

2023



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

CICA Centro de Investigación en  
Contaminación Ambiental



# Manual de **BIOCARBÓN** para una agricultura sostenible

Experiencias en Costa Rica

Gabriela Soto Muñoz • Juan S. Chin Pampillo  
Cristina Chinchilla Soto • Marta Pérez Villanueva

**CC.SIBDI.UCR - CIP/4019**

Nombres: Soto Muñoz, Gabriela, autora. | Chin Pampillo, Juan Salvador, autor.  
| Chinchilla Soto, Cristina, autora. | Pérez Villanueva, Marta, autora.

Título: Manual de biocarbón para una agricultura sostenible : experiencias  
en Costa Rica / Gabriela Soto Muñoz, Juan S. Chin Pampillo, Cristina  
Chinchilla Soto, Marta Pérez Villanueva.

Descripción: Primera edición. | San José, Costa Rica : Universidad de Costa Rica,  
CICA, 2023.

Identificadores: **ISBN 978-9930-9712-3-9** (pdf)

Materias: LCSH: Biocarbón | Biocarbón–Producción. | LEMB: Agricultura soste-  
nible. | Uso de la tierra. | Suelos – Aspectos ambientales.

Clasificación: CDD 631.86–ed. 23

Universidad de Costa Rica  
© Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA)  
Ciudad Universitaria Rodrigo Facio, Costa Rica

Primera edición digital: 2023.  
Todos los derechos reservados

Universidad de Costa Rica. Ciudad Universitaria Rodrigo Facio. San José, Costa Rica.  
El CICA está ubicado en la Ciudad de la Investigación • Tel.: 2511-8202 • [www.cica.ucr.ac.cr](http://www.cica.ucr.ac.cr)



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA



**CICA** Centro de Investigación en  
Contaminación Ambiental

**Elaborado por:**

Gabriela Soto Muñoz  
Juan S. Chin Pampillo  
Cristina Chinchilla Soto  
Marta Pérez Villanueva

**Revisión:**

Laura Brenes Alfaro

**Diseño y diagramación:**

SIEDIN - UCR

**Fotografía de portada:**

Allan Marín Guzmán



Foto: Juan S. Chin

**Agradecimiento:**

Los autores agradecen al Centro Conjunto FAO/OIEA de Técnicas Nucleares en la Alimentación y la Agricultura por el financiamiento a través del proyecto TC-COS5033 "Uso de técnicas isotópicas para la evaluación e implementación del uso de biochar para el mejoramiento del suelo, la fijación de carbono y la disminución del impacto de la aplicación de plaguicidas", al Ministerio de Ciencia, Tecnología y Telecomunicaciones (MICITT), y a la Vicerrectoría de Investigación de la Universidad de Costa Rica por el financiamiento a través del proyecto 802-CO-518 BIOECODES.

De igual manera, agradecen a los estudiantes del CATIE, la UCR, el ITEC y la UNA porque es gracias a ellos, su esfuerzo y dedicación, que muchas de estas investigaciones fueron posibles.



En memoria del  
**Ing. Marco Vinicio Corrales Soto,**  
colaborador del INTA en el proyecto BIOECODES



Se dedica este Manual al Ing. Marco Corrales Soto, compañero y amigo, miembro del proyecto BIOECODES, quien vivió su vida investigando y promoviendo un mejor manejo de los suelos.

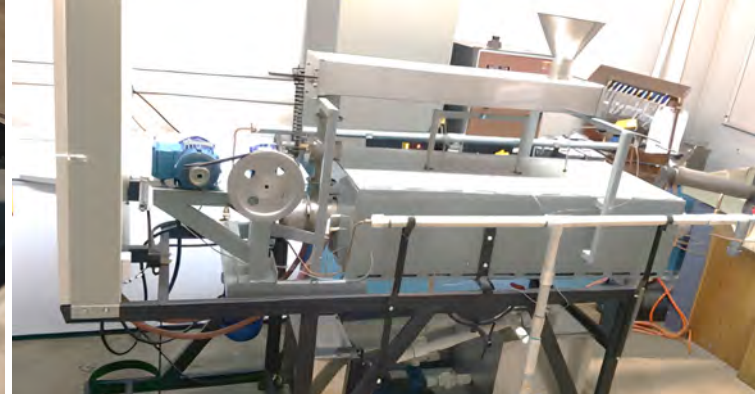
El Ing. Marco Corrales se inició como profesional en el Laboratorio de Suelos y Foliarés del Centro de Investigación en Agronomía (CIA) de la Universidad de Costa Rica. Luego dirigió el Laboratorio de Suelos de CAFESA, donde desarrolló su trabajo en el área de análisis de suelos, fertilizantes y el café. Desde esta posición promovió la mejora de la calidad en el desempeño de los laboratorios de suelos del país. Luego del cierre de operaciones de CAFESA, se integró en el Laboratorio de Suelos del Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria (INTA).

El proyecto BIOECODES se gestó en el marco de una alianza estratégica INTA - UCR – TEC, con el objetivo de promover economías circulares en el manejo de residuos de la agroindustria, mediante la producción e incorporación del uso de biocarbón en las prácticas agrícolas. El aporte de Marco como contraparte institucional del proyecto fue muy importante. Su buena disposición y entusiasmo facilitó que se iniciara la producción de biocarbón en alianza con la UCR, así como la colaboración del Ing. Olger Benavides, de la Agencia del MAG en Pejibaye de Pérez Zeledón con el proyecto, entre otros aportes.

Su entrega y actitud de colaboración con sus colegas y compañeros, además de su identificación con los productores será extrañada cada día.

**Floria Bertsch y Gabriela Soto**

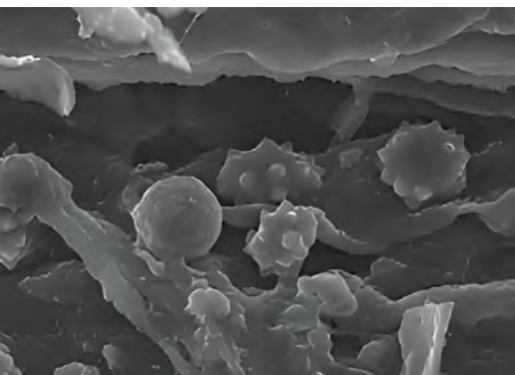




# Contenido

Presentación	11
<b>1</b> ¿Qué es el biocarbón?	12
1.1 Definición y diferencia con el carbón común	12
1.2 Descubrimiento del biocarbón o “Terra preta” en la Amazonía	13
<b>2</b> Características de la <i>Terra preta</i> en la Amazonía	15
2.1 Características químicas	15
2.2 Poblaciones microbianas	16
2.3 Producción en la Amazonía	16
<b>3</b> Ventajas del uso del biocarbón en la agricultura. Recopilación de resultados de experimentos afuera de la Amazonía	17
3.1 Incremento en la producción	17
3.2 Mejorador del suelo: química de suelos	22
3.3 Características físicas del suelo y retención de humedad	23
3.4 Pérdida de nutrientes en el suelo	24
3.5 Remediación de suelos	24
3.6 Microbiología de suelos	25
3.7 Secuestro de carbono	27
3.8 Impacto de la aplicación del biocarbón sobre la emisión de otros gases efecto invernadero	29
3.9 Compostaje	29

<b>4</b>	Producción del biocarbón: Diseño de hornos .....	30
4.1	El proceso de pirólisis .....	30
4.2	Preparación de la biomasa antes de hornear .....	32
4.3	Diseño de hornos .....	32
4.3.1	Carboneras tradicionales .....	32
4.3.2	Diseño básico de hornos a pequeña escala .....	33
4.3.3	Hornos para cocción .....	33
4.3.4	Hornos para producción de biocarbón a pequeña escala .....	35
4.3.5	Hornos para investigación .....	38
<b>5</b>	Factores a considerar al seleccionar materias primas para biocarbón .....	39
5.1	Eficiencia de producción de biocarbón .....	39
<b>6</b>	Tipos de Biocarbón .....	40
6.1	Características del biocarbón según la materia prima .....	40
6.2	Características del biocarbón según la temperatura de la pirólisis .....	42
<b>7</b>	Cómo evaluar la calidad del biocarbón .....	44
7.1	Análisis próximo .....	44
7.1.1	Contenido de humedad .....	45
7.1.2	Materia volátil .....	45
7.1.3	Contenido de cenizas .....	45







7.2	Carbono fijado .....	45
7.3	pH, conductividad eléctrica (CE) y potencial encalante .....	46
7.4	Análisis elemental C, H, O, N y relaciones Hidrógeno / Carbono y C/N .....	47
7.5	Compuestos orgánicos volátiles (COV) .....	47
7.6	Área superficial específica o capacidad de intercambio catiónico .....	48
7.7	Contenido de nutrientes .....	48
7.8	Fitotoxicidad y ecotoxicidad .....	48
7.9	Prueba de germinación para determinar fitotoxicidad .....	48
7.10	Ecotoxicidad .....	49
<b>8</b>	<b>Dosis y formas de aplicación .....</b>	<b>50</b>
8.1	Molienda de biocarbón y tamaño de partícula .....	50
8.2	Dosis .....	51
8.3	Almacenamiento y transporte .....	52
8.4	Formas de aplicación .....	52
8.4.1	Antes de la siembra .....	52
8.4.2	A la siembra .....	52
8.4.3	En plantación establecida .....	53
8.4.4	En cama hidropónica .....	53
	<b>Conclusiones .....</b>	<b>54</b>
	<b>Literatura citada .....</b>	<b>55</b>



# Presentación

**E**n febrero de 2019, el Gobierno de Costa Rica lanzó el “Plan Nacional de Descarbonización” para responder a los compromisos adquiridos en el Acuerdo de París sobre Cambio Climático (2015), y en cumplimiento con los indicadores de sostenibilidad de las Naciones Unidas. En este plan se propone trabajar la agricultura y el uso del suelo con soluciones basadas en la naturaleza, fomentando sistemas agroalimentarios altamente eficientes, bajos en emisiones de carbono, y que permitan que Costa Rica logre la carbono neutralidad en el año 2050 (Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE], 2019).

El biocarbón, o el carbón producido a partir de residuos de biomasa con fines de mejoramiento de los suelos (Prober et al., 2014; Stavi, 2012), incrementa el secuestro de carbono en el suelo a largo plazo (Macías & Camps, 2010; Roberts et al., 2010), por lo que potencialmente se proyecta como una práctica que puede contribuir con los fines del Plan Nacional de Descarbonización. Actualmente, el uso de este material en la agricultura es la práctica de balance energético negativo (secuestra más carbono de lo que emite) más estudiada a la fecha (Z. Dai et al., 2014; European Academies Science Advisory Council [EASAC], 2018; Kumar et al., 2014; Minx et al., 2017; Smith, 2016).

En la época precolombina, poblaciones indígenas de la Amazonía ya usaban el biocarbón desde hacía más de cinco siglos, mezclando el carbón resultante de la producción de alimentos, con residuos vegetales y animales (pescado, por ejemplo) para aplicarlo al suelo y mejorar la condición de sus suelos rojos (Grossman et al., 2010; Woods et al., 2009). Por tanto, es un claro ejemplo ancestral de economía circular, que aprovecha los residuos para regenerar los suelos y secuestrar carbono en ellos.

En algunos tipos de suelos se ha visto que el biocarbón, además de secuestrar carbono, tiene el potencial de mejorar su fertilidad, reducir el impacto de agroquímicos, mejorar la infiltración y favorecer la actividad microbiana. Es necesario continuar con la investigación para entender mejor sus propiedades y sus impactos en diferentes cultivos y suelos, tanto positivos como negativos (Grains Research and Development Corporation [GRDC], 2013).

El Centro de Investigación en Contaminación Ambiental (CICA), de la Universidad de Costa Rica (UCR), presenta en este manual una breve recopilación de conceptos sobre el biocarbón. Se incluyen investigaciones realizadas tanto en Costa Rica como en otros países, con el fin de guiar un proceso de investigación participativa y fomentar la producción y el uso del biocarbón, como parte de una posible estrategia de mitigación y adaptación ante el cambio climático.



# 1. ¿Qué es el biocarbón?

## 1.1 Definición y **diferencia** con el carbón **común**

El **biocarbón** también conocido como *biochar* en el idioma inglés, es la biomasa carbonizada que se produce en un horno en ausencia de oxígeno. El proceso químico de transformación térmica o carbonización de materiales orgánicos (tales como madera, hojas, paja, excretas, etc.) en ausencia de oxígeno se conoce como **pirólisis**.

El biocarbón y el carbón común se distinguen en que el primero se utiliza como mejorador de suelos y el segundo como combustible. Además, el biocarbón se produce en temperaturas de pirólisis que optimicen sus características como mejorador de suelos. Las temperaturas pueden variar entre los 450 °C y los 700 °C, según la clasificación de la Iniciativa Internacional de Biocarbón

(International Biochar Initiative [IBI], 2015), pero algunas investigaciones han evaluado biocarbón producido a temperaturas menores, a partir de los 250 °C a 300 °C, con buenos resultados en cuanto a capacidad de intercambio catiónico y mayor producción de carbón (Shaaban et al., 2014).

Como el biocarbón se produce a partir de diferentes fuentes de biomasa, no puede ser caracterizado como una sustancia química única. En su lugar, se considera como un complejo de diferentes formas carbonatadas, caracterizadas por una gran cantidad de anillos aromáticos y estructuras de grafito, relativamente inertes a la degradación (Schimmelpfennig & Glaser, 2012).



## 1.2 Descubrimiento del **biocarbón** o "Terra preta" en la **Amazonía**

En la región amazónica predominan los suelos rojos, ácidos y pobres en nutrientes por el exceso de lluvia y las temperaturas tropicales (Oxisoles y Ultisoles, según la clasificación de suelos del USDA). La presencia de estos suelos "pobres" y la falta de construcciones prominentes, llevaron a varios arqueólogos a pensar que en la Amazonía nunca pudieron existir asentamientos indígenas importantes. Su argumento es que "un suelo tan pobre no pudo haber alimentado grandes poblaciones" (Woods & McCann, 1999). Este supuesto entraba en contradicción con las cartas y narraciones que Francisco de Orellana había enviado a las Cortes Españolas, luego de su primer viaje a través del Amazonas en 1542, donde describió grandes asentamientos a la vera de los ríos.

Lo que vino a poner fin a esta contradicción histórica fueron los reportes de los geólogos y edafólogos sobre la Amazonía, donde mencionaban que existían parches de suelo fértil negro (Katzer, 1903). Estos suelos presentaban residuos de alfarería (vasijas, platos, etc.), distribuidos en el perfil. Dichos acontecimientos los llevó a pensar que la formación de estos suelos negros estaba vinculada a la actividad humana. Inclusive, desde 1866, C. Hartt y H.

Smith, dos taxónomos de suelos que trabajaron en la región, los llamaron "Suelos de residuos de cocina". La *Terra preta do indio*, como se les conoce a estos suelos negros, es la evidencia de que las cartas de Orellana eran correctas: en la Amazonía existieron importantes asentamientos indígenas que, además, con sus prácticas de manejo de residuos, lograron transformar sus suelos rojos en fértiles suelos negros.

La *Terra preta* se encuentra ubicada en su mayoría a las orillas de los ríos, donde hubo una mayor concentración de asentamientos indígenas, y las áreas pueden ser de una decena a cientos de metros cuadrados (Woods & McCann, 1999). En la literatura científica se les denomina hoy como Suelos Antropogénicos Negros (ADE, por sus siglas en inglés: *Anthropogenic Dark Earth*), y se cree que son el resultado de una mezcla de residuos de alfarería, materia orgánica carbonizada y cenizas de los hornos, así como residuos orgánicos sin carbonizar como huesos de pescado, conchas, etc. (Woods & McCann, 1999).

Debido a sus propiedades químicas, el carbón adicionado al suelo es recalcitrante, es decir, poco susceptible a ser degradado, por lo que tiene un largo tiempo de permanencia. Esta característica se debe a su estructura química de anillos aromáticos policíclicos producidos

durante la pirólisis, lo cual hace que este material sea muy estable. Análisis de carbono-14 en el carbón de la *Terra preta* han demostrado que este carbón está presente en los suelos amazónicos incluso desde 450 años A.C. (Hilbert, 1968).

A pesar de que la existencia de estos suelos fue reportada desde el siglo XVII, no fue sino hasta que el edafólogo holandés Win Sombroek realizó una campaña internacional para que el biocarbón fuera reconocido como un elemento transformador de suelos (Woods & McCann, 1999), además, resulta ser un valioso legado de los pobladores originarios a las nuevas generaciones, que buscan estrategias para mejorar sus suelos y secuestrar carbono.

La *Terra preta* se define hoy en día como una mezcla de suelo, biocarbón y materia orgánica sin carbonizar, y puede ser una alternativa para el manejo sostenible en suelos tropicales (Glaser et al., 2001).

Luego del descubrimiento de *Terra preta* en la Amazonía, se ha observado que no solo en esta región se utilizaban estas prácticas para mejorar sus suelos. Se encontraron tierras negras también al norte de Alemania, donde se cree que las poblaciones vikingas adicionaban materia orgánica carbonizada para mejorar los suelos arenosos (Wiedner et al., 2015); así como las poblaciones ancestrales en México, Japón, entre otros. Se ha llegado a considerar el carbón, que se adiciona en las quemadas naturales, como un importante formador de suelos, tanto en Rusia como en la faja maicera de los Estados Unidos (Cunha et al., 2009).

El uso de biocarbón se ha promovido por su impacto en el secuestro de carbono en el suelo a largo plazo, para mitigar el efecto del cambio climático, y para mejorar la provisión de servicios ecosistémicos, tales como retención de nutrientes y agua, entre otros.

## 2. Características de la *Terra preta* en la Amazonía

El estudio de la *Terra preta* ha despertado mucho interés, sobre todo porque puede ser un modelo para lograr sostenibilidad en el trópico húmedo, por su potencial de secuestrar carbono a largo plazo, además, de sus aportes en otros servicios ecosistémicos fundamentales como la retención de humedad en el suelo, limpieza del agua, entre otros (Glaser & Birk, 2012).

Se han realizado múltiples estudios comparativos entre la "*Terra preta do indio*" y los suelos rojos aladaños predominantes en la Amazonía (Ferralsoles, según la clasificación de la FAO; Ultisoles y Oxisoles, según la clasificación del USDA), con el fin de determinar impactos a largo plazo.

A continuación, se comparten algunas de las diferencias encontradas a nivel de química y biología de suelos, así como de producción.

### 2.1 Características químicas

Investigadores brasileños compararon 22 suelos de ocho diferentes regiones, de los cuales 18 son Ferralsoles (según la clasificación de la FAO), con un horizonte antropogénico oscuro (tipo *Terra preta*), y cuatro fueron Ferralsoles sin un horizonte A antropogénico (Cunha et al., 2009).

El análisis químico comparativo (cuadro 1), muestra mayores contenidos de Calcio (Ca), Fósforo (P) y ácidos húmicos, así como una capacidad de intercambio de cationes (CIC) mayor en el suelo con el horizonte A antropogénico (*Terra preta*), que el suelo aladaño sin adición de biocarbón.

Cuadro 1. Características químicas de suelos en 22 Ferralsoles de ocho comunidades de la Amazonía, con y sin horizonte antropogénico de biocarbón.

Tipo de suelo	pH en agua	CIC a pH 7	Carbono total (g/kg)	Ca (cmo l /kg)	P (mg/kg)	Ácidos fúlvicos	Ácidos húmicos (g/kg)	Huminas (g/kg)
<b>No antropogénico</b>	4.4	9.5	37.9	1.0	4.7	5.9	7.1	18.6
<b>Antropogénico</b>	5.1	17.5	44.6	8.8	116	5.3	13.0	20.1

CIC: Capacidad de Intercambio Catiónico.

Fuente: Cunha et al. 2009.

## 2.2 Poblaciones **microbianas**

En un estudio realizado, en el cual compararon las poblaciones de microorganismos a nivel molecular en áreas de bosque prístinos en la Amazonía, uno con *Terra preta* y otro en un Ultisol aledaño, se observó que existe una mayor diversidad de bacterias (25 % más), y un número mayor de lombrices en la *Terra preta* que en el bosque en un Ultisol (Kim et al., 2007).

## 2.3 Producción en la **Amazonía**

La comparación de la producción de biomasa de dos cultivos, arroz y caupí, en un suelo Antrosol y en un Ferralsol en la Amazonía Central, mostró incrementos del 38 % al 45 % en el Antrosol o *Terra preta* por encima del vecino suelo rojo (Lehmann et al., 2003).



Los dos aspectos más importantes del biocarbón para mejorar la productividad son su capacidad de regular la acidez y su capacidad de retener agua y nutrientes.

## 3. Ventajas del uso del biocarbón en la agricultura

Recopilación de resultados de experimentos fuera de la Amazonía

A continuación, se presenta una recopilación de diversas investigaciones acerca de los impactos del uso de biocarbón en la agricultura.

### 3.1 Incremento en la **producción**

El impacto del uso de biocarbón sobre la productividad de los cultivos depende en gran medida del tipo de suelo. Jeffery et al., (2011) compararon los resultados de 23 ensayos realizados en diferentes tipos de suelos alrededor

del mundo, sobre la productividad de cultivos como maíz, tomate, soya, entre otros; y observaron que, en general, hay un efecto positivo cuando el biocarbón se aplica en suelos ácidos con texturas gruesas (figura 1). Esto los llevó a considerar que los dos aspectos más importantes del biocarbón para mejorar la productividad son, su capacidad de regular la acidez, y su capacidad de retener agua y nutrientes.

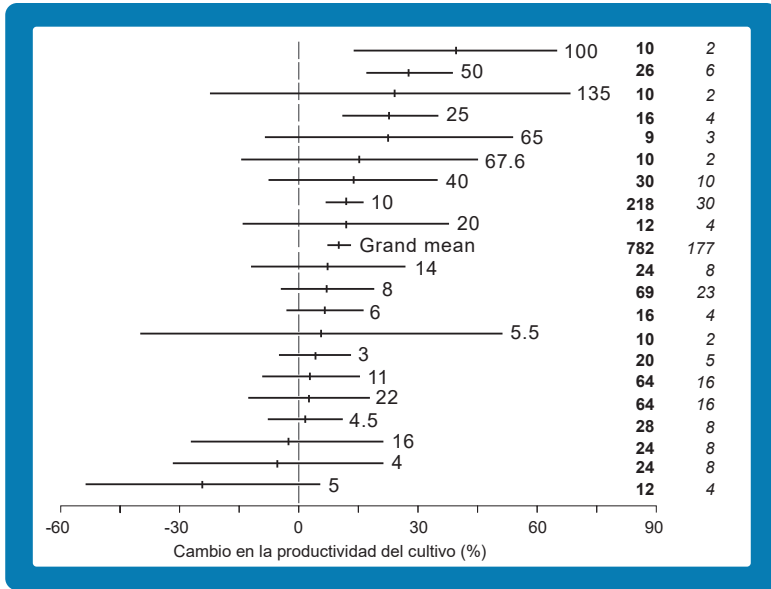


Figura 1. Cambio en la productividad de los cultivos (%) como resultado de la aplicación de diferentes dosis de biocarbón sobre la productividad de diferentes cultivos (metaanálisis) como porcentaje del control.

Fuente: Jeffery et al., 2011.

Notas:

- (1) El número al final de cada barra horizontal se refiere a las toneladas de biocarbón aplicadas por hectárea.
- (2) Los números en las columnas a la derecha son: en la primera columna, el número de repeticiones (n) combinadas de varios ensayos que permiten llegar a este resultado; la última columna es el número de ensayos que se combinaron para cada resultado.

Una de las principales recomendaciones de los autores de este metaanálisis, es que se debe aumentar el tiempo de evaluación de las investigaciones con biocarbón, ya que la mayoría de los estudios tienen una duración máxima de dos años, mientras que algunos autores han observado que el efecto de biocarbón como mejorador de suelos se incrementa con los años. Major et al., (2010) evaluaron la aplicación de 0, 8 y

20 toneladas de biocarbón por hectárea por cuatro años en el crecimiento del maíz, en un Oxisol en los Llanos Orientales en Colombia. Observaron que, aunque en el primer año no se dieron diferencias significativas, la diferencia con el control fue aumentando a través de los años. La mayor diferencia (140 % más con respecto al control) se presentó en el año 4, a pesar de la fuerte sequía que se dio ese año (figura 2).

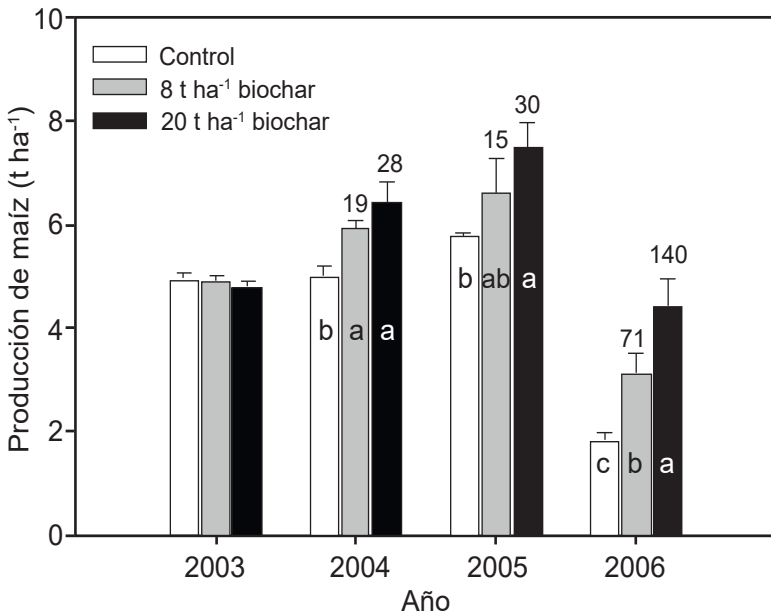


Figura 2. Producción de maíz en un Oxisol en los Llanos Orientales de Colombia con aplicaciones de biocarbón en dosis de 0, 8 y 20 toneladas por hectárea (n=3).

Fuente: Major et al., 2010.

Notas:

- (1) Los números por encima de las barras son el porcentaje de incremento en la productividad comparado con el control (0 biocarbón).
- (2) Letras diferentes indican diferencias significativas entre promedios en un mismo año ( $p \leq 0.05$ ).

# Resultados de productividad en Costa Rica

En Costa Rica, el Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), realizó evaluaciones sobre el impacto del biocarbón en el desarrollo y la productividad de diferentes cultivos (palma aceitera, cacao, hortalizas, banano y café), en un proyecto de investigación que se llevó a cabo del 2008 al 2011 (Benjamin, et al., 2012; Soto et al., 2012), en estos ensayos se observaron las mejores respuestas a la aplicación de biocarbón cuando se acompañó de aplicaciones de nitrógeno como urea o gallinaza.

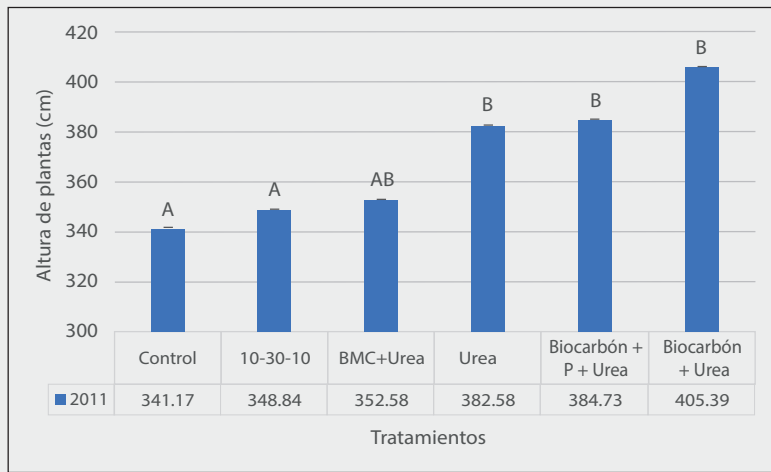
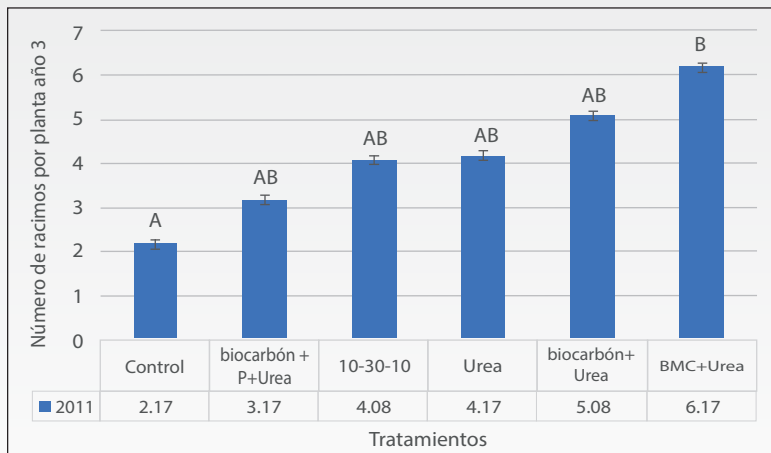


Figura 3. Altura de plantas de palma aceitera luego de tres años de la siembra y aplicación de 20 toneladas de biocarbón mezclado con urea, fósforo (P) y/o fertilizante 10-30-10. San Juan Sierpe, Osa, Puntarenas.

Fuente: Benjamin, et al., 2012.

Notas:

- (1) El control es sin fertilizante de ningún tipo.
- (2) BMC es un biocarbón al que se adicionó gallinaza y se calentó antes de aplicarlo.



## Resultados en palma aceitera

Los ensayos de palma aceitera se realizaron en Puerto Escondido (Inceptisol alto en bases) y San Juan Sierpe (Ultisol), del Cantón de Osa, Puntarenas, con la colaboración de la Cooperativa de Productores de Palma Aceitera (OSACOO). El biocarbón fue aplicado a una dosis de 20 t/ha al fondo del punto de siembra y, posteriormente, alrededor de la planta. Fue elaborado en un horno de estañones a base de desechos de tarimas de melina (*Gmelina arborea*).

En Puerto Escondido no se observaron diferencias significativas, pero en San Juan Sierpe, con los tratamientos de biocarbón más urea y BMC (biocarbón previamente calentado con gallinaza) se observó mayor altura de plantas, un mayor número de racimos y mayor peso por racimo (figura 3, 4 y 5) (Benjamin, et al., 2012; Soto et al., 2012).

Figura 4. Número de racimos a los tres años de la siembra en San Juan Sierpe, Osa, Puntarenas, con 20 toneladas de biocarbón, mezclado con urea, fósforo (P) y/o fertilizante 10-30-10.

Fuente: Benjamin, et al., 2012.

Nota:

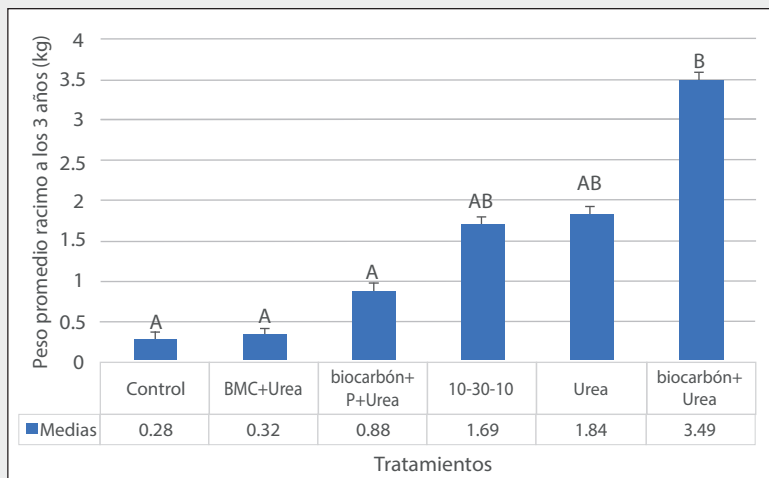
El control es sin fertilizante de ningún tipo.

Figura 5. Peso de fruta (kg) por planta (edad: 3 años) de palma aceitera con aplicaciones de biocarbón y fertilizantes sintéticos en un Ultisol en San Juan Sierpe, Osa, Puntarenas (n=12).

Fuente: Soto et al., 2012.

Notas:

- (1) Las líneas en las barras representan el error estándar y las letras sobre las columnas se refieren a diferencias significativas.
- (2) BMC es una mezcla de biocarbón calentado con gallinaza.



### Resultados en hortalizas

Se evaluó el efecto de la aplicación de biocarbón, con y sin gallinaza, utilizando inoculantes microbiológicos como *Trichoderma harzianum* y *Bacillus subtilis*, sobre la producción de pepino

en un Inceptisol en Turrialba (CATIE) (Soto et al., 2012). Se observó que la producción del tratamiento de biocarbón con gallinaza fue el que dio la mayor productividad (kg) por planta (figura 6).

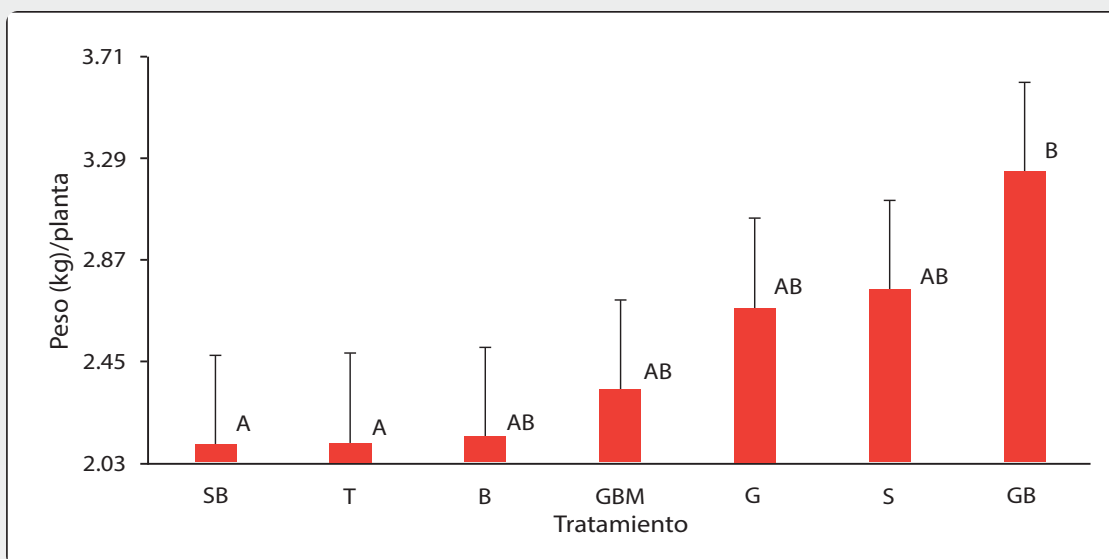


Figura 6. Peso de frutos de pepino cosechados en Turrialba con diferentes tratamientos de B = Biocarbón; G =gallinaza; SB = Fertilización mineral + biocarbón; T= testigo; B = Testigo + Biocarbón; GBM = Gallinaza + Biocarbón + Bacillus subtilis + Trichoderma harzianum; G = Gallinaza; S=Fertilización mineral; GB = Gallinaza + biocarbón.

Fuente: Soto et al., 2012.

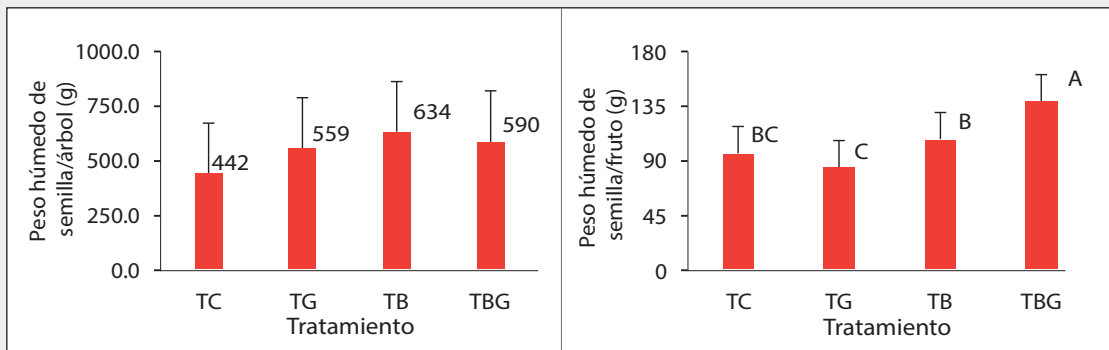
Nota:

- (1) Las barras de error representan el error standard y las letras sobre las columnas se refieren a diferencias significativas ( $p \leq 0.05$ ).

## Resultados en cacao

En la región de Talamanca, en los jardines clonales de cacao establecidos por el CATIE y la Asociación de Pequeños Productores de Talamanca (APPTA), en las comunidades de Watsi (Inceptisol) y Suretka (Ultisol), se evaluó la aplicación de 2 kg de biocarbón + 1 kg de gallinaza/planta (Hojah Da Silva, 2013).

Las aplicaciones se hicieron alrededor de la planta de cacao y fueron ligeramente incorporadas entre el suelo y el mantillo. A los siete meses de la aplicación, no se observaron diferencias significativas en frutos por árbol, solamente para la variable "peso húmedo de semillas por fruto" (figura 7).



TC= tratamiento control; TG= gallinaza; TB= biocarbón; TBG= biocarbón + gallinaza.

Figura 7. Promedio de peso húmedo de semillas de cacao por árbol y peso húmedo de semillas de cacao por fruto, en los distintos tratamientos en los jardines clonales en Watsi y Suretka en Talamanca, Costa Rica.

Fuente: Hojah Da Silva, 2013.

Nota: Medias con letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher,  $p \leq 0,05$ ).

También se evaluó la aplicación en almácigo de cacao (figura 8), en el cual se pudieron observar

diferencias en el crecimiento de las plántulas, en cuatro meses (Hojah Da Silva, 2013).

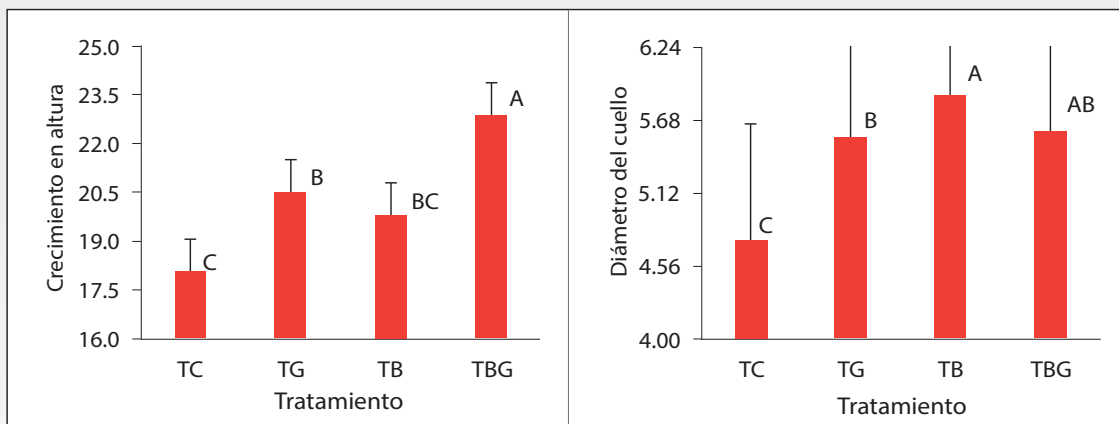


Figura 8. Efecto del biocarbón y la gallinaza en el crecimiento de (a) plántulas de cacao y (b) diámetro del cuello, después de dos meses de la siembra, Talamanca, Costa Rica.

Fuente: Hojah Da Silva, 2013.

Nota:

(1) Las diferencias estadísticas ( $p \leq 0,05$ ) están simbolizadas por letras distintas las barras representan el error estándar.

### 3.2 Mejorador del suelo: **química de suelos**

El efecto positivo del biocarbón en el suelo se ha explicado por su porosidad y capacidad de adsorción, el potencial redox o capacidad reductora u oxidativa, el poder de encalado, y por su influencia en la población microbiana y la estructura del suelo. Su impacto va a depender del tipo de suelo, el tipo y dosis de biocarbón y el tiempo que pasa el biocarbón en el suelo. Como se mencionó anteriormente, entre más tiempo, mayor es su efecto.

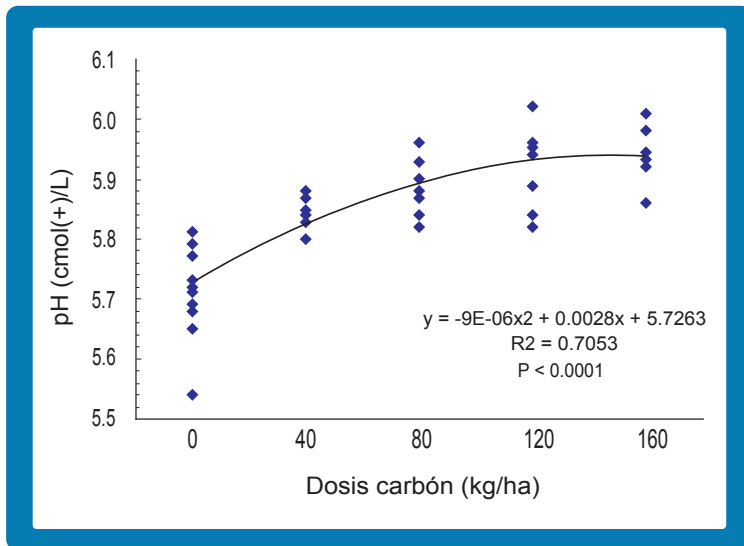


Figura 9. Efecto de la adición de biocarbón en un suelo Inceptisol de Guápiles con la adición de diferentes dosis de biocarbón de guayaba (0, 40, 80, 120 y 160 kg de biocarbón por hectárea).

Fuente: Soto et al., 2012.

El mayor contenido de nutrientes que presentan los suelos con biocarbón, se debe a una combinación de tres factores: a) los nutrientes que puede aportar el mismo biocarbón (fósforo, potasio, zinc, etc.); b) mayor capacidad de retener nutrientes; y c) cambios en la microbiología de suelos (Lehmann & Rondon, 2006).

Utilizando el mismo biocarbón de guayaba, CORBANA observó un incremento en el contenido de potasio (K) en el suelo al incrementar la dosis de biocarbón (figura 10).

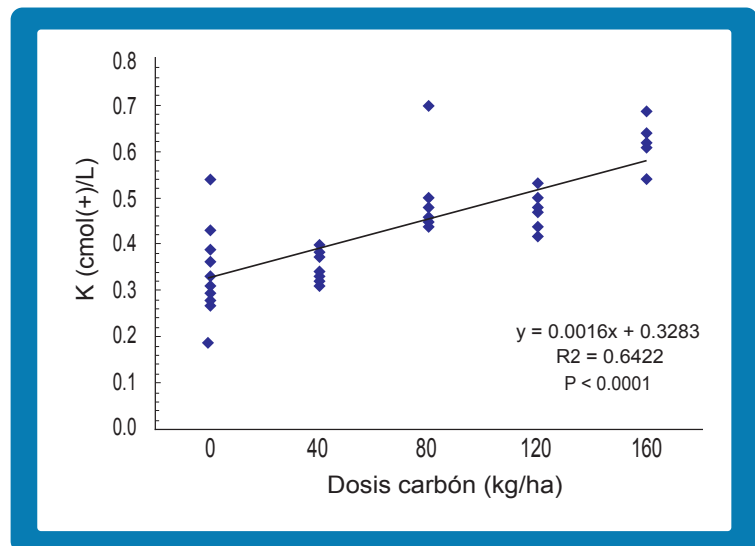


Figura 10. Contenido de potasio (K) en un suelo Inceptisol de Guápiles con la adición de diferentes dosis de biocarbón de guayaba (0, 40, 80, 120 y 160 kg de biocarbón por hectárea).

Fuente: Soto et al., 2012.

### 3.3 Características físicas del suelo y retención de humedad

Los suelos tratados con biocarbón mejoran sus características físicas e hidráulicas. Las adiciones de biocarbón cambian la porosidad del suelo, la capacidad de retención de agua, la distribución de los poros y la conductividad hidráulica bajo condiciones saturadas y no saturadas (Blanco-Canqui, 2017; Omondi et al., 2016; Villagra-Mendoza & Horn, 2018a). Además, afectan la formación de agregados, en forma directa (Burrell et al., 2016), y en forma indirecta, al crear condiciones para una mayor actividad biológica en el suelo. Por ejemplo, Hardie et al., (2014) observaron una mayor actividad de lombrices cuando se aplicó el biocarbón, ocasionando un aumento en el número de macroporos, que favoreció una mayor actividad microbiana.

La adición de biocarbón interviene la capacidad del suelo de retener y almacenar agua, al cambiar el espacio poroso entre partículas (interporos), pero sobre todo por los poros que contiene el biocarbón (intraporos) (Liu et al., 2017), tanto en condiciones saturadas como no saturadas (Villagra-Mendoza & Horn, 2018a). El transporte de agua en condiciones no saturadas se ve afectado porque se reduce la formación de poros mayores y se intensifica la formación de inter-partículas entre los poros (Villagra-Mendoza & Horn, 2018a).

Liu et al., (2017) evaluaron diferentes tamaños de partículas ( $\leq 0.2$  a 2 mm) y observaron que, en suelos arenosos, la presencia de biocarbón ayudó a aumentar la retención de agua en condiciones saturadas. En condiciones no saturadas de agua, las partículas de biocarbón de 0.8 a 2 mm fueron las que más retuvieron agua, por una mayor presencia de intraporos. Igualmente, observaron que los biocarbones de materiales vegetales tendieron a tener más intraporos, es decir, mayor retención de agua que el biocarbón producido a partir de lodos residuales o gallinaza (Liu et al., 2017). Este efecto sobre la física de los suelos es más evidente en suelos de texturas gruesas que en suelos de texturas finas (Blanco-Canqui, 2017; Omondi et al., 2016).

**El biocarbón favorece la producción de agregados del suelo al aumentar la actividad microbiana. Mejorando la infiltración de agua en el suelo.**

Además, el biocarbón favorece la formación de agregados. Burrell et al., (2016), compararon el impacto de seis diferentes tipos de biocarbón (tres materias primas: burucha de madera, paja y podas de uva, producidos a dos temperaturas, 400 °C y 525 °C) sobre la formación de agregados de suelo. Lo sembraron con una rotación de tres diferentes cultivos de ciclo corto por un año y luego lo dejaron reposar dos años más, para un total de tres años. Encontraron que el biocarbón de paja fue el que más incrementó la formación de agregados (98 % más), por lo que la retención de humedad se incrementó en un 38 %. No se observaron diferencias significativas en cuánto a la temperatura de producción del biocarbón.

Es importante hacer notar que, la mayoría de estos efectos se logran con adiciones importantes de biocarbón. Blanco-Canqui, (2017) observó que los mayores efectos en densidad aparente, por ejemplo, se vieron al agregar más de 60 t/ha. Investigadores que evaluaron dosis mucho menores como 10 o 20 t/ha no observaron ningún efecto a corto plazo.

Estudios realizados en un suelo arenoso por Villagra-Mendoza & Horn, (2018b), del ITCR-Costa Rica, concluyeron que se presentó una menor infiltración y percolación y una mayor capacidad de retención de agua al agregar *Terra preta*, inclusive mayor que el compost, efecto que incrementó a concentraciones más altas de *Terra preta* (hasta 30 %).

Aker (2014), evaluó el efecto de aplicaciones de biocarbón elaborado a partir de una mezcla de maderas comunes de León, Nicaragua (Eucalipto, Neem y Tigüilote (*Cordia dentata*)) en las zonas de Telica, León y La Paz, con suelos arenoso franco, franco arenoso y franco arcillo limoso, respectivamente, en fincas de productores de granos básicos. Se observó que los suelos donde se aplicaron dosis de 15 t/ha lograron retener la humedad del suelo hasta 15 días más que los tratamientos donde no se aplicó biocarbón. Estos resultados llevaron a los productores que participaron en el ensayo a mostrar interés en la producción de biocarbón. La investigación, además, trabajó en el diseño de estufas para que estos productores elaboraran su propio biocarbón (Aker, 2014). La descripción de estas estufas se incluye en la sección de diseño de hornos artesanales.

### 3.4 Pérdida de **nutrimentos** en el suelo

Una de las características más importantes del biocarbón es su habilidad de retener nutrientes en el suelo. Scott et al., (2014) en un metaanálisis (artículos publicados en biocarbón del 2009 al 2014), determinaron que el incremento en la capacidad del suelo de retener nutrientes cuando se aplica biocarbón, se debe a cambios en el pH, aumentos en la capacidad de intercambio catiónico (CIC), mejoras en la estructura del suelo y una mayor población microbiana. Estas características ayudan a mejorar la eficiencia de los fertilizantes, disminuir la lixiviación de nutrientes, así como las pérdidas de óxido nítrico. Columnas de suelos con dosis crecientes de biocarbón (0, 5, 10, 20 g de biocarbón/kg de suelo), a las que se les adicionó estiércol líquido de cerdo, mostraron reducciones en la infiltración de nitrógeno hasta de un 15 % y un 60 % de fósforo al ser comparadas con el control (Laird et al., 2010).

Potenciar la capacidad de intercambio de cationes en el biocarbón, es una de las razones por las que se controla cuidadosamente la temperatura en su proceso de producción.

Una característica adicionalmente valiosa, es que la CIC del biocarbón se incrementa conforme permanece en el suelo, al aumentar la concentración de cargas negativas en la superficie del biocarbón (Liang et al., 2006). Es quizás por esto, que algunos productores en Brasil dicen que los suelos negros en la Amazonía aumentan con el tiempo, porque su capacidad de retener nutrientes y formar agregados va creciendo al pasar los años.

### 3.5 Remediación de **suelos**

El término “contaminación del suelo” se refiere a la presencia de una sustancia química fuera de sitio y/o presente en una concentración más alta de lo normal en el suelo, y que tiene efectos adversos sobre cualquier organismo al que no está destinado (Rodríguez et al., 2019). Las fuentes de contaminación de tóxicos orgánicos e inorgánicos pueden ser el resultado del uso inadecuado de plaguicidas, excretas, fertilizantes, la extracción de minerales (minas), entre otros.

El carbón activado (carbón cuya carga es posteriormente activada para aumentar la superficie de contacto), se ha utilizado exitosamente como descontaminante por años. En general, la adición de diferentes formas de carbón puede reducir la biodisponibilidad de contaminantes, tanto orgánicos como inorgánicos (Beesley et al., 2011).

Múltiples estudios han mostrado la disminución de la disponibilidad de pesticidas en el suelo cuando se adiciona el biocarbón (cuadro 2). Chin-Pampillo et al., (2021) evaluaron el efecto de biocarbón de rastrojos de piña, palma aceitera y café pergamino en condiciones de laboratorio para evaluar la sorción y persistencia de dos herbicidas: bromacil y diurón. El biocarbón fue producido a 300 °C y 600 °C en una mufla en laboratorio. Observaron una sorción tres a cuatro veces mayor con el biocarbón de piña y palma aceitera producido a 300 °C en el caso del bromacil, y tres a seis veces mayor en el caso del diurón. No se observaron efectos significativos con el biocarbón de pergamino de café.



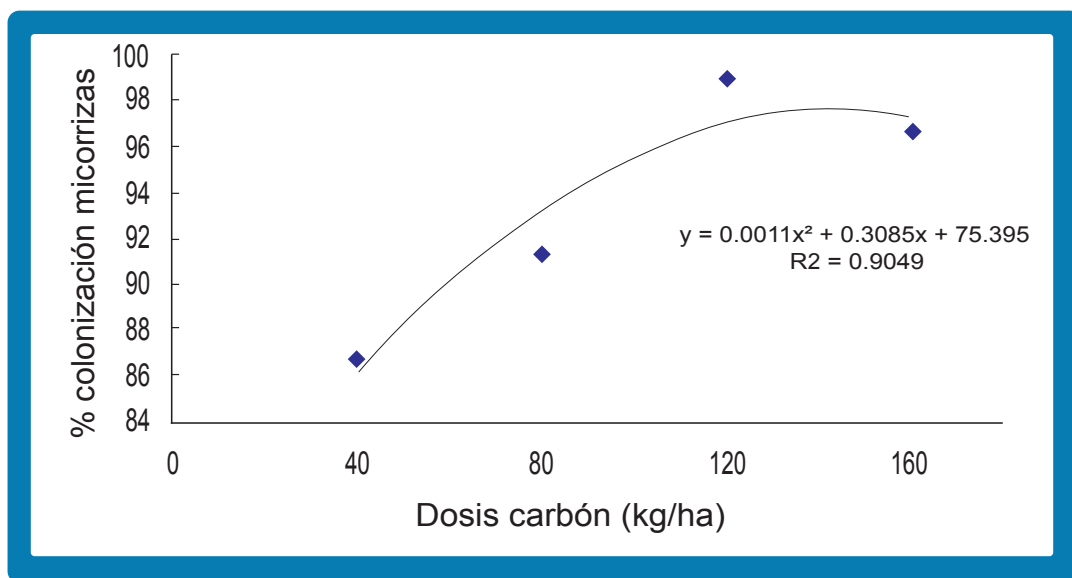
**Cuadro 2. Recopilación de estudios que han evaluado el impacto de adición de biocarbón al suelo para reducir la disponibilidad de contaminantes orgánicos e inorgánicos.**

Tipo de biocarbón y tasa de aplicación	Contaminante	Efecto observado	Autores
Biocarbón de Eucalipto (450 °C), aplicado 0.1, 0.5, 1.0 y 5.0 %	Diurón	La adsorción aumentó de un 7 % a un 80 %	Yu et al., 2006
Biocarbón de Eucalipto (850°C), aplicado a 0.1, 0.5, 0.8 y 1.0 %	Diurón	La adsorción aumentó de un 5 % a un 125 %	Yu et al., 2006
Biocarbón de Eucalipto	Clorpirifós y carbofurán	Disminuyó la concentración de Clorpirifós en un 10 % y un 25 % y Carbofurán en el tejido de la cebolla	Yu et al., 2009
Biocarbón de aserrín (700 °C)	Terbutilazina	Aumento la adsorción en un 63 %	Wang et al., 2010

Fuente: Beesley et al., 2011.

### 3.6 Microbiología de suelos

Estudios realizados en potes, por Eduardo Salas en CORBANA, mostraron un incremento en el porcentaje de colonización con micorrizas en banano, al aplicarse biocarbón al suelo en dosis crecientes (Soto et al., 2012) (figura 11).



**Figura 11. Impacto de diferentes dosis de biocarbón sobre el porcentaje de micorrización en banano Cavendish en potes con plantas de 3.5 meses (biocarbón de madera de guayaba)**

Fuente: Soto et al., 2012.

Igualmente, Salas & Araya, (2009) de CORBANA, trabajaron con plantas de banana Cavendish, en potes en invernadero, y observaron que

las aplicaciones de biocarbón tenían un efecto negativo en la población de nematodos totales y de *Radopholus similis* (figura 12).

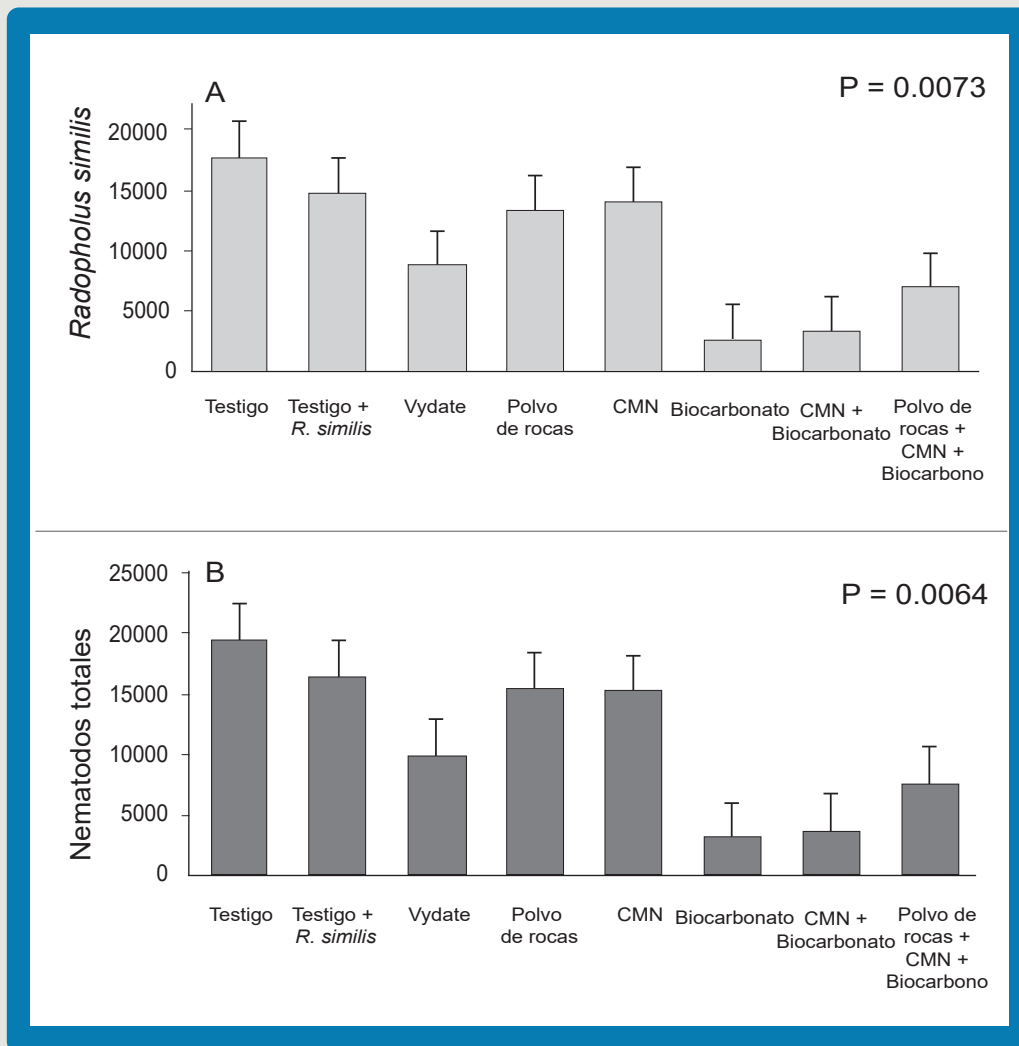


Figura 12. Número de nematodos totales y poblaciones de *Radopholus similis* por 100 g de raíces de plantas de banana (Musa AAA cv. Grande Naine), cultivadas en macetas que fueron inoculadas con  $475 \pm 51$  hembras de *R. similis* y con aplicaciones de biocarbón solo, o en mezcla con comunidades de microorganismos nativos (CMN) y polvo de rocas (n=10).

Fuente: Salas & Araya, 2009.

Como se ha mencionado anteriormente, los mayores impactos del biocarbón se evidencian en suelos ácidos y arenosos, y a largo plazo. Bucaro et al. (2015) llevaron a cabo un ensayo en potes que evaluaron a los 30 días de adicionar el biocarbón, valorando la biomasa y respiración microbiana en un Molisol con caña de azúcar en Guanacaste. Los resultados no mostraron diferencias estadísticamente significativas con la aplicación de 10, 20 y 30 toneladas de biocarbón por hectárea. Resultados similares fueron observados por Hojah Da Silva, (2013), en un Inceptisol en la comunidad Watsi, Talamanca, en campo. Estos resultados podrían deberse al poco tiempo del ensayo; para obtener resultados más concluyentes en este tema, sería ideal evaluar la población microbiana en el largo plazo.

### 3.7 Secuestro de carbono

Cuando se habla de secuestro de carbono (o capturar CO<sub>2</sub> del aire), las metodologías de cálculo como la del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés), han establecido que el carbono secuestrado debe permanecer fijado al menos 20 años para tener un impacto real sobre el clima. La historia y el hallazgo del biocarbón, como una práctica utilizada por los aborígenes en la Amazonía, demuestran que el biocarbón ha permanecido en el suelo al menos 1500 años, por lo que se consideraría una forma muy estable de secuestrar carbono (figura 13) (Baillie, 2009).

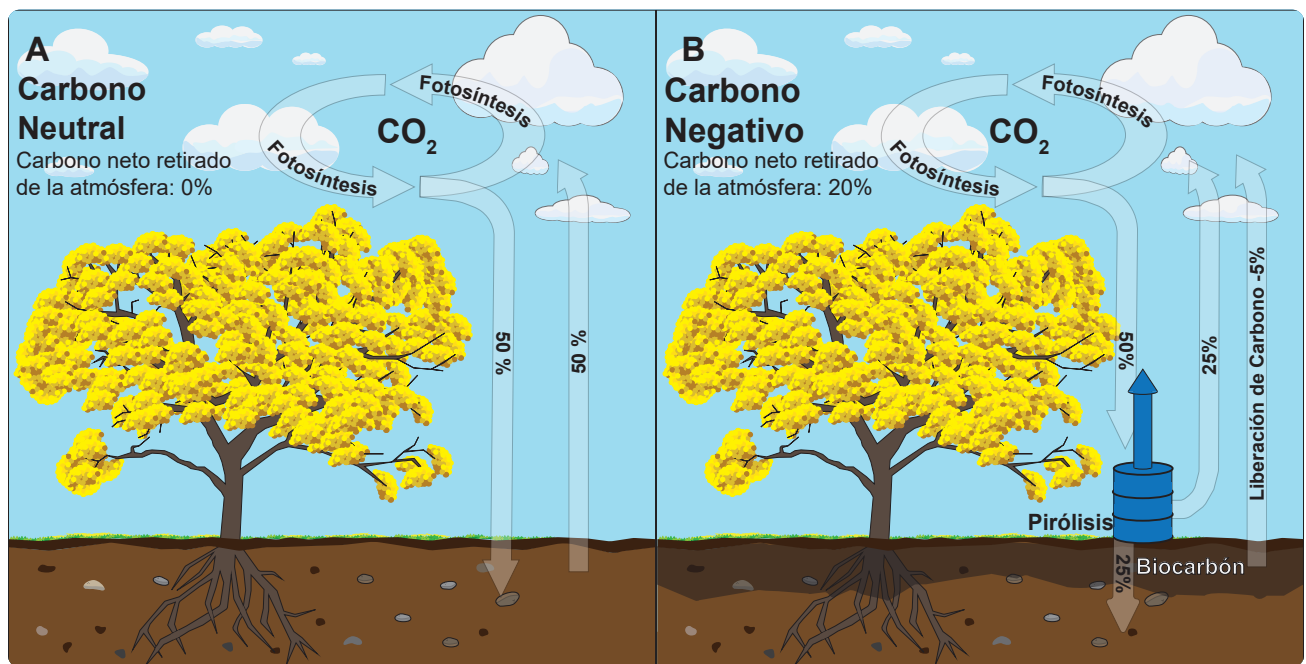


Figura 13. Esquema del secuestro de carbono en el suelo a través de la aplicación de biocarbón al suelo. Una forma estable de secuestrar carbono en el suelo. A. Ciclo carbono neutral; B. Ciclo carbono negativo.

Fuente: adaptado de Lehmann (2007) [www.biochar.org](http://www.biochar.org)

Esta larga permanencia del carbono en el suelo es una diferencia importante cuando surge la interrogante acerca de la mejor forma de manejo de la biomasa residual, si se debe hacer compost o biocarbón. La respuesta depende del objetivo, porque cada uno presenta diferentes ventajas, pero desde el punto de vista de secuestro de carbono, el biocarbón es superior. Aunque se estima que el 50 % del carbón de la biomasa se encuentra en el compost al final del proceso, al aplicarlo al suelo, el tiempo de

residencia del carbón del compost en el suelo en el trópico va de años a décadas, mientras que con el biocarbón oscila entre cientos a miles de años (Lehmann & Rondon, 2006).

La pregunta sería entonces, ¿qué porcentaje del carbono de la biomasa se transforma en CO<sub>2</sub>? En el caso del biocarbón, dependerá del tipo de biomasa y de la temperatura de la pirólisis. Biocarbón de materiales proteicos como gallinaza puede retener de un 10 % a un 40 %

**Fotografía 1.** Ensayo de compost y lombricompost con diferentes dosis de biocarbón realizado en los invernaderos de la Finca Santa Lucía de la Universidad Nacional; y en la Cooperativa Pilangosta, en Hojancha, Nicoya, Guanacaste.

Fuente: J. Rubio.



de su carbón en el proceso de pirólisis, mientras que el biocarbón de materiales lignocelulósicos como el pino, pueden retener hasta el 78 % de su carbón (Gaskin et al., 2008). Quesada (2014), observó que la eficiencia de producción de biocarbón de la pulpa de café en un proyecto con CoopeTarrazú (zona de Los Santos, Costa Rica), es del 15 %. Dicho autor recomienda investigar mejores usos para el manejo de este residuo, como podría ser el compostaje, dado su alto contenido de nitrógeno y azúcares, y por el tamaño de partícula, que permite un rápido proceso de descomposición.

### 3.8 Impacto de la aplicación del **biocarbón** sobre la emisión de otros gases de **efecto invernadero**

Las emisiones de los gases óxido nitroso ( $N_2O$ ) y metano ( $CH_4$ ), ambos con un alto potencial de calentamiento global, se reducen cuando se adiciona biocarbón al suelo. Kammann et al., (2012) evaluaron las emisiones de óxido nitroso en potes en invernadero con biocarbón de cáscara de maní (alto en nitrógeno) versus compost, adicionando diferentes dosis de nitrógeno. Ellos observaron que cuando se presentaron dosis de nitrógeno más altas, el biocarbón fue más efectivo en reducir las emisiones que el compost.

### 3.9 **Compostaje**

Rubio (2014) evaluó el efecto de la adición de biocarbón en el proceso de producción de compost y lombricompost con pulpa de café (co-compostaje) (fotografía 1), evaluando posteriormente el impacto de estas mezclas en la producción de almácigos de café en CoopePílangosta, Hojancha, Guanacaste. No se observaron diferencias significativas en variables de desarrollo como altura de las plántulas. Solamente se observó un aumento significativo en el área de la raíz conforme se incrementaron las dosis de biocarbón en el compost.

El co-compostaje se refiere a la mezcla de biocarbón con excretas y otros residuos vegetales, para luego someterse a un proceso microbiano de calentamiento y descomposición (compostaje). Se considera que el co-compostaje favorece la creación de una película alrededor de las partículas de biocarbón, similar a la que se observa al extraer partículas de biocarbón del suelo, luego de varios años. Esta película favorece la retención de nutrientes y agua en el suelo (Hagemann et al., 2017). Además, se piensa que el co-compostaje del biocarbón aumenta el potencial del biocarbón y su desempeño a corto plazo como mejorador de suelos.

Esta estrategia señala que, con dosis menores (0.5 a 2 t/ha), se pueden lograr los impactos que a corto plazo se observan con dosis más altas como 10 t/ha (Hagemann et al., 2017).

Los materiales  
constituyentes de la  
materia orgánica se  
van descomponiendo a  
diferentes temperatura.

Hemicelulosa: 220 a 315 °C

Celulosa: 315 °C

Lignina: 160 – 900 °C:  
produce el 40% del carbón.

## 4. Producción del biocarbón:

### Diseño de hornos

El biocarbón puede ser producido en una amplia variedad de hornos, con diferentes grados de tecnología. Por ejemplo, desde las carboneras tradicionales hasta hornos a gran escala, con un mejor aprovechamiento de la energía para producir electricidad.

En esta sección se describen hornos de biocarbón utilizados en Costa Rica y Nicaragua, los cuales son, en su mayoría, de pequeña escala.

#### 4.1 El proceso de **pirólisis**

La pirólisis es el proceso termoquímico de transformación de la biomasa en ausencia de

oxígeno, que produce esencialmente cuatro subproductos: biocarbón, gases, bioaceites y ceniza.

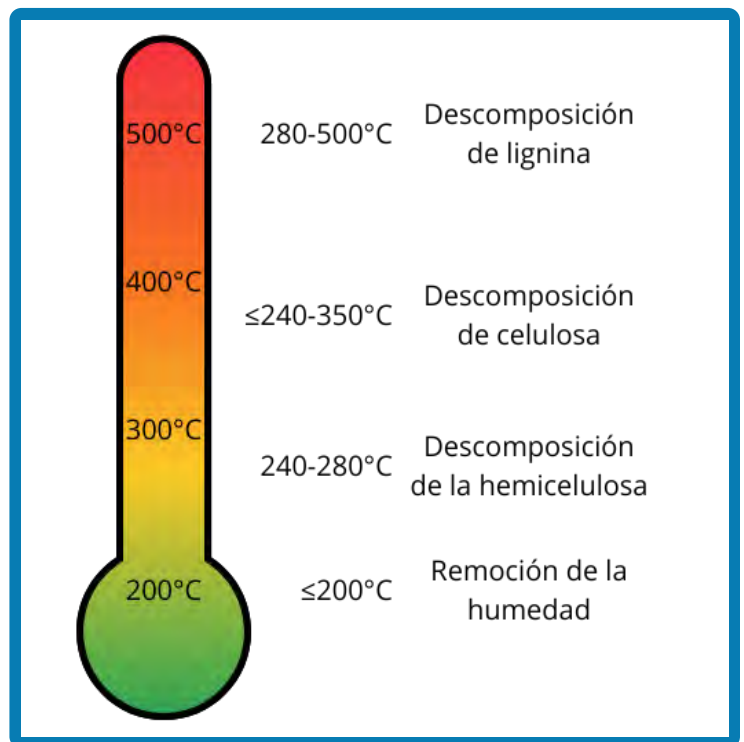
Es común que exista confusión entre dos procesos comunes de transformación térmica de la biomasa: la combustión y la pirólisis. La combustión se lleva a cabo en presencia de oxígeno, donde se producen, como subproductos sólidos, el carbón o biocarbón (3 a 5 %) y una alta cantidad de cenizas (95 %). En contraste, la pirólisis se realiza en ausencia de oxígeno, y los subproductos mayoritarios son biocarbón y cenizas en baja proporción (cuadro 3).

**Cuadro 3. Diferentes formas de conversión térmica de la biomasa y su distribución en subproductos**

Tipo de proceso	Temperatura (°C)	Otras características	Objetivo productivo	Distribución porcentual (%) de productos		
				Gas	Líquido	Sólido
Combustión	1000 - 1500	Presencia de oxígeno	Energía convertida en calor y potencia	95	0	5
Carbonización	300 - 1200	Poco oxígeno	Carbón para combustible	60-75	3-5	10-35
Pirólisis rápida para bio-aceites	400 - 600	Ausencia de oxígeno	Bio aceites y combustibles	20-40	40-70	10-25
Pirólisis lenta para biocarbón	300 - 700	Ausencia de oxígeno	Biocarbón como enmienda de suelo	40-75	0-15	20-50
Gasificación	500 - 1500	Presencia de oxígeno	Producción de gases para calefacción y como combustible	85-95	0-5	5-15

Fuente: Brown et al., 2015.

El proceso de pirólisis emite principalmente cuatro gases, además de vapor del agua: metano, hidrógeno, monóxido y dióxido de carbono (Zaman et al., 2017). Las largas cadenas de la celulosa, hemicelulosa y lignina se empiezan a descomponer, y producen moléculas de menor tamaño, vapores que se condensan como alquitranes y aceites, y el biocarbón. La transformación se dá a diferentes temperaturas para cada tipo de tejido vegetal (figura 14).



**Figura 14.** Temperatura de transformación de los diferentes tejidos vegetales en la producción de biocarbón durante la pirólisis.

Fuente: Zaman et al., 2017.

**Para lograr la mayor eficiencia es importante trabajar con materiales con contenidos de humedad menores al 15 %.**

La proporción de cada una de estas moléculas depende de la temperatura, la tasa de calentamiento del horno, y el diseño y funcionamiento de este (Zaman et al., 2017).

El diseño de hornos para producir biocarbón se plantea, para crear condiciones que optimicen la calidad del producto como mejorador de suelos. Las condiciones de la pirólisis deben promover que el biocarbón tenga alta capacidad de intercambio catiónico, mayor producción de carbono versus gases o cenizas, baja producción de sustancias tóxicas, relaciones hidrógeno/carbón (H/C) menores a 0.4, y una relación oxígeno/carbón (O/C) menor a 0.6 (Schimmelpfennig & Glaser, 2012), así como un mejor aprovechamiento del calor y los subproductos como bio-aceites (International Biochar Initiative [IBI], 2015).

Estándares de calidad para certificación de biocarbón creadas en Europa (European Biochar Foundation [EBC] (2016), consideran no solo la calidad del biocarbón como producto final, sino también las condiciones del horno. La EBC solo certifica el biocarbón producido en hornos que aprovechan los subproductos como el calor y los bio-aceites. Sin embargo, se debe reconocer que en la actualidad la mayoría del biocarbón en el mundo no se produce en hornos con estas capacidades (Brown et al., 2015).

Es posible manejar la velocidad del proceso de pirólisis para favorecer la producción de

bio-aceites o biocarbón. Este manejo es común en la producción de biocarbón con residuos de palma aceitera en Malasia (Kong et al., 2014). Pirólisis más lentas (1 a 7 °C/minuto) producen 35 % - 50 % de biocarbón y 20 % a 30 % de bio-aceites, mientras que las pirólisis más rápidas (10-500 °C/min) producen 15 % de biocarbón y 70 % de bio-aceites (Zhu et al., 2018).

## 4.2 Preparación de la biomasa antes de hornear

El sistema de producción de biocarbón busca perder la menor cantidad de carbón en el proceso de pirólisis, con la menor inversión energética. Para esto se debe seleccionar bien el material que se va a utilizar, y que posea el menor contenido de humedad posible. Se recomienda iniciar el proceso con una humedad de la materia prima entre 10 % y 15 % (Zaman et al., 2017).

La eficiencia será mayor entre más alto sea el contenido de lignina en la materia prima (Ver: Sección 6.a.: "Tipos de biocarbón según la materia prima"). Sin embargo, la industria ha desarrollado biocarbón de muchos materiales, como lodos urbanos o gallinaza Song & Guo, (2012), que tienen un bajo contenido de lignina. Se opta por hacer biocarbón con estos residuos de eficiencia tan baja, porque el biocarbón es una de las formas más ecológicas y rentables de manejo de residuos, en algunas condiciones.

Resulta muy importante la inversión en disminuir la humedad antes de que la materia prima ingrese al horno. En el caso de estiércoles y lodos urbanos, se utilizan materiales secos para la producción de biocarbón, con 15 % de humedad (Song & Guo, 2012).

## 4.3 Diseño de hornos

### 4.3.1 Carboneras tradicionales

La forma tradicional para producir carbón para cocinar o para calefacción es excavar una fosa en el suelo, utilizando el suelo como aislante. En la fosa se colocan los troncos o ramas de madera que se van a carbonizar, en forma ordenada y



compacta. Al final de la pila de troncos se colocan materiales de alta flamabilidad como pequeñas ramas u hojas secas, que permitan encender el fuego más fácilmente. Cuando se observa que los troncos más pequeños han prendido fuego, se tapa con una capa de suelo de al menos 10 cm. Se deja una entrada y salida de oxígeno y, en condiciones normales, puede tomar una o dos semanas para carbonizarse lentamente.

En sitios donde las condiciones del suelo no permiten hacer una fosa (ya sea por suelos muy pesados, pedregosos, o con un nivel de agua muy alta), se puede hacer también la producción de carbón en lomo o pira. Igualmente, en estos casos, se acomodan las ramas ordenadamente y se cubre con suelo. El pilar o tronco central se retira al iniciar el proceso de combustión para dejar una entrada de aire (FAO, 1983).

Las temperaturas a las que llega este tipo de carbonización es 100 °C inicialmente, cuando se quema el material que inicia el fuego. Luego alcanza unos 280 °C durante el proceso de secado de toda la madera presente y, finalmente, puede llegar hasta los 400 °C en el lento proceso de carbonización (FAO, 1983).

Estos sistemas de producción son de bajo costo, por lo cual son muy populares. No obstante, presentan algunas limitantes: las temperaturas no son homogéneas en todo el sistema, por lo que se produce carbón de distintas calidades; y no se hace un buen aprovechamiento de la energía ni de la producción de bio-aceites que se generan en el proceso (Brown et al., 2015). Es por esto que se trabaja en diseñar hornos que permitan un mayor control de las temperaturas, para garantizar la calidad del producto final y mejorar la eficiencia. Esto no quiere decir que el carbón producido en carbonera no pueda ser también utilizado como mejorador de suelos.

#### 4.3.2 Diseño básico de hornos a pequeña escala

La estructura básica de un horno para producir biocarbón es una cámara donde se produce el biocarbón en ausencia de oxígeno (pirólisis), y otra cámara donde se da la combustión en presencia de oxígeno.

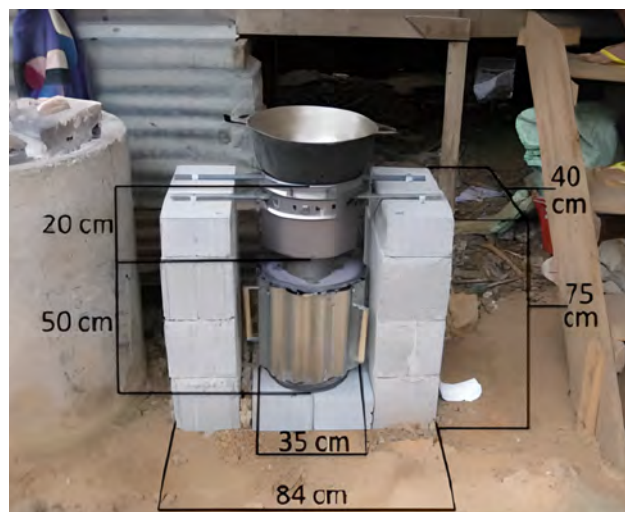
#### 4.3.3 Hornos para cocción

A continuación, se presentan dos ejemplos de hornos para cocción y producción de biocarbón, que se trabajaron en Costa Rica y Nicaragua.

#### Proyecto "Estufa Finca": Los Santos y Talamanca, Costa Rica

Entre los años 2009 a 2013, el proyecto "Estufa Finca", coordinado por Art Donnelly, de la ONG Sea Char, trabajó con poblaciones que cocinan con leña en las regiones de Los Santos y Talamanca, Costa Rica. En la zona de Los Santos se trabajó con las poblaciones de Guaymis y Ngöbes que viajan para apoyar con la cosecha de café; y en Talamanca se colaboró con productores de la Asociación de Pequeños Productores de Talamanca (APPTA), tanto Bribrís como Cabécares.

Los hornos se construyen a partir de latas de pintura, con una lámina de zinc como aislante (fotografía 2). En este caso se cuenta con una sola cámara, se utiliza el calor para cocinar y luego se deja que se produzca el biocarbón en ausencia de oxígeno. El proyecto promovió la construcción de los hornos, y compraba el biocarbón a los productores interesados en vender,



Fotografía 2. Horno del Proyecto "Estufa Finca", promovidas en las zonas de Talamanca y Los Santos.

Fuente: Reporte del proyecto "Estufa Finca", 2011.

el cual era posteriormente utilizado para almácigos o como mejorador de suelos.

El biocarbón producido en la región fue utilizado en investigaciones en cacao, realizadas por el CATIE (Hojah Da Silva, 2013).

Entre las lecciones aprendidas por el proyecto en el caso de gestión y promoción de este tipo de estufas, los productores mencionaron que deben ser adaptadas a las condiciones locales (tipo de leña disponible, tipo de habitación, y sistema de cocción utilizada), mejorar la seguridad para que los niños/as no se quemen, y que el horno cuente con más de un punto de cocción (Avilés, 2014).

La capacitación para el uso de este tipo de cocinas resultó esencial para su manejo. En muchos casos, el o la cocinera continuó agregando leña para aumentar el tiempo de cocción,

lo que disminuyó la producción de biocarbón (Avilés, 2014).

Segura (2018), evaluó las temperaturas y la calidad del biocarbón producido con la Estufa Finca. Colocó termocuplas en dos sitios, en cada horno (13 y 18 cm de altura), y produjo biocarbón de bambú y de madera. Las temperaturas alcanzadas fueron en promedio de 488 °C para bambú, y 567 °C para la mezcla de maderas. El biocarbón producido se consideró de alta calidad y con una alta superficie específica (ver detalles de este biocarbón en la sección 6 y fotografía 8).

### Estufas de biocarbón en León, Nicaragua

El segundo caso es un diseño desarrollado como parte del proyecto de Maestría del Ing. Carlos Aker (CATIE), y un productor de cocinas en la región de León, Nicaragua (Aker, 2014).



Fotografía 3. Cocina de leña para la producción de biocarbón, utilizada por productores de León, Nicaragua.

Fuente: Aker, 2014.

En este caso, la estufa contaba con dos cámaras: en la cámara externa (las esquinas) se colocaba la leña más pequeña que será quemada rápidamente para la ignición del proceso; mientras que, en la cámara interna, se colocaron los trozos de leña con los que se iba a producir el biocarbón en ausencia de oxígeno (fotografía 3).

Las temperaturas alcanzadas por la estufa para biocarbón estuvieron entre los 316 °C y los 380 °C. El tiempo de cocción fue menor en la estufa de biocarbón, así como el consumo de leña. La estufa se puede utilizar para producir biocarbón o no, según sea el interés del operador (Aker, 2014).

Las familias que evaluaron la estufa mostraron satisfacción con el tiempo de cocción y la poca producción de humo. Pero fue sobre todo el uso del biocarbón lo que pareció interesarles más, ya que simultáneamente se montaron

ensayos en sus fincas para evaluar el impacto del biocarbón en el suelo. Entre las ventajas de la producción de biocarbón resaltaron que el biocarbón mejora rendimientos, retiene humedad, reduce el gasto de fertilizantes, y “la mezcla con gallinaza parece una buena forma de cultivar”. Además, consideraron la opción de vender biocarbón a los vecinos como mejorador de suelos (Aker, 2014).

#### 4.3.4 Hornos para producción de biocarbón a pequeña escala

Un diseño comúnmente utilizado alrededor del mundo es el de doble estañón, donde se coloca un estañón pequeño dentro de un estañón grande. El estañón pequeño será la cámara de pirólisis (sin oxígeno), mientras que el grande será como una “camisa” o “chaqueta”, con el fin de aislar la cámara de pirólisis y mantener la temperatura.



Fotografía 4. Hornito utilizado por el proyecto del CATIE en la península de Osa: cámara de combustión en ladrillo, con doble estañón para la cámara de pirólisis, donde se agrega la madera que se convertirá en biocarbón. **Diseño del Horno:** Robert Lerner.

Fuente: G. Soto.

Fotografía 5. El Sr. Francisco Estrada operando el horno establecido en el CATIE para la producción de biocarbón, con un amplio espacio en la base para agregar el material de leña para combustión, y el sistema de reciclaje de gases en la tubería externa.

Fuente: P. Falcon y I. Taurou.



Estos hornos fueron utilizados por el proyecto del CATIE, producidos en Puerto Jiménez (fotografía 4), y en Turrialba (fotografía 5). La leña es la fuente de calor que se agrega en un horno de ladrillos (fotografía 4), o se coloca directamente en la base de los estañones (fotografía 5). Este horno de ladrillos operó a temperaturas entre los 550 °C y 600 °C. Incluyendo el proceso de enfriamiento, se lograba realizar una tanda de biocarbón diaria.

El horno cuenta con dos chimeneas, una para salida del vapor del agua al secar la madera de la cámara de pirólisis, y otra chimenea para la producción de los gases de la pirólisis (fotografías 4 y 5).

Estos hornos de estañones tienen las ventajas de ser de bajo costo y portabilidad. Se pueden llevar a plantaciones forestales, por ejemplo, donde se hagan podas, para producir y aplicar



Fotografía 6. Dr. Juan S. Chin (CICA-UCR) muestra diferentes diseños de horno de doble estañón.

Fuente: G. Soto.

el biocarbón ahí mismo. Una de sus limitantes es que no son muy duraderos, ya que estas temperaturas llegan a dañarlos en uno o dos años, dependiendo del uso. Hornos similares han sido utilizados en el ITCR en el proyecto coordinado por el Ing. Jaime Quesada, y en el CICA- UCR (fotografía 6).

Pérez-Martínez (2015), evaluó en el ITCR un carbonizador diseñado como herramienta práctica y móvil, de bajo costo, accesible a los productores. Este horno, similar a los hornos de estañón antes mencionados, tiene un volumen de 0.208 m<sup>3</sup> (55 galones) (figura 15).



Figura 15. Partes de un carbonizador, elaborado en el ITCR, para la producción de biocarbón.

Fuente: Pérez-Martínez, 2015.

La temperatura en este tipo de horno puede llegar hasta los 600 °C al momento de la pirólisis (figura 16). Estas temperaturas pueden variar con la materia prima, el tamaño de las piezas y cómo se encuentran acomodadas en el horno, ya que estas condiciones intervienen en las variaciones del flujo de calor.

En esta investigación se evaluaron dos materias primas: madera de residuos de construcción y madera de tarimas (*Gmelina arborea*). El consumo de leña fue un 35 % del peso de la materia prima utilizada para biocarbón (Pérez-Martínez, 2015). La humedad de la madera antes de entrar al horno estuvo entre un 11 % a un 14 %. El rendimiento de este tipo de horno fue alrededor de un 30 % (Pérez-Martínez, 2015).

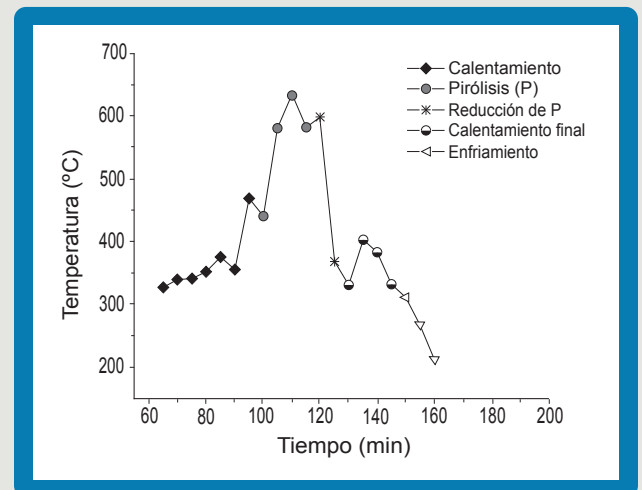


Figura 16. Temperaturas registradas a través de un proceso de pirólisis con residuos de madera de construcción, con el horno de doble estañón.

Fuente: Pérez-Martínez, 2015.



Fotografía 7. Horno de tornillo para la investigación en el CICA-UCR

Fuente: J. Chin.

#### 4.3.5 Hornos para investigación

En el CICA-UCR se cuenta con un horno eléctrico de tornillo sin fin, diseñado para la investigación (fotografía 7). Este tipo de horno de alimentación

continúa procesa materiales que tengan un tamaño de partícula pequeño y de estructura ligera, que puedan ser fácilmente movilizadas por el tornillo sin fin. Las temperaturas alcanzadas en este horno son de hasta 650 °C.

# 5. Factores a considerar al seleccionar materias primas para biocarbón

Es posible producir biocarbón de cualquier biomasa natural. Sin embargo, se debe considerar que, para algunos materiales, el rendimiento de biocarbón es tan bajo que es mejor buscar otras estrategias para usar esa biomasa, con un mejor balance costo-beneficio. Por ejemplo, hacer compost o pellets para alimento de ganado.

Sin embargo, como se mencionó anteriormente, muchas veces la industria no tiene opciones para el manejo de un producto residual, y el biocarbón es su mejor alternativa ecológica y económica.

A continuación, se presentan algunos parámetros a considerar sobre la biomasa a utilizar, que pueden afectar la calidad del biocarbón producido.

## 5.1 Eficiencia de producción de biocarbón

Para efectos de este documento, la eficiencia se define como la relación entre la cantidad de biocarbón producida (kg) respecto a la cantidad de materia prima o biomasa utilizada (kg), y se expresa de manera porcentual.

$$\% \text{ eficiencia o rendimiento} = \frac{\text{peso de biocarbón obtenido (kg)} \times 100}{\text{Peso de biomasa inicial (kg)}}$$

Diversos factores afectan la eficiencia de forma directa, como la humedad de la biomasa inicial, la composición lignocelulósica de la biomasa utilizada como materia prima (contenido de lignina, celulosa y hemicelulosa), y la temperatura de pirólisis.

Materiales con alto contenido de celulosa y hemicelulosa tienden a tener una eficiencia menor que los que tienen mayor contenido de lignina en la producción de biocarbón. Debido a la

descomposición o transformación en compuestos más volátiles de la celulosa y hemicelulosa, disminuye el contenido de carbón, se favorece la formación de alquitrán y se obtiene un mayor contenido final de cenizas. Quesada (2014) mostró que la pulpa de café tiene una baja eficiencia (15 %). En estos casos, es posible considerar otros usos para estos residuos, como en alimentación animal, producción de compost (por su alto contenido de nitrógeno), entre otros.

Los factores que determinan el tipo de biocarbón son la materia prima y las temperaturas de producción.

## 6. Tipos de biocarbón:

Existen diferentes tipos de biocarbón. Los factores que determinan el tipo de biocarbón son la materia prima o la biomasa, las temperaturas de producción y la velocidad a la que aumenta la temperatura.

### 6.1 Características del biocarbón según la materia prima

Luego de una revisión de publicaciones científicas, Scott et al., (2014) sugieren que el biocarbón debe al menos dividirse en dos tipos según

la materia prima: biocarbón a base de residuos de plantas (BBP), y biocarbón a base de residuos animales (BBA). El BBP presentará mayor contenido de carbono, menor contenido de cenizas, menor conductividad eléctrica, mayor área superficial específica y, por lo general, menor contenido de N, P y K, en comparación con los BBA. Esta es una generalización gruesa y se presentarán excepciones, tal y como lo demuestra el biocarbón de cáscara de maní, que presenta un porcentaje alto de N (2.7 %) a 500 °C (cuadro 4) (Novak et al., 2009) .

Cuadro 4. Comparación de las características de biocarbón de cáscara de maní y gallinaza a dos diferentes temperaturas de pirólisis.

Materia Prima	Temperatura (°C)	pH	C %	N %	Ceniza %	P %
Cáscara de maní	0	-	50.7	1.7	3.3	-
Cáscara de maní	400	7.9	74.8	2.7	8.2	0.26
Cáscara de maní	500	8.6	81.8	2.7	9.3	0.26
Pollinaza	0	-	36.2	4.1	24.4	
Pollinaza	350	8.7	46.1	4.9	35.9	2.94
Pollinaza	700	10.3	44.0	2.8	52.4	4.28

Fuente: Novak et al., 2009.

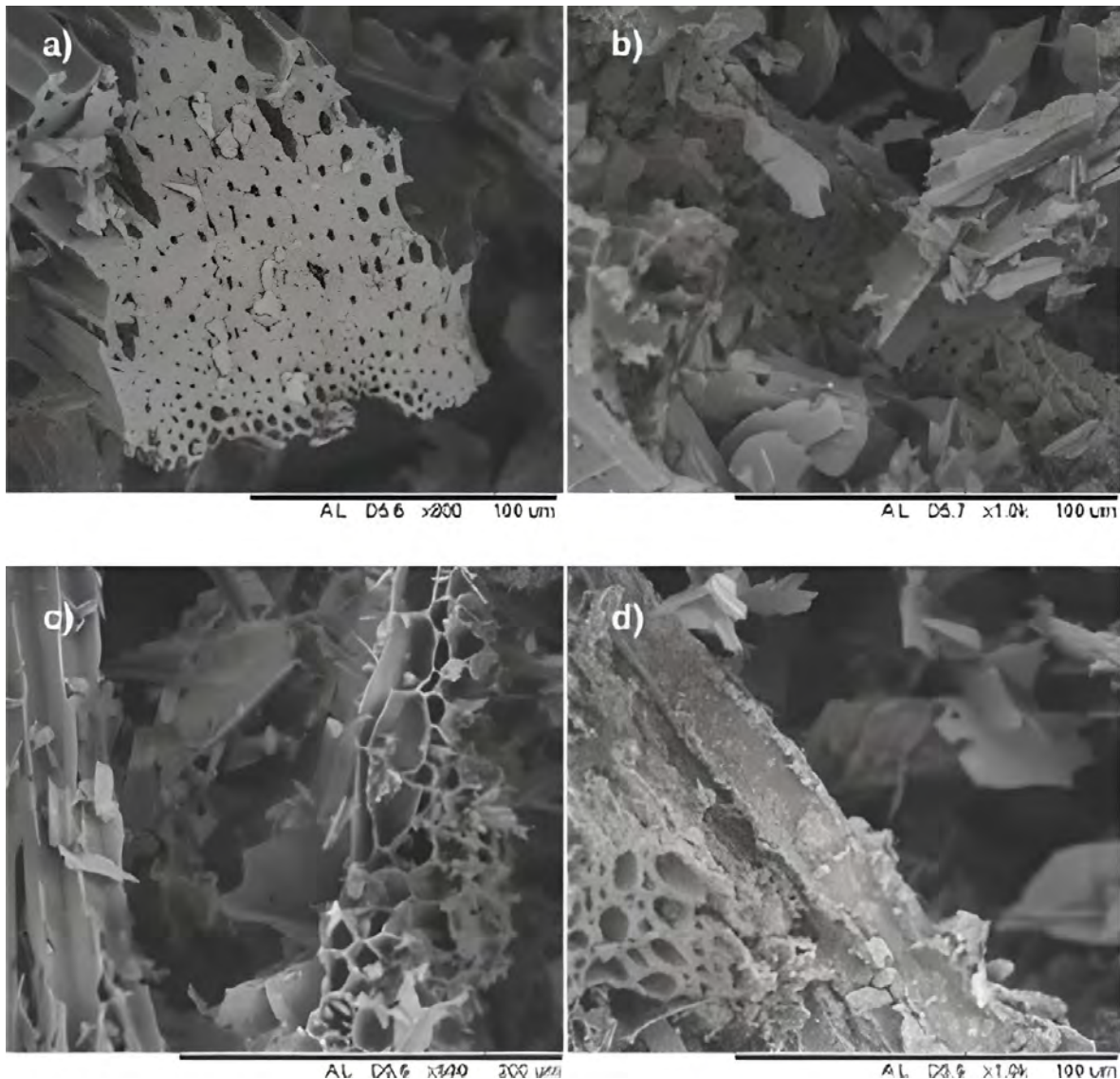


El otro factor que tiene una influencia importante en las propiedades del biocarbón es la temperatura del proceso. En el caso de BBA se pierde más N conforme aumenta la temperatura, lo que no se observa en el biocarbón de tejidos vegetales (Scott et al., 2014).

Igualmente, la morfología superficial del biocarbón va a cambiar según la materia prima y las temperaturas. Es posible observar

la morfología superficial en fotografías de microscopía de barrido.

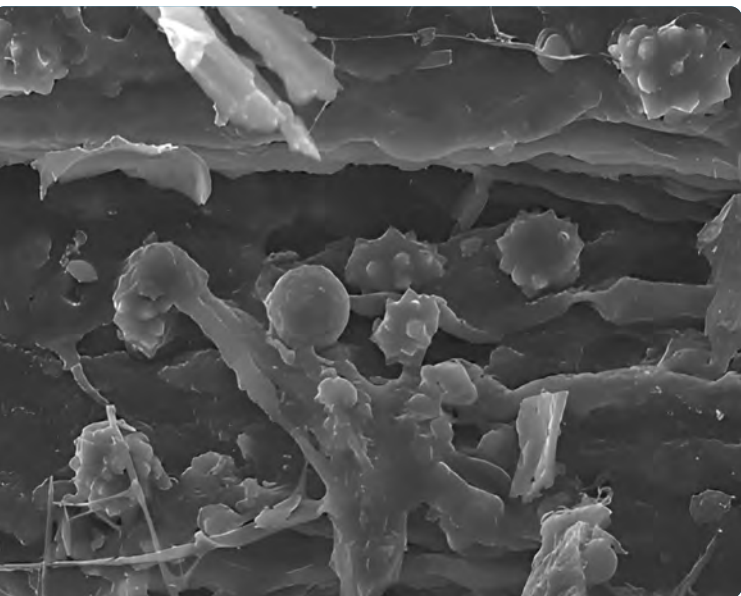
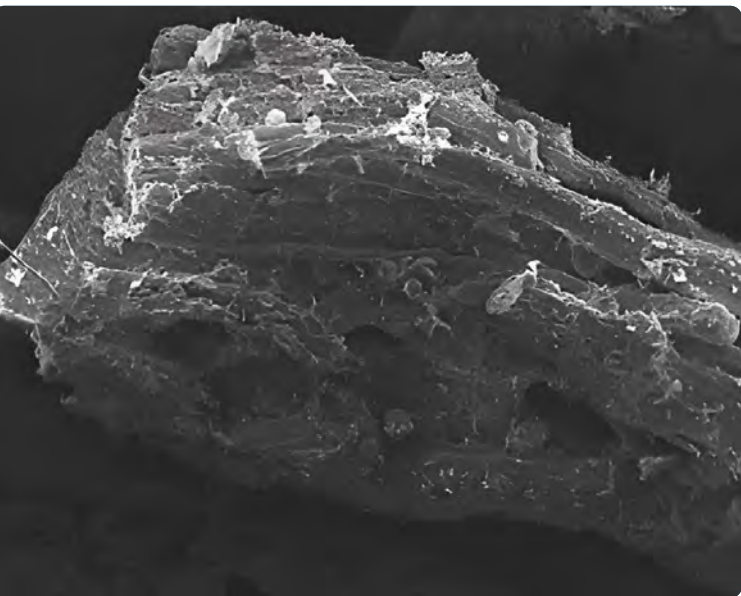
A continuación, se presentan dos ejemplos de biocarbón producido a base de bambú y residuos de madera en el horno Estufa Finca (fotografía 8), en una investigación en el ITCR (Segura, 2018). Se aprecia la estructura porosa de ambos materiales, lo que es congruente con el origen vegetal de la materia prima.



Fotografía 8. Micrografía utilizando Microscopía Electrónica de Barrido para biocarbón de bambú (a y b) y madera (c y d), producidos en el horno Estufa Finca en el ITCR, con acercamientos de 1000x, 800x y 500x.

Fuente: Segura, 2018.

En el proyecto del CATIE, se evaluó el pinzote (fotografía 9). Estas muestras fueron enviadas a la Universidad de Adelaida, Australia, y fueron analizadas gracias a la cortesía del profesor Dr. S. Joseph.



Fotografía 9. Partícula de biocarbón de pinzote de palma aceitera producida en horno de estañón en Puerto Jiménez, Costa Rica. En la foto superior se ve la parte superficial de la partícula de biocarbón, y en la foto inferior, se observa un corte que muestra estructura interna.

Fuente: Dr. S. Joseph, Universidad de Adelaida; proyecto biocarbón, CATIE.

## 6.2 Características del **biocarbón** según la temperatura de **pirólisis**

En general, a mayor temperatura, el grado de carboxilación es mayor, por lo que el área superficial es mayor (Chen et al., 2008). A mayores temperaturas, el biocarbón tendrá mayor área superficial específica, pero se reduce el contenido de materia orgánica amorfa, afectando la capacidad de retener contaminantes orgánicos.

Estudios comparativos de diferentes tipos de sustratos, tales como granza de arroz, pergamino de café, rastrojo de maíz, entre otros; con diferentes tipos de hornos, han mostrado que la concentración final de compuestos orgánicos volátiles (COV) en el biocarbón está determinada principalmente por la temperatura, la tasa de calentamiento ( $\Delta^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ) y las condiciones del horno (Deal et al., 2012). Esto indica que la selección y el manejo del horno juegan roles importantes en la calidad del producto final.

En Costa Rica, el CATIE realizó investigaciones en cultivos de cacao, palma, hortalizas, café, etc., utilizando biocarbón producido con restos de tarimas de melina (*Gmelina arborea*) en horno de estañones (Fotografía 4), y con madera de guayaba (*Psidium cattleianum*) en horno de fosa (Soto et al., 2012). Este biocarbón de guayaba fue utilizado por CORBANA para sus investigaciones en micorrizas y nemátodos (Salas & Araya, 2009). El análisis de nutrientes del biocarbón de melina fue realizado por el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la UCR. En el cuadro 8 se resumen los hallazgos en términos de nutrientes de estos biocarbones.

**Cuadro 5. Contenido de nutrientes de diferentes tipos de biocarbón producidos a partir de diferentes materias primas y a diferentes temperaturas.**

Materia Prima	Temperatura (°C)	pH	CIC	C %	N %	P ppm	K ppm	Fuente
Corteza de Acacia magnum	260-360	7.4	-	39.8	10.4	-	-	Yamamoto et al., 2006
Cáscara de coco (Cocos nucifera)	500	-	-	69.0	9,4	-	-	Tsai et al., 2006
Residuos de maíz	350	-	-	67.5	9.3	10.4	-	Nguyen y Lehmann, 2009
Residuos de maíz	600	-	-	79.0	9.2	6.7	-	Nguyen y Lehmann, 2009
Pollinaza	450	-	-	38.0	20.0	25	22	Chan et al., 2007
Bagazo de Caña (Saccharum spp.)	500	-	-	71.0	17.7	-	-	Tsai et al., 2006
Eucalipto (Eucalyptus sp.)	450	10.3	-	-	-	2.1	2.1	Aker, 2014 Nicaragua
Neem (Azaradictina sp.)	450	10.3	-	-	-	1.7	2.2	Aker, 2014 Nicaragua
Tigüilote (Cordia dentata)	450	10.2	-	-	-	4.3	3	Aker, 2014 Nicaragua
Aguas residuales	400	7.76	29.9	-	-	-	-	Méndez et al., 2013
Aguas residuales	800	8.72	11.95	-	-	-	-	Méndez et al., 2013
Aguas residuales	300	5.32		25.2	3.23			Hossain et al., 2011
Rastrojo de piña	300	6.88	-	4	1.4	3.2	2.7	Chin-Pampillo et al., 2020
Rastrojo de piña	600	9.44	-	56.8	1.2	5.8	4.3	Chin-Pampillo et al., 2020
Pinzote de palma aceitera	300	7.07	-	61.2	1.2	3.8	2.5	Chin-Pampillo et al., 2020
Pinzote de palma aceitera	600	9.54	-	63.3	0.8	4.5	4.9	Chin-Pampillo et al., 2020
Pergamino de café	300		-	59.3	0.6	1.4	0.9	Chin-Pampillo et al., 2020

## 7. ¿Cómo evaluar la calidad del biocarbón?

Dado que las características del biocarbón varían según la materia prima y las condiciones y temperaturas del horno, es importante conocer sus características básicas, para asegurar su potencial como mejorador de suelos, y estandarizar características de calidad para su producción y comercialización.

Existen dos entidades que han desarrollado criterios o estándares de calidad: uno es la Iniciativa Internacional de Biocarbón (IBI, 2015), y el otro es el Sistema de Certificación Europeo (EBC, por European Biochar Certificate) (Schmidt et al., 2016). Este último fomenta la certificación del sistema de producción de biocarbón para garantizar las condiciones óptimas de producción y la calidad final del producto.

Muchos países no cuentan con la capacidad de realizar todos los análisis químicos que se requieren para dar una caracterización completa del biocarbón. El Sistema Europeo de Certificación, consciente de esta situación, considera que dada la dificultad de acceder a algunos de estos análisis, lo que un sistema de certificación debe solicitar es que se cumpla con los requisitos ambientales y que se permita su uso en agricultura. Como requisitos ambientales se

mencionan: una fuente de biomasa sostenible, y que los gases que se produzcan sean atrapados y quemados en el proceso, de tal forma que no se produzca contaminación al ambiente (Schmidt et al. 2016).

A continuación, se presentan los análisis que se pueden realizar al biocarbón para caracterizarlo.

### 7.1 Análisis próximo

Esta es una caracterización básica y sencilla, que se puede hacer casi en cualquier laboratorio.

**Cuadro 6. Ejemplo de un análisis próximo, a biocarbón de bambú y madera en horno de estaño, realizado en el ITCR.**

Biocarbón	% humedad	% Material volátil	% Carbón fijado	% Ceniza
Bambú	9.06	44.07	22.23	24.33
Madera (residuos de madera de construcción)	6.87	44.60	39.00	9.63

Fuente: Segura, 2018

Se requiere una balanza, una estufa y una mufla. A través de esta metodología se determina el contenido de humedad, carbono y cenizas del biocarbón (cuadro 6). Si bien no da para clasificar un material como biocarbón directamente, por lo menos permite discernir su calidad, entre varios carbones, en términos de contenido de carbono (fijo o lábil).

### 7.1.1 Contenido de humedad

El contenido de humedad es la cantidad de agua retenida en el biocarbón. Se determina mediante un método gravimétrico, es decir, se mide una masa determinada de la muestra en un crisol, se calienta a 105 °C durante 18 horas, se enfría y se vuelve a medir su masa. La diferencia entre la masa inicial y la masa seca corresponde al agua que se perdió por evaporación durante el secado.

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{masa inicial} - \text{masa seca a } 105^{\circ}\text{C}}{\text{masa inicial}} \times 100$$

### 7.1.2 Materia volátil

Es la cantidad de materia que se pierde por el calentamiento en condiciones anóxicas (sin oxígeno), y corresponde a la fracción de carbono lábil presente en el biocarbón. Se determina también mediante un método gravimétrico, utilizando la muestra seca, obtenida de la determinación de humedad.

La muestra seca se tapa (con una tapa de crisol) y se calienta a 950 °C durante 10 minutos. Una vez que se ha enfriado, se pesa y se calcula la masa que se ha perdido con respecto a la muestra seca. La diferencia corresponde a la materia volátil.

$$\% \text{ materia volátil} = \frac{\text{masa seca a } 105^{\circ}\text{C} - \text{masa desvolatilizada a } 950^{\circ}\text{C}}{\text{masa seca a } 105^{\circ}\text{C}} \times 100$$

### 7.1.3 Contenido de cenizas

Corresponde a la fracción inorgánica contenida en el biocarbón. Se determina sometiendo a un calentamiento de 750 °C la muestra desvolatilizada durante seis horas, lo cual provoca la combustión de la fracción orgánica. Una vez fría la muestra, se pesa y se calcula la diferencia de masa con respecto a la muestra desvolatilizada.

$$\% \text{ contenido de cenizas} = \frac{\text{masa desvolatilizada a } 950^{\circ}\text{C} - \text{masa combustionada a } 750^{\circ}\text{C}}{\text{masa seca a } 105^{\circ}\text{C}} \times 100$$

## 7.2 Carbono fijo

Es la fracción del biocarbón que corresponde al carbono fijo o recalcitrante. Se determina al calcular la diferencia de masa entre la muestra seca, menos la materia volátil y el contenido de cenizas.

$$\% \text{ Carbono fijo} = \frac{\text{masa seca a } 105^{\circ}\text{C} - \text{masa desvolatilizada a } 950^{\circ}\text{C} - \text{masa combustionada a } 750^{\circ}\text{C}}{\text{masa seca a } 105^{\circ}\text{C}} \times 100$$

### 7.3 pH, conductividad eléctrica (CE) y potencial encalante

Estas variables aportan información relativa al grado de acidez o alcalinidad, a la salinidad o contenido de sales y al poder encalante del biocarbón (cuadro 7). Tanto el pH como la CE se determinan instrumentalmente en un extracto acuoso hecho con el biocarbón, mientras que el potencial encalante se determina mediante una valoración ácido-base.

Cuadro 7. Valor de pH en agua en el biocarbón de bambú y madera, la conductividad y el efecto encalado a partir de los equivalentes de CaCO<sub>3</sub>.

Biocarbón	pH H <sub>2</sub> O (2:20)	Conductividad (mS/cm)	Capacidad encalante eq. CaCO <sub>3</sub> (%)
Bambú	9.3	2512	72.5
Residuos de madera de construcción	9.25	1036.67	75.03

Fuente: Segura, 2018.

#### Determinación de pH

Se debe medir la masa de la muestra (es recomendable 5 g) en un tubo de centrifuga, agregar 50 ml de agua des-ionizada y agitar mecánicamente durante 1 hora. Posteriormente, se deja reposar durante 30 minutos y se mide el pH con

un medidor de pH debidamente calibrado. Al momento de reportar el valor es importante indicar la proporción biocarbón: agua que se utilizó.

#### Determinación de conductividad eléctrica

Para hacer el extracto acuoso se debe seguir el mismo procedimiento que para el pH. Una vez que ha reposado la muestra, se debe filtrar y medir la conductividad eléctrica con un conductímetro debidamente calibrado. Al momento de reportar el valor es importante indicar la proporción biocarbón: agua que se utilizó.

#### Determinación del poder encalante

Se debe medir una masa de muestra (es recomendable 0,5 g) y colocarla en un tubo de centrífuga; luego añadir una alícuota de 10,0 ml de una disolución estandarizada de HCl 1 mol/L; agitar durante dos horas y, posteriormente, dejar reposar durante una noche (aproximadamente 16 horas).

Posteriormente, se debe valorar la muestra en el mismo tubo con una disolución estandarizada de NaOH 0,5 mol/L con fenolftaleína como indicador hasta alcanzar el viraje de color. Se debe realizar el mismo procedimiento, pero utilizando una muestra blanco, en la que no se utiliza el biocarbón. El resultado se expresa como el porcentaje de equivalentes de carbonato de calcio (%ECC) y, mediante una transformación matemática, puede obtenerse el contenido de carbono inorgánico.

$$\% ECC = \frac{\text{Conc de NaOH en } \frac{\text{mol}}{\text{L}} \times (\text{Vol en mL de NaOH de la muestra} - \text{Vol en mL de NaOH en el blanco}) \times 100,09 \times 100}{1000 \times 2 \times \text{masa muestra}}$$

$$C_{\text{inorgánico}} = \frac{\%ECC \times 12,01}{100 \times 100,09}$$

## 7.4 Análisis elemental C, H, O, N y relaciones Hidrógeno / Carbono y C/N

Este análisis es el segundo nivel de caracterización. Resulta fundamental clasificarlo como biocarbón de acuerdo con la IBI, sin embargo, resulta más costoso y no todos los laboratorios cuentan con el equipo.

Actualmente, en el país no se determina el contenido de hidrógeno, lo que es fundamental para calcular el H/C y el contenido de oxígeno, que se hace por diferencia ( $O = 100 - C - H - N$ ).

El análisis del contenido de Carbono (C) y Nitrógeno (N) se puede realizar en un laboratorio de suelos, utilizando un autoanализador elemental. En Costa Rica, múltiples laboratorios pueden realizar estos análisis.

El contenido de Oxígeno (O) usualmente se determina de manera indirecta. La composición elemental de la materia orgánica consta solamente de C, H, N y O, por lo que se estima como la diferencia luego de restar los contenidos de C, H y N.

$$\begin{aligned} \text{relación atómica } \frac{H}{C} &= \frac{\frac{\%H}{1,0}}{\frac{\%C}{12,01}} \\ \text{relación atómica } \frac{O}{C} &= \frac{\frac{\%O}{16,0}}{\frac{\%C}{12,01}} \end{aligned}$$

Tradicionalmente, la industria del carbón lo ha caracterizado por las relaciones atómicas Hidrógeno/Carbono y Oxígeno/Carbono (ver Ecuación 7 y 8). En el caso del biocarbón, el IBI (2012) propone que las relaciones atómicas se calculen utilizando el contenido de carbono orgánico ( $C_{org}$ ), y no el carbono total, ya que este último valor podría sobreestimar el contenido de carbono del biocarbón, pues incluye el carbono inorgánico.

Las "Guías para la Caracterización de Biocarbón" de la Unión Europea consideran la relación  $H/C_{org}$ , uno de los indicadores más importantes del biocarbón (Schmidt et al., 2016). Valores mayores a 0.7 muestran deficiencia en el proceso de pirólisis (Schimmelpfennig & Glaser, 2012), afectando la estabilidad del producto. Se han hecho esfuerzos por medir la estabilidad del biocarbón, que variará con condiciones climáticas, manejo y el tipo de suelo, pero se espera que valores de  $H/C_{org}$  menores a 0.7 garanticen una estabilidad de más del 50 % del carbón presente por al menos 100 años (Camps-Arbestain et al., 2015).

$$C_{org} = C - C_{inorgánico}$$

La relación  $O/C_{org}$  también sirve para determinar el grado de carbonización. El  $O/C_{org}$  permite tener una idea sobre la presencia de grupos funcionales oxigenados en la superficie del biocarbón, y esto podría relacionarse con la CIC. La determinación de oxígeno en el biocarbón es costosa y no necesariamente estandarizada, por lo que no es un indicador indispensable (Schmidt et al., 2016).

La relación C/N, que se utiliza normalmente para determinar qué tan lábil es un material para la actividad microbiana, por ejemplo, en un compost, no se debe utilizar de la misma forma con el biocarbón, dado que el carbón presente en este último no todo es lábil. En un alto porcentaje, el carbono presente en el biocarbón no puede ser degradado por los microorganismos.

## 7.5 Compuestos orgánicos volátiles (COV)

Durante el proceso de pirólisis se volatilizan compuestos orgánicos constituyentes de la biomasa que está siendo pirolizada. Estos gases se condensan en las paredes del biocarbón y son parte importante de sus características (Schmidt et al., 2016).

## 7.6 Área superficial específica o capacidad de intercambio catiónico

El área superficial específica es una medida de la porosidad del biocarbón (poros mayores o igual a 2 nm), que tendrá implicaciones en su capacidad de intercambio catiónico, la capacidad de retención de agua y como hospedero de microorganismos (Schimmelpfennig & Glaser, 2012); además de la adsorción de contaminantes. Estos microporos en la superficie del biocarbón pueden ser creados por la pérdida de elementos volátiles como el CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y CO durante el proceso de pirólisis (Schimmelpfennig & Glaser, 2012).

## 7.7 Contenido de nutrientes

El Laboratorio de Suelos del CIA-UCR determina el contenido de nutrientes en el biocarbón (cuadro 8), utilizando los siguientes métodos:

- Nitrógeno por combustión seca en el Autoanalizador.
- P, Ca, Mg, K, S, Na, Fe, Cu, Zn, Mn, B y Al por digestión húmeda con HNO<sub>3</sub> y determinación por Espectrofotometría de Emisión Atómica con Plasma.

**Cuadro 8. Resultado de análisis químico de nutrientes de diferentes tipos de biocarbón producido en Costa Rica, realizados en el Laboratorio de Suelos del CIA – UCR.**

Materia Prima / horno	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
Melina/Hornito	0.35	0.03	1.10	0.13	0.74	0.02	2596	4	38	31	16
Bagazo de caña/Ingenio	0.20	0.57	0.57	0.30	0.75	0.06	28923	69	115	1294	56
Guayaba/Carbonera tradicional de suelo	0.59	0.07	1.36	1.36	0.43	0.06	13295	25	64	206	29

Fuente: Proyecto Biocarbón del CATIE, 2008.

Es importante tener en cuenta que es posible que estos nutrientes no se encuentren disponibles para los cultivos en el corto plazo.

## 7.8 Fitotoxicidad y ecotoxicidad

Durante el proceso de pirólisis se da una condensación de compuestos orgánicos volátiles e hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP) (Fabbri et al., 2013) que quedan adheridos al biocarbón; por ejemplo, ácidos acético, butírico y fórmico, algunos fenoles, metanol, entre otros. Estas sustancias, en cantidades altas, pueden resultar fitotóxicas (Buss et al., 2015). Una posibilidad es determinar el contenido de estas sustancias y compararla con el contenido del suelo donde se pueden haber acumulado por diversas razones (cercanía a zonas urbanas, otras quemadas, etc.) (Schimmelpfennig & Glaser, 2012). También es recomendable determinar si el biocarbón puede ser fitotóxico.

## 7.9 Prueba de germinación para determinar fitotoxicidad

Es un ensayo de germinación común, donde en un plato Petri se colocan semillas de lechuga (*Lactuca sativa*) o rábano (*Raphanus sp.*), en el cual se ha mezclado previamente suelo y biocarbón.

Se recomienda, si es posible, utilizar el suelo donde se va a aplicar el biocarbón, pero si no está disponible, se puede utilizar otro suelo. Igualmente, es importante utilizar la dosis de biocarbón que se va a utilizar en campo. Se mezcla el biocarbón con el suelo, se colocan unas 20 semillas por plato, se mantiene húmedo y se mide la germinación y elongación de la radícula (Major, 2009).

Otro método evaluado por Solaiman et al. (2012) fue colocar en los platos únicamente biocarbón y semillas de trigo a germinar. Este

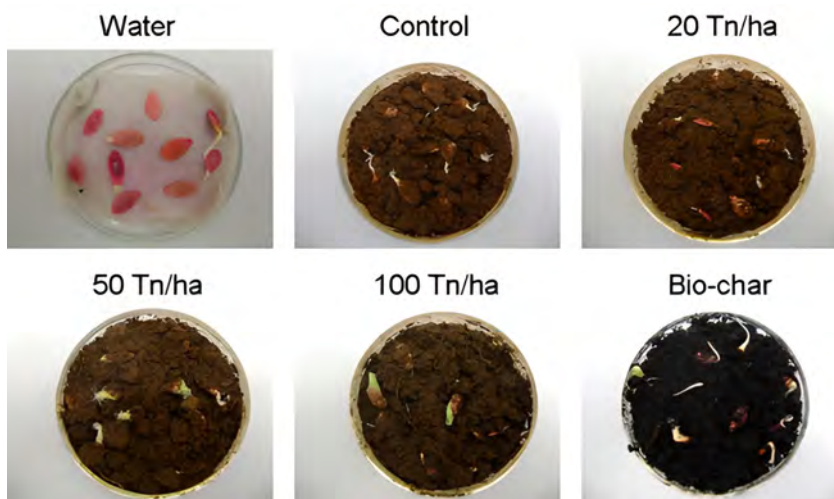


método puede ser útil para productores y comercializadores de biocarbón, cuando no se conoce el suelo en el cual se va a utilizar. En general, las mayores toxicidades fueron encontradas a dosis de 100 t/ha, y se observó que a dicha dosis es tóxico, tanto el biocarbón solo, como al mezclarse con el suelo.

No obstante, estos resultados dependen del tipo de biocarbón. En un ensayo realizado en CATIE con semillas de ayote (fotografía 10) con biocarbón de melina, se observó que solo el tratamiento con agua presentó porcentaje de germinación por debajo del 85 % (53.5 %); y el tratamiento con solamente biocarbón presentó un porcentaje de germinación del 87 % (cuadro 9).

**Cuadro 9. Porcentaje de germinación de semillas de ayote en un ensayo realizado en CATIE para evaluar la fitotoxicidad de un biocarbón de madera residual de melina (n=3).**

Tratamiento	Rep. 1	Rep. 2	Rep. 3	Promedio	Error	% de Germinación Promedio
Solo agua	4	6	6	5.33	0.67	53.33
Control	10	9	10	9.67	0.33	96.67
20 t/ha	10	10	8	9.33	0.67	93.33
50 t/ha	10	9	9	9.33	0.33	93.33
100 t/ha	10	10	9	9.67	0.33	96.67
Solo biocarbón	9	9	8	8.67	0.33	86.67



Fotografía 10. Prueba de germinación con diferentes dosis de biocarbón con semillas de ayote realizado en CATIE.

Fuente: M. Baughman.

## 7.10 Ecotoxicidad

Major (2009), también recomienda una prueba de evitación o "test de fuga" con lombrices en una caja o en un medio estañón, en cualquier contenedor que permita el movimiento de las lombrices, en el cual en una caja, de un lado se coloca el suelo mezclado con el biocarbón, y del otro, suelo sin biocarbón.

El suelo está separado al centro por un cartón que se retira cuidadosamente y, en ese espacio, se coloca una población conocida de lombrices. Luego de 48 horas se determina la cantidad de lombrices que va en una u otra dirección. La cantidad debe ser similar.

Es importante que la humedad del suelo con biocarbón y el suelo sin biocarbón sea similar, ya que las lombrices son muy sensibles a la humedad del suelo.

**Es importante recordar** que el polvo fino de carbón puede ser tóxico. De ser respirado se puede almacenar en los pulmones, y disminuir la capacidad pulmonar. Se debe trabajar el biocarbón con cierto grado de humedad para que se produzca la menor cantidad posible de polvo dispersable.

## 8. Dosis y formas de aplicación

### 8.1 Molienda de biocarbón y tamaño de partícula

Luego de la preparación del biocarbón, este debe ser molido para su aplicación en el campo. El grado de molienda va a depender del equipo con que se cuente.

Es importante recordar que el polvo fino de carbón puede ser tóxico. De ser respirado se puede almacenar en los pulmones, y disminuir la capacidad pulmonar. Se debe trabajar el biocarbón con cierto grado de humedad para que se produzca la menor cantidad posible de polvo dispersable. Algunos productores lo muelen dentro del saco (fotografía 11), y utilizan mascarilla a la hora de la molienda y aplicación (fotografía 12).

Humedecer el biocarbón antes de aplicarlo también es importante para reducir su hidrofobicidad, y aumentar su capacidad de retención de agua en el suelo (Kinney et al., 2012).

Una percepción generalizada es que entre más fina la partícula, mayor será el contacto con el suelo, pero esto puede variar según el tipo de suelo (Hardie et al., 2014) Por ejemplo, suelos arenosos pueden beneficiarse por partículas más grandes.

Liu et al., (2017) observaron que partículas muy pequeñas ( $\leq 0.8$  mm) no fueron tan efectivas para retener agua en suelos arenosos, en condiciones más secas. Los mejores resultados se obtuvieron con partículas entre 0.8 a 2 mm, pero no evaluaron partículas de mayor tamaño.

Por tanto, se requiere más investigación considerando el tipo de biocarbón y el tipo de suelo.

## 8.2 Dosis

Numerosos estudios han evaluado la dosis de biocarbón aplicada al suelo, en rangos que van de 5 a 50 o hasta 100 t/ha (Major, 2010b). En general, a corto plazo, se han observado

diferencias significativas con dosis mayores a 10 toneladas por hectárea. Es importante tener claro que el biocarbón en sí no es un fertilizante, por lo que siempre debe acompañarse con una fuente de nitrógeno.

Evaluaciones en invernadero han mostrado que dosis mayores de 100 toneladas por hectárea pueden afectar desde la germinación hasta el desarrollo de los cultivos (Major, 2009).



**Fotografía 11.** Molienda manual del biocarbón en Honduras, con el biocarbón dentro del saco (izquierda); y molienda de biocarbón con un molino de compost, en Oregon (Major, 2010a).

Fuente: J. Major; D. Dalegowski.



**Fotografía 12.** Aplicación de biocarbón en forma experimental, para ser mezclada con la rastra o arado.

Fuente: Major, 2010.

### 8.3 Almacenamiento y **transporte**

La literatura reporta que el biocarbón puede ser inflamable en presencia de oxígeno. Por tanto, lo recomendable es almacenarlo en ausencia de oxígeno (Major, 2010b) , y tomar medidas para evitar riesgos de ignición.

### 8.4 Formas de **aplicación**

#### 8.4.1 Antes de la siembra

En cultivos anuales es posible aplicar una capa de biocarbón, según la dosis especificada, y luego mezclarlo con el tractor (Major, 2010b) (fotografía 12). En plantaciones permanentes se puede aplicar al fondo del surco a la siembra. En plantaciones establecidas se puede aplicar en mezcla con la capa superficial del suelo.



#### 8.4.2 A la siembra

A la siembra se coloca al fondo del surco o punto de siembra. En caso de palma aceitera, en los experimentos realizados por CATIE en la zona de San Juan Sierpe de Osa, Costa Rica, adicionalmente se agregó el biocarbón alrededor de la plántula de palma (fotografía 13); debido a que la dosis de 10 t/ha, solo en los puntos de siembra, resultaba en una capa muy gruesa de biocarbón al fondo del hueco. Por eso se optó por aplicar al fondo y a los lados, para lograr una mejor mezcla con el suelo.



Fotografía 13. Aplicación de biocarbón al fondo del hueco en la siembra de palma aceitera, en San Juan Sierpe, Osa, Costa Rica. Se aplicó al fondo, y luego se hizo una aplicación a los lados.

Fuente: G. Soto y T. Benjamin.



Fotografía 14. Metodología de aplicación de biocarbón en plantaciones establecidas de cacao en la zona de Talamanca, Costa Rica. Obsérvese el uso de la máscara protectora cuando se está aplicando el biocarbón.

Fuente: Hoja, 2009.

#### 8.4.3 En plantación establecida

De la Hoya (2007) y Acosta (2008) evaluaron el efecto del biocarbón en la producción establecida de cacao, agregando el biocarbón alrededor de las plantas de cacao. Para esto se removió el mantillo y se agregó el biocarbón en el área de la copa, para luego incorporarlo al suelo con la rastra, lo que luego permitió restituir la cobertura de hojarasca (Fotografía 14).

En palma aceitera se agregó en plantaciones de un año de crecimiento, haciendo un círculo alrededor de la planta (Fotografía 15), con una

profundidad de 15 cm, para luego ser cubierta con suelo. En zonas de alta pendiente y precipitación, el biocarbón se lava fácilmente, por lo que es mejor enterrarlo.

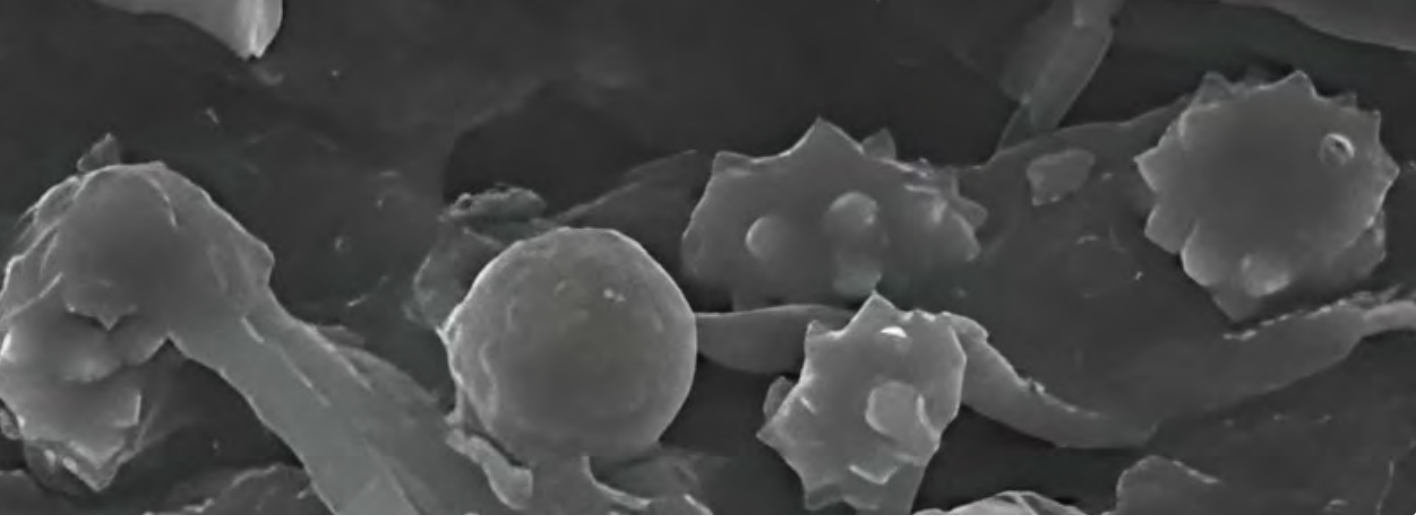
#### 8.4.4 En cama hidropónica

Es común utilizar carbón en camas para hidroponía en producción de hortalizas, fresas, lechugas, entre otros. En este caso, el biocarbón se utiliza como sustrato y se aplican fuentes de nutrientes en forma líquida, que pueden ser de origen sintético o natural (por ejemplo, humus de lombriz, sales de potasio y magnesio).



Fotografía 15. Aplicación de biocarbón alrededor de una planta de un año de palma aceitera, en la zona de San Juan Sierpe, Osa, Puntarenas.

Fuente: G. Soto.



# Conclusiones

El biocarbón es un legado que nos dejaron los ancestros para resolver, junto con muchas otras prácticas, el impacto que nuestras actividades tienen sobre el clima y el suelo. La agricultura regenerativa, que busca devolver los suelos mejor de cómo los encontramos y que promueve la agricultura del carbono en el suelo, encuentra en la producción y uso de biocarbón un aliado de miles de años.

Tiene un gran potencial como estrategia de manejo de desechos, porque permite trabajar grandes volúmenes de una alta variedad de tipos de biomasa, con una transformación de relativamente bajo costo, y generando un producto final de alta calidad.

Todavía existen muchas áreas de investigación que se deben seguir trabajando. Por ejemplo, mejorar el diseño de los hornos, para mejorar la eficiencia y disminuir lo más posible cualquier fuga de gases, el cual debe ser quemado en el proceso. Debemos analizar la rentabilidad, que variará según el tipo de materia prima, los volúmenes de producción, las fuentes energéticas, y la escala a la que se trabajará.

Como mejorador de suelos, cada vez aprendemos más de sus impactos positivos en el funcionamiento de la biología, la química y la física de suelos. Con la investigación, se van poco afinando las dosis, las fuentes, y los tipos de suelos donde hay más o menor respuesta. Por ejemplo, el efecto en la regulación de la acidez es más efectiva en Ultisoles y Oxisoles, pero no se ha observado efecto en andisoles. Su efecto en retención de agua y nutrientes es más evidente en suelos arenosos.

Diversas instituciones nacionales han realizado investigaciones, y cada vez más se logran alianzas para continuar con el trabajo.

Con este Manual, el CICA-UCR ofrece una recopilación de información con el objetivo de que los técnicos nacionales se empoderen de esta tecnología, y entre todos/as podamos lograr el cambio que se requiere.

El biocarbón, producido a partir de la biomasa de la industria nacional, tiene un gran potencial en la Estrategia de Descarbonización que Costa Rica promueve para el año 2050. Además, es un insumo importante que los extensionistas y profesionales agrícolas pueden conocer y manejar, por el bien del país y la humanidad.

# Referencias

- Aker, C. (2014). Evaluación del uso de estufas ecológicas, análisis de la producción y uso del biocarbón como enmienda del suelo en los rendimientos de maíz (*Zea mays*) en tres municipios de León, Nicaragua. CATIE, Costa Rica.
- Avilés, L. (2014). Evaluación participativa del Proyecto Estufa Finca en familias Bribri de Talamanca, Costa Rica. CATIE.
- Baillie, I. (2009). Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision - by Woods, W.I., Teixeira, W.G., Lehmann, J., Steiner, C., WinklerPrins, A.M.G.A. & Rebellato, L. (editors). *European Journal of Soil Science*, 60(6), 1126–1127. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01179.x>
- Beesley, L., Moreno-Jiménez, E., Gomez-Eyles, J. L., Harris, E., Robinson, B., & Sizmur, T. (2011). A review of biochars' potential role in the remediation, revegetation and restoration of contaminated soils. *Environmental Pollution*, 159(12), 3269–3282. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.07.023>
- Benjamin, T., Soto, G., Major, J., Lerner, R., Covell, P., Garro, F., Muñoz, M., Muñoz, L., Solorzano, A., & Joseph, S. (2012). The effectiveness of using biochar for palm oil establishment in different soil types in Costa Rica.
- Benjamin, T., Soto, G., Major, J., Lerner, R., Covell, P., Muñoz, M., Muñoz, L., & Solórzano, A. (2012). The effectiveness of using biochar for palm oil establishment in different soil types in Costa Rica. 4th International Congress EuroSoil.
- Blanco-Canqui, H. (2017). Biochar and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 81(4), 687–711. <https://doi.org/10.2136/sssaj2017.01.0017>
- Brown, R., del Campo, B., Boateng, A. A., Garcia-Perez, M., & Mašek, O. (2015). Fundamentals of biochar production. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203762264>
- Burrell, L. D., Zehetner, F., Rampazzo, N., Wimmer, B., & Soja, G. (2016). Long-term effects of biochar on soil physical properties. *Geoderma*, 282, 96–102. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.07.019>
- Buss, W., Mašek, O., Graham, M., & Wüst, D. (2015). Inherent organic compounds in biochar—Their content, composition and potential toxic effects. *Journal of Environmental Management*, 156, 150–157. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2015.03.035>
- Camps-Arbestain, M., Amonette, J. E., Balwant, S., Wang, T., & Smith, H. P. (2015). A biochar classification system and associated test methods. In J. Lehmann & S. Joseph (Eds.), *Biochar for Environmental Management* (p. 30). earthscan Routledge.
- Chin-Pampillo, J. S., Perez-Villanueva, M., Masis-Mora, M., Mora-Dittel, T., Carazo-Rojas, E., Alcañiz, J. M., Chinchilla-Soto, C., & Domene, X. (2021). Amendments with pyrolyzed agrowastes change bromacil and diuron's sorption and persistence in a tropical soil without modifying their environmental risk. *Science of The Total Environment*, 772, 10. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145515>
- Cunha, T. J. F., Madari, B. E., Canellas, L. P., Ribeiro, L. P., Benites, V. D. M., & Santos, G. D. A. (2009). Soil organic matter and fertility of anthropogenic dark earths (Terra Preta de Índio) in the Brazilian Amazon basin. *Revista Brasileira de Ciência Do Solo*, 33(1), 85–93. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100009>
- Dai, M., Hamel, C., Bainard, L. D., Arnaud, M. St., Grant, C. A., Lupwayi, N. Z., Malhi, S. S., & Lemke, R. (2014). Negative and positive contributions of arbuscular mycorrhizal fungal taxa to wheat production and nutrient

- uptake efficiency in organic and conventional systems in the Canadian prairie. *Soil Biology and Biochemistry*, 74, 156–166. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.03.016>
- Dai, Z., Wang, Y., Muhammad, N., Yu, X., Xiao, K., Meng, J., Liu, X., Xu, J., & Brookes, P. C. (2014). The Effects and Mechanisms of Soil Acidity Changes, following Incorporation of Biochars in Three Soils Differing in Initial pH. *Soil Science Society of America Journal*, 78(5), 1606–1614. <https://doi.org/10.2136/sssaj2013.08.0340>
- Deal, C., Brewer, C. E., Brown, R. C., Okure, M. A. E., & Amoding, A. (2012). Comparison of kiln-derived and gasifier-derived biochars as soil amendments in the humid tropics. *Biomass and Bioenergy*, 37, 161–168. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.12.017>
- European Academies Science Advisory Council (EASAC). (2018). Negative emission technologies: What role in meeting Paris Agreement targets? In EASAC Policy Report (Issue 35).
- Fabbri, D., Rombolà, A. G., Torri, C., & Spokas, K. A. (2013). Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in biochar and biochar amended soil. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 103, 60–67. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2012.10.003>
- Glaser, B., & Birk, J. J. (2012). State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (terra preta de Índio). *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 82, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.11.029>
- Glaser, B., Haumaier, L., Guggenberger, G., & Zech, W. (2001). The “Terra Preta” phenomenon: A model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften*, 88(1), 37–41. <https://doi.org/10.1007/s001140000193>
- Grains Research and Development Corporation [GRDC]. (2013). Biochar Fact Sheet. [https://grdc.com.au/\\_\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0026/83915/biochar-fact-sheet.pdf.pdf](https://grdc.com.au/___data/assets/pdf_file/0026/83915/biochar-fact-sheet.pdf.pdf)
- Grossman, J. M., O'Neill, B. E., Tsai, S. M., Liang, B., Neves, E., Lehmann, J., & Thies, J. E. (2010). Amazonian Anthrosols Support Similar Microbial Communities that Differ Distinctly from Those Extant in Adjacent, Unmodified Soils of the Same Mineralogy. *Microbial Ecology*, 60(1), 192–205. <https://doi.org/10.1007/s00248-010-9689-3>
- Hagemann, N., Joseph, S., Schmidt, H.-P., Kammann, C. I., Harter, J., Borch, T., Young, R. B., Varga, K., Taherymoosavi, S., Elliott, K. W., McKenna, A., Albu, M., Mayrhofer, C., Obst, M., Conte, P., Dieguez-Alonso, A., Orsetti, S., Subdiaga, E., Behrens, S., & Kappler, A. (2017). Organic coating on biochar explains its nutrient retention and stimulation of soil fertility. *Nature Communications*, 8(1), 1089. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01123-0>
- Hardie, M., Clothier, B., Bound, S., Oliver, G., & Close, D. (2014). Does biochar influence soil physical properties and soil water availability? *Plant and Soil*, 376(1–2), 347–361. <https://doi.org/10.1007/s11104-013-1980-x>
- Hilbert, P. P. (1968). Archäologische Untersuchungen am mittleren Amazonas Beiträge zur Vorgeschichte des südamerikanischen Tieflandes. Mit 164 Abbildungen und 11 Karten (vom Verfasser). Reimer.
- Hojah Da Silva, J. (2013). Impacto del uso de biocarbón sobre la calidad de suelos y producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en sistemas agroforestales, Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza.
- Hossain, M. K., Strezov Vladimir, V., Chan, K. Y., Ziolkowski, A., & Nelson, P. F. (2011). Influence of pyrolysis temperature on production and nutrient properties of wastewater sludge biochar. *Journal of Environmental Management*, 92(1), 223–228. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.008>
- International Biochar Initiative [IBI]. (2015). Standardized Product Definition and Product Testing Guidelines for Biochar That Is Used in



- Soil. [https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI\\_Biochar\\_Standards\\_V2.1\\_Final.pdf](https://www.biochar-international.org/wp-content/uploads/2018/04/IBI_Biochar_Standards_V2.1_Final.pdf)
- J. W. Gaskin, C. Steiner, K. Harris, K. C. Das, & B. Bibens. (2008). Effect of Low-Temperature Pyrolysis Conditions on Biochar for Agricultural Use. *Transactions of the ASABE*, 51(6), 2061–2069. <https://doi.org/10.13031/2013.25409>
- Jeffery, S., Verheijen, F. G. A., van der Velde, M., & Bastos, A. C. (2011). A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 144(1), 175–187. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.08.015>
- Kammann, C., Ratering, S., Eckhard, C., & Müller, C. (2012). Biochar and Hydrochar Effects on Greenhouse Gas (Carbon Dioxide, Nitrous Oxide, and Methane) Fluxes from Soils. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 1052–1066. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0132>
- Katzer, F. (1903). *Grundzüge der geologie des unteren Amazonasgebietes: (des staates Pará in Brasilien)*. M. Weg.
- Kim, J.-S., Sparovek, G., Longo, R. M., De Melo, W. J., & Crowley, D. (2007). Bacterial diversity of terra preta and pristine forest soil from the Western Amazon. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(2), 684–690. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.08.010>
- Kinney, T. J., Masiello, C. A., Dugan, B., Hockaday, W. C., Dean, M. R., Zygourakis, K., & Barnes, R. T. (2012). Hydrologic properties of biochars produced at different temperatures. *Biomass and Bioenergy*, 41, 34–43. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.01.033>
- Kong, S., Loh, S., Bachmann, R. T., Rahim, S. A., & Salimon, J. (2014). Biochar from oil palm biomass: A review of its potential and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 39, 729–739. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.107>
- Kumar, S., Avasthe, R. K., Singh, R., & Babu, S. (2014). Biochar as carbon negative in carbon credit under changing climate. *Current Science*, 107(7), 1090–1091.
- Laird, D., Fleming, P., Wang, B., Horton, R., & Karlen, D. (2010). Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma*, 158(3–4), 436–442. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.05.012>
- Lehmann, J., Pereira da Silva, J., Steiner, C., Nehls, T., Zech, W., & 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 and Soil*, 249(2), 343–357. <https://doi.org/10.1023/A:1022833116184>
- Lehmann, J., & Rondon, M. (2006). Bio-Char Soil Management on Highly Weathered Soils in the Humid Tropics. In *Biological approaches to sustainable soil systems* (pp. 517–529). <https://doi.org/10.1201/9781420017113.ch36>
- Liang, B., Lehmann, J., Solomon, D., Kinyangi, J., Grossman, J., O'Neill, B., Skjemstad, J. O., Thies, J., Luizão, F. J., Petersen, J., & Neves, E. G. (2006). Black Carbon Increases Cation Exchange Capacity in Soils. *Soil Science Society of America Journal*, 70(5), 1719–1730. <https://doi.org/10.2136/sssaj2005.0383>
- Liu, Z., Dugan, B., Masiello, C. A., & Gonnermann, H. M. (2017). Biochar particle size, shape, and porosity act together to influence soil water properties. *PLOS ONE*, 12(6), 1–19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179079>
- Macías, F., & Camps, M. (2010). Soil carbon sequestration in a changing global environment. *Soil Carbon Sequestration in a Changing Global Environment*, 15(6), 511–529. <https://doi.org/10.1007/s11027-010-9231-4>
- Major, J. (2009). *A Guide to Conducting Biochar Trials*. In *The International Biochar Initiative*.
- Major, J. (2010a). *Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems*.

- Major, J. (2010b). Guidelines on Practical Aspects of Biochar Application to Field Soil in Various Soil Management Systems.
- Major, J., Rondon, M., Molina, D., Riha, S. J., & Lehmann, J. (2010). Maize yield and nutrition during 4 years after biochar application to a Colombian savanna Oxisol. *Plant and Soil*, 333(1–2), 117–128. <https://doi.org/10.1007/s11104-010-0327-0>
- Méndez, A., Terradillos, M., & Gascó, G. (2013a). Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.03.006>
- Méndez, A., Terradillos, M., & Gascó, G. (2013b). Physicochemical and agronomic properties of biochar from sewage sludge pyrolysed at different temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2013.03.006>
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2019). Plan de Nacional de Descarbonización 2018-2050. <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PLAN-NACIONAL-DESCARBONIZACION.pdf?x59939>
- Minx, J. C., Lamb, W. F., Callaghan, M. W., Bornmann, L., & Fuss, S. (2017). Fast growing research on negative emissions. *Environmental Research Letters*, 12(3), 1–10. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa5ee5>
- Novak, J. M., Lima, I., Xing, B., Gaskin, J. W., Steiner, C., Das, K. C., Ahmedna, M., Rehrh, D., Watts, D. W., Busscher, W. J., & Schomberg, H. (2009). Characterization of designer biochar produced at different temperatures and their effects on a loamy sand. *Annals of Environmental Science*, 3, 195–206.
- Omondi, M. O., Xia, X., Nahayo, A., Liu, X., Korai, P. K., & Pan, G. (2016). Quantification of biochar effects on soil hydrological properties using meta-analysis of literature data. *Geoderma*, 274, 28–34. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.029>
- FAO. (1983). Métodos simples para fabricar carbón vegetal. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación [FAO].
- Pérez-Martínez, E. (2015). Evaluación de un carbonizador portátil de bajo costo en la valoración de residuos biomásicos lignocelulósicos. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Prober, S. M., Stol, J., Piper, M., Gupta, V. V. S. R., & Cunningham, S. A. (2014). Enhancing soil biophysical condition for climate-resilient restoration in mesic woodlands. *Ecological Engineering*, 71, 246–255. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2014.07.019>
- Quesada, J. (2014). Carbonización de biomasa para energía renovable, biocarbón en suelos y secuestro permanente de carbono. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Roberts, K. G., Gloy, B. a., Joseph, S., Scott, N. R., & Lehmann, J. (2010). Life cycle assessment of biochar systems: Estimating the energetic, economic and climate change potential. *Environmental Science and Technology*, 44(2), 827–833. <https://doi.org/10.1021/es902266r>
- Rodríguez, N., McLaughlin, M., & Pennock, D. (2019). La contaminación del suelo: una realidad oculta. In Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura (FAO).
- Rubio, J. (2014). Efecto del biocarbón de melina (Gmelina Arborea ROXB.) sobre el contenido de nutrimentos de compost y lombricompost a base de pulpa de café y su efecto en plantas de café y sorgo. Universidad Nacional de Costa Rica.
- Salas, E., & Araya, M. (2009). Efecto individual y combinado de biocarbón (biochar), comunidades de microorganismos nativos (CMN) y harina de rocas sobre el crecimiento de plantas in vitro de banano (Musa AAA cv. Grande Naine) y la población de *Radopholus similis*.
- Schimmelpfennig, S., & Glaser, B. (2012). One Step Forward toward Characterization:

- Some Important Material Properties to Distinguish Biochars. *Journal of Environmental Quality*, 41(4), 1001–1013. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0146>
- Schmidt, H. P., Bucheli, T., Kammann, C., Glaser, B., Abiven, S., & Leifeld, J. (2016). European Biochar Certificate - Guidelines for a sustainable production of Biochar. In European Biochar Foundation (EBC). <https://doi.org/doi.org/10.13140/RG.2.1.4658.7043>
- Scott, H., Ponsonby, D., & Atkinson, C. (2014). Biochar: an improver of nutrient and soil water availability - what is the evidence? *CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources*, 9, 1–19. <https://doi.org/10.1079/PAVSNNR20149019>
- Segura, D. (2018). Control de calidad de biocarbón para la producción de *Terra Preta*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Shaaban, A., Se, S. M., Dimin, M. F., Juoi, J. M., Mohd Husin, M. H., & Mitan, N. M. M. (2014). Influence of heating temperature and holding time on biochars derived from rubber wood sawdust via slow pyrolysis. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 107, 31–39. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2014.01.021>
- Smith, P. (2016). Soil carbon sequestration and biochar as negative emission technologies. *Global Change Biology*, 22(3), 1315–1324. <https://doi.org/10.1111/gcb.13178>
- Song, W., & Guo, M. (2012). Quality variations of poultry litter biochar generated at different pyrolysis temperatures. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 94, 138–145. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2011.11.018>
- Soto, G., Benjamin, T., Estrada, F., Pérez, R., de la Hoya, J., Henreaux, J., Rubio, J., Salas, E., & Tapia, A. (2012). Biocarbón en la agricultura en Costa Rica: resultados preliminares. Congreso Nacional de Suelos, Costa Rica.
- Stavi, I. (2012). The potential use of biochar in reclaiming degraded rangelands. *Journal of Environmental Planning and Management*, 55(5), 657–665. <https://doi.org/10.1080/09640568.2011.620333>
- Villagra-Mendoza, K., & Horn, R. (2018a). Effect of biochar on the unsaturated hydraulic conductivity of two amended soils. *International Agrophysics*, 32(3), 373–378. <https://doi.org/10.1515/intag-2017-0025>
- Villagra-Mendoza, K., & Horn, R. (2018b). Effect of biochar addition on hydraulic functions of two textural soils. *Geoderma*, 326, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.03.021>
- Wiedner, K., Schneeweiß, J., Dippold, M. A., & Glaser, B. (2015). Anthropogenic Dark Earth in Northern Germany — The Nordic Analogue to terra preta de Índio in Amazonia. *CATENA*, 132, 114–125. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.024>
- Woods, W. I., & McCann, J. M. (1999). The Anthropogenic Origin and Persistence of Amazonian Dark Earths. *Conference of Latin Americanist Geographers Yearbook*, 25, 7–14.
- Woods, W. I., Teixeira, W. G., Lehmann, J., Steiner, C., WinklerPrins, A., & Rebellato, L. (2009). Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision. In W. I. Woods, W. G. Teixeira, J. Lehmann, C. Steiner, A. WinklerPrins, & L. Rebellato (Eds.), *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9031-8>
- Zaman, C. Z., Pal, K., Yehye, W. A., Sagadevan, S., Shah, S. T., Adebisi, G. A., Marlina, E., Rafique, R. F., & Johan, R. Bin. (2017). Pyrolysis: A Sustainable Way to Generate Energy from Waste. In *Pyrolysis* (p. 35). InTech. <https://doi.org/10.5772/intechopen.69036>
- Zhu, L., Lei, H., Zhang, Y., Zhang, X., Bu, Q., Wei, Y., Wang, L., & Villota, E. (2018). A Review of Biochar Derived from Pyrolysis and Its Application in Biofuel Production. *SF Journal of Material and Chemical Engineering*, 1(1), 1007.



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

