



## TRAS LAS PRÁCTICAS ANCESTRALES PARA LA RECUPERACIÓN DE SUELOS AMAZÓNICOS

Clara Patricia Peña-Venegas<sup>1</sup>

### RESUMEN

Los suelos antrópicos amazónicos constituyen un tipo de suelo creado por antiguos pobladores de la Amazonia con mayor fertilidad que los suelos naturales. Estos suelos son actualmente una fuente de inspiración en la búsqueda de crear suelos más fértiles para la región. A la fecha, a partir del manejo de residuos orgánicos de origen vegetal y animal ha sido posible lograr en suelos de baja fertilidad condiciones de fertilidad similares a la de los suelos antrópicos, sin embargo aún se desconocen los procesos que pueden llegar a estabilizar los nutrientes en el suelo a través del tiempo, que es una característica particular lograda en los suelos antrópicos. Por otro lado, el mejorar la condición de fertilidad de los suelos no es la única alternativa para lograr sistemas de producción sostenibles en la Amazonia. La selección de cultivos nativos que no requieren suelos de alta fertilidad como la yuca, pueden ser una alternativa viable para la región. La aplicación de estas dos alternativas, el manejo de residuos orgánicos para mejorar la fertilidad de suelos degradados y la producción con base en cultivos adaptados a producir bien en suelos de baja fertilidad, puede constituir una alternativa real para un desarrollo sostenible de la región amazónica.

### Palabras clave

Terra Preta, Antrosoles, Fertilidad, Estabilidad de la materia orgánica.

### ABSTRACT

Amazonian dark earths are a kind of soil created by ancient Amazonian inhabitants, characterized by their increased fertility in comparison to non-anthropogenic soils. Amazonian Dark Earths are actually a source of inspiration to create more fertile soils for the Amazon region. Until now it is possible to increase the soil fertility of natural acid low-fertility soils using plant and animal organic waste. However, it is still unknown which are the processes to stabilize soil nutrients and prevent nutrient leaching through the time, which is a particular characteristic of anthropic soils. The improvement of soil fertility is not the only way to achieve sustainable production systems for the Amazon region. Selecting native crops that do not require soils with high fertility for their production such as manioc might be a feasible alternative for the region. These two alternatives, the management of organic matter waste to improve the fertility of degraded soils and the

<sup>1</sup> Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. Avenida Vásquez Cobo Calle 15 y 16. Leticia, Amazonas, Colombia. Tel: 57 98 5925480 cpena@sinchi.org.co

production based on crops adapted to growth well in soils with low fertility, might be real alternatives to achieve the sustainable development of the Amazon region.

## Keywords

Amazonian Dark Earths, Anthrosols, Soil fertility, Organic matter stability.

## INTRODUCCIÓN

El Amazonas es reconocido como el parche de bosque tropical continuo más grande y uno de los más biodiversos del mundo. Tiene además importantes roles como regulador del clima mundial (Malhi *et al.*, 2008), la mayor reserva de carbono en biomasa (Malhi *et al.* 2006), y el mayor contribuyente de agua al océano Atlántico (Marengo, 2006).

A pesar de la gran importancia de los servicios ecosistémicos que el Amazonas presta al mundo, los países cuyos territorios se sobrepone con la cuenca amazónica han optado por integrar este territorio a sus economías, cambiando la vocación forestal que tiene a una agropecuaria, lo que conlleva asu deforestación (Etter *et al.* 2006, Barona *et al.* 2010, Davidson *et al.* 2012). Entre los años 2000 y 2005, 27,151 km<sup>2</sup> de la cuenca amazónica fue deforestada (UNEP-OTCA 2009). En el caso particular de Colombia, el 7.4% de su región amazónica ha sido deforestada (Murcia-García *et al.* 2011). De allí la necesidad imperante de encontrar alternativas que permitan conservar el bosque en pie y a su vez proveer alternativas económicas sostenibles a los pobladores locales.

Uno de los factores asociados frecuentemente con la insostenibilidad de los sistemas productivos en la región amazónica es la limitada fertilidad de la mayoría de sus suelos. Aproximadamente el 70% de los suelos de la cuenca amazónica son altamente evolucionados (FAO 2006), provenientes de materiales parentales ricos en caolinita que posee una baja capacidad de intercambio catiónico (Ma y Eggleton 1999), con una alta acidez, y altas concentraciones de aluminio intercambiable que resulta tóxico para la mayoría de cultivos. La fuente principal de

nutrientes para las plantas en estos suelos lo constituye la materia orgánica. Sin embargo, por la alta humedad y alta temperatura de la región, la materia orgánica es rápidamente descompuesta. Los nutrientes que son liberados a partir de la descomposición de la materia orgánica deben ser rápidamente interceptados y absorbidos por las plantas, pues ante la baja capacidad de adsorción de nutrientes de estos suelos y las frecuentes lluvias, los nutrientes libres en el suelo son rápidamente lavados.

Esta limitada fertilidad de muchos de los suelos amazónicos llevó a la antropóloga Betty Megger a postular en los años 50's la teoría de los ambientes limitantes para el desarrollo de sociedades. En esta teoría indicaba que el ambiente determina el tipo de sociedad que se puede desarrollar. Así, contrastaba cómo las comunidades prehispánicas asentadas en los Andes donde los suelos son muy fértiles habían podido desarrollar una agricultura intensiva que les permitió el desarrollo de sociedades numerosas y complejas con grandes avances tecnológicos y artísticos. Por otro lado, las sociedades prehispánicas amazónicas practican una agricultura de subsistencia limitada por la fertilidad de sus suelos, lo que lleva a una producción limitada de alimentos, que sus poblaciones sean poco numerosas y no hayan alcanzado mayores avances como civilización (Meggers 1954). De esta teoría se deriva hoy que la baja fertilidad de los suelos amazónicos es un factor directamente relacionado con la deforestación (Etter *et al.* 2006).

Se creía que esta condición natural de alta acidez y baja fertilidad que caracteriza la mayoría de los suelos tropicales, incluidos los suelos de la cuenca amazónica, era una condición que no podía cambiarse, hasta que se descubrieron los suelos antrópicos.

Los suelos antrópicos, también denominados Antrosols, *Terras Pretas* (en portugués) o tierras negras amazónicas (la traducción de *Amazonian Dark Earths* como se denominan en inglés) son suelos resultado de la intervención del hombre sobre el ambiente, generando un suelo diferente a aquel del cual se originó. Los suelos antrópicos amazónicos han sido reportados en la Amazonia brasileña, boliviana, colombiana, peruana y venezolana. Estos suelos aparecen como islas de suelo negro en medio de los suelos ácidos de baja fertilidad que caracterizan

la región. Su horizonte antrópico, el más superficial, supera siempre los 20cm de profundidad y se caracteriza por un color negro intenso resultado de las altas concentraciones de carbono orgánico como materia orgánica y carbón. Mientras un suelo antrópico posee aproximadamente 70g/Kg de carbono orgánico, el suelo circundante tiene alrededor de 8.6-34.5g/Kg (Kern *et al.* 1996). De este carbono, entre el 35-45% es carbón pirogénico que son formas de carbón muy estables (Glaser *et al.* 2001). Además del alto contenido de carbono, los suelos antrópicos en general son más ricos en nitrógeno, calcio, potasio y especialmente fósforo; y tienen una mejor capacidad de intercambio catiónico y una mejor saturación de bases que los suelos circundantes no transformados (Glaser *et al.* 2000).

Más que la particular fertilidad de estos suelos, su estabilidad en el tiempo es lo que los hace realmente particulares. Estos suelos fueron transformados hace unos 2000 a 500 años por comunidades precolombinas amazónicas y han conservado esta fertilidad, independientemente de la humedad, la temperatura y las condiciones que no promueven la fijación de nutrientes en el suelo. El entender qué procesos se dieron en el suelo y cómo ocurrió la transformación del suelo para aumentar su fertilidad es un tema que muchos investigadores alrededor del mundo quieren entender, pues el mantenimiento de la fertilidad del suelo en condiciones tropicales representaría una disminución de la deforestación en los trópicos, una reducción en las emisiones de CO<sub>2</sub>, una mejor seguridad alimentaria y calidad de vida de sus habitantes, y sistemas productivos más sostenibles para la región.

El presente trabajo explora diferentes características de los suelos antrópicos amazónicos de la Amazonia colombiana en busca de aquellos principios que podrían ser usados en la recuperación de suelos degradados de la región, dadas las ventajas que ofrecen los suelos antrópicos de Colombia: los suelos antrópicos están en general bien conservados y hoy son habitados por comunidades indígenas nativas, descendientes de las comunidades prehispánicas que transformaron los suelos, pudiendo en su conocimiento tradicional existir indicios de prácticas ancestrales relacionadas con la formación de estos suelos antrópicos.

## MÉTODOS

### Área de estudio

El estudio fue realizado en dos zonas de la región amazónica colombiana (Figura 1).

La primera fue la comunidad indígena Ticuna de San Martín de Amacayacu, compuesta por 153 familias y localizada a 5 Km de la desembocadura del río Amacayacu en el río Amazonas (03°50'17.3" S y 70°17'57.3" O). La comunidad está localizada en el resguardo TOCOYA y se sobrepone con parte del Parque Nacional Natural Amacayacu. El paisaje corresponde a suelos de poca altura (95 m.s.n.m.), no inundables, provenientes de antiguos suelos aluviales del río Amazonas. En esta zona no hay presencia de suelos antrópicos.

La segunda zona correspondió al área del curso medio del río Caquetá, entre la localidad de Araracuara y la Isla de María Cristina (entre los 00°22'14.9" y 00°55'11"S; y los 72°06'36.3" y 71°26'18.3" O). Allí están localizadas cuatro comunidades indígenas: la Andoke de Aduche (con 27 familias), la Uitoto de Guacamayo (con 34 familias), la Muinane de Villazul (con 17 familias), y la Nonuya de Peña Roja (con 15 familias). Las comunidades están distribuidas en dos resguardos: las comunidades de Guacamayo y Aduche comparten el resguardo de Aduche; y las comunidades de Villazul y Peña Roja comparten el resguardo Nonuya. Las comunidades están localizadas en un paisaje de planos sedimentarios de origen terciario, con formaciones rocosas del Precámbrico aflorando, y máximas elevaciones entre 200-300 m.s.n.m. Las dos regiones comparten un clima húmedo tropical con un promedio de lluvia de 3.000 mm anuales. Las cuatro comunidades están asentadas en zonas donde están presentes suelos antrópicos.

### Trabajo de campo

El trabajo de campo se desarrolló entre los años 2011 y 2013, tiempo en el cual se visitaron las comunidades varias veces para un tiempo total de 90 días por comunidad.



se realizaron observaciones directas para determinar los diferentes usos del suelo en el tiempo. De cada suelo se tomó una muestra compuesta de aproximadamente 500 g del horizonte A del suelo para hacer su caracterización fisicoquímica. El análisis fisicoquímico incluyó textura, pH (1:1 en agua), saturación de Al (Al intercambiable con KCl), carbono orgánico (Walkley – Black), capacidad de intercambio catiónico (con acetato de amonio normal y neutro), elementos menores (Ca, Mg, K, Na) por DTPA, porcentaje de bases totales, saturación de bases (con acetato de amonio normal y neutro) y fósforo disponible (Bray II). Estos análisis fueron realizados en el Laboratorio Nacional de Suelos del Instituto Geográfico Agustín Codazzi en Bogotá.

La composición de los suelos naturales y antrópicos fue comparada estadísticamente para evaluar diferencias significativas entre ellos. Para este fin se aplicó el análisis de varianza no paramétrico de Kruskal-Wallis. También se hizo una revisión bibliográfica de materiales suplementarios con información sobre la composición fisicoquímica de otros suelos antrópicos en la cuenca amazónica.

Se usó un test de Chi-cuadrado para determinar diferencias significativas entre la abundancia e inventarios de yuca cultivada en las chagras de comunidades con y sin suelos antrópicos, por ser éste el principal cultivo en todas las chagras. Las diferencias fueron consideradas como significativas a una probabilidad  $p \leq 0.05$ . Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el software Statistix 9.0.

Elaboración de enmiendas con base en fundamentos importantes en la formación de suelos antrópicos

Dos fundamentos fueron usados para la elaboración de una enmienda que pudiera imitar la composición de los suelos antrópicos: el manejo de volúmenes grandes de materia orgánica y la aplicación de carbón como mecanismo para fijar los nutrientes en el suelo.

**Acopio y recolección de residuos orgánicos.** Los residuos fueron colectados en la plaza de mercado “El tour de las octavas” de Leticia. Los residuos consistieron en su mayoría cáscaras de frutas y tubérculos, vástagos de plátano y frutas en mal estado.

Los residuos animales consistieron principalmente en vísceras, algunas veces aletas, cabezas y pescados comenzando su proceso de descomposición.

**Proceso de producción de la enmienda.** Se realizó un compostaje por ser un proceso sencillo, cuidando conservar una relación C/N entre 20-30 entre los ingredientes para su buena formulación. Con base en esta relación se elaboró un compost en la proporción 70% residuos vegetales y 30% residuos animales frescos, y un volumen final de 650 Kg. El material se picó con ayuda de machetes, se organizó en pilas y se cuidó que la humedad y la aireación fueran correctas. Se dejó madurar por 8 días a temperatura ambiente al aire libre. Luego de una semana, se volteó nuevamente para airearlo y se dejó madurar por otros 8-15 días hasta que todo el material se descompuso.

De este material también se tomó una muestra compuesta de 500 g la cual fue enviada al Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC para su respectivo análisis.

En periodos de alta pluviosidad, se adicionó un 30% de residuos de carbón vegetal al compost en la preparación para establecer si el carbón estabilizaba la materia orgánica en el compost previendo su lavado. Cuando los compost con y sin adición de carbón estuvieron listos, los volúmenes finales fueron comparados.

## RESULTADOS

### *Composición fisicoquímica de los suelos antrópicos de la Amazonia colombiana*

La composición fisicoquímica de los suelos antrópicos y de los suelos naturales circundantes fue variable. No todas las características edáficas evaluadas tenían valores más altos en suelos antrópicos. De hecho, los suelos antrópicos estudiados no mostraron diferencias significativas en su composición fisicoquímica respecto a los suelos adyacentes sin modificar, excepto por el fósforo disponible (Tabla 1) el cual fue 57 veces más abundante que en los suelos sin modificar.

## Fertilidad de los suelos antrópicos de la cuenca amazónica

En general, los suelos antrópicos amazónicos son muy variables en su composición a lo largo de la cuenca amazónica. Claramente, los suelos antrópicos estudiados en la Amazonia colombiana son menos fértiles que los de la Amazonia central, excepto en el fósforo disponible, con valores similares alrededor de las 100ppm (Figura 2).

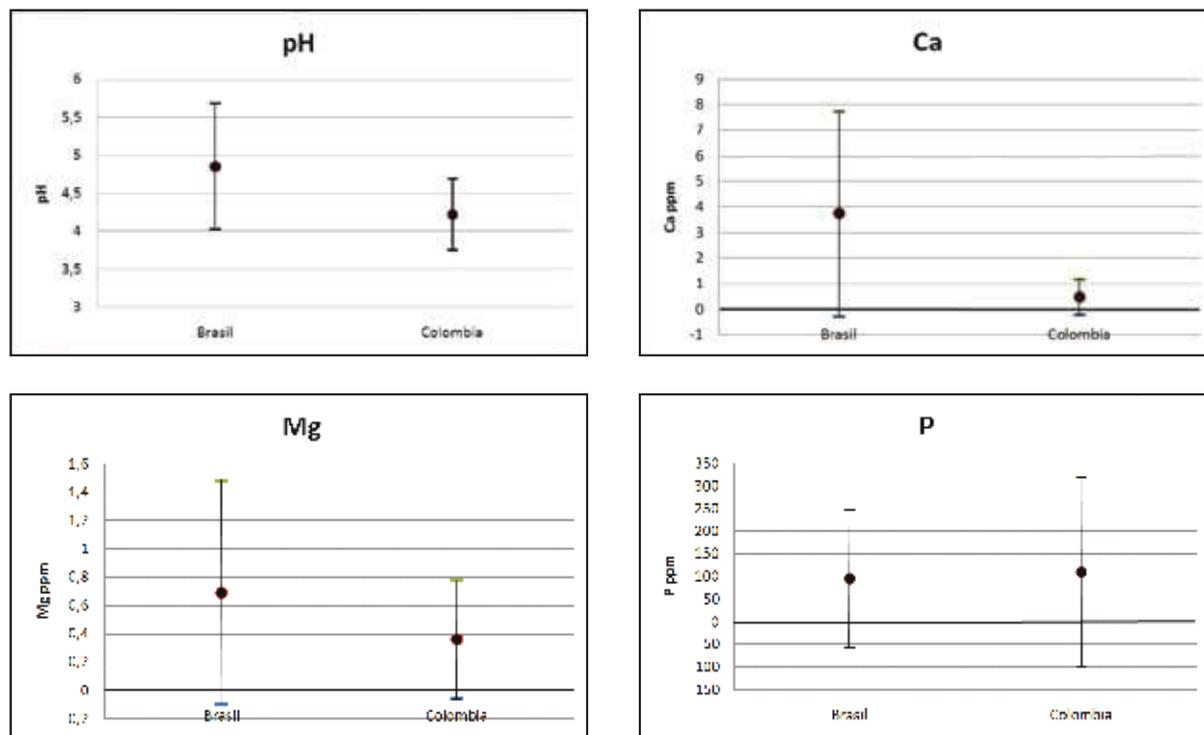
## Conocimiento indígena sobre la formación de los suelos antrópicos

De los cuatro grupos étnicos entrevistados en el Medio Caquetá, solo los Andoke ocupan su territorio ancestral, en el cual hay presencia de suelos antrópicos. Los otros tres grupos migraron en la época de la cauchería a finales de los años 50 y 60's hacia el medio Caquetá. Sin embargo, escogieron sitios con suelos antrópicos para asentar sus comunidades.

**TABLA 1.** CARACTERIZACIÓN FÍSICOQUÍMICA DE SUELOS NATURALES Y ANTRÓPICOS DEL MEDIO CAQUETÁ COLOMBIANO. LOS VALORES ESTÁN EXPRESADOS COMO LA MEDIA Y ENTRE PARÉNTESIS LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR. LAS COLUMNAS SEÑALADAS CON UN ASTERISCO INDICA QUE LA DIFERENCIA DE LA VARIABLE ES SIGNIFICATIVA ENTRE LOS SUELOS DE ACUERDO AL TEST NO-PARAMÉTRICO DE KRUSKAL-WALLIS ( $P < 0.05$ ).

Tipo de suelo	pH-H <sub>2</sub> O	CO	CIC	Ca	Mg	K	Na	SB	P	
Suelo natural (n=6)	3.9 (0.6)	3.3 (3.7)	14.9 (12.2)	0.2 (0.1)	0.3 (0.4)	0.2 (0.1)	0.1 (0.0)	7.6 (7.5)	3.7 (6.2)	*
Suelo antrópico (n=5)	4.0 (0.3)	1.8 (0.7)	9.5 (4.7)	1.0 (0.9)	0.4 (0.4)	0.2 (0.1)	0.1 (0.0)	16.9 (7.9)	228.9 (313.7)	*

pH (1:1 en agua); CO: Porcentaje de carbon orgánico (Walkley – Black); CIC: Capacidad de intercambio catiónico usando acetato de amonio normal y neutro; Ca: Calcio por DTPA; Mg: Magnesio por DTPA; K: Potasio por DTPA; Na: Sodio por DTPA; SB: Porcentaje de saturación de bases usando acetato de amonio normal y neutro; P: Fósforo disponible por Bray II.



**FIGURA 2.** COMPARACIÓN DE VARIABLES QUÍMICAS ENTRE LOS SUELOS ANTRÓPICOS AMAZÓNICOS DE COLOMBIA (ALTA AMAZONIA) Y LOS SUELOS ANTRÓPICOS AMAZÓNICOS DE BRASIL (AMAZONIA CENTRAL). LA COMPARACIÓN SE REALIZA CON BASE EN LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS REPORTADOS PARA 13 SUELOS ANTRÓPICOS AMAZÓNICOS DE COLOMBIA CORRESPONDIENTES A LOS TRABAJOS DE EDEN ET AL. 1984, MORCOTE-RÍOS Y LEÓN-SICARD 2011, Y LOS DATOS ORIGINALES DE ESTE TRABAJO; Y LOS ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS REPORTADOS PARA 237 SUELOS ANTRÓPICOS AMAZÓNICOS DE BRASIL CORRESPONDIENTES A LOS TRABAJOS DE MADARI ET AL. 2003, FALCÃO ET AL. 2009, Y FRASER ET AL. 2011.

De acuerdo con una abuela Muinane que estuvo en la fundación de la comunidad de Villazul, “*se fundó la comunidad aquí (sobre un suelo antrópico) porque estos suelos son buenos para cultivar la yuca*”, lo cual indica que efectivamente les eran familiares y ya conocían las características particulares de los suelos antrópicos. En sus lenguas, existen nombres con los que denominan particularmente estos suelos. En algunas clasificaciones como las de los Nonuya y los Muinane, los suelos antrópicos hacen parte de los suelos arenosos y sólo adicionan la palabra para denominar el color negro y así distinguirlos de los suelos arenosos no antrópicos. En el caso de los Andoke y los Uitoto, utilizan palabras específicas (Ñesxaθ y Jui+k+no, respectivamente) para denominar los suelos antrópicos y los clasifican como un grupo de suelos aparte de los otros suelos.

Al preguntar por el origen de estos suelos, todos respondieron que tienen un origen natural, y citan eventos mitológicos que explican el porqué de su coloración negra. Sin embargo también reconocen que, como lo expresó un líder Andoke “*al usar los suelos arenosos se van volviendo negros por las quemaduras que se hacen*”. La noción más antigua de estos suelos los ubica en un momento de su historia en el que la Amazonia estaba densamente poblada y en que los diferentes grupos se enfrentaban por el uso de estos suelos para su cultivo. Un líder indígena Andoke cuenta que “*esta zona (donde hay suelos antrópicos) fue habitada por el antiguo clan Andoke Cucarrón. Ellos pelearon con los Carijona por estos suelos. Como los Carijona eran un grupo guerrero, varias veces mataron los Andoke y se quedaron con sus territorios para cultivarlos. Después los Andoke volvían a pelear para recuperar sus tierras*”. De esas peleas quedan las cerámicas rotas que se encuentran en estos suelos. En palabras del líder Andoke “*donde se encuentran los tuestos es donde llegaban los Carijona a matar la gente y romper todo*”.

Durante las visitas a las chagras a lo largo del ciclo productivo, no se evidenciaron prácticas específicas de abonamiento o mejoramiento de la calidad del suelo, excepto por la “*hoguerada*” que se hace luego que la chagra ha sido quemada. La “*hoguerada*” consiste en apilar leña seca sin quemar o poco quemada en sitios específicos de la chagra para allí prender unas hogueras que más que fuego producen

humo, y que consumen lentamente la leña dejando cantidades considerables de cenizas y el carbón. Estos sitios son reservados para el cultivo de plátano u hortalizas como el ají y el pimentón, considerados cultivos exigentes en nutrientes.

Dado que no fue evidente el conocimiento de prácticas agrícolas específicas ligadas a la formación de los suelos antrópicos, la investigación se concentró más en entender las transformaciones de la materia orgánica en el suelo más que en el conocimiento tradicional de prácticas agrícolas que estos grupos pudieran tener.

## Manejo de la materia orgánica

Una de las características de los suelos antrópicos amazónicos es la alta concentración de materia orgánica. Estas altas concentraciones se pueden obtener fácilmente a partir de la elaboración de cualquier tipo de abono orgánico. Sin embargo, las altas concentraciones de fósforo que caracterizan los suelos antrópicos amazónicos no pueden ser alcanzadas solo con la acumulación de material vegetal, ya que el fósforo no es abundante en las plantas. De allí, que en la formación de los suelos antrópicos exista un porcentaje importante de materia orgánica de origen animal.

Varios residuos de origen animal han sido propuestos en la formación de suelos antrópicos como huesos de animales y peces (Glaser y Birk 2012), y heces de animales y humanas (Birk *et al.* 2011). Obtener volúmenes considerables de estos elementos no es fácil. Por ello para los experimentos se seleccionaron residuos de pescado como la principal fuente de materia orgánica de origen animal por varias razones: el pescado fue y sigue siendo la fuente principal de proteína en las comunidades indígenas de la Amazonia; es relativamente sencillo acopiar estos residuos en sitios como las plazas de mercado; y el pescado es rico en fósforo.

El abono orgánico fosfatado producido muestra proporciones de elementos similares a los suelos antrópicos, excepto en el porcentaje de saturación de bases (Tabla 2), la cual fue mayor en los suelos antrópicos. Se encontró que el uso de una proporción

70% residuos vegetales, 30% residuos de pescado y el proceso de compostaje sin adiciones de otros químicos y exclusivamente ejecutado con mano de obra, puede producir una enmienda de alta calidad que al mezclarse con el suelo amazónico puede producir un suelo con características similares a los suelos antrópicos.

### Estabilidad de la materia orgánica en enmiendas inspiradas en los suelos antrópicos amazónicos

El abono orgánico fosfatado desarrollado fue producido a lo largo de todo un año. En la época más lluviosa el abono en preparación tendía a humedecerse demasiado y los procesos de descomposición anaeróbica aparecían produciendo malos olores. En la época de lluvias durante el proceso de elaboración del abono orgánico fosfatado, se adicionaron residuos de carbón vegetal para ser mezclado con los demás materiales, esperando observar una mayor estabilidad en el proceso de descomposición. Los resultados mostraron un menor lavado de los residuos, una disminución o ausencia de olores, y una mayor estabilidad de la materia orgánica, la cual se evidenció al comparar los volúmenes de pérdida de materia orgánica entre un proceso de abono orgánico fosfatado adicionado con carbón y uno sin adición de carbón. El proceso de producción de abono orgánico fosfatado sin adición de carbón perdió aproximadamente 20% de su volumen en comparación con el proceso del abono orgánico fosfatado adicionado con carbón.

### Selección de cultivos para la Amazonia

Se esperaba que la presencia de unos suelos no inundables con una buena fertilidad como los son los suelos antrópicos, pudieran incidir en los cultivos que harían parte de la base de la alimentación indígena de sitios donde estos suelos existen. Unos suelos más fértiles permitirían sembrar especies nutricionalmente más exigentes y a su vez más nutritivas para la población.

Los resultados mostraron que tanto en comunidades indígenas con acceso al uso de suelos antrópicos (Aduche, Peña Roja, Villazul y Guacamayo) como en comunidades indígenas sin suelos antrópicos (San Martín de Amacayacu), el cultivo base de la alimentación es la yuca. Adicionalmente no hubo diferencias significativas en los volúmenes o la diversidad de variedades de yuca cultivadas entre comunidades con acceso y sin acceso a suelos antrópicos (Valor chi-cuadrado = 4.5, d.f.= 4;  $\alpha = 0.05$ ) (Tabla 3).

Igualmente se encontró que el uso principal de los suelos antrópicos en comunidades donde estos suelos están presentes, no son las chagras como el sistema principal de agricultura de estas comunidades. El uso principal de los suelos antrópicos es el de zonas de asentamiento (Figura 3) y zonas para el mantenimiento de agroforestales con especies nativas y exóticas que en suelos con menor fertilidad no podrían mantenerse.

**TABLA 2.** COMPARACIÓN QUÍMICA DE SUELOS ANTRÓPICOS AMAZÓNICOS DE COLOMBIA (MEDIO CAQUETÁ) CON EL ABONO ORGÁNICO FOSFATADO DESARROLLADO POR EL INSTITUTO SINCHI. VALORES EXPRESADOS COMO LA MEDIA DE LAS VARIABLES CON LA DESVIACIÓN ESTÁNDAR EN PARÉNTESIS.

Sustrato	pH-H <sub>2</sub> O	CO	CIC	Ca	Mg	K	Na	SB	P
Suelo antrópico (n=5)	4.0 (0.3)	1.8 (0.7)	9.5 (4.7)	1.0 (0.9)	0.4 (0.4)	0.2 (0.1)	0.1 (0.0)	16.9 (7.9)	228.9 (313.7)
Abono orgánico fosfatado (n=1)	6.1	46	26	1.9	0.5	0.3	0.1	10.8	394

pH (1:1 en agua); CO: Porcentaje de carbon orgánico (Walkley – Black); CIC: Capacidad de intercambio catiónico usando acetato de amonio normal y neutro; Ca: Calcio por DTPA; Mg: Magnesio por DTPA; K: Potasio por DTPA; Na: Sodio por DTPA; SB: Porcentaje de saturación de bases usando acetato de amonio normal y neutro; P: Fósforo disponible por Bray II.

**TABLA 3.** CULTIVOS, FRUTALES Y PALMAS CULTIVADAS CON YUCA EN CHAGRAS INDÍGENAS LOCALIZADAS EN SUELOS ANTRÓPICOS Y SUELOS NATURALES DE LA AMAZONIA COLOMBIANA.

Nombre vulgar	Nombre científico	Suelos antrópicos	Suelos naturales
Achira	<i>Canna indica</i> L.		X
Ají	<i>Capsicum annum</i> L.	X	X
Bacuri	<i>Garcinia gardneriana</i> (Planch. & Triana) Zappi		X
Banano	<i>Musa</i> sp.		X
Barbasco	<i>Lonchocarpus nicou</i> (Aubl.) DC.	X	
Batata	<i>Ipomoea batatas</i> (L.) Lam.	X	X
Bore	<i>Xanthosomasagittifolium</i> (L.) Schott		X
Caimo	<i>Pouteriacaimito</i> (Ruiz & Pav.) Radlk.	X	X
Caña de azúcar	<i>Saccharum officinarum</i> L.	X	X
Coca	<i>Erythroxylum coca</i> Lam.	X	X
Chontaduro	<i>Bactris gasipaes</i> Kunth		X
Dale dale	<i>Pseudolmedialae vigata</i> Trécul	X	X
Frijol	<i>Phaseolus</i> sp.		X
Lulo	<i>Solanum sessiliflorum</i> Dunal	X	
Maíz	<i>Zea mays</i> L.		X
Mafafa	<i>Xanthosomas agittifolium</i> (L.) Schott	X	X
Maní	<i>Arachis hypogaea</i> L.	X	
Marañón	<i>Anacardium occidentale</i> L.		X
Name	<i>Dioscorea trifida</i> L.f.	X	X
Pintura cabello	<i>Palicourea triphylla</i> DC.	X	X
Papaya	<i>Carica goudotiana</i> (Triana & Planch.) Solms		X
Piña	<i>Ananas comosus</i> (L.) Merr.	X	X
Plátano	<i>Musa paradisiaca</i> L.	X	X
Pimentón	<i>Capsicum annum</i> L.		X
Tabaco	<i>Nicotiana tabacum</i> L.		X
Tomate	<i>Solanum lycopersicum</i> L.		X
Uva caimarona	<i>Pouroumace cropiiifolia</i> Mart.		X
Ucuye	<i>Macoubea guianensis</i> Aubl.	X	X
Sandía	<i>Citrullus lanatus</i> (Thunb.) Matsum. & Nakai	X	X



**FIGURA 3.** USOS DE LOS SUELOS ANTRÓPICOS DEL MEDIO CAQUETÁ POR COMUNIDADES INDÍGENAS LOCALES. FOTO: CLARA P. PEÑA-VEGGA

## DISCUSIÓN

### Fertilidad de los suelos antrópicos amazónicos

Los suelos antrópicos amazónicos son muy variables en su composición, siendo los suelos antrópicos de la Amazonia colombiana menos fértiles que los suelos antrópicos reportados para la Amazonia central. La baja fertilidad de los suelos antrópicos de la Amazonia colombiana puede ser explicada por varios factores. Uno, es el número de personas que habitó sitios donde se formaron los suelos antrópicos. Claramente el número de suelos antrópicos amazónicos reportados en Colombia es mucho menor que el reportado en Brasil (Clement *et al.* 2015), lo que podría indicar que la Amazonia central estuvo más densamente habitada que la alta Amazonia. Otro factor es el tipo de suelo que dio origen al suelo antrópico. El mayor número de suelos antrópicos reportado para Colombia se encuentran en el medio Caquetá. De acuerdo con los recorridos hechos y con la descripción de los perfiles de suelo, los suelos antrópicos de esta zona fueron formados sobre Espodosoles.

Los Espodosoles, son suelos poco profundos, formados sobre superficies rocosas del precámbrico, de suelos arenosos (franco-arenosos a arenosos-franco), con un bajo contenido de carbono orgánico (IGAC 2003), y un horizonte espódico bajo el horizonte A, siendo un suelo de muy baja fertilidad. En la Amazonia central, predominan los suelos ácidos, de texturas arcillosas (Lepsch 2002, Quesada *et al.* 2010). Las arcillas, por el tamaño de partícula, forman poros más pequeños y tienen a formar fácilmente agregados, lo cual disminuye la posibilidad de lavado de nutrientes, siendo más fácil la adsorción de nutrientes en suelos arcillosos que arenosos y por ende más factible y rápida la formación de un suelo antrópico en un suelo arcilloso que en uno arenoso, como lo son los Espodosoles del medio Caquetá.

A pesar de la menor fertilidad de los suelos antrópicos de la Amazonia colombiana respecto a los de la Amazonia central, el que tengan una alta disponibilidad de fósforo constituye una gran diferencia en términos de fertilidad, pues el fósforo es el elemento limitante de la agricultura en la región.

Esta característica fue reconocida por las comunidades indígenas que habitan zonas con sitios antrópicos, reconociendo que en algún punto de su historia cuando la zona estaba densamente poblada, estos suelos constituían un recurso importante para la producción de alimentos. Sin embargo, estos grupos contemporáneos de indígenas no se consideran los creadores de los suelos antrópicos, lo cual es soportado por las narraciones de los conflictos que se dieron antiguamente por la posesión de esos territorios. Ellos reconocen la importancia de dos elementos asociados a la presencia de suelos antrópicos: poblaciones numerosas y el uso del fuego, elementos que están implícitos en las palabras que utilizan en sus lenguas para definir los suelos antrópicos (Peña-Venegas *et al.* 2016).

Es claro que la cauchería en los años 40-50's afectó considerablemente estas comunidades indígenas, rompió sus estructuras sociales y prácticas culturales, prohibió el uso de sus lenguas nativas, y diezmó sus poblaciones en algunos casos hasta el borde de su extinción como ocurrió con el pueblo Nonuya (Echeverri y Landaburu 1995). Por ello, no es extraño que mucho del conocimiento tradicional que pudieron tener estos pueblos y que pudiera estar asociado a la formación de estos suelos antrópicos se perdiera.

A la fecha, hay un consenso entre los diferentes investigadores de las ciencias naturales y sociales en reconocer que la formación de los suelos antrópicos no fue el producto de una tecnología desarrollada con el propósito de "crear" suelos fértiles, sino más bien un producto no intencional de las actividades cotidianas de estos antiguos poblados como lo es el manejo y disposición de residuos (Schmidt *et al.* 2014, Fraser *et al.* 2011b). Sin embargo, no existe un conocimiento preciso entre las comunidades indígenas de cómo eran manejados los residuos en esos antiguos poblados, por lo que su conocimiento en este sentido no contribuye significativamente a descifrar las prácticas que pudieron estar asociadas a la formación de los suelos antrópicos.

Es claro que las comunidades indígenas reconocen las limitaciones de los suelos no antrópicos para el cultivo de ciertas especies exigentes en nutrientes y aplican la técnica de "hoguerear" para aumentar la fertilidad de algunos sitios específicos de la chagra. Esta técnica también ha sido documentada entre

las comunidades de caboclos en Brasil y denominada como *queima de coivara* (Fraser *et al.* 2011a). Se ha propuesto que estas prácticas de quema, que también son conservadas en muchos de los hogares amazónicos como una práctica para manejar las basuras de las áreas abiertas (Winklerprins 2002), pueden ser un reflejo de alguna práctica ancestral relacionada con la formación de los suelos antrópicos.

## Imitando los suelos antrópicos amazónicos

Los resultados de elaboración de abonos orgánicos ricos en fósforo como enmiendas para adicionar a los suelos amazónicos e imitar la fertilidad de un suelo antrópico, muestra que es fácil y factible incrementar los niveles de nutrientes en el suelo a partir del manejo de materia orgánica de origen vegetal y animal.

Lo que es verdaderamente difícil aún de imitar es la estabilidad de los nutrientes de los suelos antrópicos. La mayor diferencia encontrada entre la composición fisicoquímica de los suelos antrópicos evaluados y el abono orgánico fosfatado fue la saturación de bases, la cual fue mayor en los suelos antrópicos, indicando una mayor estabilidad de las bases en estos suelos que en el abono formulado. La aplicación de carbón vegetal, ayudó significativamente en la estabilización de la materia orgánica en el abono fosfatado cuando se adicionó. El carbón aumenta la adsorción de cationes, el pH del suelo, y modifica su estructura haciéndola más propicia como nicho para un sinnúmero de organismos edáficos (Lehmann *et al.* 2011). Sin embargo el uso de carbón (o biochar como es denominado al carbón usado como enmienda en el suelo para mejorar sus características), tiene aún limitaciones desde el punto de su elaboración.

La elaboración de carbón vegetal está considerada como una actividad poco amistosa con el medio ambiente dadas las emisiones de CO<sub>2</sub> en su producción y su asociación con procesos de deforestación (Rittl 2015). Es importante también indicar que no todos los carbones son recalcitrantes, y solo aquellos elaborados en ausencia de oxígeno y algunos materiales particulares producen carbones ricos en estructuras aromáticas policondensadas que le dan una mayor estabilidad a la descomposición natural. Sin embargo, el carbón usado en nuestro experimento,

que es el mismo que se elabora artesanalmente, no lleva un proceso que asegure la formación de estas estructuras moleculares más resistentes a la degradación (Rittl 2015).

Aun cuando el carbón, puede tener un efecto importante en la prevención del lavado de nutrientes, otros procesos también pueden tener un papel igual o más importante que el efecto logrado con el carbón. La resiliencia de la materia orgánica en el suelo está dada por el tipo de descomposición a la que es sometida. En general los procesos de descomposición de la materia orgánica ocurren en condiciones de aerobiosis, lo cual conlleva a la descomposición total de la materia orgánica. Sin embargo, existen otros procesos de descomposición que ocurren en atmósferas con baja tención de oxígeno o en anaerobiosis, cuyo producto final son moléculas aromáticas más estables.

Adicionalmente, algunos organismos edáficos como las lombrices y las termitas por ejemplo, transforman la materia orgánica al ser ingerida y pasar por el tracto intestinal donde comunidades de microorganismos la transforman en compuestos ricos en estructuras aromáticas y ácidos húmicos más estables que son devueltos al medio como sus heces. En suelos tropicales de baja fertilidad y con bajo porcentaje de material orgánica, se ha observado que las lombrices de tierra pueden alcanzar grandes volúmenes de biomasa y producir cantidades importantes de heces lo cual se traduce en cambios importantes en la estructura del suelo y el ciclo de nutrientes (Lavelle *et al.* 1997). Son pocos los trabajos que se han realizado en torno al papel que estos organismos tienen o tuvieron en la estabilización de la materia orgánica y por ende en la formación de suelos antrópicos amazónicos (Cunha *et al.* 2016).

Es importante anotar que no todas las lombrices juegan el mismo rol en el suelo. Las lombrices compactadoras forman complejos organo-minerales produciendo una fuerte compactación del suelo con sus heces (McKenzie y Dexter 1988, Blanchart *et al.* 1999), mientras las lombrices descompactadoras disminuyen la densidad del suelo ya que ingieren microagregados (Blanchart *et al.* 1999). Estudios preliminares indican que la especie *Pontoscolex corethrurus* es común en suelos antrópicos amazónicos (Cunha *et al.* 2016). Esta especie de lombriz

prefiere alimentarse de partículas mixtas de suelo y carbón que solo de suelo (Topoliantz *et al.* 2002, Topoliantz y Ponge 2003). Un estudio preliminar de laboratorio en el cual se incubó *P. corethrus* en un suelo antrópico de la Amazonia colombiana y su suelo adyacente sin modificar, no mostró diferencias significativas en el carbono o el fósforo del suelo, y tampoco en la agregación, sugiriendo un comportamiento de la especie similar en los dos suelos (Koorneef 2016). Sin embargo es necesario hacer estudios con un número mayor de suelos antrópicos y adyacentes sin modificar para tener resultados concluyentes.

Las lombrices de tierra no son el único grupo de macrofauna que puede tener un efecto importante en la estabilización de la materia orgánica en el suelo, también ocurre con insectos. Sin embargo, el estudio de la macrofauna edáfica asociada a los suelos antrópicos amazónicos hasta ahora comienza, por cuanto su aplicación en el manejo de residuos orgánicos y la producción de enmiendas para mejorar la fertilidad del suelo es aún incierta.

## Selección de cultivos para la Amazonia colombiana

La yuca (*Manihot esculenta* Crantz) es un cultivo adaptado a crecer en suelos tropicales ácidos de baja fertilidad (El-Sharkawy 2004), como son la mayoría de los suelos de la cuenca amazónica (Quesada *et al.* 2010). Al existir suelos más fértiles, se esperaba encontrar diferencias significativas entre los cultivos sembrados en zonas con suelos antrópicos y en zonas sin presencia de suelos antrópicos. Sin embargo la yuca fue el cultivo principal en zonas con y sin presencia de suelos antrópicos. Este resultado parece no ser una particularidad de la zona de estudio. La mayoría de las comunidades indígenas de la Amazonia basan su alimentación en la yuca (Wilson y Dufour 2006, Emperaire y Peroni 2007, Heckler y Zent 2008, McKey *et al.* 2010), pero también las comunidades no indígenas asentadas en zonas con suelos antrópicos (Fraser 2010, Alves-Pereira *et al.* 2011, Junqueira *et al.* 2016).

En este sentido, parecería que la fertilidad del suelo no es el factor que determina la productividad y sostenibilidad de un sistema agrícola sino el tipo de

cultivos seleccionados. Un ejemplo claro de esto lo constituye el cultivo de sandía en suelos antrópicos amazónicos del bajo río Madeira-Brasil, en donde el uso intensivo de estos suelos en este cultivo ha reducido la fertilidad de los suelos antrópicos y aumentado la incidencia de malezas, por cuanto el cultivo requiere igual o mayor uso de agroquímicos que en un suelo no antrópico.

Por ello, no se debe incentivar en la región amazónica el cultivo de especies foráneas con alta exigencia nutricional. A cambio se debe volcar la mirada a las especies amazónicas que ya fueron domesticadas y que ofrecen un gran potencial para la región. Un ejemplo claro de ello es la yuca, la cual ofrece cientos de variedades con características particulares no solo para la seguridad alimentaria de las comunidades locales, sino para la industria alimenticia y biotecnológica por ser un alimento libre de gluten y poseer almidones con diversas proporciones de amilosa y amilopectina en sus diferentes variedades que le dan propiedades particulares de gelificación y viscosidad de importancia para diversos usos industriales (Aritzabal *et al.* 2007). Pero así como la yuca, hay otros cientos de especies nativas domesticadas (Clement *et al.* 2015, Piperno 2011, Clement 1999) que constituyen el verdadero potencial para la región.

## CONCLUSIONES

Los suelos antrópicos amazónicos son una buena referencia de cuanto se puede incidir en los suelos ácidos de baja fertilidad de la cuenca amazónica para mejorar su fertilidad. Sin embargo, hasta la fecha, no hay indicios que haya existido una tecnología ancestral para la transformación de suelos naturales en suelos antrópicos. Claramente hubo alguna actividad humana cotidiana que asociada a factores ambientales particulares permitió que los nutrientes acumulados en ciertas zonas pudieran ser estabilizados en el tiempo, dando origen a los suelos antrópicos. Aun cuando es evidente que la fuente principal de nutrientes fue la materia orgánica, falta mucho por entender cuáles son los procesos que inmovilizan esa materia orgánica en el suelo. Se espera que las actuales investigaciones en curso puedan contribuir a explicar esos cambios, permitiendo en un futuro sugerir alguna tecnología que imite la formación de los suelos antrópicos amazónicos.

## AGRADECIMIENTOS

Al Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas "SINCHI" de Colombia y al Fondo Interdisciplinario para la Investigación y la Educación (INREF) y su programa Terra Preta de la Universidad de Wageningen de los países Bajos por la financiación de la presente investigación. También a las abuelas, líderes y productores de las comunidades de Aduche Guacamayo, Peña Roja y Villazul del Medio Caquetá por el invaluable apoyo para la realización de esta investigación.

## REFERENCIAS

- Alves-Pereira A, N Peroni, AG Abreu, R Gribel, CR-Clement. 2011. Genetic structure of traditional varieties of bitter manioc in three soils in Central Amazonia. *Genetica* 139: 1259-1271.
- Aristizábal J, T. Sánchez, DMLorío. 2007. Guía técnica para producción y análisis de almidón de yuca. FAO, Roma.
- Barona E, N Ramankutty, GHyman, OTCoomes. 2010. The role of pasture and soybean in deforestation of the Brazilian Amazon. *Environmental Resources Letters* 5: 9. doi:10.1088/1748-9326/5/2/024002.
- Birk JJ, WG Teixeira, EG Neves, B Glaser. 2011. Faeces deposition on Amazonian Anthrosols as assessed from 5 $\beta$ -stanols. *Journal of Archaeological Science* 38: 1209-1220.
- Blanchart E, A Albrecht, J Alegre, A Duboisset, C Gilot, B Pashanasi, P Lavelle, L Brussard. 1999. Effects of earthworms on soil structure and physical properties. In: *Earthworm Management in Tropical Agroecosystems*. P Lavelle, L Bussard y P. Hendrix (eds). CAB international. 149-172.
- Clement CR. 1999. 1492 and the loss of Amazonian crop genetic resources I. The relation between domestication and human population decline. *Economic Botany* 53: 188-202.
- Clement CR, WM Denevan, MJ Heckenberger, AB Junqueira, EG Neves, WG Teixeira, WI Woods. 2015. The domestication of Amazonia before European conquest. *Proceedings of the Royal Society of London B: Biological Sciences* 282: 20150813.
- Cunha L, GG Brown, DWG Stanton, E da Silva, FAHansel, G Jorge, D McKey, P Vidal-Torrado, RS Macedo, E Velasquez, SW James, P Lavelle, P Kille, Terra Preta de Indio Network. 2016. Soil Animals and Pedogenesis: The Role of Earthworms in Anthropogenic Soils. *Soil Science* 181 (3/4): 110-125.
- Davidson EA, AC Araújo, P Artaxo, JK Balch, IF Brown, MMC Bustamante, MTCoe, RS DeFries, M Keller, M Longo, JWMunger, W Schroeder, BSSoares-Filho, CMSouza, SC Wofsy. 2012. The Amazon basin in transition. *Nature* 481, 321-328.
- Echeverri JA, J Landaburu. 1995. Los Nonuya del Putumayo y su lengua: huellas de su historia y circunstancias de un resurgir. In: Pabón, M. (Ed.), *La recuperación de lenguas nativas como búsqueda de identidad étnica*. CCELA-Uniandes, Bogotá, pp. 39-60.
- Eden MJ, W Bray, L Herrera, C McEwan. 1984. Terra Preta soils and their archaeological context in the Caquetá Basin of southeast Colombia. *American Antiquity* 49: 125-140.
- El-Sharkawy MA. 2004. Cassava biology and physiology. *Plant Molecular Biology* 56: 481-501.
- Emperaire L, N Peroni. 2007. Traditional management of agrobiodiversity in Brazil: A case study of manioc. *Human Ecology* 35: 761-768.
- Etter A, C McAlpine, S Phinn, D Pullar, H Possingham. 2006. Unplanned land clearing of Colombian rainforests: Spreading like disease? *Landscape and Urban Planning* 77: 240-254.
- Falcão NPS, CR Clement, SM Tsai, NB Comerford. 2009. Pedology, Fertility, and Biology of Central Amazonian Dark Earths In: WI Woods *et al.* (Eds.). *Amazonian Dark Earths: Wim Sombroek's Vision*. Springer Science + Business Media B.V.: 213-228.
- FAO. 2006. World reference base for soil resources 2006. A framework for international classification, correlation and communication. In: *Food and Agriculture Organization of the United Nations* (Ed.). *World Soil Resources Reports* 103. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fraser JA. 2010. *Caboclo* horticulture and Amazonian Dark Earths along the Middle Madeira River, Brazil. *Human Ecology* 38: 651-662.
- Fraser JA, AB Junqueira, NC Kawa, CP Moraes, CR Clement. 2011a. Crop diversity on anthropogenic dark earths in Central Amazonia. *Human Ecology* 39: 395-406.

- Fraser JA, W Teixeira, N Falcao, W Woods, J Lehmann, ABJunqueira. 2011b. Anthropogenic soils in the Central Amazon: from categories to a continuum. *Area* 43: 264-273.
- Glaser B, L Haumaier, G Guggenberger, W Zech. 2001. The 'Terra Preta' phenomenon: a model for sustainable agriculture in the humid tropics. *Naturwissenschaften* 88: 37-41.
- Glaser B, E Balashov, L Haumaier, G Guggenberger, W Zech. 2000. Black carbon in density fractions of anthropogenic soils of the Brazilian Amazon region. *Organic Geochemistry* 31: 669-678.
- Glaser B, JJ Birk. 2012. State of the scientific knowledge on properties and genesis of Anthropogenic Dark Earths in Central Amazonia (Terra Preta de Indio). *Geochimica et Cosmochimica Acta* 82: 39-51.
- Heckler S, S Zent. 2008. Piaroa manioc varieties: Hyperdiversity or social currency? *Human Ecology* 36: 679-697.
- IGAC. 2003. Estudio general de suelos y zonificación de tierras del departamento de Amazonas. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Bogotá.
- Junqueira AB, CJM Almekinders, TJ Stomph, CR Clement, PC Struik. 2016. The role of Amazonian anthropogenic soils in shifting cultivation: learning from farmers' rationales. *Ecology and Society* 21(1):12.
- Kern DC. 1996. Geoquímica e pedogequímica de sítios arqueológicos com terra preta na Floresta Nacional de Caxiuanã (Portel-Pará). PhD thesis. Belem: UFPA.
- Koorneef GJ. 2016. The influence of earthworms on P and C dynamics in Terra Preta vs. non-TP reference soils. Wageningen University. MSc thesis Soil Biology and Biological Soil Quality. 66 p.
- Lavelle P, D Bignell, M Lepage, W Wolters, P Roger, P Ineson, O Heal, S Dhillion. 1997. Soil function in a changing world: the role of invertebrate ecosystems engineers. *European Journal of Soil Biology* 33 (4): 159-193.
- Lehmann J, MC Rillig, J Thies, CA Masiello, WC Hockaday, D Crowley. 2011. Biochar effects on soil biota: A review. *Soil Biology & Biochemistry* 43: 1812-1836.
- Lepsch IF. 2002. Formação e Conservação dos solos. Sao Paulo. Oficina de Textos. 178 p.
- Ma C, RA Eggleton. 1999. Cation exchange capacity of kaolinite. *Clays and Clay Minerals* 47: 174-180.
- Madari B, VM Benites, TJF Cunha. 2003. The effect of management on the fertility of Amazonian Dark Earth Soils In: J. Lehmann *et. al.* (eds.). *Amazonian Dark Earths: Origin, Properties, Management*. Kluwer Academic Publishers. Printed in the Netherlands: 407-432.
- Malhi YR, JT Roberts, RABetts, TJ Killeen, W Li, CA Nobre. 2008. Climate change, deforestation, and the fate of the Amazon. *Science* 319: 169-172.
- Malhi YR, D Wood, TRBaker, JS Wright, OL Phillips, T Cochrane, P Meir, J Chave, S Almeida, L Arroyo, N Higuchi, TJ Killeen, SG Laurance, WF Laurance, SL Lewis, A Monteagudo, DA Neill, PN Vargas, NCA Pitman, CA Quesada, R Salomão, JNM Silva, AT Lezama, J Terborgh, RV Martínez, B Vicenti. 2006. The regional variation of aboveground live biomass in old-growth Amazonian forest. *Global Change Biology* 12: 1107-1138.
- Marengo JA. 2006. On the Hydrological Cycle of the Amazon Basin: A historical review and current State-of-the-art. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 21 (3a): 1-19.
- McKenzie BM, ARDexter. 1988. Radial pressures generated by the earthworm *Aporrectodea rosea*. *Biology and Fertility of Soils* 5 (4): 328-332.
- McKey D, TR Cavagnaro, J Cliff, R Gleadow. 2010. Chemical ecology in coupled human and natural systems: people, manioc, multitrophic interactions and global change. *Chemoecology* 20: 109-133.
- Meggors BJ. 1954. Environmental limitation on the development of culture. *American Anthropologist* 56: 801-824.
- Morcote-Ríos G, T León-Sicard. 2011. Las Terras Pretas del Igarapé Takana: Un sistema precolombino de cultivo en Leticia Amazonas, Colombia. Instituto de Ciencias Naturales Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 190p.
- Murcia-García UG, MC Huertas, JM Rodríguez, HO Castellanos. 2011. Monitoreo de los bosques y otras coberturas de la Amazonia colombiana, a escala 1:100.000. Cambios multitemporales en el período 2002 al 2007. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, Bogotá, Colombia. 226 p.
- Peña-Venegas CP, TJ Stomph, G Verschoor, JA Echeverri, PC Struik. 2016. Classification and use of natural and anthropogenic soils by indigenous

- communities of the Upper Amazon region of Colombia. *Human Ecology* 44:1–15.
- Piperno DR. 2011. The origins of plant cultivation and domestication in the New World Tropics: Patterns, process, and new developments. *Current Anthropology* 52: S453-S470.
- Quesada CA, J Lloyd, M Schwarz, S Patiño, TR Baker, C Czimczik, NM Fyllas, L Martinelli, GB Nardoto, J Schmerler, AJB Santos, MG Hodnett, R Herrera, FJ Luizã, A Arneth, G Lloyd, N Dezzio, I Hilke, I Kuhlmann, M Raessler, WA Brand, H Geilmann, JOM Filho, FP Carvalho, RNA Filho, JE Chaves, OFC Junior, TP Pimentel, R Paiva. 2010. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeosciences* 7: 1515-1541.
- Rittl TF. 2015. Challenging the claims on the potential of biochar to mitigate climate change. Wageningen University. The Netherlands. PhD Thesis. 145 p.
- Schmidt MJ, AR Py-Daniel, CP Moraes, RBM Valle, CF Caromano, WG Teixeira, CA Barbosa, JA Fonseca, MP Magalhães, DSC Santos, RS Silva, VL Guapindaia, B Moraes, HP Lima, EG Neves, MJ Heckenberger. 2014. Dark earths and the human built landscape in Amazonia: a widespread pattern of Anthrosol formation. *Journal of Archaeological Science* 42: 152-165.
- Topoliantz S, JF Ponge. 2003. Burrowing activity of the geophagus earthworm *Pontoscolex corethrurus* (Oligochaeta: Glossoscolecidae) in the presence of charcoal. *Applied Soil Ecology* 23 (3): 267-271.
- Topoliantz S, JF Ponge, D Arrouays, S Ballof, P Lavelle. 2002. Effect of organic manure and the endogeic earthworm *Pontoscolex corethrurus* (Oligochaeta: Glossoscolecidae) on soil fertility and bean production. *Biology and Fertility of Soils* 36 (4): 313-319.
- UNEP-OTCA. 2009. Environment outlook in Amazonia GeoAmazonia. The United Nations Environment Programme UNEP, The Amazon Cooperation Treaty Organization ACTO, The Research Center of the Universidad del Pacífico CIUP: Panamá, 2009. 166 p.
- Wilson WM, DL Dufour. 2006. Ethnobotanical evidence for cultivar selection among the Tukanoans: Manioc (*Manihot esculenta* Crantz) in the Northwest Amazon. *Culture & Agriculture* 28: 122-130.
- Winklerprins AMGA. 2002. House-lot gardens in Santarém, Pará, Brazil: Linking rural with urban. *Urban Ecosystems* 6: 43–65.

