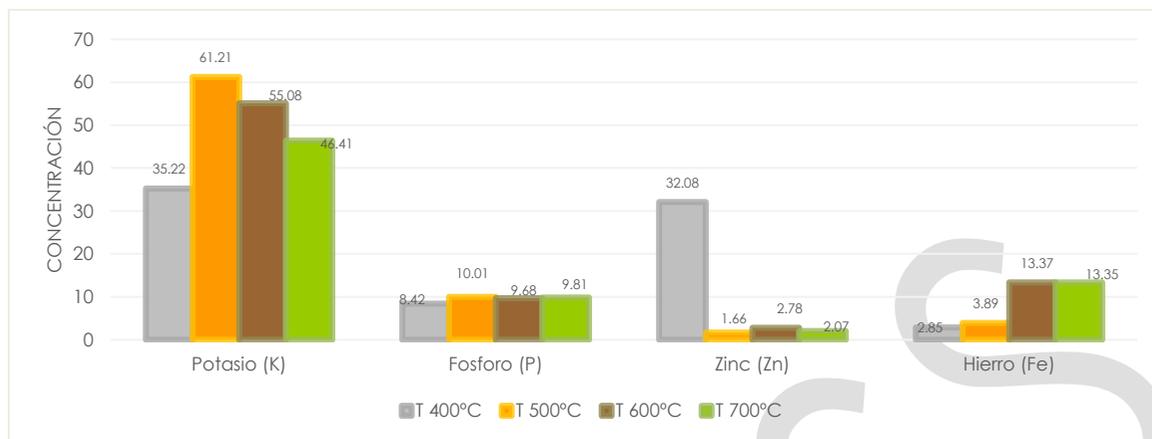


Figura 2. Relación de las concentraciones de elementos inorgánicos a diferentes temperaturas. Fuente: adaptado de [41].

A su vez, el pH del suelo puede aumentar, debido al pH del propio biocarbón y al mejorar la retención de cationes dentro del suelo [41]; esto último correlacionado con el aumento de la CIC. A este respecto, los biocarbones de palma Licuri obtenidos a temperaturas de 500, 600 y 700 °C, presentaron un pH cercano a la neutralidad (7,10; 7,31 y 7,54, respectivamente), aunque el biocarbón obtenido a 400 °C fue ligeramente ácido, con un pH igual a 6,24 [41]. En contraste, Chin-Pampillo et al. [42] encontraron que los biocarbones de cascarilla de café transformados a 300 y 600 °C, presentaron pH de 6,90 y 8,71.

Otra propiedad química es la presencia de cadenas aromáticas condensadas en el biocarbón, que mejoran la captura y el almacenamiento de carbono, gracias a que estas ralentizan la velocidad de degradación de los compuestos orgánicos, retrasan el retorno del dióxido de carbono a la atmósfera y aumentan la concentración de carbono en el suelo [41]. Más aún, el biocarbón puede reducir potencialmente la emisión de óxido nitroso en el suelo, al afectar el amoníaco y las bacterias oxidantes de nitritos, según Jia et al. (citados en [9]).

En último lugar, el biocarbón es una materia orgánica estable [43] que influye en las propiedades biológicas del suelo. Así es como la enmienda de los suelos con biocarbón cambia los hábitats microbianos, al afectar directa o indirectamente las actividades metabólicas microbianas, y modifica la comunidad microbiana del suelo, en términos de su diversidad y abundancia [44].

En concordancia, el biocarbón provee a la biota de sustratos microbianos favorables para sus actividades metabólicas y microbianas, y con ello promueve algunas funciones ecológicamente importantes, como las actividades enzimáticas, el ciclo de elementos y la productividad de las plantas [44].

6. Discusiones

Lo expuesto describe el uso del biocarbón como enmienda del suelo en la agricultura, cuyo procesamiento incluye el aprovechamiento de biomásas y el empleo de procesos como la pirólisis y la carbonización hidrotérmica. Su aplicación ha demostrado beneficios en términos de fertilidad, por su impacto en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (figura 3).

El biocarbón se comporta como un almacén de una planta de producción, la cual representa el suelo. En dicha planta se sufre por nutrientes que no se alcanzan a tratar, agua que no se alcanza a transferir, contaminantes e insuficientes insumos.

El biocarbón es el aporte a la estructura física, y los procesos químicos y biológicos de la planta de producción, el almacén donde el agua y los nutrientes se retienen mientras la línea de producción los requiere. Del mismo modo, se gestionan de una manera más eficiente tanto los nutrientes y carbono orgánico como los contaminantes, gracias a sus propiedades como catalizador.

Otro punto importante es que el biocarbón, como alternativa de solución, es un producto versátil y dinámico, cuya aplicación depende de múltiples variables. Entre ellas se encuentran las propiedades del suelo, las condiciones de clima (como la temperatura y la precipitación), el tipo de cultivo y el historial de manejo dado al suelo en prácticas agrícolas y pecuarias anteriores.

Ciertamente, alternativas como la aplicación del biocarbón al suelo pueden mejorar su calidad y, en concordancia, la productividad y rentabilidad de los agricultores, debido a que, con la apropiación de la tecnología de producción de biocarbón, se puede realizar un manejo integrado de los residuos generados en los predios y, así, optimizar sus ingresos y sobrecostos por desperdicios [45], lo que desencadenaría en un impacto positivo en los suelos agrícolas y un aporte de nutrientes para los cultivos con un producto orgánico.

En países en vías de desarrollo en Latinoamérica se han propuesto diseños de mecanismos para comunidades rurales que les permitan incluir en sus cocinas estufas modificadas multifuncionales para cocinar sus alimentos y producir biocarbón al mismo tiempo [46], [47]. Esta dinámica se considera como una dualidad: por una parte, los procesos más desarrollados y complejos factibles de escalar hacia una industrialización; por otra, los procesos con naturaleza artesanal que le apuestan a mecanismos con diseños de *open access*, para entregárselas a las comunidades.

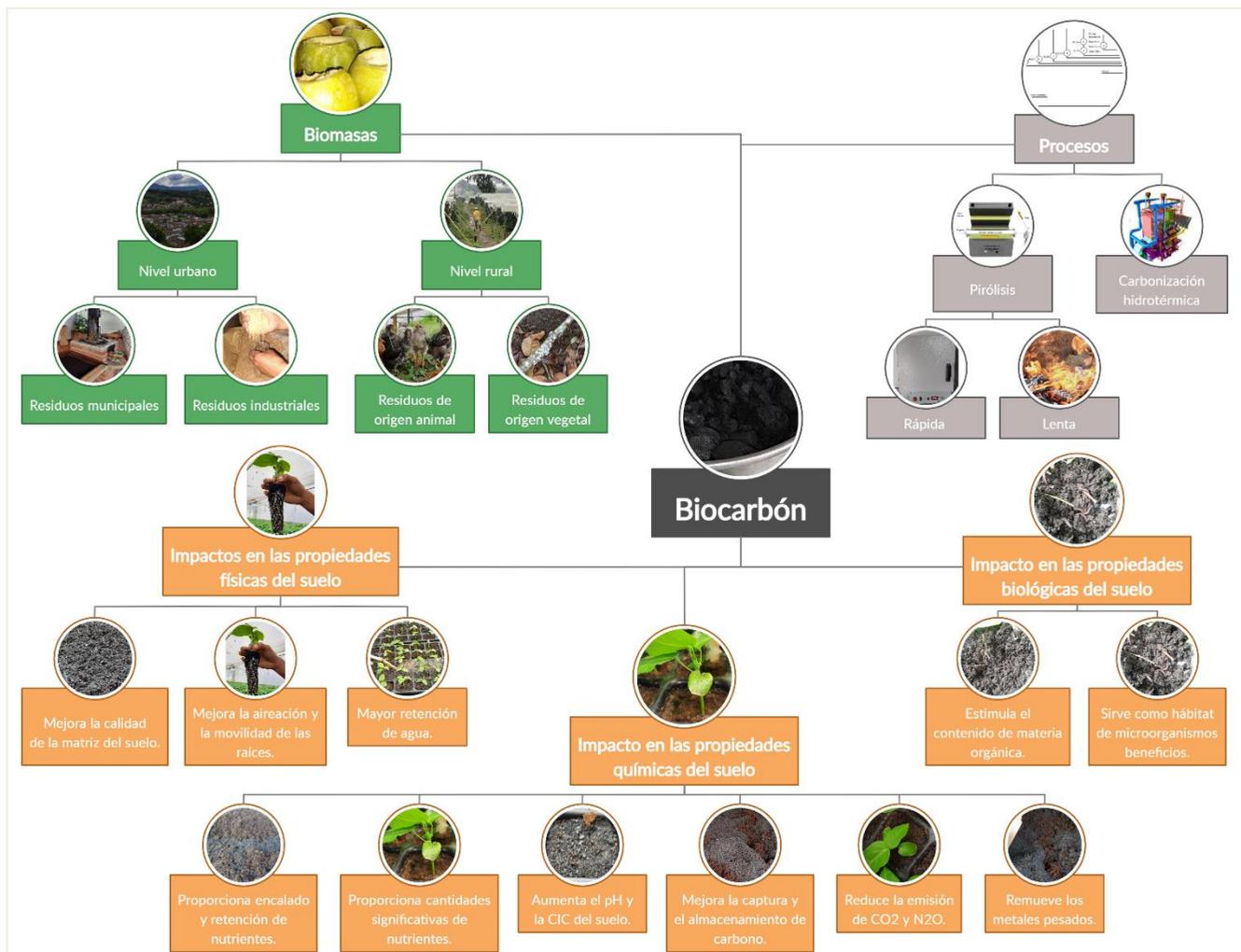


Figura 3. El biocarbón como estrategia de sostenibilidad del suelo. Fuente: elaboración propia.

Conclusiones

La degradación de los suelos agrícolas repercute tanto en la pérdida de los servicios ecosistémicos como en los costos de producción y en la rentabilidad de los sistemas de negocios del campo. No obstante, el uso del biocarbón como estrategia de sostenibilidad para mejorar la salud del suelo permite remediar los problemas asociados con la estructura física, así como con las propiedades y procesos químicos y biológicos del suelo. Esto debido a presentar macro y microporos propios y al mejoramiento de propiedades como el pH, la CIC, contenido de carbono orgánico y aporte de nutrientes.

Finalmente, en esta materia continúa la necesidad de realizar estudios que evalúen el impacto del biocarbón en el suelo agrícola a largo plazo. Sin embargo, en el país se está introduciendo el uso de esta tecnología en los procesos agrícolas, y a corto plazo, podría generarse un efecto positivo ambiental, al darle un aprovechamiento a los residuos mediante su transformación en biocarbón. Entre tanto, a mediano plazo, al disminuir el área del suelo que presenta algún grado de degradación.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos a la Gobernación del Huila y al Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, financiadores y operadores de la convocatoria Jóvenes Investigadores e Innovadores para el Departamento del Huila 2019; al Centro de Desarrollo Tecnológico de las Pasifloras de Colombia, y a la empresa Bioinsumos y Pasifloras del Macizo SAS, por sus aportes al desarrollo del proyecto de investigación.

Referencias

- [1] E. O. Luna-Robles, I. Cantú-Silva, H. González-Rodríguez, J. Marmolejo-Monsiváis, M. I. Yáñez-Díaz, F. J. Hernández y e. al., "Effects of forest management on the physical and hydrological properties of an Umbrisol in the Sierra Madre Occidental", *Rev. Chapingo*, vol. 27, n.º 1, pp. 19-32, 2021.
- [2] S. Belalcázar Serrano, "Evaluación del biocarbón derivado de cascarilla de arroz como potenciador del establecimiento y proliferación de bacterias en suelos no perturbados", tesis de grado, Univ. Icesi, Santiago de Cali, Colombia, 2013 [en línea]. Disponible: https://repository.icesi.edu.co/biblioteca_digital/bitstream/10906/76991/1/belalcazar_evaluacion_biocarbon_2014.pdf
- [3] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Grupo Técnico Intergubernamental del Suelo (GTIS), Estado Mundial del Recurso Suelo (EMRS): resumen técnico. Roma, Italia, 2016.
- [4] J. U. Ibáñez de Sendadiano, "Beneficios y riesgos de la aplicación de enmiendas orgánicas sobre la salud de suelos agrícolas", tesis de doctorado, Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, España, 2020 [en línea]. Disponible: <http://hdl.handle.net/10810/50205>
- [5] E. Concilco A., A. Moreno-Reséndez, M. García Carrillo, H. M. Quiroga Garza y O. Á. García, "Influencia del biocarbón aplicado al suelo sobre atributos de rendimiento y calidad de avena forrajera", *Terra Latinoamericana*, vol. 36, n.º 3, pp. 221-228, 2018.
- [6] D. Pandey, A. Daverey y K. Arunachalam, "Biochar: production, properties and emerging role as a support for enzyme immobilization", *J. Clean. Product.*, vol. 255, 2020.
- [7] D. Présiga-López, A. Rubio-Clemente y J. F. Pérez, "Uso del biocarbón como material alternativo para el tratamiento de aguas residuales contaminadas", *Rev. UIS Ing.*, vol. 20, n.º 1, pp. 121-134, 2021. <https://doi.org/10.18273/revuin.v20n1-2021011>
- [8] A. Escalante Rebolledo, G. Pérez López, C. Hidalgo Moreno, J. López Collado, J. Campo Alves, E. Valtierra Pacheco et al., "Biocarbón (biochar) I: Naturaleza, historia, fabricación y uso en el suelo", *Terra Latinoamericana*, vol. 34, n.º 3, pp. 367-382, 2016.
- [9] N. L. Panwar, A. Pawar y B. L. Salvi, "Comprehensive review on production and utilization of biochar", *SN Appl. Sci.*, vol. 1, n.º 168, 2019. <https://doi.org/10.1007/s42452-019-0172-6>
- [10] X. Gómez, B. Ladd, A. Muñoz y R. A. Rosa, "Determinación del efecto del biocarbón en movilidad del mercurio en sistemas suelo-planta", *Biologist*, vol. 15, n.º 1, pp. 37-48, 2017. <https://doi.org/10.24039/rtb2017151137>
- [11] S. Tenesaca Martínez, J. N. Quevedo Guerrero y R. García Batista, "Determinación de la dosis óptima de biocarbón como enmienda edáfica en el cultivo de banano (*Musa X Paradisiaca* L.) Clon Williams", *Rev. Cient. Agroecosist.*, vol. 7, n.º 3, pp. 134-141, 2019 [en línea]. Disponible: <https://aes.ucf.edu.cu/index.php/aes/article/view/328>
- [12] G. Reyes Moreno, "Aprovechamiento de residuos forestales en forma de biocarbón como alternativa agroecológica para la producción de madera de calidad de *Acacia mangium* Willd", tesis de doctorado, Univ. Nal. Colomb., Bogotá, D.C., 2018 [en línea]. Disponible: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/69541>
- [13] H. Burbano Orjuela y F. Silva Mojica, eds., *Ciencia del suelo: principios básicos*, 2.ª ed. Bogotá: Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo (SCCS), 2013.
- [14] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), *Línea base de degradación de suelos por erosión en Colombia (2010-2012)* Escala 1:100.000. Bogotá: IDEAM, 2015.
- [15] Instituto de Hidrología, Meteorología y estudios ambientales (IDEAM), *Universidad de Ciencias Aplicadas y*

Ambientales (UDCA), Síntesis del estudio nacional de la degradación de suelos por erosión en Colombia. Bogotá, 2015.

- [16] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO); Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Guía de buenas prácticas para la gestión y uso sostenible de los suelos en áreas rurales. Bogotá, 2018.
- [17] Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Los suelos sanos son la base para la producción de alimentos saludables. Washington, 2015.
- [18] A. M. Primavesi, Los bioindicadores del suelo: una herramienta de análisis en agricultura orgánica. Tunja: Fund. Univ. Juan de Castellanos, 2003.
- [19] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Política para la gestión y sostenible del suelo. Bogotá, 2016.
- [20] D. P. Abenza, "Evaluación de efectos de varios tipos de biochar en suelo y planta", tesis de grado, Univ. Autónoma de Barcelona, Bellaterra, 2012 [en línea]. Disponible: https://ddd.uab.cat/pub/trerecpro/2012/hdl_2072_202695/PFC_DanielPacoAbenza.pdf
- [21] W. I. Woods, "Development of anthrosol research", en J. Lehmann, D. C. Kern, B. Glaser, W. I. Woods (eds.), Amazonian Dark Earths. Dordrecht: Springer, 2003. https://doi.org/10.1007/1-4020-2597-1_1
- [22] B. Glaser, L. Haumaier, G. Guggenberger y W. Zech, "The 'terra preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics", *Naturwissenschaften*, pp. 37-41, 2001.
- [23] G. Morcote-Ríos y T. León Sicard, Las Terras Pretas del Igarapé Takana: un sistema de cultivo precolombino en Leticia Amazonas -Colombia. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2012.
- [24] N. Falcao, "Pesquisadores garipam a história contida na terra preta de índio", *Natureza*, 17 de junio de 2012 [en línea]. Disponible: <http://g1.globo.com/natureza/noticia/2012/06/pesquisadores-garimpam-historia-contida-na-terra-preta-de-indio.html>
- [24] J. Sherwood, "The significance of biomass in a circular economy", *Bioresour. Technol.*, vol. 300, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.122755>
- [26] T. Wang, Y. Zhai, Y. Zhu, C. Li y G. Zeng, "A review of the hydrothermal carbonization of biomass waste for hydrochar formation: process conditions, fundamentals, and physicochemical properties", *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 90, pp. 223-247, 2018.
- [27] C. Poncio, H. Falcon, M. Renzini y J. Alonso, "Aprovechamiento energético de la biomasa del sorgo y valorización de subproductos", *AJEA*, n.º 5, 2020. <https://doi.org/10.33414/ajea.5.781.2020>
- [28] N. Guiñazú, H. Falcón, S. Renzini y J. Alonso, "Valorización de residuos proveniente del sector frutihortícola para la producción de productos químicos intermedios y biocombustibles", *AJEA*, n.º 5, 2020. <https://doi.org/10.33414/ajea.5.780.2020>
- [29] K. Homagain, C. Shahi, N. Luckai y M. Sharma, "Life cycle cost and economic assessment of biochar-based bioenergy production and biochar land application in Northwestern Ontario, Canada", *For. Ecosyst.*, vol. 3, n.º 21, pp. 1-10, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40663-016-0081-8>
- [30] K. Ridhuan, D. Irawan y R. Setiawan, "Comparison of types and size of biomass on pyrolysis combustion toward the results of bio-charcoal and liquid smoke", *J. Eng. Sci. Res.*, vol. 2, n.º 1, pp. 10-15, 2020. <https://doi.org/10.23960/jesr.v2i1.37>
- [31] S. Iglesias-Abad, M. Álvarez-Vera y C. S. Jacinto Vázquez, "Biochar de biomasa residual de eucalipto (*Eucalyptus globulus*) mediante dos métodos de pirólisis", *Rev. Manglar*, vol. 17, n.º 2, pp. 105-111, 2020.
- [32] Y. López Pulgarín y B. Franco Orozco, "Gestión de residuos sólidos urbanos: Un enfoque en Colombia y el departamento de Antioquia", *Cuad. Activa*, vol. 12, n.º 1, pp. 119-134, 2021 [en línea]. Disponible: <https://ojs.tdea.edu.co/index.php/cuadernoactiva/article/view/808>
- [33] J. Ferrer-Gutiérrez, J. Marcheno-Revilla, S. Blacio-Toro y T. Vera-Infante, "Localización y producción potencial de una planta de pirólisis para la valorización de residuos agrícolas", *Polo del Conocimiento*, vol. 5, n.º 12, pp. 265-278, 2020. <http://dx.doi.org/10.23857/pc.v5i12.2046>
- [34] D. Forero-Gutiérrez y J. P. Navarro-Muñoz, "Implementación de alternativa de aprovechamiento de residuos sólidos orgánicos mediante el proceso de pirólisis lenta para la obtención de materiales de uso agrícola", tesis de grado, Univ. de La Salle, Bogotá, Colombia, 2017 [en línea]. Disponible: https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/364/
- [35] N. Stadler-Kaulich y A. Hernando P., "Más Allá de la agroforestería: el biocarbón activado y la madera rameal fragmentada. Utilización y preparación en Mollesnejta", *Acta Nova*, vol. 8, n.º 4, pp. 572-592,

2018.

- [36] G. Cornelissen, N. R. Pandit, P. Taylor, B. H. Pandit, M. Sparrevik y H. P. Schmidt, "Emissions and char quality of flame-curtain 'Kon Tiki' kilns for farmer-scale charcoal/biochar production", *PLOS ONE*, vol. 11, n.º 5, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0154617>
- [37] J. Velázquez-Maldonado, P. Juárez-López, J. Anzaldo-Hernández, G. Alejo-Santiago, L. A. Valdez-Aguilar, I. Alía-Tejacal, et al., "Concentración nutrimental de biocarbón de cascarilla de arroz", *Rev. Fitotec. Mex.*, vol. 42, n.º 2, pp. 129-136, 2019.
- [38] M. Schlegel, B. Ibrahim, H. Ortiz-Laurel, D. Rössel-Kipping, J. Frías, N. Kanswohl y J. Zosel, "Hydrothermal carbonization process to improve transportability of plant biomass", *Agroproductividad*, vol. 11, n.º 11, pp. 3-9, 2018.
- [39] A. Mellalou, A. Outzourhit y A. Bacaoui, "Nanostructured biochar: production pathways and applications", en *Nanoscience and Nanotechnology in Security and Protection against CBRN Threats*. Dordrecht: Springer, 2018, pp. 187-197. https://doi.org/10.1007/978-94-024-2018-0_14
- [40] S. P. Ganesan, S. Bordoloi, J. Ni, T. Sizmur, A. Garg y S. Sekharan, "Exploring implication of variation in biochar production on geotechnical properties of soil", *Biomass Conv. Bioref.*, vol. 10, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00847-2>
- [41] L. E. R. Santos, L. Meili, J. I. Soletti, S. H. V. Carvalho, L. M. O. Ribeiro, J. L. S. Duarte y R. Santos, "Impact of temperature on vacuum pyrolysis of *Syagrus coronata* for biochar production", *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, vol. 22, p. 878-886, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10163-020-00978-8>
- [42] J. S. Chin-Pampillo, A. Alfaro-Vargas, R. Rojas, C. E. Giacomelli, M. Pérez-Villanueva, C. Chinchilla-Soto, J. M. Alcáñiz y X. Domene, "Widespread tropical agrowastes as novel feedstocks for biochar production: characterization and priority environmental uses", *Biomass Conv. Bioref.*, vol. 10, 2020. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00714-0>
- [43] B. N. Moebius-Clune, D. J. Moebius-Clune, B. K. Gugino, O. J. Idowu, R. R. Schindelbeck, A. J. Ristow, H. M. van Es, J. E. Thies, H. A. Shayler, M. B. McBride, K. S. M. Kurtz, D. W. Wolfe y G. S. Abawi, *Comprehensive Assessment of Soil Health*. New York: Cornell University, 2017.
- [44] K. N. Palansooriya, J. T. F. Wong, Y. Hashimoto, L. Huang, J. Rinklebe, S. X. Chang, N. Bolan, H. Wang y Y. Sik O., "Response of microbial communities to biochar-amended soils: a critical review", *Biochar*, vol. 1, pp. 3-22, 2019.
- [45] A. Sánchez-Reinoso, E. Ávila-Pedraza y H. Restrepo-Díaz, "Use of biochar in agriculture", *Acta Biol. Colomb.*, vol. 25, n.º 2, pp. 327-338, 2020. <https://doi.org/10.15446/abc.v25n2.79466>
- [46] L. V. Soria Guía y J. E. Palo Tejada, "Evaluación de un sistema integrado cocina a leña con tanque de agua para calefacción de viviendas rurales en zonas altoandinas del Perú", tesis de maestría Univ. Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú, 2019 [en línea]. Disponible: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/10285>
- [47] D. M. Segura-Chavarría, "Control de calidad de biocarbón para la producción de Terra Preta", tesis de grado, Tecnológico de Costa Rica, Cartago, Chile, 2018 [en línea]. Disponible: <https://hdl.handle.net/2238/10315>