
Más Allá de la Agroforestería El Biocarbón Activado y la Madera Rameal Fragmentada: utilización y preparación en Mollesnejta

Beyond Agroforestry Activated Biocarbon and Fragmented Rameal Wood: use and preparation in Mollesnejta

Noemi Stadler-Kaulich & Alejandro Hernando Perteguer

Directora técnica de Mollesnejta - Centro de la Agroforestería Andina

nstadlerkaulich@gmail.com

Resumen: Es alarmante la pérdida de suelo fértil a nivel global. Las prácticas agrícolas convencionales sumadas a los efectos del cambio climático están reduciendo al mínimo la materia orgánica de los suelos, con las consecuencias de una reducida capacidad de regeneración de nutrientes y del almacenamiento de la humedad. Para asegurar la seguridad alimentaria en el futuro se deben impulsar técnicas agrícolas sostenibles que no sólo sean productivas, sino también consoliden la fertilidad del suelo en el largo plazo. En Mollesnejta- Centro de Agroforestería Andina empleamos sistemas de agroforestería dinámica en conjunción con dos técnicas de agroecología implicadas en el mejoramiento del suelo: (a) Biocarbón Activado y (b) Madera Rameal Fragmentada (MRF). El material de la poda de los sistemas agroforestales fue empleado en el tratamiento del suelo a través de ambas técnicas. En este artículo se describen los beneficios del Biocarbón Activado y la MRF así como su modo de preparación y aplicación en el suelo. Asimismo, se comparten las experiencias vividas en Mollesnejta- Centro de Agroforestería Andina tras el uso de estas técnicas y sus resultados. Las dos técnicas resultaron efectivas en el aumento de la fertilidad del suelo y su capacidad de almacenar la humedad.

Palabras clave: agroecología, agroforestería dinámica, biocarbón, terra preta, madera rameal fragmentada

Abstract: The loss of soil fertility at the global scale is alarming. Conventional agriculture practices, in addition to climate change effects, are reducing the organic matter content of soil as well as the soil's capacity to regenerate nutrients and to retain rainwater. In order to ensure food security in the future, sustainable agriculture techniques have to be promoted. These techniques should not only be productive, but also build soil fertility in the long term. At Mollesnejta- Centro de Agroforestería Andina, we apply dynamic agroforestry measures in combination with two agroecological techniques, with the goal of improving soil quality: (a) Activated Biochar and (b) Ramial Chipped Wood (RCW). Pruning material sourced

from agroforestry systems was used as a soil amendment through both techniques. This article describes the benefits of Activated Biochar and RCW and discusses their preparation and application to the soil. Finally, a summary is provided of all the experiences and results obtained at Mollesneja- Centro de Agroforestería Andina after using these techniques. Both techniques proved to be effective at improving soil fertility and his capacity to store rainwater.

Key words: agroecology, dynamic agroforestry, biochar, terra preta, ramial chipped wood, soil amendment

1 Introducción

En el siglo XXI, la agricultura se enfrenta un gran reto: dar de comer a una población cada vez más grande y a la vez proteger los recursos naturales suelo, agua, aire y biodiversidad, con el fin de asegurar la supervivencia de las generaciones futuras (Bai et al, 2008; Oliveira et al, 2017). En lo que se refiere a la producción de alimentos, preocupa sobre todo la fertilidad de los suelos agrícolas y la disponibilidad de agua de riego (Pender, 2009; (Tan et al., 2017). A pesar de que la agro-industria, surgida en la revolución verde, está contribuyendo en gran medida al abastecimiento de la población global, no está tomando en cuenta la secuela medioambiental resultante de su actividad, especialmente en relación al recurso suelo (Sánchez, 2002). La aplicación de fertilizantes inorgánicos no resulta una solución sostenible en el mejoramiento de la fertilidad o el mantenimiento de la productividad agrícola en el largo plazo (Agegnehu et. al, 2017). Por el contrario, es ampliamente reconocido que la aplicación excesiva de fertilizantes químicos causa el deterioro del suelo, así como otros problemas medioambientales derivados de su aplicación, como la rápida mineralización de la materia orgánica o la progresiva desaparición de los stocks de carbono (Oliveira et al, 2017).

El agotamiento de la fertilidad del suelo y el consecuente descenso de la productividad agrícola se debe en gran parte a la pérdida de la materia orgánica del suelo y a la falta de nutrientes, que son las limitantes principales de las zonas tropicales y sub-tropicales (Tan et al., 2017). La pérdida de la materia orgánica contribuye a la degradación del suelo por procesos de erosión, compactación, pérdida de nutrientes, pérdida de biodiversidad o desertificación. En un suelo degradado los cultivos son, además, generalmente más vulnerables, razón por la cual es más probable la invasión por enfermedades y/o plagas (Pender, 2009; Tan et al., 2017). La aplicación de agroquímicos es solamente un remedio a corto plazo, ya que éstos no mantienen la materia orgánica ni los nutrientes en el suelo, sino que se degradan rápidamente (Sánchez, 2002). Además, tienen la tendencia a dispersarse más allá de los límites deseados, afectando a otros ecosistemas y bioacumulándose en la cadena alimenticia, lo que supone una gran amenaza a la salud humana y al medio ambiente (Bai et al., 2008).

Mantener un nivel apropiado de materia orgánica en el suelo y asegurar el funcionamiento del ciclo de nutrientes natural sin la necesidad de agroquímicos es crucial para la consolidación de un suelo sano, por lo que es necesario impulsar prácticas agrícolas productivas y sostenibles (Tan et al., 2017). Dichas prácticas deben priorizar el mantenimiento del carbono orgánico del suelo, ya que de esa forma se promueve la retención de agua y nutrientes, el mejoramiento de la estructura del suelo y se proporciona un hábitat idóneo para la proliferación de la biota del suelo (Bationo et al., 2007). En este escenario, y teniendo en cuenta la cada vez más extendida desertización motivada por el cambio climático, el reto consiste en devolver al suelo una estructura que favorezca la recuperación de su fertilidad y su plena capacidad de retener la humedad (Agegnehu et al., 2017). Este artículo propone dos técnicas agroecológicas alternativas para lograr la restauración del suelo de forma respetuosa con el medio ambiente: (a) fabricación de biocarbón a partir del material de poda de los sistemas agroforestales y activación con guano y/o compost; (b) transformación del material de poda de los sistemas agroforestales en Madera Rameal Fragmentada (MRF) para su aplicación a los terrenos de cultivos y a las parcelas agroforestales.

2 El Biocarbón

A la luz de la problemática anteriormente descrita, es evidente que urge encontrar técnicas agrícolas alternativas que aumenten la fertilidad del suelo de forma respetuosa con el medio ambiente. Por ello, diversos grupos de investigación en distintas partes del mundo están desarrollando una nueva rama de investigación en torno a un material con un alto potencial en agroecología, el biocarbón. El término biocarbón ha sido acuñado recientemente para diferenciar el carbón convencional del destinado a mejorar la calidad del suelo (Oliveira et al., 2017; Tan et al., 2017). Este material se considera una herramienta de gran utilidad en el manejo de los suelos debido a sus propiedades físico-químicas únicas. Su organización molecular negativamente cargada le permite permanecer en el medio ambiente por períodos mucho más largos que cualquier otra forma de carbono orgánico (Zimmerman, 2010).

Además, posee una enorme superficie específica derivada de la infinidad de microcavidades que cubren la totalidad de su estructura, llegando incluso a valores de más de 2500 m²/g m² dependiendo del tipo de biocarbón. Estas características, sumadas a su condición neutra o ligeramente alcalina, confieren al biocarbón la capacidad de influir en los ecosistemas edáficos de manera notable (IBI, 2015).

El biocarbón ha estado formando parte de la composición del suelo en distintas localizaciones del planeta por miles de años pasando de forma prácticamente inadvertida a la comunidad científica (Schmidt et al., 2014). Un claro ejemplo es la llamada “terra preta” (tierra negra en portugués), hallada en una gran cantidad de

puntos a lo largo de la cuenca del río Amazonas. En estos lugares la tierra tiene una gran productividad y presenta un color negruzco como consecuencia de la alta concentración de materiales carbonizados. La calidad de estas tierras se atribuye a la presencia de biocarbón en concentraciones de hasta un 9%, el cual se conjetura que pudo ser intencionadamente añadido por las comunidades precolombinas como medida para mantener la fertilidad de las tierras de cultivo (Gerlach et al., 2012, 2006). Por ese motivo, investigar los beneficios de la aplicación de biocarbón al suelo es considerado por algunos expertos como la recuperación de los saberes ancestrales de la agricultura sostenible.

El efecto inmediato de la aplicación de biocarbón al suelo es el aumento de la disponibilidad de los elementos K, P, N y Zn, así como Ca y Cu aunque en menor medida. Sin embargo, en lo que se refiere al mejoramiento del suelo, el biocarbón se considera más un facilitador de recursos que una fuente primaria de nutrientes (DeLuca et al., 2009; Oliveira et al., 2017). El biocarbón tiene una extraordinaria capacidad de absorción derivada de su alta porosidad y su gran superficie específica cargada negativamente. Los suelos suplementados con biocarbón poseen una capacidad de retención de agua y nutrientes mucho mayor que antes de ser tratados (Rajapaksha et al., 2016; Sombroek et al., 2003). El biocarbón actúa entonces como una esponja situada en el horizonte A del suelo, allí donde se encuentran las raíces de las plantas cultivadas, ayudando a reducir la lixiviación de nutrientes (Tan et al., 2017). Además, a medida que el biocarbón envejece incorpora un mayor número de cargas negativas en su estructura, lo que potencialmente promueve la agregación del suelo y una todavía mayor capacidad de absorción. (Joseph et al., 2009; Inyang et al., 2010).

Asimismo, se ha observado que el biocarbón tiene otros potenciales beneficios en el mejoramiento de las propiedades químicas del suelo. El biocarbón ralentiza el proceso de mineralización de la materia orgánica permitiendo la acumulación de ésta en el suelo y, por ende, una mayor capacidad de intercambio catiónico (CIC). (Glaser et al., 2002). Estudios comparativos realizados en parcelas con y sin biocarbón encontraron valores de CIC mucho más elevados en aquellas parcelas suplementadas con biocarbón (Zhao et al., 2015). Del mismo modo, se cree que este material puede ser empleado para reducir la salinidad del suelo (Lehmann et al., 2003a; Van Zwieten et al., 2014), disminuir la concentración de contaminantes o incluso modular el pH de suelos ácidos (Rousk et al., 2010; Sparkes y Stoutjesdijk, 2011). Las propiedades físicas del suelo también se ven afectadas después de la aplicación de biocarbón. Estudios previos han constatado que la introducción de biocarbón en suelos infértiles y parcialmente degradados facilitó en gran medida las labores de descompactación. (Abel et al., 2013; Chan et al., 2007).

Otro de los beneficios de la aplicación de biocarbón está relacionado con el aumento de la biomasa microbiana del suelo. (Lehmann et al., 2011; Wang et al., 2016). Se cree que la estructura porosa del biocarbón ofrece micro-hábitats idóneos

para la proliferación de microorganismos. El biocarbón mejoraría física y químicamente las propiedades del suelo proporcionando a los microorganismos un hábitat más favorable para su desarrollo. (Lehmann et al., 2011; Gomez et al., 2014). Análisis edafológicos realizados de manera posterior al empleo del biocarbón revelaron aumentos significativos en las concentraciones de micorriza y bacterias actinomicetales. (Abujabhah et al., 2016). Asimismo, Ducey et al. (2013) confirmaron que existía una mayor abundancia de microorganismos fijadores de N en suelos suplementados con un 10% de biocarbón.

Todas estas modificaciones del ecosistema edáfico tienen lógicamente una gran repercusión en el componente vegetativo. De manera general, se cree que el uso de biocarbón desencadena una serie de alteraciones físico-químicas que culminan con la consolidación de la fertilidad y calidad del suelo (Agegnehu et al., 2016; Gaskin et al., 2010; Lehmann et al., 2003), lo que a su vez beneficia el desarrollo de las plantas. Aumentos significativos en el crecimiento de las plantas, así como en su productividad y biomasa radical, han sido observados posteriormente a la aplicación de biocarbón. (Abiven et al., 2015; Agegnehu et al., 2015). Revisiones científicas publicadas recientemente afirman que la productividad de los cultivos puede aumentar alrededor de un 20% con tasas de aplicación de biocarbón de 10t por hectárea.

Cabe mencionar que no todas las investigaciones obtuvieron resultados positivos al emplear biocarbón en el manejo de los suelos. Algunos estudios sugieren que la aplicación de biocarbón puede generar una indeseada sobrecarga de nutrientes o incluso favorecer la liberación de metales pesados (Tan et al., 2017). Asimismo, la germinación de ciertas especies de plantas puede verse interrumpida con altas concentraciones de biocarbón o se pueden generar procesos de desregulación del pH o de las comunidades microbióticas del suelo (Lehmann et al., 2011). Del mismo modo, en lo que se refiere al crecimiento vegetal o la productividad, numerosos estudios realizados en zonas templadas no observaron ningún cambio significativo en el desarrollo de las plantas tras la aplicación de biocarbón. (Borchard et al., 2014; Schmidt et al., 2014).

Finalmente, es importante resaltar el rol del uso del biocarbón en la protección del medio ambiente. La aplicación del biocarbón es considerada una técnica de cultivo revolucionaria por promover la productividad de los suelos y simultáneamente contribuir a mitigar los efectos del cambio climático (Schmidt et al., 2014). Cuando el biocarbón es introducido en el suelo se favorece el secuestro de carbono y, por otra parte, el mantenimiento de la calidad de las fuentes de agua como consecuencia de una mayor retención de nutrientes y contaminantes (Tan et al., 2017; Lehmann et al., 2006; Shackley et al., 2010). Análisis globales han revelado que nada menos que un 12% de las emisiones de efecto invernadero podrían ser reducidas si la tradicional práctica de la “tala y quema” fuese remplazada por la “tala y

carbonización". (Lehmann et al., 2006; Woolf et al., 2010). Además, el potencial del biocarbón como mitigador del cambio climático es incluso superior si se considera su capacidad de recuperar suelos degradados improductivos, ya que de ese modo se reduciría la presión antrópica ejercida sobre otros ecosistemas. (Barrow, 2012).

3 Formación del Biocarbón

El biocarbón se produce a través de un proceso químico irreversible en ausencia de oxígeno llamado pirólisis (Lehmann, 2007). Los dos factores que más influyen en las características finales del biocarbón son el tipo de material empleado en la carbonización y la temperatura de pirólisis (Crombie et al., 2013; Ippolito et al., 2015; Ronsse et al., 2013; Subedi et al., 2016). El modo de preparación del biocarbón es clave para asegurar las propiedades del mismo y poder eventualmente favorecer la fertilidad del suelo. (Agegnehu et al., 2015; DeLuca et al., 2009; Granatstein et al., 2009). Una pirólisis lenta a baja temperatura (350-550°C) producirá, por ejemplo, un biocarbón con un 30-40% de contenido en C mientras que una pirólisis rápida uno del 12% (Inyang y Dickenson, 2015). El pH del biocarbón, del mismo modo, aumentará a medida que se incrementa la temperatura de pirólisis debido a un mayor contenido en cenizas (Brewer et al., 2012; Gul et al., 2015; Windeatt et al., 2014).

Actualmente, la International Biochar Initiative (IBI), está tratando de determinar qué combinación de características es la más apropiada para crear un biocarbón de calidad con la capacidad de mejorar la fertilidad del suelo. (IBI, 2014). Las principales características que determinan la calidad del biocarbón son el pH, la cantidad de C, P y N, la conductividad, la capacidad de neutralizar el ácido, la capacidad de intercambio catiónico y la capacidad de absorción de nutrientes o contaminantes. Sin embargo, todavía no se ha conseguido correlacionar empíricamente ningún parámetro físico-químico del biocarbón con la productividad de los cultivos (Droesch et al. 2013).

Existen muchas maneras diferentes de producir carbón, ya que es un proceso bien conocido por el ser humano desde hace miles de años. Infinidad de civilizaciones en diferentes partes del mundo encontraron la manera de quemar sus residuos en ausencia de oxígeno, creando así carbones con diversas propiedades que utilizaban según sus propósitos (Agegnehu et al., 2017). Es precisamente por ello por lo que los grupos de investigación están buscando maneras de producir biocarbón de calidad de una manera sencilla y económica. No se necesita una alta tecnología para producir un buen biocarbón como ya demostraron nuestros antepasados y, además, el objetivo principal de los investigadores es difundir esta técnica de mejoramiento del suelo entre agricultores o gente sin muchos recursos (Schmidt, 2012; Shackley, 2014).

Así, grupos de científicos desarrollaron diferentes hornos de biocarbonización con el objetivo de proporcionar a los agricultores y comunidades un sistema con el que transformar eficazmente sus residuos biológicos en biocarbón. En Mollesnejta - Centro de Agroforestería Andina se trabaja con dos tipos de hornos de biocarbonización: el Kon-Tiki Quechua y el Hoyo Empedrado. El Kon-Tiki Quechua es un cono metálico inverso inventado por un grupo de investigadores suizos del Ithaka Institute que permite elaborar un producto de alta calidad gracias a un inteligente diseño que optimiza la termodinámica de formación del biocarbón. La forma cónica inversa favorece la compactación del biocarbón al fondo de la estructura, así como el mantenimiento de una gran llama superficial que aísla el proceso pirolítico del oxígeno. El armazón metálico permite reconducir el calor emitido de la pirólisis y la combustión de nuevo al horno, lo que favorece una temperatura uniforme en la totalidad de la estructura y por tanto un producto con unas características más homogéneas. Otra particularidad del Kon-Tiki Quechua es la doble capa metálica que cubre el cono, la cual permite generar una corriente de aire caliente que asciende por el espacio que separa ambas capas. Ese aire caliente, con una menor cantidad de oxígeno que el aire frío, acaba siendo expulsado hacia a la parte superior del Kon-Tiki Quechua permitiendo la estabilización de la combustión y el aislamiento del proceso pirolítico en las capas inferiores (Schmidt et al., 2014).

Una vez finalizada la carbonización, la parte inferior del Kon-Tiki se conecta a una toma de agua para finalizar el proceso pirolítico y hacer que el vapor de agua resultante atraviese la columna de biocarbón. De ese modo, el diámetro de los poros del biocarbón se ve aumentado y se genera un producto de mayor calidad con una incrementada capacidad de absorción (Schmidt et al., 2014).

Alternativamente se puede realizar la carbonización en el hoyo empedrado, que también tiene una estructura cónica con una toma de agua inferior pero construida bajo tierra y con materiales mucho más rudimentarios. Los únicos materiales empleados en su construcción fueron piedras, adobe, un tubo de metal y otro de plástico. El motivo de la creación de este segundo horno de biocarbonización fue la demostración tangible a los agricultores de que pueden producir biocarbón de calidad sin la necesidad de una inversión económica.

En Mollesnejta - Centro de Agroforestería Andina son empleados ambos hornos de biocarbonización para la fabricación de biocarbón a partir de todos los materiales leñosos provenientes de las prácticas agroforestales que no son aptos para la construcción. Para la formación de biocarbón en el Kon-Tiki Quechua se introduce en primer lugar un pequeño montón de leña delgada (grosor de un dedo) dejando una apertura en el centro que actúa como chimenea. A continuación, el montón de leña se prende por la parte superior y se espera hasta que el fuego consume casi la totalidad de la madera. En ese momento se introduce más leña que ahora puede ser más gruesa (grosor de la muñeca) de forma paralela procurando no

dejar ningún espacio vacío en el que pueda penetrar el aire. Cuando se observa que la nueva capa de madera presenta un color negruzco, está ligeramente agrietada y contiene algo de cenizas, se añade una segunda capa de troncos (que pueden tener el diámetro de un brazo) de la misma forma. Se repetirá el mismo mecanismo con las siguientes capas de madera ahora hasta el grosor de un muslo procurando no dejar los troncos de mayor grosor para el final porque requieren más tiempo de carbonización. Una vez carbonizado todo el material leñoso, se abre la llave del agua y se espera hasta que el agua cubra la totalidad del biocarbón para terminar de golpe el proceso de pirolisis (Schmidt et al., 2014). En el caso del hoyo empedrado, el proceso de formación de biocarbón es prácticamente el mismo solo que el producto final podría resultar de una calidad algo inferior por las limitaciones de su diseño.

4 Activación del Biocarbón y Aplicación en el Suelo

El recién fabricado biocarbón se puede dejar un par de días cubierto de agua. Si se espera más tiempo, el agua se evaporará y dejará atrás todas las cenizas generadas en el proceso, lo que acidificará el biocarbón (Agegnehu et al., 2017). Es por ello por lo que se recomienda retirar el agua del horno de biocarbonización antes de que se evapore y almacenarla para otros usos en agroecología. Se ha comprobado, por ejemplo, que el agua residual del Kon-Tiki ha sido efectiva para ahuyentar caracoles y hongos no deseados de determinados sistemas agrícolas (Schmidt et al., 2014).

Si se pretende añadir el biocarbón a terrenos pobres o ligeramente pobres, como es el caso de Mollesnejta - Centro de Agroforestería Andina, un paso previo muy importante es la llamada “activación del biocarbón”. Debido a la gran capacidad absorbente de este material, si se aplica directamente a terrenos pobres se podría estar promoviendo la excesiva retención de los pocos nutrientes que tiene el suelo, haciéndolos menos accesibles para las plantas (Agegnehu et al., 2017). Por ese motivo es necesario mezclar el biocarbón con materia orgánica antes de introducirlo al suelo, proceso conocido como “activación del biocarbón” (Schmidt et al., 2014). De esta manera, el carbón estará liberando poco a poco los nutrientes y humedad alojados en su interior. En Mollesnejta - Centro de Agroforestería Andina es mezclado el biocarbón con cáscaras de huevo molido en el batán, guano de llama y burro y orina. No existe prácticamente literatura científica explicando qué tipo de materia orgánica es mejor para activar el biocarbón por lo que futuros estudios en ese aspecto son necesarios.

Una vez que el biocarbón está activado estará listo para su aplicación al suelo. En Mollesnejta - Centro de Agroforestería Andina se suele introducir el biocarbón activado alrededor de los árboles frutales que están empezando a producir o ya produciendo por sus requerimientos nutricionales. En primer lugar, se cava un surco alrededor del árbol objetivo con un diámetro ligeramente superior al tamaño de la

copa. Lo más práctico es la profundidad y el ancho del azadón. Lo que se busca es que las raíces del frutal puedan tener acceso a los nutrientes liberados progresivamente por el biocarbón. Cuando el surco está acabado, se introduce en él el biocarbón activado. En el caso que éste fuera mojado se le tapa con la tierra que anteriormente estaba en el surco. Si el biocarbón estuviera seco es recomendado de mojarlo con agua para facilitar la deliberación de nutrientes y conservar la actividad de los microorganismos y macroorganismos que ahí se albergan. Después se tapa el biocarbón con la tierra que anteriormente estaba en el surco. Para finalizar la aplicación se coloca una espesa capa de hojarasca sobre el suelo alrededor del tronco del frutal.

Los resultados obtenidos hasta el momento en Mollesnejtá - Centro de Agroforestería Andina por ensayos de pasantías en la aplicación del biocarbón activado son alentadores. Nahstoll, S. de la Technische Universität München ha podido demostrar en 2015, que la aplicación de biocarbón en el suelo mejora la disponibilidad de humedad para el cultivo. Mayor es la cantidad de biocarbón vegetal en el suelo, mejor es el abastecimiento con la humedad necesaria para el desarrollo de las plantas.

5 Madera Rameal Fragmentada

Otra técnica de mejoramiento del suelo con alto potencial en agroecología, aunque todavía tan reconocida como el biocarbón, es la llamada Madera Rameal Fragmentada (MRF). Esta técnica rescata el proceso de pedogénesis (del griego pedo-, “tierra” y -génesis, “formación”) que transcurre de forma natural en los bosques y lo aplica a los sistemas agrícolas. Los ecosistemas forestales mantienen su fertilidad, entre otra serie de procesos biológicos, a través de la descomposición de la materia orgánica que cae al suelo (Lemieux et al., 2000). El componente vegetativo adiciona constantemente hojas, ramas o frutos al suelo, devolviendo así los nutrientes al mismo y manteniendo la fertilidad (Soumare et al., 2002). Este es un proceso universal de reciclaje de energía y materia llevado a cabo por los macro- y microorganismos en el suelo que transforman la materia orgánica para hacer los nutrientes de nuevo asimilables para las plantas (Gruda, 2008).

Pese a que este proceso es bien conocido por la comunidad científica desde hace tiempo, la aplicación de conceptos de ecología forestal en la agricultura sigue siendo escasa o prácticamente nula. La agricultura, en lo que se refiere al mejoramiento del suelo, presta demasiada atención al proceso de mineralización y se centra en la aplicación de abonos o fertilizantes que sólo son útiles a corto plazo. Sin embargo, el proceso de humificación, base indiscutible de la pedogénesis y aparentemente olvidado por los agrónomos, favorece no sólo la mineralización sino también la consolidación de la fertilidad y calidad del suelo a largo plazo. Dicho en otras

palabras, la mineralización conduce a la pérdida de materia orgánica y la humificación a su acumulación (Lemieux et al., 2000).

Es por ello por lo que investigadores en agroecología están buscando formas de activar el proceso natural de humificación en suelos agrícolas. Según la literatura, el detonante principal del proceso de humificación es la descomposición de los materiales leñosos. La madera contiene celulosas, hemicelulosas, lignina, aminoácidos, enzimas, glúcidos, fitohormonas y otros componentes que sirven de alimento a los organismos del suelo (Soumare et al., 2002). Éstos transforman dichas sustancias en formas más simples y desencadenan así el proceso de formación del suelo. Entre todos estos componentes, algunos como las fitohormonas, los glúcidos, las enzimas o los aminoácidos son muy fácilmente asimilables por la microbiota del suelo. Otros, como las celulosas o las hemicelulosas, requieren un mayor esfuerzo de degradación, aunque finalmente liberan azúcares que retroalimentan el desarrollo de la microbiota del suelo. La lignina, sin embargo, es un polímero también muy energético, pero de muy difícil acceso para los microorganismos por su estructura única formada por cadenas de ciclos aromáticos (Gruda, 2008).

La degradación de la lignina, especialmente la proveniente de las angiospermas (Stevanovic, 2006), se ha identificado como el punto de partida de una sucesión de ciclos biológicos complejos que culminan con la formación de humus. Los principales microorganismos encargados de la degradación de este material son un grupo de hongos llamados basidiomicetes (Basidiomycota). Los sistemas enzimáticos de los hongos basidiomicetes son capaces de producir ácido fúlvico y húmico a partir de la lignina, generando así las bases para la consolidación de un suelo fértil (Leisola y García 1989). Este proceso, sumado a la simultánea liberación de los nutrientes alojados en la lignina, permite una estructuración óptima del suelo, así como la acomodación del mismo para nuevas formas de vida (Noël, 2006). Así, se podría decir de manera general que la degradación de la lignina en los terrenos agrícolas permitiría a mediano y largo plazo la recuperación física, química y biológica del suelo, tras la pérdida de la fertilidad ocasionada por la supresión de la cubierta vegetal (Soumare et al., 2002).

Teniendo en cuenta los procesos biológicos anteriormente mencionados, un grupo de investigadores de la Laval University (Quebec, Canadá) dirigidos por el Dr. Lemieux se propuso aplicar el proceso natural de humificación de los bosques en el mejoramiento de los suelos agrícolas (Lemieux et al., 2000). Para ello, los investigadores comenzaron a trocear la madera de las ramas y a añadirla al suelo para observar sus efectos, bautizando esta técnica como Madera Rameal Fragmentada (MRF). La elección de las ramas de los árboles y arbustos como material de partida no fue casual, ya que se cree que alrededor del 75% de los nutrientes de las plantas se encuentran almacenados en las ramas (Noël, 2006). La fragmentación de la

madera, por otra parte, tenía como objetivo facilitar la descomposición por los hongos basidiomicetes y facilitar el manejo de los cultivos (Lemieux, 1993).

Las investigaciones con MRF obtuvieron resultados muy positivos tanto a nivel químico, físico como biológico. En cuanto al nivel químico, la modificación más evidente del suelo tras la aplicación de la MRF fue la progresiva acumulación de humus. Estudios realizados por Noël (2006) mostraron que aquellos suelos tratados con MRF quintuplicaban la velocidad de formación de humus en comparación con las parcelas tratadas con abonos convencionales. De forma simultánea, durante el proceso de degradación de la MRF, se vuelven disponibles para las plantas los elementos minerales NO_3^- , NH_4^+ , H_2PO_4^- o HPO_4^{2-} , K^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} ... entre otros, los cuales refuerzan el crecimiento vegetativo y la formación de cadenas tróficas (Gruda, 2008). Del mismo modo, se ha comprobado que la MRF favorece el secuestro de C y parece estar implicada en la reducción de los contaminantes del suelo (Lemieux et al., 2000).

En lo que se refiere a la alteración de las propiedades físicas del sistema edáfico, se ha comprobado que la acumulación de humus oscurece el suelo y favorece la formación de agregados, aumentando así la retención de agua y nutrientes. Experimentos relativamente recientes en Burkina Faso, por ejemplo, demostraron que aquellas parcelas suplementadas con MRF necesitaron cuatro veces menos agua que aquellas parcelas “desnudas” (Zongo, 2007). La degradación de la lignina permite, además, reducir la conductividad de los suelos salinos y neutralizar el pH de suelos ácidos. Asimismo, la capa de MRF depositada sobre el suelo actúa como una cobertura natural (en inglés mulch) que protege al suelo de las condiciones climáticas extremas y ayuda a luchar contra la erosión (Lemieux et al., 2000).

La MRF es también considerada una poderosa técnica bioestimuladora. A los seis meses de su incorporación en el suelo puede observarse ya una gran proliferación toda clase de microorganismos. En el caso de los hongos, dicha proliferación puede ser hasta de 10 veces más en el período de un año, siendo muchos de esos nuevos hongos generadores de micorrizas (Gruda, 2008). Los hongos ayudan a capturar el nitrógeno inorgánico disuelto en el suelo durante su crecimiento, evitando así su lixiviación y permitiendo que éste permanezca disponible para las plantas (Noël, 2006). Además, la presencia de hongos en el ecosistema edáfico permite la proliferación inmediata de artrópodos fungívoros y por ende el desarrollo de otras formas de vida superiores. Estas formas de vida podrían ser por ejemplo las lombrices, que son de vital importancia en el mantenimiento de la fertilidad del suelo por aumentar la capacidad de infiltración de agua y aire (Lemieux et al., 2000). La MRF tendría entonces la capacidad de restaurar la micro y macrobiota del suelo al proporcionar la energía, los nutrientes y el hábitat necesario para el establecimiento de las cadenas tróficas del suelo (Swanson y Calkins, 1995; Larsson y Bath, 1996; Gustavsson, 1999; Olson, 2004). Cabría destacar también el papel de la MRF en el

aumento de la resistencia de los cultivos frente a los patógenos. Estudios previos han constatado que aplicaciones de MRF previas al cultivo de ciertas especies vegetales reducen significativamente o impiden la invasión de nematodos (Seck, 1999) así como la colonización de hierbas no deseadas. Del mismo modo, se cree que los hongos basidiomicetes podrían sintetizar antibióticos naturales que protegen a los cultivos de parásitos y enfermedades (Gruda, 2008).

El sumatorio de las alteraciones del suelo a todos los niveles -químico, físico y biológico- después de la aplicación de la MRF repercute de forma notable en el desarrollo de las plantas. De manera global se puede afirmar que la MRF contribuye, no sólo a mejorar la productividad de los cultivos, sino también a estabilizar la fertilidad del suelo (Lemieux y Lachance, 2000). Infinidad de publicaciones respaldan esta afirmación registrando diferentes aumentos en la productividad de los cultivos (Zongo, 2007). Las variaciones en la productividad se cree que son debidas a las particularidades de cada experimento, ya que emplean diferentes especies vegetales y preparan la MRF de distintas maneras. Algunos resultados de publicaciones científicas a resaltar son: el aumento del 1000% de la productividad de tomates en Senegal, el 300% de fresas en Quebec o el 400% de materia seca del maíz en la República Dominicana (Lemieux, 1985; Lemieux y Lachance, 2000). Del mismo modo, el contenido nutricional de los frutos de aquellos cultivos suplementados con MRF fueron significativamente superiores a aquellos plantados de la manera convencional.

Llegados a este punto, se podría concluir que la MRF es una técnica con un gran potencial en agroecología por su simpleza y accesibilidad, la cual permitiría el acceso a insumos a toda clase de personas independientemente de su rango social. La potencialidad de la MRF cobra mayor magnitud si se tiene en cuenta que en la mayoría de las partes del mundo las ramas de los árboles son consideradas un desecho. Los residuos de los trabajos forestales o de la poda, que son muchas veces quemados o incluso depositados en basureros, podrían convertirse en una materia prima de gran utilidad (Zongo, 2007). Además, esta técnica se considera una aliada en la lucha contra el cambio climático por favorecer el secuestro de carbono, contribuir a la regeneración de suelos pobres, empoderar a las comunidades empobrecidas y promover la no dependencia a herbicidas ni fertilizantes artificiales (Lemieux et al., 2000).

6 Preparación y aplicación de la MRF

La preparación de la MRF comienza con la recolección de ramas con menos de 7cm de diámetro de los árboles o arbustos a los que se tenga fácil acceso. En Mollesnejta - Centro de Agroforestería Andina son empleadas las ramas provenientes de la poda de los sistemas agroforestales, seleccionando aquellas con un grosor igual

o menor a un meñique. Se debe incluir únicamente la madera de las ramas porque en ésta se encuentran los elementos más activos de las plantas, los cuales tienen la capacidad de producir capullos, hojas o incluso frutas (Lemieux et al., 2000). Idealmente, se recomienda recolectar las ramas de varias especies de árboles de hoja caduca simultáneamente y en la medida de lo posible utilizar especies de árboles climácidos (es decir, árboles que hayan llegado a su clímax ecológico) dado que tienen un mayor contenido en lignina (Zongo, 2007). Conviene, asimismo, no emplear más de un 20% de coníferas, así como evitar las especies forestales que contengan sustancias alelopáticas para la pedofauna como son los eucaliptos. Tampoco se recomienda emplear ningún tipo de palma ni bambú, ya que la lignina de este tipo de árboles es estructuralmente diferente. Del mismo modo, es conveniente no incluir las ramas muertas o secas por su carencia en nutrientes y porque dificultan la retención de agua (Noël, 2006).

El período de recolección de las ramas puede ser en cualquier época del año, aunque se recomienda realizarlo durante la dormancia de los árboles, es decir, durante los meses de febrero-marzo en las zonas templadas del hemisferio norte. En las zonas tropicales, la recolección de ramas y aplicación de la MRF se recomienda al final de la época de lluvias para así favorecer su biotransformación. Algunas experiencias en climas tropicales mostraron que incluir las hojas de los árboles en la MRF ayudó a compensar las deficiencias en zinc, aunque este fenómeno no se observó en las zonas templadas (Lemieux et al., 2000).

La fragmentación de las ramas se puede realizar de forma mecanizada o de un modo rudimentario. En Mollesneja - Centro de Agroforestería Andina se emplea una máquina trituradora pero también se puede realizar esta tarea a mano con machete como ya demostraron algunos estudios exitosos en Senegal. En caso de emplear la máquina trituradora, se debe procurar no introducir un alto porcentaje de ramas resinosas para no atascar las cuchillas. Después de la trituración el tamaño de los trozos de MRF no debería ser mayor de 10cm para asegurar la invasión de los hongos basidiomicetes. De forma ideal, la MRF debe ser incorporada al suelo tan pronto como sea recolectada para evitar la fermentación por vía de la formación de compost (Noël, 2006).

Una vez que la madera está fragmentada, ésta se extiende por la zona del suelo que se desea tratar formando una capa no más gruesa de 2.5cm. La cantidad exacta recomendada de MRF es de 150 m³/ha, lo que equivale a unos 15mm de espesor. La capa de MRF no debe estar enterrada bajo tierra sino permanecer al aire libre, ya que los hongos basidiomicetes necesitan condiciones aeróbicas para su desarrollo (Leisola y Garcia 1989). Del mismo modo, la MRF deberá estar bien en contacto con la tierra por lo que es necesario rastrillar y crear una capa superficial homogénea que contenga suelo y madera fragmentada a partes iguales. Cabe destacar que, si se añade MRF a un sistema agrícola que haya sido tratado por fertilizantes, herbicidas u otras

sustancias químicas, probablemente no se active el proceso de humificación (Noël, 2006). Este fenómeno se debe a la carencia de microorganismos existente en los sistemas agrícolas altamente alterados, por lo que es recomendable en estos casos mezclar la MRF previamente con muestras de suelos de bosques climácidos para reintroducir los microorganismos al sistema (Zongo, 2007).

A continuación, se deberá esperar algunos meses para confirmar que se ha producido la colonización de la MRF por los hongos basidiomicetes. El proceso de colonización lógicamente es mucho más rápido en zonas tropicales que en zonas templadas (Noël, 2006). Durante el primer mes posterior a la aplicación de MRF, el terreno necesitará absorber grandes cantidades de N para satisfacer los requerimientos nutricionales de los hongos. Este fenómeno es conocido como “hambre de nitrógeno” y para combatirlo se recomienda aplicar alrededor de un 1Kg de nitrato de amonio por cada tonelada de MRF fresca (Zongo, 2007). Para imitar el proceso natural de reciclaje de nutrientes de los bosques, conviene también añadir una nueva capa de MRF cada 2 o 3 años de unos 1-3cm de espesor, lo que corresponde a 150-200 m³/ha de MRF (Noël, 2006).

El aumento en la fertilidad y calidad del suelo es fácilmente observable a los 10 años de la aplicación de la MRF y sus efectos perduran por décadas (Lemieux et al., 2000). Para finalizar, cabría mencionar que no basta con aplicar la MRF de manera aislada para producir un gran cambio en el sistema agrícola. La MRF debe ser una técnica empleada en conjunción con otras medidas agroecológicas tales como el establecimiento de barreras vivas, la creación de sistemas agroforestales o la anteriormente explicada aplicación de biocarbón.

En Mollesneja - Centro de Agroforestería Andina, dentro de sus pasantías los estudiantes Beister y Kugler han hecho ensayos con la MRF con los siguientes resultados: (a) la aplicación de la MRF en una cantidad de 30 litros/m², la mitad mezclada con la tierra superficial y la otra aplicada como cobertura, resulta en un ahorro de 30% de agua de riego; (b) los cultivos tienen una mayor disponibilidad de nitrógeno aplicando al suelo la MRF de especies leguminosas en comparación de una aplicación de la MRF de especies no-leguminosas.

Referencias Bibliográficas

- [1] Abel, S., Peters, A., Trinks, S., Schonsky, H., Facklam, M., Wessolek, G., 2013. Impact of biochar and hydrochar addition on water retention and water repellency of sandy soil. *Geoderma* 202–203, 183–191.
- [2] Abiven, S., Hund, A., Martinsen, V., Cornelissen, G., 2015. Biochar amendment increases maize root surface areas and branching: a shovelomics study in Zambia. *Plant Soil* 395, 45–55.

- [3] Abujabhah, 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. *Appl. Soil Ecol.* 98, 243–253.
- [4] Agegnehu, G., Bass, A.M., Nelson, P.N., Bird, M.I., 2016a. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. *Sci. Total Environ.* 543, 295–306.
- [5] Agegnehu, G., Bass, A.M., Nelson, P.N., Muirhead, B., Wright, G., Bird, M.I., 2015a. Biochar and biochar–compost as soil amendments: effects on peanut yield soil properties and greenhouse gas emissions in tropical North Queensland, Australia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 213, 72–85.
- [6] Agegnehu, G., Srivastava, A.K. and Bird, M.I., 2017. The role of biochar and biochar–compost in improving soil quality and crop performance: A review. *Applied Soil Ecology*, 119, pp.156-170.
- [7] Bai, Z.G., Dent, D.L., Olsson, L., Schaepman, M.E., 2008. Proxy global assessment of land degradation. *Soil Use Manage.* 24, 223–234.
- [8] Barrow, C.J., 2012. Biochar: potential for countering land degradation and for improving agriculture. *Appl. Geogr.* 34, 21–28. *Plant Prod. Sci.* 18, 491–500.
- [9] Bationo, A., Kihara, J., Vanlauwe, B., Waswa, B., Kimetu, J., 2007. Soil organic carbon dynamics, functions and management in West African agro-ecosystems. *Agric. Syst.* 94, 13–25.
- [10] Beister, L. 2015. Erhalt der Bodenfeuchte durch Fragmentiertes Zweigholz im semiariden Hochland von Bolivien. Untersuchung innerhalb eines Praktikums, Technische Universität München, Deutschland.
- [11] Borchard, N., Siemens, J., Ladd, B., Möller, A., Amelung, W., 2014. Application of bio-chars to sandy and silty soil failed to increase maize yield under common agricultural practice. *Soil Tillage Res.* 144, 184–194.
- [12] Brewer, C.E., Hu, Y.Y., Schmidt-Rohr, K., Loynachan, T.E., Laird, D.A., and Brown, R.C. (2012). Extent of pyrolysis impacts on fast pyrolysis biochar properties. *J. Environ. Qual.* 41, 1115-22.
- [13] Chan, K., van Zwieten, L., Meszaros, I., Downie, A., Joseph, S., 2007. Agronomic values of greenwaste biochar as a soil amendment. *Aust. J. Soil Res.* 45, 629–634.

- [14] Crane-Droesch, A., Abiven, S., Jeffery, S., Torn, M.S., 2013. Heterogeneous global crop yield response to biochar: a meta-regression analysis. *Environ. Res. Lett.* 8, 044049.
- [15] Crombie, K., Mašek, O., Sohi, S.P., Brownsort, P., Cross, A., 2013. The effect of pyrolysis conditions on biochar stability as determined by three methods. *GCB Bioenergy* 5, 122–131.
- [16] DeLuca, T.H., MacKenzie, M.D., Gundale, M.J., 2009. Biochar effects on soil nutrient transformations. *Biochar for Environmental Management*. Earthscan publishing, London, pp. 251–270.
- [17] Ducey, T.F., Ippolito, J.A., Cantrell, K.B., Novak, J.M., Lentz, R.D., 2013. Addition of activated switchgrass biochar to an aridic subsoil increases microbial nitrogen cycling gene abundances. *Appl. Soil Ecol.* 65, 65–72.
- [18] Gaskin, J.W., Speir, R.A., Harris, K., Das, K., Lee, R.D., Morris, L.A., Fisher, D.S., 2010. Effect of peanut hull and pine chip biochar on soil nutrients, corn nutrient status, and yield. *Agron. J.* 102, 623–633.
- [19] Gerlach, R., Baumewerd-Schmidt, H., Borg, K. Van Den, Eck-Meier, E., Schmidt, M.W.I., 2006. Prehistoric alteration of soil in the Lower Rhine Basin, Northwest Germany — archaeological, ^{14}C and geochemical evidence 136, 38–50.
- [20] Glaser, B., Lehmann, J., Zech, W., 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal—a review. *Biol. Fert. Soils* 35, 219–230.
- [21] Gomez, J., Deneff, K., Stewart, C., Zheng, J., Cotrufo, M., 2014. Biochar addition rate influences soil microbial abundance and activity in temperate soils. *Eur. J. Soil Sci.* 65, 28–39.
- [22] Granatstein, D., Kruger, C., Collins, H., Galinato, S., Garcia-Perez, M., Yoder, J., 2009. Use of Biochar from the Pyrolysis of Waste Organic Material as a Soil Amendment. Final Project Report. Center for Sustaining Agriculture and Natural Resources, Washington State University, Wenatchee, WA.
- [23] Gruda, N., 2008. The effect of wood fiber mulch on water retention, soil temperature and growth of vegetable plants. *Journal of sustainable agriculture*, 32(4), pp.629-643.
- [24] Gul, S., Whalen, J.K., Thomas, B.W., Sachdeva, V. and Deng, H. (2015). Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. *Agr. Ecosyst. Environ.* 206, 46-59.

- [25] Gustavsson, B.A. 1999. Effects of mulching on fruit yield, accumulated plant growth and fungal attack in cultivated Lingonberry, cv. Sanna, *Vaccinium vitis-idaea* L. *Gartenbauw.* 64:65–69.
- [26] IBI, 2014. Standardized product definition and product testing guidelines for Biochar that is used in soil, IBI-STD-2.0, IBI Biochar Standards. International Biochar Initiative (IBI). [www.biochar-international/org/characterizationstandard](http://www.biochar-international.org/characterizationstandard), Accessed July 15, 2016, p. 60.
- [27] Inyang, M. and Dickenson, E. (2015). The potential role of biochar in the removal of organic and microbial contaminants from potable and reuse water: review. *Chemosphere* 134, 232–40.
- [28] Inyang, M., Gao, B., Pullammanappallil, P., Ding, W., Zimmerman, A.R., 2010. Biochar from anaerobically digested sugarcane bagasse. *Bioresour. Technol.* 101, 8868–8872.
- [29] Ippolito, J.A., Spokas, K.A., Novak, J.M., Lentz, R.D., Cantrell, K.B., 2015. Biochar elemental composition and factors influencing nutrient retention. *Biochar for environmental management. Sci. Technol. Implement.* 137–162.
- [30] Joseph, S., Peacocke, C., Lehmann, J., Munroe, P., 2009. Developing a biochar classification and test methods. *Biochar Environ. Manage. Sci. Technol.* 107–126.
- [31] Kugler, S. 2017. Vergleich der Stickstoffpräsenz im Boden bei Einarbeitung von fragmentiertem Zweigholz einer Leguminosenart ((*Chamaecytisus proliferus* ssp *palmensis*) und einer Nicht-Leguminosenart (*Dodonaea viscosa*), Untersuchung im Rahmen eines Praktikums, Universität Freiburg im Breisgau / Deutschland.
- [32] Lal, R., 2015. Sequestering carbon and increasing productivity by conservation agriculture. *J. Soil Water Conservation.* 70, 55A–62A.
- [33] Larsson, L. and A. Bath. 1996. Evaluation of soil temperature moderating and moisture conserving effects of various mulches during a growing season. *Acta Agri. Scand. (Sect. B.) Soil and Plant Sci.* 46:153–160.
- [34] Lehmann J, da Silva J J P, Steiner C, Nehls T, Zech W and Glaser B. 2003. Nutrient availability and leaching in an archaeological Anthrosol and a Ferralsol of the Central Amazon basin: fertilizer, manure and charcoal amendments. *Plant Soil.* 249: 343–357.
- [35] Lehmann, J., Rillig, M.C., Thies, J.A.C., Masiello, C.A., Hockaday, W.C., Crowley, D., 2011. Biochar effects on soil biota – a review. *Soil. Biol. Biochem.* 43, 1812–1836.

- [36] Leisola, M.S.A & Garcia, S. (1989) Lignin degradation mechanism in Enzyme systems for lignocellulose degradation. Galway, Ireland, Elsevier publication pp 89-99.
- [37] Lemieux, G. & Tétreault, J.-P. (1993) Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés, édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec (Canada) ISBN 2- 550-28792-4 FQ94-3014, 187 pages.
- [38] Lemieux, G. 1985. Essais d'induction de la végétation forestière vasculaire par le bois raméal fragmenté. Département des Sciences Forestières, Université Laval Québec, 109 pages. © ISBN 2-550- 21340-8
- [39] Lemieux, G., Germain, D. and Environnement, H., 2000. Ramial Chipped Wood: the Clue to a Sustainable Fertile Soil. Laval University, Coordination Group on Ramial Wood.
- [40] Lemieux, G., Lachance, L., 2000. Une tentative d'évaluation de la technologie BRF pour des fins maraîchères. Publication #120. Département des Sciences du bois et de la forêt, Faculté de Foresterie et de géomatique, Université Laval. ISBN 2-921728-52-4, 34 pages.
- [41] Nahstoll, S. 2015. Beregnungswassereinsparung durch die Anwendung von Pflanzenkohle in einer Gemüseparzelle in Mollesnejta / Bolivien. Untersuchung innerhalb eines Praktikums, Technische Universität München, Deutschland.
- [42] Noël, I.B., 2006. Le Bois Raméal Fragmenté (BRF), un nouvel élan pour l'agriculture bio wallonne? Revue Aggra, #4, mars. 2006. pp. 4-7.
- [43] Oliveira, F.R., Patel, A.K., Jaisi, D.P., Adhikari, S., Lu, H. and Khanal, S.K., 2017. Environmental application of biochar: Current status and perspectives. Bioresource Technology.
- [44] Olson, S.M. 2004. Mulching, Chapter 6, 27–30. In: Olson, S.M. and E. Simonne (Eds.) Vegetable production guide for Florida. University of Florida, p. 295.
- [45] Pender, J., 2009. The World Food Crisis, Land Degradation, and Sustainable Land Management: Linkages, Opportunities, and Constraints. IFPRI, New York, USA.
- [46] Rajapaksha, A.U., Chen, S.S., Tsang, D.C., Zhang, M., Vithanage, M., Mandal, S., Gao, B., Bolan, N.S., Ok, Y.S., 2016. Engineered/designer biochar for contaminant removal/ immobilization from soil and water: potential and implication of biochar modification. Chemosphere 148, 6e291.

- [47] Ronsse, F., Van Hecke, S., Dickinson, D., Prins, W., 2013. Production and characterization of slow pyrolysis biochar: influence of feedstock type and pyrolysis conditions. *GCB Bioenergy* 5, 104–115.
- [48] Rousk, J., Bååth, E., Brookes, P.C., Lauber, C.L., Lozupone, C., Caporaso, J.G., Knight, R., Fierer, N., 2010. Soil bacterial and fungal communities across a pH gradient in an arable soil. *ISME J.* 4, 1340–1351.
- [49] Sanchez, P.A., 2002. Soil fertility and hunger in Africa. *Science (Washington)* 295, 2019–2020.
- [50] Schmidt, H. and Taylor, P., 2014. Kon-Tiki flame cap pyrolysis for the democratization of biochar production. *Ithaka Journal for biochar materials, ecosystems and agriculture*, pp.338-348.
- [51] Schmidt, H.-P., Kammann, C., Niggli, C., Evangelou, M.W., Mackie, K.A., Abiven, S., 2014. Biochar and biochar-compost as soil amendments to a vineyard soil: influences on plant growth nutrient uptake, plant health and grape quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* 191, 117–123.
- [52] Seck, M.A. (1993) Essais de fertilisation organique avec les bois raméaux fragmentés de filao (*Casuarina equisetifolia*) dans les cuvettes maraichères des Niayes (Sénégal). Les actes du quatrième colloque international sur les bois raméaux fragmentés » édité par le Groupe de Coordination sur les Bois Raméaux, Département des Sciences forestières, Université Laval, Québec (Canada), p. 36-41.
- [53] Shackley, S., Sohi, S., Brownsort, P., Carter, S., Cook, J., Cunningham, C., Gaunt, J., Hammond, J., Ibarrola, R., Mašek, O., 2010. An Assessment of the Benefits and Issues Associated with the Application of Biochar to Soil. Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK Government, London.
- [54] Shackley, S., Sohi, S., Brownsort, P., Carter, S., Cook, J., Cunningham, C., Gaunt, J., Hammond, J., Ibarrola, R., Mašek, O., 2010. An Assessment of the Benefits and Issues Associated with the Application of Biochar to Soil. Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK Government, London.
- [55] Sombroek, W., Ruivo, M.D.L., Fearnside, P.M., Glaser, B., Lehmann, J., 2003. Amazonian Dark Earths as carbon stores and sinks, Amazonian Dark Earths. *Springerpp.* 125–139.
- [56] Soumare, M.D., Mnkeni, P.N.S. and Khouma, M., 2002. Effects of *Casuarina equisetifolia* composted litter and ramial-wood chips on tomato growth and

- soil properties in Niayes, Senegal. *Biological agriculture & horticulture*, 20(2), pp.111-123.
- [57] Sparkes, J., Stoutjesdijk, P., 2011. Biochar: Implications for Agricultural Productivity, ABARES, Technical Report 11.6. Australian Bureau of Agricultural and Resource Economics and Sciences, Canberra, Australia, pp. 1–63.
- [58] Stevanovic, T., 2006. Constituants du bois et la pédogenèse à partir des BRF – une solution pour un sol durable : mettre en synergie agriculture et foresterie. *Revue Aggra*, #4, mars. 2006. pp. 2-4.
- [59] Subedi, R., Taupe, N., Pelissetti, S., Petruzzelli, L., Bertora, C., Leahy, J.J., Grignani, C., 2016. Greenhouse gas emissions and soil properties following amendment with manure-derived biochars: influence of pyrolysis temperature and feedstock type. *J. Environ. Manage.* 166, 73–83.
- [60] Swanson, B.T. and J.B. Calkins. 1995. Weed control strategies for field- and container- grown herbaceous perennials. *HortScience* 30:824.
- [61] Tan, Z., Lin, C.S., Ji, X. and Rainey, T.J., 2017. Returning biochar to fields: A review. *Applied Soil Ecology*, 116, pp.1-11.
- [62] Van Zwieten L, Singh B, Joseph S, Kimber S, Cowie A and Chan K Y. 2009. Biochar and emissions of non-CO₂ greenhouse gases from soil. In: Lehmann J, Joseph S (Eds) *Biochar for Environmental Management*. Earthscan, London. pp. 227–249.
- [63] Wang, J., Xiong, Z., Kuzyakov, Y., 2016. Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy* 8, 512–523.
- [64] Windeatt, J.H., Ross, A.B., Williams, P.T., Forster, P.M., Nahil, M.A. and Singh, S. (2014). Characteristics of biochars from crop residues: Potential for carbon sequestration and soil amendment. *J. Environ. Manage.* 146, 189-197.
- [65] Woolf, D., Amonette, J.E., Street-Perrott, F.A., Lehmann, J., Joseph, S., 2010. Sustainable biochar to mitigate global climate change. *Nat. Commun.* 1, 56.
- [66] Zhao, R., Coles, N., Kong, Z., Wu, J., 2015. Effects of aged and fresh biochar on soil acidity under different incubation conditions. *Soil Tillage Res.* 146, 133–138.
- [67] Zimmerman, A.R., 2010. Abiotic and microbial oxidation of laboratory-produced black carbon (biochar). *Environ. Sci. Technol.* 44, 1295–1301.

- [68] Zongo, E., 2007. Expériences sur la technique de production dite «Des Bois Rameaux Fragmentés (BRF)». Cas des villages de KINDI et DINDERESSO dans le Centre - Ouest et l'Ouest du Burkina Faso. Colloque Les Rémanents en foresterie et agriculture Les Branches, matériau d'avenir ! Lyon, France, February 1st and 2nd, 2007.