

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA
ESCUELA DE POSGRADO**

**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**

por

Juliano Hojah da Silva

Tesis sometida a consideración de la Escuela de Posgrado
como requisito para optar por el grado de

Magister Scientiae en Agroforestería Tropical

Turrialba, Costa Rica, 2013

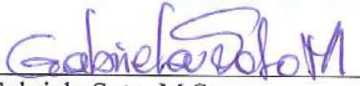
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA TROPICAL


FIRMANTES:




Tamara Benjamin, Ph.D.
Directora de tesis



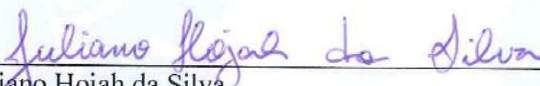
Gabriela Soto, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Rolando Cerda, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Thomas Dormody, Ph.D. / Francisco Jiménez, Dr. Sc.
Decano / Vicedecano de la Escuela de Posgrado



Juliano Hojah da Silva
Candidato

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mi padre Francisco Manoel da Silva y mi madre Zenaide Hojah da Silva, por toda enseñanza en mi vida y apoyo en mis estudios. A todos productores rurales que producen productos y alimentos sanos para nuestro buen vivir.

AGRADECIMIENTOS

A mi profesora consejera Tamara Benjamin, por la gran oportunidad, apoyo, motivación y enseñanza durante la realización de este proyecto de investigación.

A Gabriela Soto y Rolando Cerda, miembros del comité consejero, por su tiempo, conocimiento y aportes brindados durante las distintas etapas de este proyecto.

A mi esposa Violeta Martínez que siempre estuvo conmigo en todos los momentos, sabiendo compartir de todo con mucho cariño.

A Marina Abarca, Marcos Igue y toda su familia por todo el apoyo que proporcionaran para que yo pudiera empezar y concluir mis estudios en Costa Rica.

A todos los patrocinadores, en especial a Seachar.org, por todo apoyo brindado en el desarrollo del proyecto.

A Art Donnelly y Kate Sealtling por todo el apoyo en la instalación del experimento y en las ayudas aportadas.

A Doña Marina y Doña Katia, indígenas Bribri productoras de cacao que brindaron sus fincas para la presente investigación.

A Don Walter Rodriguez, que ha proporcionado conocimiento y espacio para trabajar en las instalaciones de APPTA

A Antony Salazar y Arturo Mora por todo su trabajo brindado, siempre acompañándome en las colectas de datos en campo.

A mi familia Bribri (Antony, Rosa, Michy y Sebastian) por la acogida, cariño y ricos momentos en la comunidad de Watsi.

A todos compañeros del CATIE y de la Asociación Altitude que proporcionaron momentos inolvidables en estos dos años de pura experiencia.

BIOGRAFÍA

El autor nació en 19 de diciembre de 1984, en la ciudad de São Paulo, SP, Brasil. Se graduó en el curso de Ingeniería Forestal en 2008 en la “Faculdade de Ciências Agrônômicas” (FCA), Botucatu, São Paulo, por la “Universidade Estadual Paulista” (UNESP). En el año de 2010 se especializó en el MBA de Negocios para la Sostenibilidad en el “Centro de Desenvolvimento Sustentável” CEDS en São Sebastião, São Paulo, por la “Universidade Católica de Santos” (UNISANTOS).

En su primero año de pregrado trabajó en el invernadero de especies forestales de la FCA, donde trabajaba en todo el proceso de producción de almácigos de especies forestales. En el segundo año continuó trabajando en el invernadero pero con otro propósito, a formar niños de escuelas públicas para la conciencia y prácticas socioambientales en el proyecto “Florestas Sociais: Semeando o Futuro”, donde enseñaba los niños toda la rutina de un invernadero y también sobre las cuestiones socioambientales actuales en una forma lúdica. Con su presencia por dos años en el invernadero empezó a cuestionar la utilización de los embalajes plásticos para la producción de almácigos, así que desarrolló una propuesta de embalajes biodegradables producidos a partir de yute (*Corchorus capsularis*) donde desarrolló un proyecto que fue aprobado y becado por el PIBIC-CNPq, Brasil.

Después de graduado, en el año de 2009 fue a trabajar por un año en la ONG “Elementos da Natureza” con educación ambiental en comunidades de pescadores tradicionales aisladas en el archipiélago de Ilhabela, São Paulo, Brasil. Después de esta experiencia, en el año de 2010 estuvo trabajando en la ONG “Verdescola”, donde trabajó como educador ambiental en un barrio de baja rienda con niños de 6 hasta 17 años, principalmente en los puntos de manejo de residuos sólidos, ecosistemas, agua, Bosque Atlántico, huerta y técnicas de permacultura.

Consciente de que necesitaba alcanzar nuevos horizontes y ampliar sus conocimientos y experiencias, en el 2011 ingresó al CATIE para la realización de la maestría en Agroforestería Tropical y la Especialización en Prácticas de Desarrollo.

CONTENIDO

DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTOS	IV
BIOGRAFÍA	V
CONTENIDO	VI
RESUMEN.....	VIII
SUMMARY	IX
ÍNDICE DE CUADROS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS	XI
LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS	XIII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos del estudio.....	3
1.1.1 <i>Objetivo general</i>	3
1.1.2 <i>Objetivos específicos</i>	3
1.2 Hipótesis del estudio	4
2 MARCO CONCEPTUAL.....	5
2.1 Biocarbón	5
2.2 Sistemas agroforestales de cacao en Talamanca	8
2.2.1 <i>Enfermedades del cacao</i>	10
2.2.1.1 <i>Monilia (Moniliophthora roreri)</i>	10
2.2.1.2 <i>Mazorca negra (Phytophthora palmivora)</i>	11
2.2.1.3 <i>El biocarbón, una posible estrategia contra las enfermedades</i>	12
2.3 El biocarbón en Talamanca, Costa Rica.....	13
2.3.1 <i>El grupo Seachar en Talamanca</i>	13
3 MATERIALES Y MÉTODOS	14
3.1 Localización	14
3.2 Evaluación del efecto de la aplicación del biocarbón en la productividad e incidencia de enfermedades en cacao y en la calidad del suelo	16
3.2.1 <i>Población y muestra</i>	16

3.2.2	<i>Biocarbón y gallinaza utilizados</i>	18
3.2.3	<i>Recolección de datos</i>	21
3.2.4	<i>Diseño Experimental</i>	23
3.2.5	<i>Análisis de los datos</i>	24
3.3	Efecto de la aplicación de biocarbón al suelo, con y sin gallinaza, en el crecimiento de plántulas de cacao.....	25
3.3.1	<i>Población, muestra, recolección de datos y diseño experimental</i>	25
3.3.2	<i>Análisis de los datos</i>	26
4	RESULTADOS.....	27
4.1	Efecto de la aplicación del biocarbón y gallinaza al suelo en los indicadores físico, químico y biológico del suelo	27
4.1.1	<i>Indicadores Físicos</i>	27
4.1.2	<i>Indicadores químicos</i>	28
4.1.3	<i>Indicadores biológicos</i>	31
4.2	Efecto del biocarbón en la productividad de cacao e incidencia de enfermedades.....	32
4.3	Efecto de la aplicación de biocarbón y gallinaza al suelo en macetas con plántulas de cacao	36
5	DISCUSIONES.....	37
5.1	Efecto del biocarbón y gallinaza en los indicadores físico, químico y biológico del suelo	37
5.1.1	<i>Indicadores Físicos</i>	37
5.1.2	<i>Indicadores químicos</i>	39
5.1.3	<i>Indicadores biológicos</i>	44
5.2	Efecto del biocarbón y gallinaza en la productividad de cacao e incidencia de enfermedades.....	46
5.3	Efecto de la aplicación de biocarbón y gallinaza en suelo de macetas con plántulas de cacao	48
6	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA EL DESARROLLO Y PARA ALIMENTAR INSUMOS DE CAPACIDADES SOBRE BIOCARBÓN	49
7	CONCLUSIONES	52
8	RECOMENDACIONES	53
9	BIBLIOGRAFÍA.....	55
	ANEXOS.....	63

RESUMEN

Este estudio fue dividido en tres partes, la primera parte evaluó en campo el efecto de la aplicación de biocarbón al suelo, con y sin gallinaza, sobre las calidades de los suelos, la producción de cacao e incidencia de enfermedades en frutos de cacao en sistemas agroforestales en la Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica. La segunda parte del estudio evaluó el crecimiento en altura y diámetro de cuello de plántulas de cacao en vivero. La otra parte analizó insumos para el uso y producción de biocarbón por estufas desarrolladas por la ONG Seachar. En campo, se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos en la densidad aparente del suelo, indicadores químicos (pH, Acidez, Ca, Mn, P, N, C, MO, C/N) y biomasa microbiana. La aplicación de biocarbón con gallinaza incrementó el peso húmedo de semillas de cacao por fruto. La combinación de gallinaza con biocarbón fue particularmente eficiente y fue el tratamiento con los mejores resultados en indicadores del suelo, peso de semillas de cacao y crecimiento de plántulas de cacao. En vivero fueron encontradas valores estadísticamente superiores del crecimiento en altura y diámetro de cuello de plántulas de cacao que recibieron tratamientos con biocarbón y gallinaza. Se verificó una buena aceptación de las estufas proporcionadas por la ONG Seachar por parte de los indígenas de la Reserva Indígena Bribri involucrados en el proyecto, que viene siendo comprobado por su uso y la alta producción de biocarbón por las familias que poseen las estufas.

Palabras-clave: gallinaza; fertilizantes orgánicos; enfermedades; rendimiento.

SUMMARY

This study was divided into three parts, the first part evaluated the effect of field application of biochar to soil, with and without chicken manure on soil qualities, cocoa production and incidence of diseases in fruits of cocoa in agroforestry systems in the Bribri Indigenous Reserve, Talamanca, Costa Rica. The second part of the study evaluated the growth in height and diameter of the neck of cocoa seedlings in nursery. The other part analyzed and inputs for use by production of biochar stoves developed by the NGO Seachar. In field, significant differences were found between treatments in soil bulk density, chemical indicators (pH, acidity, Ca, Mn, P, N, C, MO, C/N) and microbial biomass. The application of biochar with chicken manure increased wet weight of cocoa seeds per fruit. The combination of biochar with chicken manure was particularly efficient and was the treatment with the best results in soil indicators, weight of cocoa beans and cocoa seedling growth. In nursery were found statistically higher values of height and diameter growth of cocoa seedlings neck receiving biochar and chicken manure treatments. We verified a good acceptance of the stoves provided by the NGO Seachar by Indigenous Bribri Reserve involved in the project, which has been proven by its use and the high production of biochar for families who own stoves.

Key words: chicken manure, organic fertilizers, diseases, productivity.

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Clones de cacao de los jardines clonales en Talamanca, Costa Rica.....	16
Cuadro 2. Especies arbóreas encontradas en los jardines clonales de cacao estudiados en las comunidades de Watsi y Suretka. Talamanca, Costa Rica, 2012.....	17
Cuadro 3. Propiedades químicas de los suelos de los jardines clonales de Watsi (inceptisol) y Suretka (ultisol) al inicio del experimento. Talamanca, Costa Rica, 2012.....	18
Cuadro 4. Propiedades químicas del biocarbón y de la gallinaza aplicados a suelos de jardines clonales de cacao y a sustratos de vivero. Talamanca, Costa Rica, 2012	19
Cuadro 5. Cálculo representativo de cantidad de biocarbón utilizado por hectárea asumiendo aplicación al suelo en área total. Talamanca, Costa Rica, 2012.....	21
Cuadro 6. Indicadores químicos, físicos y biológicos utilizados para determinar la calidad de suelos entre los tratamientos aplicados.....	22
Cuadro 7. Tratamientos del experimento en campo.....	24
Cuadro 8. Tratamientos del experimento de almácigos de cacao en vivero.....	26
Cuadro 9. Promedio de los indicadores químicos del suelo en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) al final del experimento. Talamanca, Costa Rica, 2012.....	29
Cuadro 10. Promedio de los indicadores químicos del suelo en el jardín clonal de Suretka (ultisol) al final del experimento. Talamanca, Costa Rica, 2012.....	31

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sistema agroforestal de cacao (<i>Theobroma cacao</i> L.) en consorcio con laurel, pejibaye, limón y banano, comunidad de Suretka, Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica..	08
Figura 2. Presencia del hongo monilia (<i>Moniliophthora roreri</i>) en frutos de cacao.....	10
Figura 3. Presencia del hongo mazorca Negra (<i>Phytophthora palmivora</i>) en frutos de cacao.....	11
Figura 4. Proceso de combustión, montaje y cocción en la Estufa Finca, biocarbón como producto final.....	14
Figura 5. Mapa de ubicación de los jardines clonales de Watsi y Suretka y del vivero de APPTA, Valle de Talamanca, provincia de Limón, Costa Rica.....	15
Figura 6. Aplicación del biocarbón (a) y gallinaza (b) en los jardines clonales estudiados.....	20
Figura 7. Promedio de la densidad aparente de los suelos en los distintos tratamientos en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) (a) y en el jardín clonal de Suretka (ultisol) (B), Talamanca, Costa Rica, 2012.....	27
Figura 8. Biomasa microbiana del suelo (inceptisol) en el jardín clonal de Watsi en los distintos tratamientos al final del experimento, Talamanca, Costa Rica, 2012.....	32
Figura 9. Promedio de número de frutos totales por árbol (a) y número de frutos sanos por árbol (b) en los distintos tratamientos en los jardines clonales estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012.....	33
Figura 10. 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 estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012.....	34

Figura 11. Producción estimada de semillas de cacao en baba (a) y seca (b) por hectárea en los distintos tratamientos del experimento en campo, Talamanca, Costa Rica, 2012.....	35
Figura 12. Promedio de número de frutos (a) y porcentaje (%) de incidencia de monilia (<i>Moniliophthora roreri</i>) en los distintos tratamientos en los jardines clonales estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012.....	36
Figura 13. Efecto del biocarbón y gallinaza en el crecimiento de plántulas de cacao en altura (a) y crecimiento del diámetro del cuello (b) después de 2 meses de la siembra, Talamanca, Costa Rica, 2012.....	37
Figura 14. Dinámica realizada con participantes (a) y manejo de las Estufas Finca (b) en una de las escuelas de campo realizadas por Seachar en la comunidad de Suretka, Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica, 2012.....	51
Figura 15. Actividades de los talleres de biocarbón: aplicación en cacaotal en la comunidad de Shiroles (a) y producción de compost en finca de la comunidad de Watsi (b), Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica, 2012.....	51

LISTA DE UNIDADES, ABREVIATURAS Y SIGLAS

ACOMUITA: Asociación Comisión de Mujeres Indígenas de Talamanca

AIC: criterios de *Akaike*

Al: aluminio

ANOVA: análisis de variancia

APPTA: Asociación de Pequeños Productores de Talamanca

BIC: criterio de información *Bayesiano*

C: carbono

Ca: calcio

CATIE: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza

cc: centímetro cúbico

CIC: capacidad de intercambio catiónico

CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva

cm: centímetro

cmol(+): centimol

C/N: relación carbono/nitrógeno

Cu: cobre

DA: densidad aparente

FAO: “Food and Agriculture Organization”

Fe: hierro

g: gramo

GPS: “Global Positioning System”

ha: hectárea

HG: humedad gravimétrica

K: Potasio

kg: kilo

kPa: kilopascal

l: litro

m: metro

MAP: Programa Agroambiental Mesoamericano

Mg: magnesio

mg: miligramo

mm: milímetro

mmolc: milimol de carga

Mn: manganeso

MO: materia orgánica

MPa: megapascal

N: nitrógeno

P: fósforo

PCC: Proyecto Cacao Centroamérica

pH: potencial de hidrógeno

t: tonelada

TB: tratamiento con biocarbón

TBG: tratamiento con biocarbón y gallinaza

TC: tratamiento control

TG: tratamiento con gallinaza

Zn: zinc

1 INTRODUCCIÓN

En la Amazonía hay unidades de suelo con alta fertilidad, insertado en un paisaje de suelos infértiles (Lehmann *et al.* 2003). Estos suelos fueron alterados por el hombre, hace 500 a 2500 años. Se encuentran fragmentos de cerámica y artefactos indígenas integrados en su horizonte superficial, lo que resulta en su terminología de *Terra Preta de Índio*. Se conocen mundialmente por tener mejores características que los suelos de su alrededor, incluyendo una mayor productividad agrícola, mayor capacidad de retener agua y nutrientes, secuestro de carbono y un alto contenido de materia orgánica y nutrientes, como el nitrógeno, fósforo, potasio y calcio (Cunha *et al.* 2009; Linhares *et al.* 2012).

Las mejores características encontradas en estos suelos, están relacionadas con la alta tasa de carbono orgánico encontrada, siendo que gran parte de este carbono proviene de vestigios de quemas (Lehman *et al.* 2003). El creciente reconocimiento del potencial de estos suelos como un modelo para la gestión moderna de la fertilidad del suelo ha impulsado una serie de actividades de investigación con la aplicación de carbón como una enmienda de suelos agrícolas. La descomposición térmica de biomasa de origen vegetal, en ausencia parcial o total de oxígeno (pirolisis), genera un material sólido rico en carbono denominado carbón. Este material cuando es producido para la aplicación al suelo, es denominado biocarbón (biochar) (Fuertes *et al.* 2010; Sohi *et al.* 2010).

Estudios actuales reportan efectos benéficos del biocarbón en las propiedades químicas, físicas (Steiner *et al.* 2007; Kimetu *et al.* 2008; Major *et al.* 2010) y biológicas del suelo (Zagal *et al.* 2002; Das *et al.* 2008). En suelos estudiados hasta el momento, el biocarbón ha aumentado significativamente el pH, la capacidad de intercambio catiónico (CIC), calcio (Ca) y potasio (K) intercambiable, el total de carbono (C), ha disminuido la acidez (Kimetu *et al.* 2008; Major *et al.* 2010; Zwieten *et al.* 2010) y ha cambiado la cantidad de actividad microbiana en el suelo (Das *et al.* 2008). También hay una mejora en la permeabilidad del suelo y la capacidad de retención de agua y por lo tanto la disponibilidad de esta para las plantas (Asai *et al.* 2009). El biocarbón mejora las características de suelo, favoreciendo un sistema ideal para las plantas con una mayor productividad.

Algunos estudios reportan mayor productividad relacionada con la aplicación de biocarbón a los suelos. Major *et al.* (2010) encontraron mejoras significativas en la productividad de maíz hasta después de cuatro años de la aplicación de biocarbón en el suelo. Yeboah *et al.* (2009) encontraran mejoras en la producción de maíz con la aplicación de biocarbón combinado con estiércol bovino. Van Zweiten *et al.* (2010) llegaron a encontrar un incremento de dos veces y medio mayor en la productividad de trigo con la aplicación de biocarbón en interacción con fertilizante. Los trabajos reportan que para el biocarbón sea más efectivo es importante aplicar en conjunto un fertilizante rico en nitrógeno para un mejor equilibrio en la relación de carbono y nitrógeno en el suelo y que los resultados sean más significativos. En un estudio realizado en Brasil encontraran que la aplicación de biocarbón en conjunto con gallinaza aumentó la capacidad de intercambio catiónico en la zona radicular de los cultivos, redujó la lixiviación de nutrientes y así mejoró la producción de cultivos. El autor comentó que una combinación de biocarbón y gallinaza podría imitar las propiedades favorables de la “Terra Preta de Índio” (Steiner *et al.* 2007). Sistemas agroforestales y la aplicación de biocarbón en el suelo pueden aumentar la eficiencia de fertilizantes y aumentar la capacidad productiva (Stavi y Lal 2012), sin embargo, no se han encontrado estudios o reportes sobre el efecto y las interacciones del biocarbón en cacaotales, sistemas agroforestales, o en producción orgánica. La mayoría de los estudios se han enfocado en monocultivos agrícolas convencionales.

Los cacaotales orgánicos de la región de Talamanca, Costa Rica, tienen rendimiento promedio entre 100 y 200 kg/ha/año (Somarriba *et al.* 2003). Estos valores están por debajo del reportado en fincas convencionales en Ecuador y Brasil que tienen un promedio de 1000 kg/ha/año y que en algunos sitios pueden llegar a producir hasta 3000kg/ha/año (Chepote 2003; Enríquez 2004). Los cacaotales de Talamanca requieren mejoras en su manejo para aumentar los rendimientos. Se sabe que hay varios factores que están impactando la producción de cacao, por ejemplo la alta incidencia de enfermedades en los frutos del hongo monilia (*Moniliophthora roreri*) (Oliveira y Luz 2005), principalmente causando una reducción fuerte en la producción de frutas sanas. Se debe buscar alternativas para el manejo de esta enfermedad, ya que un gran número de fincas son manejadas bajo sistema orgánico (Hinojosa *et al.* 2003; Cerda 2007), donde el laboreo es mínimo y no utilizan fertilizantes y agroquímicos (Guiracocha *et al.* 2001; Somarriba y Harvey 2003; Cerda 2007). No solamente las enfermedades impactan los rendimientos, también la fertilidad del suelo en la zona es baja. Debido que los productores de

Talamanca utilizan poca fertilización, los valores de fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca) y el pH son bajos y el contenido de aluminio (Al) es alto (Cerdea 2007). Es importante la búsqueda de soluciones a estos problemas, como la aplicación del biocarbón, que puede tener un impacto significativo sobre los medios de vida de los productores.

Esta investigación evaluó los efectos de la aplicación del biocarbón al suelo, con y sin la aplicación de gallinaza, en sistemas agroforestales de cacao y en el crecimiento de plántulas de cacao en Talamanca, Costa Rica. El estudio fue conformado por un experimento en campo y uno en vivero de almácigos de cacao. En campo se evaluaron las propiedades físico, química y biológicas del suelo, la productividad de cacao e incidencia de monilia (*Moniliophthora roreri*) y mazorca negra (*Phytophthora palmivora*) en cuatro tratamientos distintos. En vivero se evaluó crecimiento en altura y diámetro de cuello de plántulas de cacao con dos meses de edad.

1.1 Objetivos del estudio

1.1.1 Objetivo general

Estudiar el efecto de la aplicación de biocarbón sobre la calidad de suelos y en la producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en sistemas agroforestales en la Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica.

1.1.2 Objetivos específicos

1) Evaluar la producción de frutos en clones de cacao, con y sin aplicación de biocarbón y su interacción con la aplicación de gallinaza.

2) Evaluar la incidencia de monilia (*Moniliophthora roreri*) y mazorca negra (*Phytophthora palmivora*) en frutos de cacao de seis clones con y sin aplicación de biocarbón y su interacción con la aplicación de gallinaza.

3) Evaluar indicadores físicos, químicos y biológicos de calidad de suelo antes y después de la aplicación de biocarbón y su interacción con la aplicación de gallinaza.

4) Evaluar el crecimiento de plántulas de cacao en vivero con y sin aplicación de biocarbón y su interacción con la aplicación de gallinaza.

1.2 Hipótesis del estudio

- 1) La aplicación de biocarbón aumenta el número de frutos y la productividad de cacao en sistemas agroforestales.

- 2) La aplicación de biocarbón disminuye la incidencia de monilia (*Moniliophthora roreri*) y mazorca negra (*Phytophthora palmivora*) en los frutos de cacao.

- 3) La aplicación de biocarbón mejora calidades físicas, químicas y biológicas del suelo.

- 4) La aplicación de biocarbón aumenta el crecimiento de plántulas de cacao.

2 MARCO CONCEPTUAL

2.1 Biocarbón

Según la definición utilizada por la FAO, los Anthrosoles comprenden suelos que han sido profundamente modificados por actividades humanas, tales como la adición de materia orgánica o residuos orgánicos de los hogares, riego y cultivo (IUSS 2007). El grupo Anthrosol incluye los suelos llamados de *Terra Preta de Índio* de la Amazonía central, son suelos oscuros de alta fertilidad, insertados en un paisaje caracterizado por tener suelos de baja fertilidad (Sohi *et al.* 2010). *Terra Preta*, del portugués, significa suelo negro debido a su color oscuro diferenciado de los suelos característicos de la región.

Terra Preta de Índio, es un vestigio de suelo de asentamientos precolombinos con alto contenido de carbono orgánico que contiene una gran proporción de carbón de quema (Lehmann *et al.* 2003). Conociendo estos suelos, investigadores empezaron a desarrollar técnicas para imitarlos, y es ahí que surge el término biocarbón (biochar). Biocarbón es un producto sólido rico en carbono resultante de la calefacción de biomasa en un ambiente de oxígeno limitado. Debido a la presencia de anillos aromáticos en su estructura, el biocarbón es químicamente y biológicamente más estable en comparación con la materia orgánica con la que fue producido. Los anillos son más difíciles de ser degradados por microorganismos que otras formas químicas presentes en la materia orgánica de origen (Fuertes *et al.* 2010; Sohi *et al.* 2010). El suelo que recibe la aplicación de este pierde poco carbono con el paso del tiempo (Steiner *et al.* 2007).

Actualmente el biocarbón es producido a partir de varias fuentes, por ejemplo, residuos forestales y de la agroindustria (restos de palma, bagazo de caña), gallinaza, bambú, lodo, entre otros (Chan *et al.* 2008; Das *et al.* 2008). El proceso de carbonización todavía es el mismo del siglo anterior, sin embargo la utilización de técnicas sencillas y tradicionales están siendo cambiadas por métodos más eficientes, donde hay mayor eficiencia energética, menor emisión de gases y mejor aprovechamiento de los productos útiles derivados de la carbonización (Colombo *et al.* 2006).

El biocarbón ha demostrado su potencial en la producción agrícola, sus efectos en el suelo y sus características químicas, físicas e biológicas. Los principales efectos químicos han impactado

la retención de nutrientes a través de una reducción en la lixiviación de los nutrientes y la mejora de la capacidad de intercambio catiónico, el pH y la disminución de aluminio, sin embargo hay otros efectos que no han entendido hasta el momento (Kimetu *et al.* 2008). En estudios previos la aplicación de biocarbón en un alfisol aumentó el pH del suelo de 4,83 para 7,78 en la tasa más alta de aplicación (50 t/ha) y eliminó completamente el aluminio intercambiable del suelo incluso a la tasa más baja de aplicación (10 t/ha) del biocarbón (Chan *et al.* 2008). La capacidad de intercambio catiónico (CIC) de un ultisol se incrementó con la aplicación de biocarbón en 38,7 mmolc/kg en zonas moderadamente degradados, en sitios muy degradados aumentó en 22.7 mmolc/kg, superiores a la CIC de parcelas de control. También la aplicación de biocarbón tuvo mayor impacto en el aumento de carbono orgánico del suelo, con un incremento del 45% por encima de las parcelas de control (Kimetu *et al.* 2008).

Otros estudios sugieren que el uso del biocarbón puede disminuir la lixiviación de nutrientes en la producción agrícola. Un estudio realizado en columnas de suelos (mesic Typic Hapludolls) (Laird *et al.* 2010), que contenían 0, 5, 10, y 20 g de biocarbón/kg de suelo, mostró una disminución significativa en la lixiviación total de N, P, magnesio (Mg) y silicio (Si) con el aumento de biocarbón en el suelo, a pesar de que el biocarbón añade cantidades de estos nutrientes. En las columnas que recibieron las tasas más altas de biocarbón, hubo una disminución de 11 y 69% de lixiviados de N y P respectivamente. Con aumento de biocarbón en el suelo, hubo disminución de hasta 77% de lixiviados del suelo (Busscher *et al.* 2010).

Otros estudios demuestran mejoras en algunas calidades físicas de suelos. La agregación de biocarbón afectó la infiltración y la capacidad de retención de agua y mejoró la humedad de un suelo arcillo arenoso (thermic Typic Kandiudult) en un drenaje libre (Busscher *et al.* 2010). La resistencia a la tracción de un suelo testigo era de 192 kPa, valor que se redujo considerablemente a 135, 107 y 71 kPa, con aplicación de 10, 25 y 50 t/ha de biocarbón respectivamente (Chan *et al.* 2008). En otro estudio la aplicación del nivel más alto de biocarbón (44 t/ha) presentó resistencia a la penetración del suelo mucho menor que el control, bajando hasta 240 MPa la resistencia a la penetración del suelo (Busscher *et al.* 2010).

Algunos trabajos sobre biocarbón reportan actividad biológica del suelo, lo que puede influir en el equilibrio de la materia orgánica del suelo y la disponibilidad de nutriente para las plantas

(Zagal *et al.* 2002). Se reportó que lombrices prefirieron suelos a los que se les aplicó biocarbón comparado con los suelos control. También la actividad microbiana responde de diversas formas con la aplicación de distintos biocarbones, suelos, fertilización y cultivos agrícolas, pudiendo disminuir o aumentar dicha actividad hasta 36% con la aplicación de biocarbón producido de una mezcla de lodo con residuos de madera combinado con fertilizante (Das *et al.* 2008).

La influencia del biocarbón en las características de los suelos ha demostrado impactos positivos en la productividad de los cultivos, diversos trabajos reportan mejora en la producción de distintos cultivos agrícolas cuando se aplica biocarbón al suelo. Dos tipos de biocarbón aplicados a un alfisol, incrementaron significativamente la materia seca total de rábano. Comparados con el testigo hubo un aumento de 42% con aplicación de 10 t/ha de biocarbón, y 96% a la tasa de 50 t/ha. Con aplicación de N, los incrementos fueron mayores, llegando a un aumento de 320% con aplicación de 50 t/ha de biocarbón con 100 Kg/ha de N (Chan *et al.* 2008). En un oxisol degradado de Kenia, después de tres aplicaciones repetidas de biocarbón (7 t/ha), encontraron una duplicación del rendimiento de maíz por más de dos años, que no se explicó totalmente por la disponibilidad de nutrientes por parte del biocarbón, sugiriendo mejora de otros factores en el suelo (Kimetu *et al.* 2008). Por otro lado, en un invernadero, el efecto de biocarbón en la productividad de maíz fue estudiado en dos tipos de suelo (franco arenoso y franco limoso) con diferentes combinaciones de fertilizantes. El mayor valor de peso seco de tallos de maíz se registró con la aplicación de 3 t/ha de biocarbón con 120 kg N/ha. El peso seco varió de 40 g en el testigo hasta 45 g por cada maceta para la aplicación de 3 t/ha de biocarbón con N en el suelo franco arenoso y de 31 hasta 35 g por cada maceta en el suelo franco limoso (Yeboah *et al.* 2009).

Debido a los estudios que han encontrado mejoras en la producción agrícola se indica el mérito de estudiar su potencial en diversos suelos y sistemas agrícolas. Son necesarias más investigaciones para conocer mejor los mecanismos que mejoran la fertilidad y así optimizar el uso del biocarbón en el suelo. Observaciones a más largo plazo serían pertinentes para comprender plenamente la sostenibilidad de las adiciones de materia orgánica estable en revertir la degradación del suelo (Kimetu *et al.* 2008; Steiner *et al.* 2007).

2.2 Sistemas agroforestales de cacao en Talamanca

El cacao (*Theobroma cacao* L.), nativo de la zona alta del río Amazonas en América del Sur, fue domesticado y cultivado por las comunidades indígenas y mestizas de América Central hace más de 3.000 años (Somarriba *et al.* 2010). En la región de Talamanca, Costa Rica, son manejados por los pequeños productores en sistemas agroforestales con árboles maderables, frutales y de sombra en parcelas de más de 70 años, siendo en conjunto con el banano los cultivos comerciales más importantes en esta región (Orozco *et al.* 2008). Las parcelas de cacao tienen una superficie promedio de 1,3 ha (Somarriba *et al.* 2003), ocupando un 12 por ciento del territorio de la Reserva Indígena de Talamanca (Borge y Castillo 1997). Los propietarios son indígenas de las etnias Bribri y Cabécar y poseen de una a tres parcelas con cacao y/o banano, generalmente separadas. Además, poseen huertos caseros, áreas de vegetación secundaria en barbecho (tacotal), bosque y, en algunos casos, potreros (Somarriba *et al.* 2003). El cacao es sembrado en densidad de 630 hasta 1111 árboles de cacao/ha. Las especies asociadas al cacao están a una densidad promedio de 234 árboles/ha, con una composición florística dominada por frutales, con un total de 35 especies arbóreas, separados en tres estratos con una altura promedio de 17,5 m del estrato superior (Figura 1) (Guiracocha *et al.* 2001; Orozco *et al.* 2008).



Figura 1. Sistema agroforestal de cacao (Theobroma cacao L.) en consorcio con laurel, pejibaye, limón y banano, comunidad de Suretka, Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica. (Fuente: Archivo personal 2012).

Los sistemas agrícolas de Talamanca tienden a ser muy estables, esto por encontrarse en una selva tropical húmeda donde presenta pocas variaciones en temperatura, humedad y precipitación. La estabilidad y sustentabilidad de los sistemas agrícolas tradicionales se da por la complejidad estructural, asemejándose al ecosistema del bosque local, sin embargo muchas veces presentan una baja productividad (Borge y Castillo 1997).

La productividad de los cacaotales orgánicos de Talamanca es muy baja, esto debido a la falta de manejo de la sombra, incidencia de enfermedades, baja densidad de árboles de cacao y propiedades del suelo (Somarriba *et al.* 2003; Somarriba *et al.* 2010). Los suelos poseen bajos valores de P (4,41 mg/l), K (0,18 cmol(+)/l), Ca (7,06 cmol(+)/l) y pH (5,33) y alto contenido de Al (1,51 cmol(+)/l) (Cerdea 2007). Los valores óptimos estarían entre (10-20 mg/l), (0,2-0,6 cmol(+)/l), (4-20 cmol(+)/l), (5,6-6,5) y (< 0,5 cmol(+)/l) respectivamente (Bertsch 1995). Los valores de nutrientes en los suelos de estos cacaotales podrían mejorar con la aplicación de residuos orgánicos en las parcelas (Chepote *et al.* 2003).

Los cultivos orgánicos, como lo de cacao, con una adecuada fertilización basada en la materia orgánica, proporciona el medio para que los microorganismos del suelo se desarrollen y estos liberen los nutrimentos presentes en la materia orgánica para que las plantas puedan aprovechar de forma apropiada (Enríquez 2004). La corrección de la acidez del suelo también es un factor que favorece el crecimiento de cacaotales (Chepote *et al.* 2007). Un cacaotal con una buena nutrición es capaz de soportar mejor las adversidades del clima, las enfermedades, desarrollar mejor el potencial genético de su genoma y dar un producto de mejor calidad (Enríquez 2004; Chepote *et al.* 2007).

En suelos que no hay impedimento, la raíz pivotante del cacao es recta, pudiendo crecer entre 120 a 150 cm, con algunas radículas en su terminación que absorben agua y nutrientes. Sin embargo, las raíces secundarias que están en los primeros 25 cm de suelo son las de mayor volumen (entre 64 a 90%), ubicadas principalmente en la superficie de su propia sombra. Las radículas funcionales están casi que en la superficie del suelo y bajo condiciones de buen cultivo llegan a estar en contacto con el mantillo que cubrelo. (Enríquez 2004; Chepote *et al.* 2007).

2.2.1 Enfermedades del cacao

2.2.1.1 Monilia (*Moniliophthora roreri*)

El cacao es uno de los productos comerciales más importantes en Talamanca, sin embargo con la llegada de la enfermedad monilia, la producción de los cacaotales llegaron a colapsar por un momento (Borge y Castillo 1997). Monilia es una enfermedad fúngica de frutos, que afecta directamente la producción de cacao, llegando a causar pérdidas de hasta 90%. Esta enfermedad es uno de los factores más limitantes de la producción de cacao en Costa Rica (Oliveira y Luz 2005). La infección puede darse en cualquier fase del desarrollo del fruto (Figura 2), esporádicamente aparecen frutos que aparentan estar sanos pero que internamente están dañados (Phillips-Mora y Cerda 2010; Oliveira y Luz 2005).



Figura 2. Presencia del hongo monilia (*Moniliophthora roreri*) en frutos de cacao. (Fuente: Archivo personal, 2012).

Constantemente, los mayores problemas del productor de cacao están ligados a las enfermedades y a su combate. En la actualidad, se están encontrando que con aplicaciones de microorganismos antagonistas se puede controlar el hongo en campo y reducir la incidencia de la enfermedad, necesitando profundizar en las investigaciones en este tema (Enríquez 2004). Los frutos ya enfermos cuando cortados y dejados al suelo son degradados por microorganismos y dejan de ser fuente importante de la enfermedad. Otras estrategias de control de la enfermedad en sistemas orgánicos son la eliminación de plantas susceptibles y el control de la humedad por podas de las plantas de cacao, reducción de la sombra y el uso de clones resistentes (Phillips-Mora y Cerda 2010; Oliveira y Luz 2005).

2.2.1.2 Mazorca negra (*Phytophthora palmivora*)

Phytophthora palmivora, conocida como mazorca negra, es la especie con el mas amplio rango de hospederos, con habilidades de infectar casi todas las partes de la planta, lo que hace que sea uno de los patógenos más importantes en regiones de clima caliente en el mundo (Oliveira y Luz 2005). En el cacao los daños más importantes se dan en los frutos, particularmente en los cercanos a la madures (Phillips-Mora y Cerda 2010). Uno de los principales síntomas de mazorca negra es el apareamiento de pequeñas manchas de color café en la superficie de los frutos, dados principalmente en condiciones de alta humedad (Figura 3) (Oliveira y Luz 2005).



Figura 3. Presencia del hongo mazorca Negra (*Phytophthora palmivora*) en frutos de cacao. (Fuente: Archivo personal, 2012).

En agricultura orgánica debe aprovecharse de todos los conocimientos que se dan para protección de la producción. Agentes bióticos vienen siendo estudiados como inductores de resistencia, con muchas posibilidades de combate a las plagas, pero que en el caso de cacao aún no se han experimentado muy bien (Enríquez 2004). Hasta el momento la mazorca negra viene siendo controlada en sistemas orgánicos principalmente con medidas profilácticas, además de prácticas culturales como: remoción de frutos infectados, cosechas frecuentes, eliminación de montículos de cáscaras, reducción de sombra, podas, drenaje del suelo, todo esto para crear un ambiente desfavorable a la enfermedad (Oliveira y Luz 2005).

2.2.1.3 El biocarbón, una posible estrategia contra las enfermedades

La resistencia es la capacidad de un organismo para excluir o superar, completamente o en algún grado, el efecto de un factor perjudicial de un patógeno o de otro tipo (Agrios 1998). Resistencia inducida en plantas es un fenómeno que la planta, una vez estimula apropiadamente, demuestra resistencia a la inoculación de un patógeno (Van Loon 1997). La resistencias inducida puede ser dada por infección del mismo o de otro patógeno, inoculación de algún organismo no patógeno, tratando la planta con compuestos obtenidos del propio patógeno o por compuestos naturales (Agrios 1998)

Además de los beneficios mencionados anteriormente de la aplicación del biocarbón en suelos agrícolas, algunos trabajos reportan la inducción a la resistencia de plantas a patógenos por parte del biocarbón. Sin embargo ha sido poco estudiado en este sentido. Matsubara *et al.* (2002) observaron que el biocarbón en combinación a una micorriza arbuscular (*Glomus* sp.) tiene efecto supresor en el crecimiento de fusarium (*Fusarium oxysporum*) en raíces de espárrago (*Asparagus officinalis* L.). Elad *et al.* (2010) encontraron que suelo que recibió aplicación de biocarbón ha inducido la resistencia foliar por hongos patógenos (*Botrytis cinerea* y *Leveillula taurica*) en plantas de tomate y chile y la disminución del ataque de ácaros (*Polyphagotarsonemus latus* Banks) en plantas de chile. No encontraron diferencias entre las diferentes dosis de biocarbón aplicado (1 a 5%). Henreaux (2012) encontró que el biocarbón retardó la propagación de la marchitez bacterial (*Ralstonia solanacearum*) en el tomate, siendo significativo independiente del tipo de fertilización utilizada.

Se sabe que la mayoría de los mecanismos de defensa inducibles son sistémicos, lo cual puede ser activado en las raíces siendo trasladado para toda la planta. La respuesta de defensa se da por alteraciones en la pared celular, expresión de proteínas relacionadas con la patogenicidad y otros mecanismos de defensa a nivel estructural o bioquímico (Riveros Angarita 2010). Otra manera de inducción a la resistencia es con la aplicación de compuestos químicos en el suelo que son absorbidos por los pecíolos de las raíces y trasladados por la planta generando la inducción a resistencia (Agrios 1998). El biocarbón podría estar funcionando como inductor a resistencia de plagas como un activador en las raíces o liberador de sustancias que la planta absorbe y estos inducen a la resistencia de las plantas.

2.3 El biocarbón en Talamanca, Costa Rica

Talamanca tiene una economía basada en mercado, donde casi todo tiene valor de cambio monetario, con algunas familias con economía de subsistencia y/o autoconsumo (Borge y Castillo 1997). El cacao es uno de los cultivos agrícolas con mayor importancia en la Reserva Indígena Bribri, lo cual genera ingresos sustanciales a las familias productoras. Muchos productores poseen certificación orgánica de sus cacaotales otorgados en conjunto por asociaciones locales (Orozco *et al.* 2008). Mismo con tal importancia del cacao, él acaba recibiendo poco manejo por muchos de los productores.

Los indígenas de la reserva no tienen costumbre de fertilizar sus cacaotales de manera directa, muchas veces esta fertilización es realizada de forma indirecta, como por los montículos de cascaras que depositan después de una cosecha, por siembra de especies leguminosas (ej. *Inga ssp.*), por tumba de árboles y palmas para retirada de algún producto (maderables y pejibaye), y por la poda de control de sombra y del cacao. De acuerdo con Chepote *et al.* (2007), cacaotales que reciben atención en la fertilización presentan producciones superiores y mayor sostenibilidad en el tiempo.

Por la presencia de especies leñosas, los sistemas agroforestales permiten obtener biomasa de la madera producida en la zona. En los sistemas agroforestales de cacao de los indígenas Bribri de Talamanca, la tasa de corta de madera es menor al incremento en volumen de los árboles aprovechables, lo que permite un incremento neto de las existencias de madera aprovechable (Suárez 2001; Suárez 2008). Además, los árboles que son tumbados para aprovechamiento maderable, generan material que queda disponible en las parcelas, el cual podría ser aprovechado para la producción de biocarbón. Con la oportunidad de producirse una enmienda orgánica para el suelo dentro de la propia finca, con costos muy reducidos podría ser una de las soluciones para la falta de fertilización de los cacaotales, todavía más si los productores empiezan vez resultados benéficos de esta actividad. Muchos hogares dependen del cacao como fuente de ingreso, así que si ellos llegan a producir más, las familias tendrían mejores ingresos.

2.3.1 El grupo Seachar en Talamanca

El Grupo de Trabajo en Biocarbón Seattle (Seachar) es una organización sin fines de lucro, que tienen como misión desarrollar, promover y compartir herramientas para una vida carbono

negativo. Tienen como valores llevar a cabo la misión del grupo, de tal manera que promueva y proteja la diversidad y la igualdad de la vida, compartiendo abiertamente los conocimientos y restableciendo el equilibrio a través de actos de reciprocidad. Llevan como visión la responsabilidad de ciudadanos de una comunidad global que ayudan a crear el futuro positivo. A través de la investigación, extensión educativa y el desarrollo de tecnología del carbón quieren compartir herramientas para esto (Seachar 2012).

Seachar llegó en la región de Talamanca en el año de 2011 para trabajar en el proyecto *Estufa Finca* en conjunto con los indígenas de la Reserva Indígena Bribri. Este proyecto tiene como objetivo compartir de la experiencia y diseño de una estufa para la cocina que logra generar un ahorro de 40% de leña y que emite 92% menos partículas y 87% menos monóxido de carbono en el humo generado al momento de la quema, además de producir carbón al final de cada ciclo de quema (Figura 4). De acuerdo con Seachar (2012), cada estufa tiene capacidad de producir cantidades de 3 a 5 kilos de biocarbón diarios, dependiendo directamente de la cantidad de comida producida por las familias.



Figura 4. Proceso de combustión, montaje y cocción en la Estufa Finca, biocarbón como producto final. Fuente: Archivo personal, 2012.

3 MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización

El trabajo de campo fue desarrollado en el valle de la Reserva Indígena Bribri de Talamanca, Cantón Talamanca, Provincia Limón, Costa Rica (Figura 5). La Reserva Indígena Bribri está ubicada entre las posiciones geográficas 9°00′-9°50′ N y 82°35′-83°05′ O, con una altitud que llega hasta los 200 m sobre el nivel del mar. El trabajo de vivero fue desarrollado en el vivero de

las instalaciones de la Asociación de Pequeños Productores de Talamanca (APPTA) ubicado en Sand Box, Cantón Talamanca, Provincia Limón, Costa Rica, en las posiciones geográficas 9°37' N y 82°49' O, en una altitud de 46 m sobre el nivel del mar. Los dos locales de trabajo están ubicados en la zona baja de Talamanca.

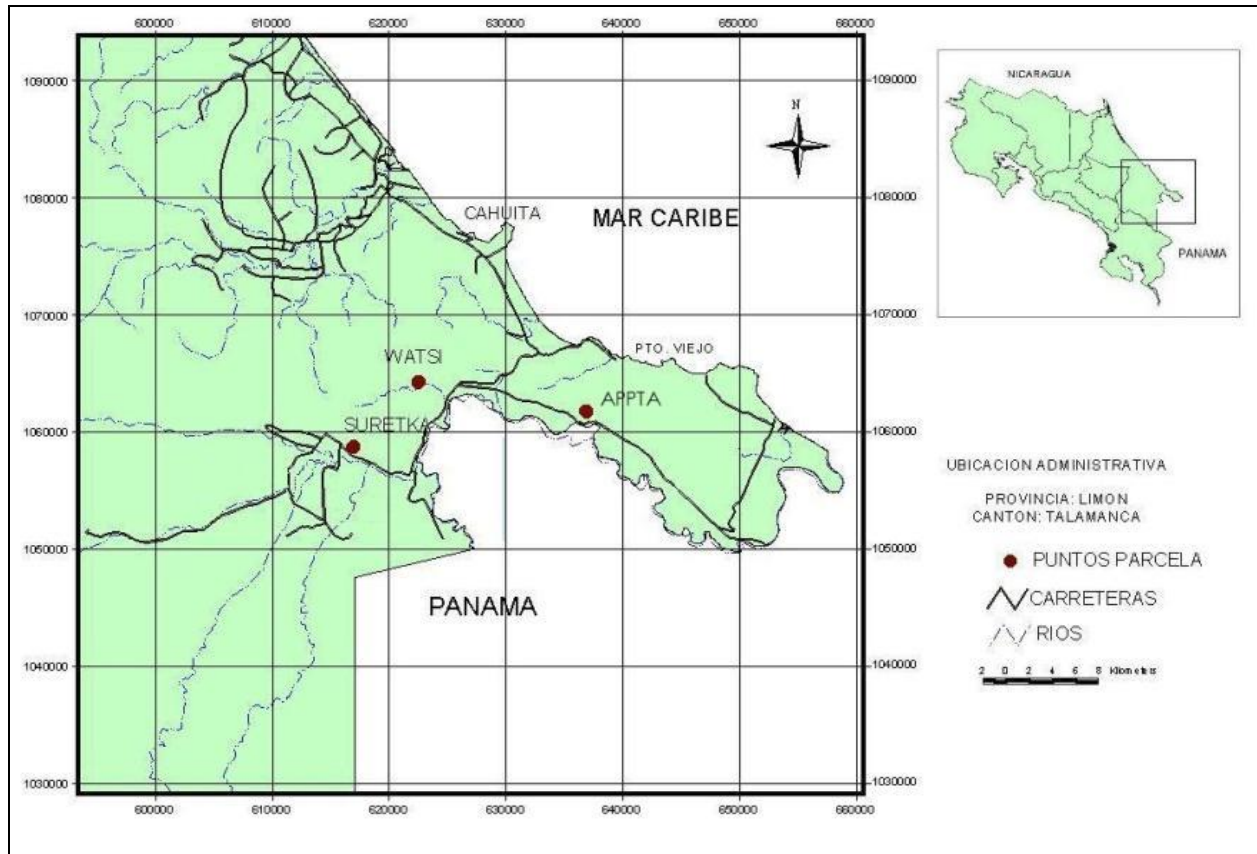


Figura 5. Mapa de ubicación de los jardines clonales de Watsi y Suretka y del vivero de APPTA, Valle de Talamanca, provincia de Limón, Costa Rica.

La precipitación promedio anual es de 2459 mm, por lo que se considera una zona lluviosa con una temperatura media anual que oscila entre 24 y 27 grados centígrados (Kapp 1989). Sin embargo, se podría definir un periodo relativamente más seco: enero a abril, aunque no siendo menor que 120mm de precipitación mensual. La humedad relativa promedio se mantiene por encima del 85% durante todo el año (Borge y Castillo 1997).

El relieve del Valle de Talamanca, donde están ubicados los jardines clonales estudiados, presenta una topografía plana cóncava y plana ondulada con pendientes inferiores al 13%. Los suelos están compuestos por fracciones de rocas sedimentarias, volcánicas e intrusivas

erosionadas de la Cordillera de Talamanca, lo que evidencia una intensa dinámica erosiva de las partes altas y medias de la cuenca (Borge y Castillo 1997), donde predominan los suelos *Aeric Tropic Fluvaquents* (entisoles) (30%) y *Typic Tropaquepts* (inceptisoles) (50%) (Kapp 1989).

3.2 Evaluación del efecto de la aplicación del biocarbón en la productividad e incidencia de enfermedades en cacao y en la calidad del suelo

3.2.1 Población y muestra

Se estudió el cacao en campo en dos jardines clonales, ubicados en las comunidades de Watsi y Suretka. Ambos jardines fueron establecidos en 2008 en propiedades de productores de Talamanca por medio del Proyecto Cacao Centroamérica (CATIE-MAP-PCC). El jardín clonal de Watsi tiene un área de aproximadamente 4.800 m² con relieve plano; el de Suretka aproximadamente 3.600 m² con relieve plano ondulado. Los jardines clonales están compuestos por seis clones de cacao (Cuadro 1), distribuidos en bloques completamente aleatorizados, cada bloque tiene una línea de plantas de cada clon (ver ANEXO 1 y 2). La distancia de siembra de las plantas de cacao es de 3m x 3m, sembradas en cuadro, a una densidad de 1111 árboles ha⁻¹.

Cuadro 1. Clones de cacaos que se encuentran en los jardines clonales en Talamanca, Costa Rica.

Clon	País de origen	Tipo	Forma del fruto	Color del fruto	Tolerancia a enfermedades
ICS – 95	Trinidad & Tobago	Trinitario	Amelonado	Rojo	Ceratocystis Monillia Phytophthora
CC – 137	Costa Rica	Trinitario	Amelonado	Verde	Monillia Phytophthora
PMCT – 58	Costa Rica	Trinitario	Angoleta	Rojo	Monillia
CATIE - R1	Costa Rica	Trinitario	Angoleta	Verde	Monillia
CATIE - R4	Costa Rica	Trinitario	Angoleta	Verde	Monillia
CATIE - R6	Costa Rica	Trinitario	Angoleta	Rojo	Monillia Phytophthora

Fuente: Adaptado de Phillips-Mora et al. (2012).

Los jardines clonales son sistemas agroforestales con otras especies dispersas, asociadas al cultivo (Cuadro 2). Estos individuos proporcionan madera, frutos y medicinas a la familia y a su vez sombra a las plantas de cacao. Con el apoyo técnico del PCC estas plantas son manejadas para regular una sombra adecuada al cacaotal. La densidad y diversidad de estas especies están basadas principalmente en el manejo que cada familia hace en sus parcelas.

Cuadro 2. Especies arbóreas encontradas en los jardines clonales de cacao orgánico estudiados en las comunidades de Watsi y Suretka. Talamanca, Costa Rica, 2012.

Nombre común	Nombre científico	Jardín Clonal	
		Watsi	Suretka
Banano	<i>Musa spp.</i>	X	X
Carambola	<i>Averhooa carambola</i>	X	
Coco	<i>Cocos nucifera</i>		X
Guaba	<i>Inga spp.</i>	X	X
Laurel	<i>Cordia alliodora</i>	X	X
Limón	<i>Citrus limón</i>		X
Naranja	<i>Citrus sinensis</i>		X
Plátano	<i>Musa spp.</i>	X	
Pejibaye	<i>Bactris gasipaes</i>	X	X

Los suelos de los jardines clonales fueron clasificados en categorías de órdenes según la taxonomía de suelos propuesta por *United States Department of Agriculture (USDA)*. El suelo del jardín clonal de Watsi fue clasificado como del orden inceptisol, suelo relativamente joven, con características en el perfil poco acentuadas, formado principalmente por sedimentos aluviales, rico en bases, presentando condiciones intermediarias o buenas para la producción agrícola. El suelo del jardín clonal de Suretka fue clasificado como siendo del orden ultisol, uno de los órdenes de suelos más viejo y meteorizados de Costa Rica, ocupando por general partes altas de las cuencas y pendientes, con su uso intensivo puede empezar a presentar problemas acentuados, sin embargo, bajando la acidez de estos suelos se logra aumentar su fertilidad, pudiendo ser utilizado para la siembra de muchos cultivos (Bertsch 1995). Las propiedades químicas de los suelos al inicio del experimento son presentadas en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Propiedades químicas de los suelos de los jardines clonales de cacao orgánico de Watsi (*inceptisol*) y Suretka (*ultisol*) al inicio del experimento. Talamanca, Costa Rica, 2012.

	pH H ₂ O	Acidez -----cmol(+)/l-----	Ca	Mg	K	P	Cu	Zn	Mn	Fe	N ---- % ----	C
Watsi	5,8	0,10	18,65	4,93	0,53	3,13	4,94	7,28	27,38	78,50	0,27	2,55
Suretka	4,6	2,19	2,78	1,53	0,17	3,15	8,20	1,91	32,88	260,00	0,35	3,77

3.2.2 Biocarbón y gallinaza utilizados

El biocarbón utilizado fue producido en la Península de Osa, Costa Rica, a partir de madera de melina (*Gmelina arborea* Roxb.), obtenida de tarimas desechadas por la industria local. Este biocarbón fue producido en tres hornos de 220 litros con una capacidad productiva de 15-20 kg cada uno. El proceso de pirolisis de estos hornos empieza a los 300°C llegando a temperaturas entre 400-500°C. Este proceso dura entre 1-3 horas dependiendo del grado de humedad de la madera. El biocarbón fue molido en una picadora para generar un material fino y tener más área de contacto con el suelo. La gallinaza fue comprada de un proveedor de la región de Turrialba, Costa Rica (Granja Avícola GR, Chitaría).

La composición química del biocarbón fue determinada en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR) y la composición de la gallinaza fue determinada en el laboratorio de análisis de suelo, tejido vegetal y aguas del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE), Turrialba, Costa Rica. Los resultados de estos análisis se presentan en la Cuadro 4.

Cuadro 4. Propiedades químicas de las enmiendas de biocarbón y gallinaza aplicadas a los suelos de jardines clonales de cacao orgánico y a sustratos de vivero. Talamanca, Costa Rica, 2012.

Elemento	Unidad	Biocarbón*	Gallinaza**
N	%	0,38	3,53
C		66,18	34,40
pH	H ₂ O	8,00	-
Ca	%	1,05	6,72
Mg		0,12	0,53
K		0,21	2,46
P		0,04	1,94
Cu	mg/kg	7	65
Zn		39	351
Mn		32	383
Fe		2900	1116

* Análisis realizado en el Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica (UCR). ** Análisis realizado en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Tejido Vegetal y Aguas del CATIE, Turrialba, Costa Rica.


Las aplicaciones al suelo de biocarbón y gallinaza fueron realizadas en forma de anillo en un radio de 1 m alrededor de los árboles, sin aplicar en un radio de 30 cm cerca del tronco del árbol (Figura 6), según metodología adaptada de Chepote *et al.* (2007). Antes de la aplicación de los tratamientos, se retiró la hojarasca y se realizó chapia donde se necesitaba. Los tratamientos fueron aplicados e incorporados al suelo en los primeros 10-15 cm de profundidad, posteriormente el suelo fue recubierto con el material vegetal resultante de la chapia y la hojarasca. Las plantas con tratamiento control recibieron los mismos manejos en el suelo.



Figura 6. Aplicación del biocarbón (a) y gallinaza (b) en los jardines clonales de cacao orgánico en Talamanca, Costa Rica, 2011. Fuente: archivo personal (2011).

Los trabajos de investigación realizados anteriormente aplicando biocarbón en suelos presentan distintas formas de demostrar cantidad utilizada. La unidad más utilizada es de toneladas por hectárea ($t\ ha^{-1}$). Para este trabajo se puede calcular dos valores diferentes en esta unidad utilizando distintos cálculos. Lo primero sería con el cálculo de 3 kilos de biocarbón por planta, asumiendo que una plantación de cacao tiene 1.111 plantas por hectárea, entonces tendríamos una aplicación de $3,33\ t\ ha^{-1}$. La segunda forma de cálculo sería asumiendo una aplicación uniforme del biocarbón en todo el perfil superficial del suelo de una hectárea, utilizando el volumen de biocarbón por área de aplicación y asumiendo esta aplicación en área de superficie total (Cuadro 5), representaría una aplicación de $10,5\ t\ ha^{-1}$. Es necesario tener en cuenta los dos cálculos, el primer para saber cuanto se aplicaría de biocarbón en una hectárea utilizando la misma metodología, lo mismo utilizado como sugerencia al cultivo y el segundo para una comparación entre resultados de análisis de suelo con otros trabajos. Asumiendo los mismos cálculos anteriores para la cantidad de gallinaza aplica al suelo tendríamos una aplicación de $1,11\ t\ ha^{-1}$ y una proporción equivalente de $3,5\ t\ ha^{-1}$ en las áreas de aplicación.

Cuadro 5. Cálculo representativo de cantidad de biocarbón utilizado por hectárea asumiendo aplicación al suelo en área total. Talamanca, Costa Rica, 2012.

	<p>Área de aplicación del biocarbón en cada planta de cacao:</p> <p>Radio externo de 1 metro con radio interno de 0,30 metro (ilustrado en la figura al lado).</p> <p>Cálculo de área de aplicación de biocarbón por planta:</p> $A = \pi(R^2 - r^2) = \pi (1^2 - 0,3^2) = 2,85 \text{ m}^2$ <p>Estimación de biocarbón aplicado por área de suelo:</p> $At = (3 \times 10.000) / 2,85 = 10,5 \text{ t/ha}$
---	---

3.2.3 Recolección de datos

Los datos obtenidos en este experimento fueron, la producción de cacao, los frutos enfermos por monilia (*Moniliophthora roreri*) y mazorca negra (*Phytophthora palmivora*) y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Para analizar la producción de cacao se cosechó todos los frutos maduros producidos por cada árbol, donde se contabilizaron número de frutos sanos y sacaron el peso húmedo de las semillas por árbol y promedio por fruto en los distintos tratamientos. Para el análisis de enfermedades, fueron contabilizados y cortados los frutos enfermos por monilia (*Moniliophthora roreri*) y mazorca negra (*Phytophthora palmivora*). De esta forma se analizó el número de frutos y el porcentaje de enfermedad por cada tratamiento. El muestreo de estos datos se realizó durante el ciclo de producción de febrero a octubre de 2012, los datos de cada cosecha siempre fueron tomados días antes de la cosecha de los productores, siguiendo los mismos patrones de cosecha local, sin embargo no se pudo contabilizar dos cosechas (marzo y agosto) debido a análisis de producción de los jardines realizadas por personal del PCC.

Para el análisis del suelo se utilizaron indicadores físicos, químicos y biológicos (Cuadro 6). Se evaluaron los indicadores químicos y biológicos al inicio del experimento, en el mismo radio donde se aplicaron los tratamientos. Al final del experimento se evaluaron indicadores físicos, químicos y biológicos. Para los indicadores físicos (densidad aparente y humedad gravimétrica), en cada jardín clonal, se tomaron cinco muestras para cada tratamiento utilizando cilindros con

volúmenes conocidos ($392,70 \text{ cm}^3$), los cuales se enterró al suelo hasta su altura específica (5 cm), se pesaron estas muestras, se secaron en estufa y pesadas otra vez, a estas muestras se les calculó el peso seco/volumen (g/cm^3) para conocer la densidad aparente y utilizando el peso húmedo y peso seco se calculó la humedad gravimétrica en porcentaje. Para los indicadores químicos se tomaron muestras del suelo en un perfil de 0-15 cm utilizando un barreno. Fueron utilizadas tres muestras por cada tratamiento en cada jardín clonal. Cada muestra estaba compuesta por seis submuestras retiradas de los seis clones que recibieron el mismo tratamiento en cada bloque (ver Anexo 1 y 2). Los indicadores químicos y físico se analizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Tejido Vegetal y Aguas del CATIE, Turrialba, Costa Rica. Para los análisis biológicos del suelo (respiración y biomasa microbiana) se colectaron muestras de suelo de 0-8 cm de profundidad. Las muestras aclimatadas se enviaron al laboratorio. Respiración y biomasa microbiana fueron analizadas según la metodología de Anderson e Ingram (1992) en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Tejido Vegetal y Aguas del CATIE, Turrialba, Costa Rica.

Cuadro 6. Indicadores químicos, físicos y biológicos utilizados para determinar la calidad de suelos entre los tratamientos aplicados.*

	Indicadores	Prof. (cm)	Metodología	Fuente
Físico	Densidad aparente (DA) (g/cc)	0-5	Extracción de suelo con cilindros de 5 cm de altura y 5 cm de diámetro. Secado en horno a 105°C por 24 horas.	EMBRAPA (1997)
	Humedad Gravimétrica (%)		Utilizando la misma muestra de DA: (Masa de agua / masa de sólidos) x 100	
Químicos	pH Acidez (H+Al) (cmol(+)/l) Ca (cmol(+)/l) Mg (cmol(+)/l) K (cmol(+)/l) P (mg/l) Cu (mg/l) Mn (mg/l) Zn (mg/l) Fe (mg/l)	0-15	Extracción en Olsen Modificado pH 8.5; para determinación de Cu, Zn, Mn, Fe, K y P, extracción en Cloruro de Potasio 1N para determinación de Ca, Mg y Acidez Intercambiable y pH en agua	Henríquez y Cabalceta (1999)

	% C total % N total		El C total y N total se determinaron con el método de combustión realizado en equipo autoanalizador de carbono y nitrógeno Thermo Finnigan.	Briceño y Pacheco (1984)
	C/N		$C/N = \% C \text{ total} / \% N \text{ total}$	Bertsch (1995)
	% materia orgánica (%MO)		$\% MO = \% C \text{ total} \times 1,724$	EMBRAPA (1997)
	Capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE)		$CICE = \text{Acidez} + Ca + Mg + K \text{ (cmol(+)/l)}$	
Biológicos	Respiración microbiana (mg CO ₂ -C/kg/h)	0-8	muestra en solución de NaOH 0.05N en un vaso Mason hermético por 24 horas en incubación a 25°C; el equivalente a CO ₂ se determina por titulación con HCl 0.05N	Anderson e Ingram (1992)
	Biomasa microbiana (mg C-biom/kg)		fumigación-incubación con Cloroformo por 48 horas y extracción de las muestras en tiempo inicial y tiempo final con Sulfato de Potasio 0.5 M	Anderson e Ingram (1992)
	Cociente metabólico (μg CO ₂ -C mg ⁻¹ C-biom h ⁻¹)		$q_{CO_2-C} = CO_2-C / C\text{-biom } h^{-1}$ CO ₂ -C: respiración microbiana	Visser y Parkinson (1992)
	Índice de mineralización del C (% C 10 días-1)		$IM = (CO_2-C / C\text{-total}) \times 100\%$ CO ₂ -C : respiración microbiana.	Cerda (2007)

*Analizados en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Tejido Vegetal y Aguas del CATIE, Turrialba, Costa Rica.

3.2.4 *Diseño Experimental*

El método utilizado para esta investigación fue el experimental, utilizando un diseño de parcelas divididas repetidas en bloques completos aleatorizados. En la parcela principal están los seis clones, luego cada parcela principal contiene cuatro plantas selectas de cada clon (subparcelas) donde se aleatorizaron los tratamientos (ver Anexos 1 y 2). Cada unidad experimental es representada por un árbol, totalizando así 192 unidades experimentales. Los tratamientos fueron: el control (TC), un segundo tratamiento con aplicación de 1 kg de gallinaza por planta (TG), un tercero de 3 kg de biocarbón por planta (TB) y un cuarto de 3 kg de biocarbón y 1 kg de gallinaza por planta (TBG) (Cuadro 7).

Cuadro 7. Tratamientos utilizados en los jardines clonales de cacao orgánico de la Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica, 2011.

Tratamientos	Código	Biocarbón (kg/planta)	Gallinaza (kg/planta)
Control	TC	0	0
Gallinaza	TG	0	1
Biocarbón	TB	3	0
Biocarbón + Gallinaza	TBG	3	1

3.2.5 Análisis de los datos

Para determinar la influencia de los diferentes tratamientos sobre las variables, se utilizó el análisis de varianza univariado (ANOVA) asumiendo los diseños propuestos. Se utilizaron dos modelos para análisis de los datos, uno que incluye la variable clon de cacao y sitio, este utilizado para las variables de productividad de cacao e incidencia de enfermedades y otro sin la variable clon y sitio, donde se evaluó las propiedades físico, químico e biológica del suelo por cada sitio separado.

El modelo utilizado para análisis de los datos de productividad e incidencia de enfermedades asumiendo la variable clon fue el siguiente:

$$Y_{ijkl} = \mu + S_i + \beta(S)_{j(i)} + C_k + T_l + CT_{kl} + \epsilon_{ijkl}$$

Donde: Y_{ijkl} = una observación cualquier; μ = media general; S_i = efecto del i-ésimo sitio; $\beta(S)_{j(i)}$ = efecto de j-ésimo bloque del i-ésimo sitio; C_k = efecto del k-ésimo clon; T_l = efecto del l-ésimo tratamiento; CT_{kl} = interacción clon x tratamiento; ϵ_{ijk} = error por defecto.

El modelo utilizado para análisis de los indicadores del suelo, excluyendo las variables sitio y clon, fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ij} = una observación cualquier; μ = media general; T_i = efecto del i -ésimo tratamiento; β_j = efecto de j -ésimo bloque; ϵ_{ij} = error por defecto.

Se comprobaron los supuestos del ANOVA con gráficos diagnósticos (cuantiles de los términos de error, gráficos de residuos). Las variables de respuesta que cumplieron con los supuestos de normalidad fueron analizadas directamente. Las variables que no cumplieron con los supuestos de varianza homogénea, implicó la selección de modelos con una función de varianzas heterogéneas. Se evaluaron todas las funciones y se escogió el mejor modelo, según los criterios de *Akaike* (AIC) y del criterio de información *Bayesiano* (BIC) (Ver anexo 3). En caso de que existan diferencias estadísticas entre los tratamientos, se realizaron comparaciones de medias según el método de prueba LSD Fisher ($p < 0,05$).

3.3 Efecto de la aplicación de biocarbón al suelo, con y sin gallinaza, en el crecimiento de plántulas de cacao

3.3.1 Población, muestra, recolección de datos y diseño experimental

La población estudiada en vivero fueron las semillas germinadas de cacao utilizadas por APPTA para la producción de porta injertos para sus clones. El método utilizado para esta investigación fue el experimental, donde las semillas fueron sembradas en macetas de plástico con capacidad de dos kilos de suelo en los cuatro tratamientos utilizados en vivero. Se colectó datos del crecimiento en altura (cm) y del diámetro de cuello (mm) después de 2 meses de edad.

El diseño experimental utilizado fue un bifactorial en bloques generalizados, con cuatro tratamientos aplicados con ocho repeticiones cada uno. Cada unidad experimental fue representada por una plántula, totalizando así 32 unidades experimentales. Los tratamientos que fueron utilizados son el control, un segundo tratamiento con aplicación equivalente de 20 g/maceta de gallinaza, un tercero de 30 g/maceta de biocarbón de melina y un cuarto de 30 g/maceta de biocarbón de melina y 20 g/maceta de gallinaza (Cuadro 8).

Cuadro 8. Tratamientos orgánicos utilizados en el experimento de almácigos de cacao en el vivero de APPTA, Talamanca, Costa Rica, 2012.

Tratamientos	Código	Biocarbón (g/planta)	Gallinaza (g/planta)
Control	TC	0	0
Gallinaza	TG	0	20
Biocarbón	TB	30	0
Biocarbón + gallinaza	TBG	30	20

3.3.2 *Análisis de los datos*

Para determinar la influencia de los diferentes tratamientos sobre las variables se utilizó el análisis de varianza (ANOVA) univariado, asumiendo los diseños propuestos.

El modelo utilizado para análisis de los datos de crecimiento fue el siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Donde: Y_{ijk} = una observación cualquier; μ = media general; T_i = efecto del i -ésimo tratamiento; β_j = efecto de j -ésimo bloque; ϵ_{ijk} = error por defecto.

Se comprobaron los supuestos del ANOVA con gráficos diagnósticos (cuantiles de los términos de error, gráficos de residuos). Todas las variables de respuesta cumplieron con el supuesto de normalidad. En caso de que existieron diferencias estadísticas entre los tratamientos, se realizaron comparaciones de medias según el método de prueba LSD Fisher ($p < 0,05$).

4 RESULTADOS

4.1 Efecto de la aplicación del biocarbón y gallinaza al suelo en los indicadores físico, químico y biológico del suelo

4.1.1 Indicadores Físicos

Para la humedad gravimétrica de los suelos (HG), no se encontró diferencia estadística significativa tanto en Watsi ($F=22,42$, $p<0,0001$) como Suretka ($F=4,68$, $p=0,0218$). Los valores promedios de la HG en cada tratamiento son expresados en el Anexo 4. Para la densidad aparente (DA) se encontró diferencia estadística entre tratamientos en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) ($F=22,42$, $p<0,0001$) y en el jardín clonal de Suretka (ultisol) ($F=4,68$, $p=0,0218$) (Anexo 4; Figura 7).

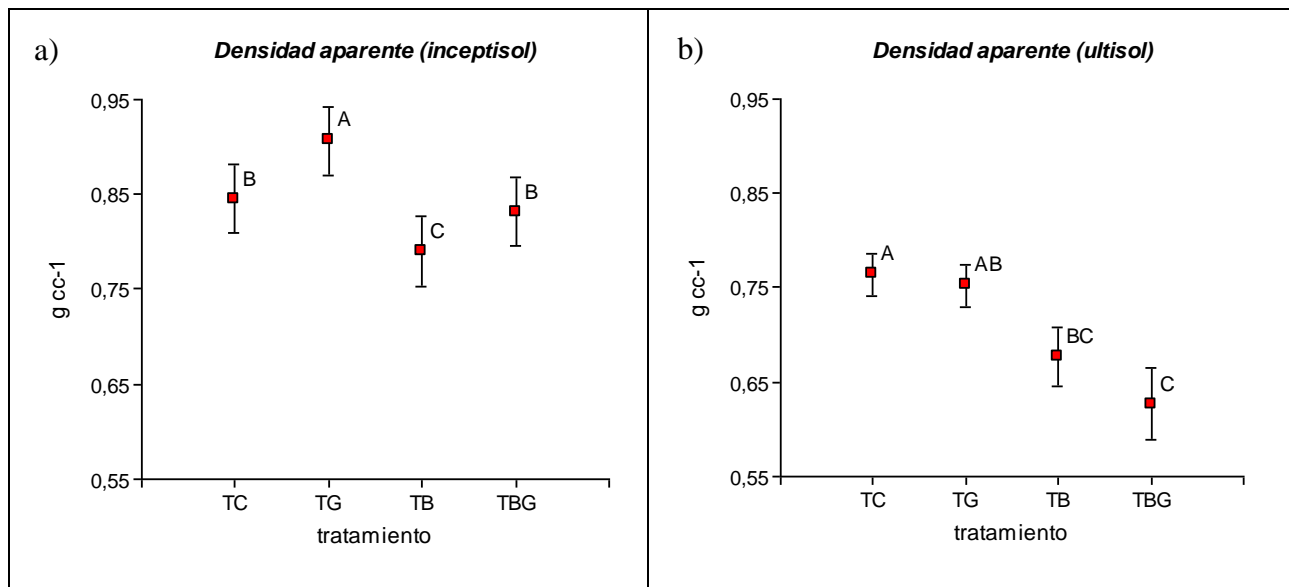


Figura 7. Promedio de la densidad aparente de los suelos en los distintos tratamientos en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) (a) y en el jardín clonal de Suretka (ultisol) (b), Talamanca, Costa Rica, 2012. Las barras de errores representan los errores estándares. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (LSD, $p>0,05$).

En los dos sitios de estudio, todos los tratamientos presentaron DA menores a 1 g cc^{-1} . En el inceptisol, el tratamiento con gallinaza (TG) fue lo que presentó valores significativamente mayores en la DA en comparación con los demás tratamientos, seguido por los tratamientos

control (TC) y biocarbón con gallinaza (TBG). El tratamiento que recibió solamente biocarbón (TB) presentó menores valores significativamente distintos a los demás. La gallinaza sola aumentó la DA del suelo en un promedio de 7 %, el biocarbón disminuyó la DA del suelo en un promedio de 7 %, el biocarbón en presencia de gallinaza no presentó diferencia con el control. En el ultisol, el tratamiento control no presentó diferencia significativa con el tratamiento con gallinaza, que por su vez no presentó diferencia con el tratamiento con biocarbón sólo. El tratamiento con biocarbón y gallinaza fue lo que presentó menores valores, no siendo significativamente distinto del tratamiento con biocarbón (TB), sin embargo presentó diferencia significativa con los demás tratamientos. En el ultisol, no fue detectado un efecto de la gallinaza en la DA del suelo, sin embargo, los tratamientos con biocarbón presentaron diferencia con el tratamiento control, siendo que la combinación de biocarbón con gallinaza logró los menores valores, disminuyendo la DA del suelo en un promedio de 11 y 22 %, TB y TBG respectivamente, cuando comparados con el tratamiento control.

4.1.2 Indicadores químicos

Los indicadores químicos del suelo presentaron diferencias entre los tratamientos en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) (Cuadro 9) y en el jardín clonal de Suretka (Ultisol) (Cuadro 10). En los cuadros, solamente se presentan los resultados significativos, para los resultados completos de los indicadores químicos de los suelos en los distintos tratamientos ver Anexos 5 y 6.

En el inceptisol se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamientos para los indicadores Acidez ($F=6,57$, $p=0,0253$), Mn ($F=4,77$, $p=0,0497$), C ($F=13,07$, $p=0,0048$), MO ($F=12,95$, $p=0,0050$) y C/N ($F=46,85$, $p=0,0001$). En el inceptisol, el tratamiento que llevó solamente gallinaza (TG) cuando comparado con el control (TC) no presentó diferencia estadística significativa en ningún indicador químico del suelo (LSD Fisher, $p>0,05$). El efecto del biocarbón en los indicadores químicos de un inceptisol se dio principalmente en indicadores dependiente directos de la cantidad de carbono (C) en el suelo, siendo la acidez y Mn los únicos indicadores no dependiente de C en el suelo que demostraron diferencia significativa entre los tratamientos en este tipo de suelo. Los tratamientos con biocarbón lograron disminuir la acidez de un ultisol en 40% ($0,04 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$) cuando comparados con el tratamiento control. En la cantidad de Mn, los tratamientos que recibieron biocarbón presentaron menores promedios que los demás tratamientos. La cantidad de C y MO en un inceptisol aumentó en un promedio de 16 y

21 %, para el tratamiento con biocarbón (TB) y la combinación de biocarbón con gallinaza (TBG), respectivamente. La relación C/N también recibió influencia de los tratamientos con biocarbón, donde TB Y TBG lograron aumentar el valor en un promedio de 14 y 16 %, respectivamente. No se encontraron diferencias significativas entre los tratamiento para los indicadores pH (F=1,68, p=0,2689), Ca (F=1,23, p=0,3769), Mg (F=3,69, p=0,0800), K (F=1,11, p=0,4143), CICE (F=1,93, p=0,2262), P (F=2,78, p=0,1325), Cu (F=1,70, p=0,2652), Zn (F=0,74, p=0,5635), Mn (F=4,77, p=0,0501) y Fe (F=89, p=0,4980).

Cuadro 9. Promedio de los indicadores químicos del suelo en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) al final del experimento. Talamanca, Costa Rica, 2012.

Indicadores	Control (TC)	Gallinaza (TG)	Biocarbón (TB)	Bioc+Galli (TBG)	Valor F	Valor p	Rango Óptimo
Acidez (cmol(+)/l)	0,14 ±0,02a	0,16 ±0,02ab	0,10 ±0,02bc	0,10 ±0,02c	6,57	0,0253	<1,5'
Mn (mg/l)	19,93 ±6,04a	20,23 ±6,04a	15,87 ±6,04b	15,50 ±6,04b	4,77	0,0497	50-300'
C (%)	2,97 ±0,13a	2,73 ±0,12a	3,47 ±0,18b	3,60 ±0,19b	13,07	0,0048	NE
MO (%)	5,13 ±0,23b	4,71 ±0,21b	5,99 ±0,30a	6,21 ±0,33a	12,95	0,0050	>5'
C/N	9,54 ±0,16b	9,30 ±0,16b	10,93 ±0,22a	11,15 ±0,24a	46,85	0,0001	10,5-15,5*

Medias con letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, p<0,05).

*CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva. ±: Desviación estándar. *Amores (2009).*

***Enríquez (2004). 'Bertsh (1995).*

En el ultisol se encontraron diferencias estadísticas significativas para los indicadores pH (F=24,00, p=0,0010), Acidez (F=27,00, p=0,0007), Ca (F=15,75, p=0,0030), Mg (F=5,22, p=0,0414), P (F=9,77, p=0,0100), N (F=14,76, p=0,0035), C (F=21,53, p=0,0013), MO (F=21,38, p=0,0013) y C/N (F=9,31, p=0,0112) (Cuadro 10). No se encontraron diferencias significativas para los indicadores K (F=1,63, p=0,2796), CICE (F=2,09, p=0,2035), Cu (F=3,02, p=0,1159), Zn (F=3,61, p=0,0849), Mn (F=0,66, p=0,6040) y Fe (F=0,78, p=0,5445).

Los tratamientos aplicados lograron efecto significativo más notorio en más indicadores químicos del suelo en el ultisol que en el inceptisol. En la cantidad de Ca en el ultisol, el tratamiento con gallinaza (TG) logró mayores valores significativos comparados con el control (TC). Sin embargo, no hubo diferencia significativa, comparado con biocarbón (TB). El tratamiento con biocarbón y gallinaza (TBG) fue el que presentó los valores mayores con diferencia estadística a los demás. Los aumentos de la cantidad de Ca en el suelo debido a los tratamientos, fueron de 26, 32 y 70%, respectivamente para TG, TB y TBG cuando se compararon con TC.

En el pH y N del ultisol, TG no presentó diferencia estadística significativa con TC. TB y TBG presentaron diferencia significativa con TC, también presentando diferencia significativa entre ellos, siendo TBG el que presentó los mayores valores. El aumento proporcionado por los tratamientos con biocarbón y la combinación de biocarbón con gallinaza en el ultisol fue de 4 y 6% en el pH y 8 y 17% en el N, respectivamente. En el P del ultisol, TC no se diferencia estadísticamente de TG, que por su vez no diferencia de TB, que también no diferencia de TBG. En este sentido podemos decir únicamente que TBG es significativamente distinto de TC, donde presentó aumento de 95% de P en el ultisol. Para las variables C, MO y relación C/N, los dos tratamientos que recibieron biocarbón (TB y TBG) presentaron aumento significativo de estos indicadores cuando comparados con los otros tratamientos (TC y TG). TB y TBG comparados con TC aumentaron la cantidad de C y MO en el ultisol en 36 y 55%, respectivamente. Para la relación C/N los tratamientos TB y TBG aumentaron los valores en un promedio de 22 y 27%, respectivamente.

Cuadro 10. Promedio de los indicadores químicos del suelo en el jardín clonal de Suretka (ultisol) al final del experimento. Talamanca, Costa Rica, 2012.

Indicadores	Control (TC)	Gallinaza (TG)	Biocarbón (TB)	Bioc+Galli (TBG)	Valor F	Valor p	Rango Óptimo
pH (H ₂ O)	4,57 ±0,12c	4,60 ±0,12c	4,77 ±0,12b	4,87 ±0,12a	24,00	0,0010	5,1-6,5*
Acidez (cmol(+)/l)	2,50 ±0,68a	1,96 ±0,68a	1,74 ±0,68b	1,25 ±1,25c	27,00	0,0007	<1,5'
Ca (cmol(+)/l)	2,36 ±0,81c	2,98 ±0,81b	3,12 ±0,81b	4,02 ±0,81a	15,75	0,0030	4-18,2**
Mg (cmol(+)/l)	1,16 ±0,17b	1,31 ±0,18ab	1,47 ±0,19a	1,78 ±0,24a	5,22	0,0414	0,8-2,0**
P (mg/l)	5,87 ±2,16c	6,13 ±2,16bc	6,80 ±2,16ba	11,50 ±2,16a	9,77	0,0100	12-20'
N (%)	0,35 ±0,02c	0,34 ±0,02c	0,38 ±0,02b	0,41 ±0,02a	14,76	0,0035	0,2-0,4**
C (%)	3,58 ±0,28b	3,63 ±0,28b	4,88 ±0,28a	5,56 ±0,28a	21,53	0,0013	NE
MO (%)	6,18 ±0,48b	6,26 ±0,48b	8,41 ±0,48a	9,59 ±0,48a	21,38	0,0013	>5'
C/N	10,56 ±0,18b	10,55 ±0,18b	12,90 ±0,55a	13,46 ±0,76a	9,31	0,0112	10,5-15,5*

*Medias con letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, $p < 0,05$). CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva. ±: Desviación estándar. *Amores (2009). **Enríquez (2004). 'Bertsh (1995).*

4.1.3 Indicadores biológicos

Al final del experimento en campo, en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) se encontró diferencia estadística significativa entre los distintos tratamientos solamente para biomasa microbiana ($F=33,07$, $p=0,0004$). El tratamiento de biocarbón con gallinaza no presentó diferencia estadística significativa con el control, sin embargo los tratamientos que recibieron gallinaza y biocarbón solos presentaron una disminución de la biomasa microbiana en el suelo, presentando valores inferiores al control en un promedio de 6 y 18 % respectivamente, lo que indica que estos dos tratamientos utilizados pueden disminuir la cantidad de biomasa microbiana en este tipo de suelo.

No se presentaron diferencias significativas entre los tratamientos para las variables respiración microbiana ($F=0,69$, $P=0,5914$), índice de mineralización ($F=1,91$, $p=0,2286$) y

cociente metabólico ($F=0,30$, $p=0,8273$). En el jardín clonal de Suretka (ultisol), no se encontraron diferencias estadísticas significativas entre los tratamiento para biomasa microbiana ($F=2,69$, $p=0,1400$), respiración microbiana ($F=1,19$, $P=0,3907$), índice de mineralización ($F=0,81$, $p=0,5344$) y cociente metabólico ($F=4,62$, $p=0,0529$). En la Figura 8 se ve los valores promedios de biomasa microbiana en el jardín clonal de Watsi, en el Anexo 7 y 13 se puede encontrar los valores promedios y gráficos de los indicadores biológicos del suelos para cada tratamiento en los dos jardines estudiados, respectivamente.

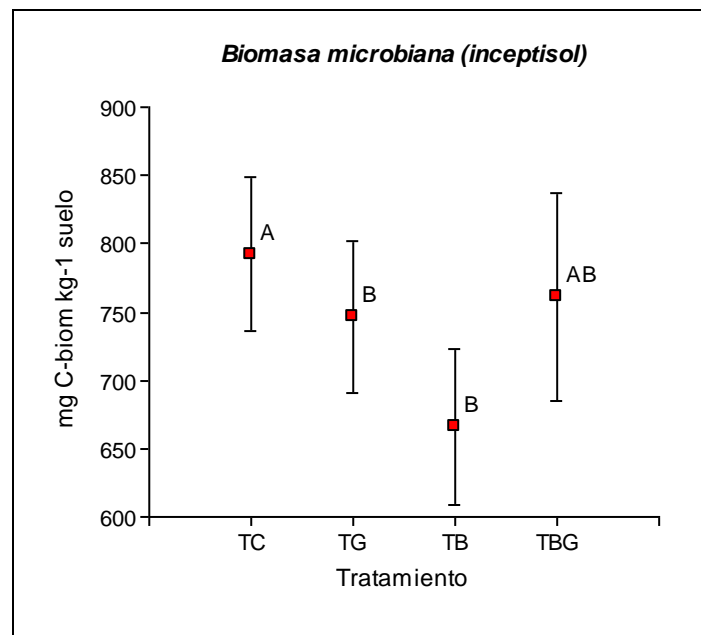


Figura 8. Biomasa microbiana del suelo (inceptisol) en el jardín clonal de Watsi en los distintos tratamientos al final del experimento, Talamanca, Costa Rica, 2012. Las barras de errores representan los errores estándares. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (LSD , $p>0,05$).

4.2 Efecto del biocarbón en la productividad de cacao e incidencia de enfermedades

Para la variable respuesta de productividad de número de frutos totales de cacao por árbol, no se encontró diferencia significativa entre los tratamiento ($F=1,43$, $p=0,2361$) (Figura 9a) y entre la interacción de los tratamientos con los clones ($F=0,76$, $p=0,7170$). Para la misma variable se encontró diferencia significativa entre los clones estudiados ($F=9,34$, $p<0,0001$). Para la

respuesta de frutos sanos producidos por árbol, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos ($F=1,76$, $p=0,1578$) (Figura 9b) y entre la interacción de los tratamientos con los clones ($F=0,69$, $p=0,7953$). Se encontró diferencia significativa de producción de frutos sanos entre los clones estudiados ($F=7,54$, $p<0,0001$). Como el estudio enfoca el papel del efecto de los tratamientos utilizados, no se discutirá las diferencias encontradas cuando se trata de una influencia que sea solamente de los clones estudiados, los resultados encontrados para clones son expresos en los Anexos 8, 9 y 10.

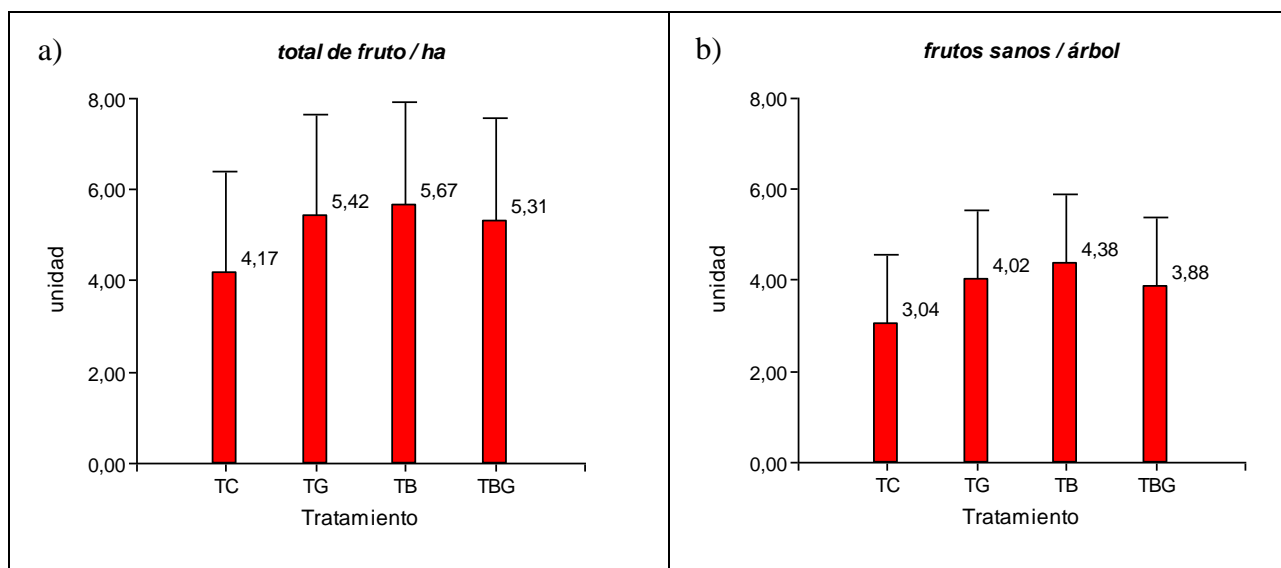


Figura 9. Promedio de número de frutos totales por árbol (a) y número de frutos sanos por árbol (b) en los distintos tratamientos en los jardines clonales estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012.

En el peso en gramos de semillas de cacao en baba (peso húmedo) producidas por árbol no se encontraron diferencias estadísticas entre los tratamientos ($F=1,71$, $p=0,1662$) y entre la interacción de tratamientos y clones ($F=0,79$, $p=0,6888$). En esta variable se encontró diferencia significativa entre los clones ($F=5,93$, $p<0,0001$) (Ver Anexo 9). De las variables respuesta en la productividad de cacao, se encontró diferencia estadística del efecto los tratamientos solamente en el promedio de peso húmedo de semillas por fruto ($F=7,36$, $p<0,0001$), siendo el tratamiento TBG lo que presentó mayor promedio, seguido de TB y TC que no presentaron diferencia significativa entre sí, estando TG con menor promedio, sin diferencia estadística a TC (Figura 10b). Para esta variable también se encontró diferencia significativa entre los clones ($F=5,84$,

p=0,0001). Para la interacción Tratamiento*Clon no se encontró diferencia significativa (F=1,58, p=0,0839).

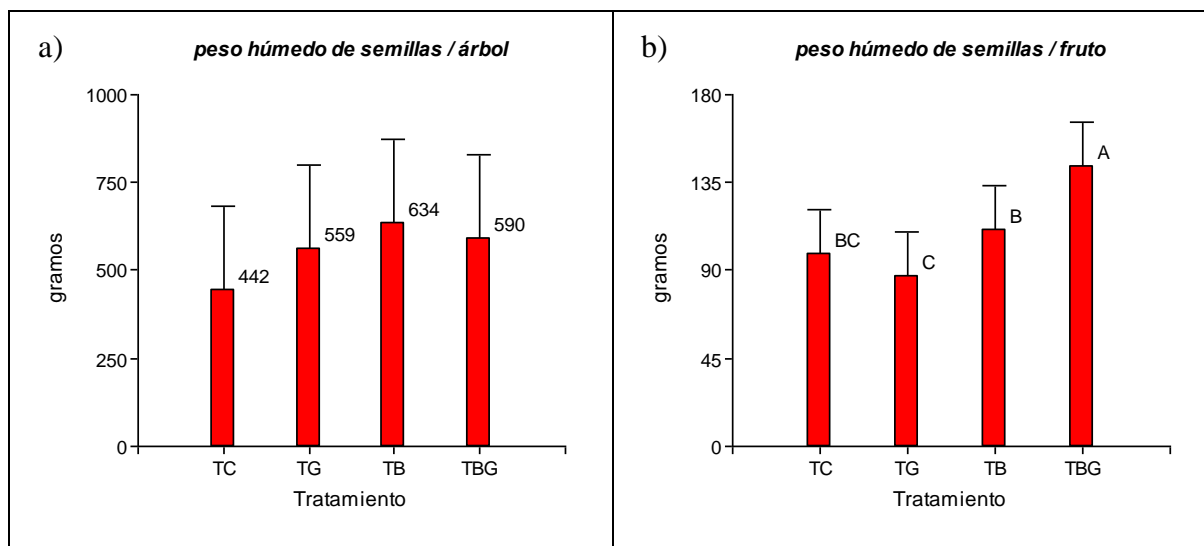


Figura 10. Promedio de peso húmedo de semillas de cacao por árbol y peso húmedo de semillas de cacao por fruto en los distintos tratamientos en los jardines clonales estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, $p < 0,05$).

Para efectos de estimación y comparación de productividad de semillas de cacao por hectárea, fue evaluada la producción estimada de producción de semillas húmedas y secas de cacao por hectárea en cada tratamiento, sin embargo, los tratamientos no presentaron diferencia estadística significativa entre sí en estos indicadores (F=0,87, $p=0,4600$). Los tratamientos que recibieron gallinaza y/o biocarbón no presentaron diferencia estadística significativa en la producción de semillas de cacao cuando comparados con el control, sin embargo la comparación entre estos valores es necesaria para evaluar el impacto de la tendencia de los resultados encontrados en la generación de renta de las familias de los productores rurales que vengán utilizar de la técnica. Los tratamientos TG, TBG y TB, presentaron un promedio superior estimado de 26, 32, 39% en la cantidad de peso húmedo (baba) y seco de semillas de cacao por hectárea cuando comparado con el control, respectivamente.

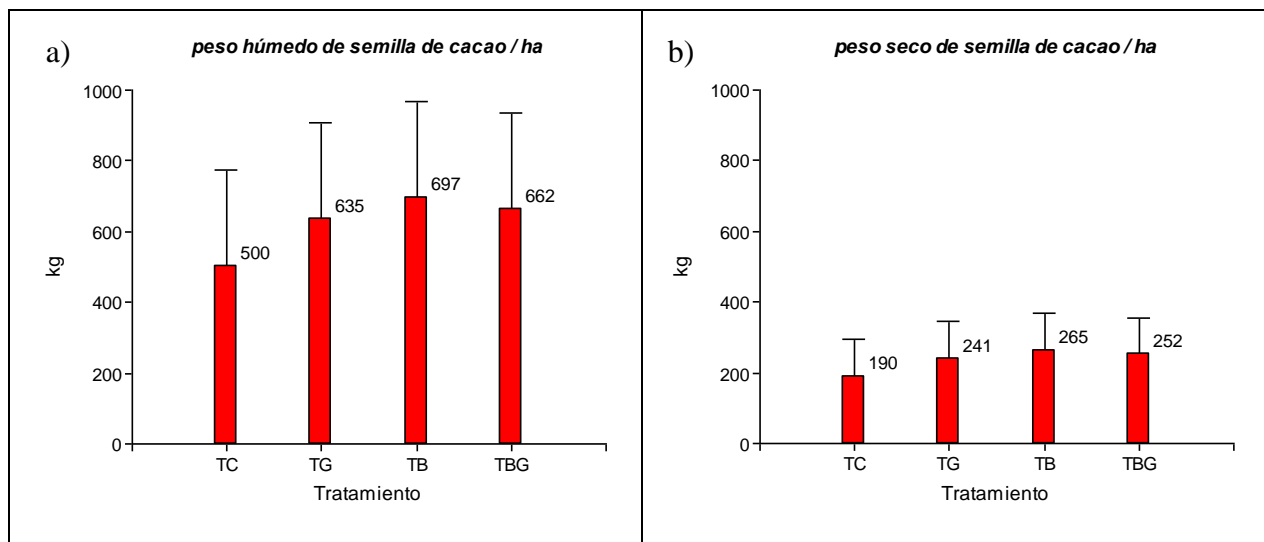


Figura 11. Producción estimada por hectárea de semillas de cacao en baba (a) y seca (b) en los distintos tratamientos del experimento en campo, Talamanca, Costa Rica, 2012.

Para conocimiento de los picos de producción y del efecto de los tratamientos al largo del año también fueron evaluados los efectos de los tratamientos en cada cosecha. Evaluando los dos sitios de estudio en conjunto, no fueron encontrados diferencias estadísticas entre los tratamientos en ninguna de las cosechas, ni en el promedio de la cantidad de frutos por árbol ($F=1,40$ $p=0,1059$) como también en el peso húmedo de semillas ($F=1,36$ $p=0,1264$). Evaluando los sitios por separado, en Watsi también no fue encontrado diferencia estadística en cantidad de frutos ($F=1,77$ $p=0,1565$) ni en peso húmedo de semillas ($F=1,61$ $p=0,1423$). En Suretka tampoco fueron encontradas diferencias en cantidad de frutos ($F=1,15$ $p=0,2948$) y peso húmedo de semillas ($F=1,31$ $p=0,1595$). Los gráficos de producción al largo del año son presentados en los Anexos 14 a 19.

Para las variables de incidencia de enfermedades en frutos de cacao, los indicadores para la variable incidencia de mazorca negra (*Phytophthora palmivora*), no cumplieron con los supuestos de normalidad (Ver anexo 11). Para las variable de número de frutos y porcentaje de frutos con incidencia de monilia (*Moniliophthora roreri*), los tratamiento no presentaron diferencia significativa entre los tratamientos ($F=0,49$, $p=0,6872$), ($F=1,29$, $p=0,2782$), entre los clones ($F=1,52$, $p=0,1861$), ($F=1,17$, $p=0,3287$) y entre la interacción de tratamiento con clon ($F=0,51$, $p=0,9333$), ($F=0,94$, $p=0,5194$), respectivamente.

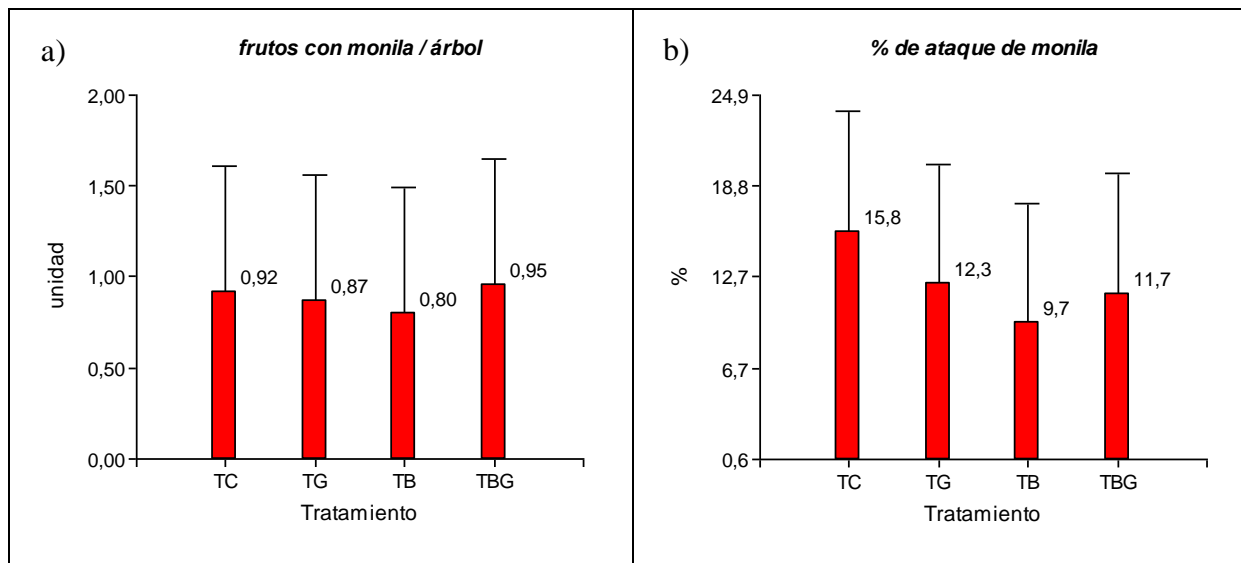


Figura 12. Promedio de número de frutos (a) y porcentaje (%) de incidencia de monilia (*Moniliophthora roreri*) en los distintos tratamientos en los jardines clonales estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012.

4.3 Efecto de la aplicación de biocarbón y gallinaza al suelo en macetas con plántulas de cacao

En el vivero, las plántulas de cacao sometidas a los diferentes tratamientos presentaron diferencia significativa en el crecimiento en altura de las plántulas ($F=8,28$; $p=0,0008$) y en diámetro de cuello ($F=39,05$; $p<0,0001$) (Figura 13). En el crecimiento en altura de las plántulas de cacao, los tratamientos TG y TB no presentaron diferencia significativa entre sí, sin embargo el tratamiento con biocarbón (TB) no presentó diferencia con el tratamiento control (TC). El tratamiento con la combinación de gallinaza y biocarbón (TBG) fue lo que presentó los mayores valores siendo distinto estadísticamente que los demás, presentando un aumento promedio de 26%. En el diámetro de cuello, el tratamiento control (TC) fue lo que presentó menores valores, seguido y diferente estadísticamente por los tratamientos con gallinaza (TG) y su combinación con biocarbón (TBG), siendo el tratamiento con biocarbón (TB) lo que presentó los mayores promedios, con un aumento promedio de 22% cuando comparado con el control. Los valores numéricos promedios para todos los tratamientos son presentados en el Anexo 12.

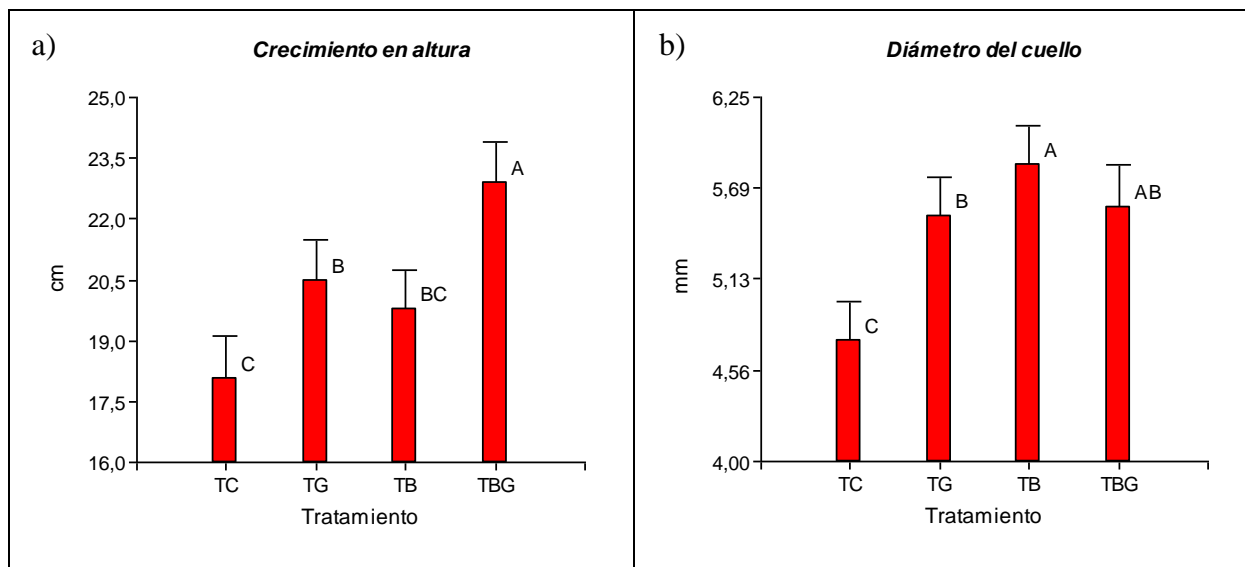


Figura 13. Efecto del biocarbón y gallinaza en el crecimiento de plántulas de cacao en altura (a) y crecimiento del diámetro del cuello (b) después de 2 meses de la siembra, Talamanca, Costa Rica, 2012. Las diferencias estadísticas ($p < 0.05$) están simbolizadas por letras distintas y las barras representan los errores estándares.

5 DISCUSIONES

5.1 Efecto del biocarbón y gallinaza en los indicadores físico, químico y biológico del suelo

5.1.1 Indicadores Físicos

La densidad aparente del suelo presenta alta covarianza con la porosidad del suelo (Souza Júnior *et al.* 1999). La disminución de la DA del suelo por la incorporación del biocarbón puede ser explicada ya que este material presenta baja densidad por su alta porosidad debido a su estructura física que mantiene espacios internos vacíos (Masulili *et al.* 2010). Cuando se disminuye la densidad aparente del suelo, aumenta la porosidad y disminuye la resistencia del suelo a la penetración. Aumenta el crecimiento de las raíces de los cultivos permitiendo una mejor exploración de agua y nutrientes del suelo por las plantas (Acevedo y Martínez 2003). En el estudio de Dempster *et al.* (2012) constataron que el biocarbón utilizado en su experimento presentaba $4,42 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ de área de poros mayores que $0,60 \mu\text{m}$, seis veces mayor que la cantidad de poros del suelo sin biocarbón ($0,74 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$). Con las tasas de aplicación de 5 y 25 t ha^{-1} lograron un aumento de 0,02 y $0,08 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ de poros, es decir un aumento neto de 2,7 y 10,8%

respectivamente. En estudios sobre resistencia a penetración de suelos, obtuvieron una disminución de la resistencia en un 21% en suelos que recibieron aplicación de 10 t ha⁻¹ de biocarbón de cáscara de arroz (Masulili *et al.* 2010), una disminución de 50% de la resistencia a penetración del suelo aplicando 50 t ha⁻¹ de biocarbón, llegando disminuir hasta 70% en los niveles más altos de aplicación de biocarbón que fueron de 100 t ha⁻¹ (Chan *et al.* 2007).

Se han encontrado una correlación entre porosidad del suelo y productividad de cacaotales, suelos más porosos representaron cacaotales más productivos, principalmente en los años más secos (Souza Júnior *et al.* 1999). Por el incremento en poros en el suelo debido al uso del biocarbón, se pudo afectar la densidad aparente y mejorar la estructura del suelo, disminuyendo su compactación. Los suelos estudiados presentaban un valor considerado excelente para el desarrollo vegetal, sin embargo, la aplicación de biocarbón logró disminuir estos valores, quizá el efecto del biocarbón en la DA de suelos que presentan valores inapropiados para el desarrollo de raíces sea todavía más significativo. Los suelos que recibieron aplicación de biocarbón presentaron valores de 0,62 g cc⁻¹ en un ultisol y 0,79 g cc⁻¹ en un inceptisol, valores inferiores o cercanos a 0,78 g cc⁻¹, encontrados por Cerda (2007) en barbechos de la región. El biocarbón logró bajar los valores de la DA de los suelos a valores cerca o más bajos que suelos menos antropizados, sugiriendo la capacidad del biocarbón en mantener el equilibrio de un indicador de calidad del suelo que pueden sufrir alteración negativa por el uso humano. Esta mejora de la estructura del suelo puede mejorar la retención de agua, la vida microbiana y el crecimiento de raíces, ayudando a los cacaotales pasaren por estaciones con sequías más prolongadas. Las diferencias proporcionadas en el suelo fueron observadas en menos de un año, las cuales pueden mejorar la producción al largo de la vida del cacaotal.

La retención y disponibilidad de agua del suelo, además de su capacidad de aire son afectadas directamente por la porosidad del suelo, que es responsable por el espacio interno del suelo capaz de almacenar fluidos (Acevedo y Martínez 2003). Al agregar biocarbón al suelo facilita la infiltración del agua, ya que aumenta la cantidad de poros en el suelo, que puede ser seguida por la disponibilidad de agua para las plantas (Asai *et al.* 2009; Masulili *et al.* 2010). Sin embargo, la mejora de la retención de agua del suelo por adición de carbón sólo puede esperarse en suelos de textura gruesa o suelos con gran cantidad de macroporos, suelo con textura fina pueden no presentar mejora en la retención de agua (Glaser *et al.* 2002). En el presente trabajo no

se encontró relación del biocarbón con disponibilidad de agua en ningún de los suelos estudiados, esto puede tener ocurrido por diversos factores. Los suelos estudiados son arcillosos, con textura fina rico en microporos, lo que hace que ya tengan buena estructura física, demostrado por la baja densidad aparente encontrada en los tratamientos control. El trabajo también fue desarrollado en campo, lo que hace que algunas variables pueden ser sensibles e influenciadas por muchos factores como una muestra en un local que no poseé sombra de los árboles, otro que recibió el agua acumulada de una hoja ancha, esto es demostrado por la alta varianza en los tratamientos (Error Estándar de hasta 2,37). Los sistemas agroforestales son muy complejos, quizá otros indicadores de disponibilidad de agua son necesarios para evaluar este parámetro en experimentos como esto en campo agroforestal. Otros puntos a destacar es de que los locales de estudio tienen un buen promedio de lluvia dispersa todo el año, los suelos estudiados son ricos en materia orgánica y por el tipo de sistemas agroforestal que son manejados en estructura similar a los bosques locales, esto hace con que los valores de humedad del suelo ya sean altos y sea difícil una constatación de mejora por la aplicación de biocarbón.

5.1.2 Indicadores químicos

Los estudios de biocarbón han encontrado respuestas químicas del suelo muy variadas dependiendo del tipo de suelo donde se han aplicado el biocarbón. También en este estudio el tipo de suelo influenció la respuesta en los indicadores químicos del suelo. El inceptisol presentó menor impacto en los indicadores químicos del suelo cuando comparado con el ultisol. En suelos ácidos como el ultisol, el biocarbón actúa como un neutralizante debido su alcalinidad intrínseca ($\text{pH}=8,0$). En el biocarbón hay una baja concentración de iones de hidrógeno (H^{+1}) libres y por su estructura presentar cargas negativas, pueden atrapar H^{+1} libres del suelo (Warnock *et al.* 2007). Otro mecanismo neutralizante puede ser formado durante la pirolisis, cationes (K, Ca, Si y Mg) presentes en la madera pueden formar óxidos metálicos (por ejemplo, ceniza) que se mezclan con el biocarbón. Cuando estos óxidos llegan al suelo pueden reaccionar con H^{+1} y Al^{+3} , modificando el pH y la acidez intercambiable del suelo (Novak *et al.* 2009). La literatura presenta diversos trabajos que reportan mejoras significativas del pH en suelo con la aplicación de biocarbón (Chan *et al.* 2008; Kimetu *et al.* 2008; Laird *et al.* 2010; Major *et al.* 2010). Los resultados son más evidentes cuando la aplicación de biocarbón es elevada y cuando son aplicados en suelos ácidos (Masulili *et al.* 2010). En suelos ácidos, con cantidades de 10 t ha^{-1} han logrado un aumento de

37% en el pH y con aplicaciones elevadas (50 t ha^{-1}), se puede aumentar hasta un 60% el pH de un suelo ácido (Chan *et al.* 2008).

En el ultisol, la acidez del suelo (Al^{+3} y H^{+1}) también presentó diferencia significativa entre el control y los dos tratamientos con biocarbón. Estos resultados siguen el patrón inversos del pH, ya que las relaciones en el suelo entre estos dos indicadores son inversamente proporcionales. El biocarbón viene demostrando ser un material eficiente en disminuir la acidez de suelos que presentan problemas en este indicador. En este trabajo se analizó la acidez intercambiable, que analiza aluminio e hidrógeno intercambiables en el suelo, logrando una disminución de $1,25 \text{ cmol}(+)/\text{l}$ con la aplicación de la combinación de biocarbón con gallinaza. En un estudio que analizó solamente aluminio intercambiable (Al^{+3}), lograron eliminar por completo valores de $0,18$ y $0,26 \text{ cmol}(+)/\text{kg}$, hasta con las tasas más bajas de aplicación de biocarbón (10 t ha^{-1}) (Chan *et al.* 2008). Suelos que presentan pH y niveles de acidez en niveles adecuados, presentan ambiente más propicio al desarrollo de las plantas, logrando mejores rendimientos en los cultivos (Chan *et al.* 2007; Asai *et al.* 2009).

El efecto del biocarbón en el pH y acidez del suelo también es reportado en referencia al tiempo de su efecto en el suelo. Novak *et al.* (2009) encontraron aumento de pH y disminución de la acidez intercambiable similares para el día 0 y 67 días después de la aplicación del biocarbón. Major *et al.* (2010) encontró mejoras hasta después de cuatro años después de la aplicación de biocarbón en campo agrícola. Estos datos sugieren que el efecto del biocarbón en el encalado del suelo puede ser rápido y equilibrado al largo del tiempo. Quizá los tratamientos realizados con biocarbón lograron disminuir la acidez y aumentar el pH del suelo luego de su aplicación y que estos resultados perduren a largo plazo en el suelo. El biocarbón puede ser una alternativa para productores que necesitan encalar sus suelos, disminuyendo la necesidad de entrada de insumos externos ya que tiene efecto a largo plazo y el mismo puede ser producido dentro de la propia finca.

En el ultisol, la disponibilidad de Ca aumentó con los distintos tratamientos. La mayor disponibilidad de calcio puede ser explicada por el biocarbón y la gallinaza presentaren altos valores de este nutriente en sus composiciones, siendo que ellos solos mejoraran la disponibilidad de Ca y en conjunto lograron mayor valor significativamente diferente que los demás. En la

superficie de biocarbón están presentes cationes de Ca, que probablemente están disponible en el suelo (Novak *et al.* 2009), el análisis químico del biocarbón demostró concentración de 1,1 % de Ca en su composición, la gallinaza presentó una concentración de 6,72 %, lo que sugiere que las cantidades de biocarbón y la gallinaza utilizados y aplicados en conjunto aportan cantidades significativas de Ca para suelos que presentan deficiencia de este nutriente. Por su naturaleza, el inceptisol presentó alto contenido de Ca en el suelo, lo que puede tener influenciado en los resultados nulos obtenido de la aplicación de los tratamientos en el suelo.

Para el elemento Mg no se encontró diferencia significativa entre los tratamientos en el inceptisol estudiado, lo mismo fue encontrado en el trabajo de Laird *et al.* (2010) en un *clarion soil*. Otros trabajos reportaron hasta la disminución de la cantidad de Mg en el suelo proporcional a la cantidad de biocarbón aplicada, lo que sugieren que el Mg puede estar siendo retenido en el suelo que recibe biocarbón, o que esté lixiviando, la variable absorción por parte de la planta no puede ser aceptada ya que otros experimentos que no tenían ninguna planta cultivada en el suelo tuvieron estas respuestas (Asai *et al.* 2009; Novak *et al.* 2009). Sin embargo, en un ultisol los valores de Mg aumentaron con los tratamientos con biocarbón, demostrando el potencial del biocarbón en aumentar la disponibilidad de este elemento en algunos tipos de suelo. No obstante, los suelos estudiados no presentaban déficit de este nutriente, al contrario, la cantidad de este nutriente en el inceptisol era hasta superior al rango óptimo para los cultivos agrícolas encontrado en la literatura.

En el indicador fósforo (P), los dos suelos estudiados presentaron aumento en su disponibilidad con el uso de biocarbón combinado con gallinaza, sin embargo el único que presentó nivel de aceptable significancia estadística fue en el ultisol, donde llegó a casi duplicar el valor encontrado en el control. No se puede decir que el biocarbón utilizado en este experimento es una fuente directa de P, ya que su composición es baja en este elemento (0,03 %), la gallinaza utilizada presentó mayor valor (1,94 %). Con el uso de gallinaza, Steiner *et al.* (2007) encontró aumento significativo para la cantidad de P en el suelo, distinto de lo encontrado en el presente trabajo, posiblemente por la mayor cantidad aplicada al suelo. Sobre el biocarbón, en otros estudios encontraron que con solamente la aplicación de biocarbón, los niveles de P en el suelo aumentaron, sin embargo utilizaron cantidades elevadas de biocarbón y algunos que

presentaba alto valor de P en su composición, lo que palpablemente era encontrado en el suelo (Chan *et al.* 2007; Asai *et al.* 2009).

El biocarbón he demostrado mantener la disponibilidad de P en del suelo, aún más si una fuente adicional de nutriente se da, sin embargo los mecanismos todavía no son muy claros. Explicaciones mecánicas incluyen la disponibilidad dada de P soluble e intercambiable en el suelo por el biocarbón, también por la modificación del pH del suelo (que mejora la disponibilidad de P con pH más neutrales) y posiblemente como un potenciador de la actividad microbiana que solubilizaría fosfato en el suelo. También el biocarbón tiene efecto directo en la disminución de óxidos de aluminio del suelo, lo que hace que estos estén en menor cantidad e incapaces de unirse con P soluble. La disponibilidad de P en el suelo dependerá de factores abióticos (tipo de suelo, composición del biocarbón) y bióticos (microbiología del suelo) locales, que influenciarán directamente los mecanismos que podrán ser desarrollados para tal efecto (Atkinson *et al.* 2010). Se puede decir que la mezcla de biocarbón y gallinaza podría ser eficiente en mantener la disponibilidad de P en un ultisol para los cultivos.

En el inceptisol, los tratamientos utilizados no presentaron efecto en la cantidad de N en el suelo, ya en el ultisol, los tratamientos con biocarbón incrementaron la cantidad de N. Los datos encontrados en este estudio sugieren que el uso de biocarbón en un ultisol aumenta la cantidad de N en el suelo, y que su combinación con gallinaza potencializa dicho efecto. Otros autores reportaron que gallinaza sola no he aumentado la disponibilidad de N en el suelo (Steiner *et al.* 2007) y que biocarbón solo también no logró mejores resultados en N (Chan *et al.* 2007; Steiner *et al.* 2007). Sin embargo, muchos trabajos reportan una mejor eficiencia del uso de fertilizantes ricos en N por la planta cuando se aplica biocarbón en el suelo (Chan *et al.* 2007; Asai *et al.* 2009), por lo que se recomienda la aplicación de una combinación de biocarbón con fertilizantes ricos en N para una mejor eficiencia del uso de este elemento por las plantas.

El carbono (C) en el suelo fue superior en los tratamientos con biocarbón, este aumento de C puede ser explicado principalmente por el biocarbón ser un material rico en C en su composición (Chan *et al.* 2007; Asai *et al.* 2009; Atkinson *et al.* 2010), como también la estabilidad de C del biocarbón en el suelo. Esta estabilidad se da principalmente por él estar presente en la estructura del biocarbón, principalmente en anillos aromáticos formados en la pirolisis, estos siendo muy

estables, formando una estructura física resistente a la degradación (Liang *et al.* 2006; Novak *et al.* 2010) A pesar de la naturaleza recalcitrante del biocarbón, de 2 hasta 10% del C puede mineralizarse durante unos meses después de la aplicación del biochar en el suelo (Bruun y EL-Zerehy 2012; Stavi y Lal 2012), pudiendo esta cantidad aumentar cuando aplicado fertilizante en conjunto con el biocarbón (Steiner *et al.* 2007). Sin embargo la mineralización del biochar se da mucho más lentamente que comparado con residuos vegetales, esto sin disminuir la estabilidad del carbono orgánico en el suelo (Steiner *et al.* 2007; Bruun y EL-Zerehy, 2012). Vale resaltar que la mineralización lenta del C del biocarbón en los suelos es importante para mantener los cambios producidos por su aplicación en el suelo, ya que este C no produce cambios en la dinámica del C orgánico incrementado por la mineralización de vegetal depositado en el manto superficial del suelo.

La dinámica del C en el suelo está directamente relacionada al tipo de manejo adoptado y las condiciones ambientales locales. Mientras que los sistemas agroforestales contienen menos C que en los bosques primarios o secundarios de la misma región, secuestran C más allá de lo que ocurriría en otras actividades agrícolas (Stavi y Lal 2012). En el inceptisol y ultisol estudiados, el tratamiento TC presentó 2,97 y 3,58% de C en el suelo, respectivamente, demostrando que los sitios que se realizó el estudio ya presentaban alta cantidad de C en el suelo, sin embargo, con la adición de biocarbón las cantidades llegaron a aumentar hasta 3,6 y 5,56% respectivamente, valores igual y superior a encontrados en bosques de la región (Polidoro *et al.* 2008), donde la cantidad de carbono en el suelo puede ser comparada para evaluar el equilibrio de la materia orgánica en el suelo de los sistemas de producción que ayudan a mantener niveles óptimos en la calidad de los suelos para los cultivos.

Los cultivos de cacao de los indígenas de la región de Talamanca son manejados en sistemas agroforestales con características estructurales similares a los bosques locales (Guiracocha *et al.* 2001), lo que sugiere que son sistemas que logran mantener una mayor cantidad de carbono al suelo, que en conjunto con la aplicación de biocarbón logra cantidades todavía mayores de este elemento, lo que puede favorecer el sistema por completo, ya que la cantidad de C en el suelo es un importante indicador de calidad de suelo. Parcelas de cacao con mayor rendimiento pueden presentar un menor almacenamiento de carbono en el suelo, lo que indica que la intensificación de los rendimientos de cacao pueden generar una pérdida de carbono almacenado en las fincas

(Wade *et al.* 2010). Si sistemas de producción de cacao como los estudiados logran aumentar sus rendimientos, el biocarbón puede ser una alternativa para ayudar a mantener o elevar los niveles de C en el suelo.

Para la relación carbono/nitrógeno (C/N) en el suelo, los dos sitios estudiados presentaron aumento de los valores de este indicador en los tratamientos que recibieron biocarbón. Tanto en el inceptisol como en el ultisol los tratamientos con biocarbón alcanzaron valores de este indicador dentro del rango óptimo para la producción de cacao y otros cultivos agrícolas. No fue encontrado diferencia entre el tratamiento con biocarbón y su combinación con gallinaza, demostrando efecto solamente del biocarbón en la relación C/N del suelo con los tratamientos utilizados. Algunos trabajos con biocarbón no resaltan en sus resultados la relación C/N en los suelos estudiados, tratando los dos elementos por separado (Chan *et al.* 2008; Major *et al.* 2010; Van Zwieten *et al.* 2010), sin embargo un suelo con una relación C/N adecuada puede propiciar una buena absorción del nitrógeno por la planta además de regular la biota del suelo (Bertsch 1995). El uso del biocarbón puede favorecer este equilibrio en el suelo favoreciendo un buen desarrollo de los cultivos.

Los resultados encontrados en este estudio indican el potencial del biocarbón en mejorar indicadores químicos de calidad de suelo, siendo aún más impactante en un suelo que presentaba valores de nutrientes afuera de rangos óptimos para los cultivos. Como se sabe, los ultisoles son unos de los suelos más viejos del planeta, los cuales sufrieron intemperies por años que ocasionó pérdidas de muchos nutrientes. El biocarbón fue capaz en menos de un año mejorar indicadores químicos que muchas veces son limitantes dentro de la agricultura. Resultados similares en el suelo son encontrados en comparaciones realizadas entre otro grupo de suelos antiguos e intemperizados que son los oxisoles de la amazonía, comparados con las *Terras Pretas de Índio*, donde encuentran mejores características dadas por resquicios de carbono de quema (Lehmann *et al.* 2003), lo que confirma que el biocarbón puede lograr cambios significativos en indicadores químicos de suelos y que puede ser un acondicionador de suelos a corto plazo.

5.1.3 Indicadores biológicos

Fue observado un efecto poco significativo de los tratamientos en los indicadores de calidad biológica de los suelos estudiados, en el ultisol no hubo ninguna diferencia estadística entre

ninguno tratamiento en los indicadores biológicos del suelo estudiados. Los cambios fueron observados apenas en la cantidad de biomasa microbiana en el inceptisol. Los cambios fueron dados en los tratamientos que recibieron gallinaza y biocarbón solos donde presentaron valores inferiores en la cantidad de biomasa microbiana. En los dos sitios y en todos los tratamientos los valores de actividad microbiana estudiados y encontrados fueron altos, lo que pude tener resultado en la falta de respuesta por los distintos tratamientos. La microbiología de los suelos es muy diversa, con distintos grupos funcionales, Germano *et al.* (2012), encontraron mayores índices de diversidad microbiológica en suelos antropogénicos que presentaban alto contenido de carbono recalcitrante que en los suelos del alrededor, este trabajo no he analizado estos dichos grupos, solamente se analizó la microbiología por general, quizá cambios en este sentido sean más significativos, un análisis de diversidad de grupos funcionales en el suelo podría dar a entender mejor los efectos de los tratamientos en la microbiología de los suelos.

Los sistemas de manejo que mantienen niveles altos de carbono total del suelo pueden proporcionar una mayor actividad microbiana en el suelo (Santos *et al.* 2004). Con la aplicación de biocarbón, los microorganismos heredados del suelo pueden adaptarse a la nueva fuente de carbono. Sin embargo, el tipo de biocarbón puede determinar los grupos de microorganismos que desarrollen en los suelos (Steinbeiss *et al.* 2009). En comparación con las partículas del suelo biocarbón tiene un área de superficie grande, debido a su estructura física y de su microestructura altamente porosa, que resulta una mayor retención de materia orgánica disuelta y esta por su vez puede servir como fuente de nutriente para los microorganismos (Liang *et al.* 2006). Como expuesto anteriormente, la cantidad de espacio poroso potencialmente habitable por microorganismos, es decir poros mayores que $0,60\mu\text{m}$, puede aumentar con la aplicación de biocarbón al suelo. Dempster *et al.* (2012), encontraron que la cantidad de estos poros aumentó en 10% con la aplicación equivalente de 25 t ha^{-1} de biocarbón al suelo. Sin embargo en el mismo estudio la actividad microbiana en el suelo no aumentó con la aplicación de biocarbón, lo que hace que las hipótesis originales de que el biocarbón aumenta la actividad microbiana al suelo no se apoyen por lo general por distintos factores.

Hay muchas condiciones determinantes que tienen que ser tomadas en cuenta en experimentos que tratan la influencia del biocarbón en la actividad microbiana. Las primeras condiciones que afectarán los resultados están relacionadas con el biocarbón utilizado (materia

prima del biocarbón, condiciones de producción, tamaño de las partículas). Otros factores están relacionados con las condiciones de los experimentos (clima, tipo de suelo, cantidad de biocarbón utilizado, fertilizantes, tiempo del estudio), dadas estas condiciones se traducirá los efectos del biocarbón sobre la comunidad microbiana y sus funciones asociadas (Dempster *et al.* 2012). El biocarbón en interacción con el ambiente puede contribuir rápidamente a las características químicas del suelo. A pesar de esto, propiedades biológicas pueden tardar más tiempo para ser transformados naturalmente en los suelos (Linhares *et al.* 2012). Otro punto a destacar es que la cantidad de gallinaza y biocarbón utilizados en este experimento fueron inferiores cuando comparada a otros trabajos que encontraron diferencia en la actividad microbiana del suelo, donde los tratamientos presentaron un cierta tendencia en provocar cambios en indicadores biológicos, quizá sea necesaria una mayor cantidad de biocarbón y/o gallinaza aplicada a los suelos para producir cambios significativos en los indicadores biológicos estudiados. Un trabajo realizado en sitios más alterados por el uso de químicos, como los usos de suelo de las plantaciones de banano y plátano de la región pueden presentar diferencias significativas entre los tratamientos utilizados.

5.2 Efecto del biocarbón y gallinaza en la productividad de cacao e incidencia de enfermedades

Los tratamientos utilizados en este experimento no aumentaron de manera significativa la cantidad de frutos de cacao en las parcelas estudiadas, ni la cantidad de peso húmedo de semillas de cacao producidas por cada árbol. Sin embargo, la combinación de biocarbón con gallinaza logró alcanzar valores superiores para el promedio del peso húmedo de semillas por fruto, resultado que indica que las plantas que recibieron este tratamiento presentaron mayor cantidad de peso húmedo de semillas por fruto, lo que sugiere que plantas de cacao que reciben aplicación de biocarbón con gallinaza producen frutos más grandes que cuando no se aplica ninguna enmienda al suelo.

La mayoría de los trabajos realizados con biocarbón reportan efectos positivos de su aplicación en la productividad de los cultivos, además si un fertilizante es aplicado. Sin embargo, la mayoría de los trabajos son realizados en invernaderos con variables muy bien controladas, donde son manipulados en macetas que no reciben influencia directa de adversidades del medio externo. En un trabajo que fue llevado a cabo en campo, los resultados en productividad de maíz

con la aplicación de biocarbón no fueron significativamente diferentes en el primer año del cultivo, sin embargo se expresaron en el segundo año después de la aplicación de los tratamientos al suelo. Con la aplicación de biocarbón (8 y 20 t ha⁻¹) la producción de granos de maíz fue creciente al uso creciente de biocarbón, con valores significativamente significativos al control, mismo cuatro años después de la aplicación, donde los resultados fueron todavía más expresivos (Major *et al.* 2010). Efecto de diferentes biocarbones en otros estudios fueron similares (Chan *et al.* 2008), posiblemente el biocarbón utilizado puede tener las respuestas similares a los estudios de campo a largo plazo. La aplicación de biocarbón puede mejorar la retención de nutrientes (Yeboah *et al.* 2009) y disminuir la acidez del suelo, lo que pueden ser algunas de las características que puedan aumentar la productividad de cultivos agrícolas. Algunos autores reportan que algunos cultivos aumentaron la absorción de nutrientes en conjunto con el aumento de las tasas de aplicación de biocarbón (Steiner *et al.* 2007; Major *et al.* 2010).

Un buen manejo integral de parcelas de cacao puede generar beneficios al cultivo. Resultados de producción de un cacaotal que tenía una producción baja al Sur de Brasil, llegaron a tener un aumento en la producción de cacao de 355%, en apenas cuatro años de trabajos, que incluyeron selección adecuada de área de siembra, utilización de clones y un manejo adecuado (Mandarino y Gomes 2009). El presente trabajo fue desarrollado en un jardín clonal, donde fue escogido un buen local, utilizando clones productivos y resistentes a enfermedades, sin embargo el manejo, principalmente de los niveles de nutrientes en el suelo, no fueron evaluados ni manejados antes de la presente fecha. Si los jardines clonales estudiados estuvieran recibiendo dicho manejo del suelo, podrían presentar el día de hoy una mayor productividad, generando más ingresos a las familias dependientes de estos sitios.

El uso de clones resistentes a las enfermedades puede tener influenciado lo bastante para influir en la baja incidencia de monilia (*Moniliophthora roreri*) y mazorca negra (*Phytophthora palmivora*). Un trabajo como este realizado en plantas susceptibles a estas enfermedades podría presentar alguno resultado más significativo de la aplicación de los tratamientos (biocarbón y/o gallinaza). Elad *et al.* (2010) encontraron que suelo que recibió aplicación de biocarbón ha inducido la resistencia foliar por hongos patógenos (*Botrytis cinerea* y *Leveillula taurica*) en plantas de tomate y chile. Un posible efecto del biocarbón en inducción de resistencia a hongos patógenos de frutos de cacao también puede ser esperado.

5.3 Efecto de la aplicación de biocarbón y gallinaza en suelo de macetas con plántulas de cacao

El efecto positivo del biocarbón sobre el crecimiento de plantas ha sido reportado tanto para plantas bajo sistemas controlados (Chan *et al.* 2008) como en campo (Major *et al.* 2010). Varios trabajos reportan la necesidad de la aplicación de un fertilizante rico en nitrógeno para que el biocarbón tenga resultados más pronunciados (Steiner *et al.* 2007; Chan *et al.* 2007), en estos sistemas hay una necesidad de nitrógeno y otros nutrientes (Major *et al.* 2010) para equilibrar la relación carbono/nitrógeno en el suelo (Steiner *et al.* 2008). El nitrógeno ejerce un papel sobresaliente sobre el crecimiento de plántulas, lo cual también limita la acumulación de otros nutrientes como el P, Ca y Mg, que son absorbidos en mayores cantidades en presencia del N (Scivittaro *et al.* 2004; Souza Júnior y Carmello 2008). Suelos fertilizados con gallinaza presentan cantidades mayores de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg) y micronutrientes (Cu, Zn, Fe) y un pH más elevado (Henreaux 2012). El biocarbón puede actuar en la capacidad de intercambio catiónico del suelo, en su acidez y en el pH (Chan *et al.* 2008; Kimetu *et al.* 2008), lo que hace que en conjunto con fertilización, esta sea mejor aprovechada. En el caso del nitrógeno, el biocarbón puede ayudar en la disminución de las pérdidas por volatilización (desnitrificación) y lixiviación.

La aplicación de biocarbón en combinación con gallinaza puede acelerar el crecimiento de plántulas de cacao, garantizando una producción más vigorosa y económica en un espacio de tiempo menor. Con este crecimiento, se puede disminuir el tiempo necesario para injertar los clones en las plántulas producidas (porta injertos) y así disminuir el tiempo de permanencia de los almácigos, reduciendo el tiempo de producción y los costos que implican su mantenimiento. La fase de vivero es la etapa de producción que demanda más cuidados, el biocarbón y gallinaza podrían representar una alternativa para productores rurales, que les permita disminuir el tiempo, los labores y costos de producción de almácigos de cacao.

6 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS PARA EL DESARROLLO Y PARA ALIMENTAR INSUMOS DE CAPACIDADES SOBRE BIOCARBÓN

El tema biocarbón viene siendo discutido y evaluado en varios contextos: como fuente renovable del recurso bioenergético, una posible solución para la fertilidad de los suelos, almacén de carbono en el suelo, una de las soluciones al calentamiento global, certificación, mercado de carbono y otras más. Las investigaciones con biocarbón son relativamente nuevas, todavía más cuando se comparan con la edad de las *Terras pretas*, que son la inspiración a los estudios con biocarbón. A pesar de lo anterior, todavía es necesario generar información para que el uso del biocarbón sea consolidado en bases científicas como un acondicionador de suelo de largo plazo.

En este trabajo se evaluaron los efectos del biocarbón en algunos indicadores de calidad del suelo y en la producción de cacao. Lo que se pudo constatar con la literatura y con los resultados aquí encontrados es que el biocarbón sí puede tener efectos benéficos al suelo, todavía más en suelos con mayores deficiencias y que estos efectos se pueden manifestar en la producción del cultivo y con esto mejorar la calidad de vida de los agricultores. En la región de Talamanca, el cacao es un producto que forma parte de las familias indígenas y que tiene como principal objetivo la venta de las semillas para el mercado nacional y/o internacional que genera ingresos básicos y fundamentales para muchas de ellas. Sin embargo, muchos productores no dan el manejo básico a sus cultivos de cacao (podas, manejo de enfermedades) y mucho menos hacen fertilización directa de sus cultivos, lo que hace que el promedio de la producción sea relativamente bajo.

El biocarbón demostró su potencial en mejorar la densidad aparente, acidez y propiedades ligadas al C de los dos suelos estudiados y en un ultisol sus efectos en otros indicadores fueron más impactantes, mejorando muchos de ellos. El biocarbón puede ser una solución para suelos poco productivos de la región y se recomienda su aplicación a los suelos en las cantidades evaluadas en este experimento. Sin embargo, se comprendió desde un inicio que era necesario encontrar formas en las cuales los productores de cacao de la región pudieran producir su propio biocarbón, esto para no generar una dependencia externa de insumos para el desarrollo de la técnica presentada a los productores. Así el presente proyecto se vinculó al grupo Seachar para

generar juntos posibilidades de producción de biocarbón para los productores que presentasen interés en estas técnicas y que tuviesen una oportunidad de utilizarla.

El grupo Seachar llegó a la región de Talamanca para promover el proyecto de la *Estufa Finca*, que a su vez financió el presente estudio. El proyecto *Estufa Finca* busca además de mejorar la calidad de vida de los indígenas, promocionar la producción de biocarbón mediante el uso de las estufas. De esta manera, el productor que quiere hacer uso del biocarbón en su finca y no conoce otra forma de producirlo tendrá el conocimiento de una técnica y no necesitará comprarlo, podrá producir en la finca su propio fertilizante, lo que hace que se estrechen los enlaces con la tierra y el productor.

Hasta el momento, el proyecto tiene 146 Estufas Finca distribuidas en Talamanca, de las cuales 110 en familias de la Reserva Indígena Bribri, dos para sustitución, 15 vendidas al mercado local, tres en centros comunales, incluyendo una en Panamá, 6 utilizadas en los talleres y las demás siendo utilizadas para talleres de capacitación. Para que los productores reciban sus estufas, el proyecto firma un acuerdo con un miembro de la familia que tiene que participar en la escuela de campo (ECA) desarrollada para enseñar la técnica de uso de la estufa y qué es el biocarbón y para qué puede ser utilizado. Los talleres de la ECA están compuestos por dinámicas con los participantes, dos secciones con preguntas para la introducción del tema, práctica en el campo y preguntas de la retroalimentación (Figura 14). Como algunas familias involucradas en el proyecto no tienen áreas agrícolas y el proyecto tiene otro objetivo que es el del desarrollo del mercado local de biocarbón, el proyecto también cuenta con un mecanismo de compra del biocarbón, con el cual ya se han comprado alrededor de 2.400 kg de biocarbón producidos con las estufas. Dicho biocarbón está siendo utilizado en reventa para viveros locales, en los talleres, aplicados a proyectos de fertilización agrícola ubicados en escuelas y fincas de productores locales y también se ha hecho una donación de alrededor de 1000 kg de biocarbón a los socios de APPTA para la utilización en sus cacaotales y 200 kg para investigaciones que serán desarrolladas en el CATIE.



Figura 14. Dinámica realizada con participantes (a) y manejo de las Estufas Finca (b) en una de las escuelas de campo realizadas por Seachar en la comunidad de Suretka, Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica, 2012. Fuente: archivo personal, 2012.

También para la divulgación de la técnica de fertilización con biocarbón, el proyecto desarrolló en conjunto con esta investigación talleres teórico-prácticos dentro de la comunidad donde se tocaron temas como: *Terra Preta de Índio* también con conceptos básicos sobre el biocarbón, exposición de mejoras en la producción agrícola encontradas por otros trabajos, presentación del presente trabajo desarrollado en la región, técnicas de como producir el biocarbón y cómo utilizarlo directamente o en forma de abonos y cómo aplicarlo al suelo (Figura 15).



Figura 15. Actividades de los talleres de biocarbón: aplicación en cacaotal en la comunidad de Shiroles (a) y producción de compost en finca de la comunidad de Watsi (b), Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica, 2012. Fuente: archivo personal, 2012.

Se apreció que muchas personas de la región de Talamanca están interesadas en el uso de la Estufa Finca y de la aplicación de biocarbón al suelo. Se espera que las personas vinculadas al presente proyecto y aquellas que participaron de las escuelas de campo de la Estufa Finca y talleres sobre biocarbón, utilicen las técnicas presentadas para ellos y que haya una integración de sus conocimientos tradicionales, proporcionando mejoras en la calidad de sus suelos, con posibilidades así de aumentar la productividad de sus cultivos, generando mayor conocimiento, experiencias y un mayor ingreso para las familias. Algunos resultados del proyecto Estufa finca y de esta investigación fueron divulgados en la página de National Geographic para difundir las experiencias con Estufa Finca y la aplicación de biocarbón en el suelo (Anexo 20).

7 CONCLUSIONES

La cantidad de biocarbón mezclado al suelo en una sola aplicación presentó mejoras en algunos indicadores de calidad de los suelos estudiados, siendo aún más significativo combinado con gallinaza. El efecto de los tratamientos en la productividad de cacao fue menos impactante. Los resultados indican que cambios significativos en calidades del suelo pueden ser observados en menos de un año, sin embargo, la productividad de un cultivo perenne puede tardar más tiempo en presentar respuestas estadísticamente significativas.

Suelos que presentan problemas de compactación pueden presentar mejoras de la densidad aparente cuando se ha aplicado biocarbón. Los dos suelos estudiados no presentaban problemas de densidad aparente en el suelo, presentando valores inferiores a 1 g cc^{-1} , mismo así el uso de biocarbón logró disminuir los valores todavía más, obteniendo valores encontrados solamente en sitios poco antropizados de la región.

El biocarbón mostró ser una enmienda favorable a ser utilizada en el suelo ultisol, mejorando indicadores del suelo que pueden limitar el crecimiento vegetal. En este tipo de suelo con el uso de biocarbón las propiedades químicas del suelo presentaron mejoras en el pH, acidez, C, MO y C/N del suelo. La gallinaza presentó mayores valores de Ca. La combinación de biocarbón y gallinaza, además de presentar las mejoras encontradas sólo con el uso del biocarbón, aumentó también la disponibilidad de Ca, K, P y N en el suelo, lo que sugiere que una interacción de biocarbón y gallinaza (TBG) sea más efectivo que los otros tratamientos en proporcionar cambios positivos en las propiedades químicas de suelos como los estudiados (Ultisol y Inceptisol).

El efecto del biocarbón en la productividad de cacao sólo fue significativo en el aumento del peso de semillas por fruto. No fue verificado un aumento estadísticamente significativo para la producción de número de frutos y peso húmedo de semillas de cacao al final del experimento. También no se verificó diferencia estadística en la incidencia de monilia (*Moniliophthora roreri*) entre los tratamientos estudiados. Los indicadores de incidencia de mazorca negra no cumplieron con los supuestos de normalidad. Un efecto directo de los clones resistentes a las enfermedades estudiadas pudo haber influido más que los tratamientos utilizados en este trabajo.

Se encontró un efecto en la aplicación del biocarbón y gallinaza en el crecimiento de almácigos de cacao. En altura de plántulas de cacao el crecimiento fue más expresivo con la interacción de los dos insumos, la aplicación de gallinaza también demostró potencial de mejora de crecimiento en altura de macetas de cacao. En el crecimiento del cuello de las plántulas el tratamiento con biocarbón fue el que presentó mejores resultados después del tratamiento con biocarbón y gallinaza, el tratamiento con gallinaza también presentó resultados positivos.

8 RECOMENDACIONES

Estudios con biocarbón son relativamente nuevos y casi todos están enfocados en los resultados de su aplicación al suelo. Es necesario estudiar y entender mejor las implicaciones del uso del biocarbón para que sea una herramienta más efectiva en la agricultura sostenible. Técnicas para moler el biocarbón en partículas menores necesitan ser más difundidas y desarrolladas. La etapa de preparación del material puede generar muchos inconvenientes cuando una técnica no es muy bien aplicada. La aplicación puede generar una excesiva liberación de polvo que es altamente contaminante en las vías respiratorias de la persona que lo manipula. Quizá un trabajo con el objetivo de encontrar un porcentaje de humedad ideal para trabajar con el biocarbón sea de utilidad para disminuir estos problemas.

Trabajos relacionados con la metodología de aplicación y mezcla del biocarbón al suelo en escala comercial son necesarios. En una plantación ya instalada la mezcla del biocarbón al suelo puede ser una actividad laboriosa para el productor y puede afectar las raíces de los cultivos. La aplicación del biocarbón antes o en el momento de la siembra del cultivo estudiado puede constituir en un labor menos desgastante y con mejores resultados de incorporación al suelo.

Algunos cambios proporcionados por la aplicación de biocarbón pueden tardar en ser representativos. Experimentos como éste en escala de finca deben ser replicados y mantenidos a largo plazo para tener un conocimiento de los posibles cambios en la productividad, resistencia a patógenos y en las calidades de los suelos.

Se verificó que la cantidad de gallinaza aplicada no proporcionó efectos tan expresivos en los resultados de suelo y productividad, se recomendaría la utilización de mayores cantidades (2 o 3 kilos/planta) para un mejor contraste entre los tratamientos y el control.

El experimento de vivero proporcionó resultados interesantes, que a más largo plazo pudiera tener resultados todavía más expresivos. Se verificó la necesidad de evaluar otros indicadores para una mejor comprensión de lo que pasa en el suelo y en la planta. Un análisis de calidad de suelo (químico, físico y/o biológico) podría ayudar a comprender mejor los cambios ocurridos como también el índice de área foliar, peso de materia seca y otros indicadores.

9 BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, E; Martínez, E. 2003. Sistema de labranza y productividad de los suelos. *In* Acevedo, E.: Sustentabilidad en Cultivos Anuales: Cero Labranza, Manejo de Rastrojo. Serie Ciencias Agronómicas 8. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, CL. p. 13-27.
- Amores, F; Palacios, A; Jiménez, J; Zhang, D. 2009. Entorno Ambiental, Genética, Atributos de Calidad y Singularización del Cacao en el Nor Oriente de la Provincia de Esmeraldas. Boletín Técnico nº135. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Estación Experimental Pichilingue. Quevedo, Los Ríos, Ecuador. 120p.
- Asai, H; Samson, BK; Stephan, HM; Songyikhangsuthor, K; Homma, K; Kiyono, Y; Inoue, Y; Shiraiwa, T; Horie, T. 2009. Biochar amendment techniques for upland rice production in Northern Laos 1. Soil physical properties, leaf SPAD and grain yield. *Field Crops Research* 111: 81-84.
- Atkinson, CJ; Fitzgerald, JD; Hipps, NA. 2010. Potential mechanisms for achieving agricultural benefits from biochar application to temperate soils: a review. *Plant Soil* 337: 1-18.
- Bertsch, F. 1995. La Fertilidad de los Suelos y su Manejo. 1 ed. San José, CR: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 157 p.
- Borge, C; Castillo R. 1997. Cultura y Conservación en la Talamanca Indígena. 1 ed. San José, CR: EUNED. 310 p.
- Briceño, JA; Pacheco, R. 1984. Métodos Analíticos para el Estudio de Suelos y Plantas. San José, Costa Rica: UCR. 137 p.
- Bruun, S; EL-Zerehy, T. 2012. Biochar effect on the mineralization of soil organic matter. *Pesq. Agropec. Bras.* 47 (5): 665-671.

- Busscher, WJ; Novak, JM; Evans, DE; Watts, DW; Niandou, MAS; Ahmedna, M. 2010. Influence of pecan biochar on physical properties of a norfolk loamy sand. *Soil Science* 175 (1): 10-14.
- Cerda, R. 2007. Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banana (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*) en el valle de Talamanca, Costa Rica. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba, CR. 60 p.
- Chan, KY; Van Zwieten, L; Meszaros, I; Downie, A; Joseph, S. 2008. Using poultry litter biochars as soil amendments. *Australian Journal of Soil Research* 46: 437-444.
- Chepote, RE. 2003. Efeito do composto da casca do fruto de cacau no crescimento e produção do cacauero. *Agrotropica* 15 (1): 1-8.
- Colombo, SFO; Pimenta, AS; Hatakeyama, K. 2006. Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável. XIII Simpósio de Engenharia de Produção, Bauru, São Paulo, BR. 8 p.
- Das, KC; Garcia-perez, M; Bibens, B; Melear, N. 2008. Slow pyrolysis of poultry litter and pine woody biomass: Impact of chars and bio-oils on microbial growth. *Journal of Environmental Science and Health* 43 (7): 714-724.
- Dempster, DN; Gleeson, DB; Solaiman, ZM; Jones, DL; Murphy, DV. 2012. Decreased soil microbial biomass and nitrogen mineralisation with Eucalyptus biochar addition to a coarse textured soil. *Plant Soil* 354: 311-324.
- Elad, Y; David, DR; Harel, YM; Borenshtein, M; Kalifa, HB; Silber, A; Graber, ER. 2010. Induction of systemic resistance in plants by biochar, a soil-applied carbon sequestering agent. *Phytopathology* 100 (9): 913-921.
- EMBRAPA. 1997. Manual de Métodos de Análise de Solo / Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Documentos n. 1, 2 ed. EMBRAPA-CNPS, Rio de Janeiro, BR. 212p.

Enríquez, GA. 2004. Cacao Orgánico: Guía para Productores Ecuatorianos. Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias. Quito, EC. 54. 360 p.

Fuertes, AB; Camps Arbestain, M; Sevilla, M; Maciá-Agulló, JA; Fiol, S; López, R; Smernik, RJ; Aitkenhead, HP; Arce, F; Macias, F. 2010. Chemical and structural properties of carbonaceous products obtained by pirolisis and hydrothermal carbonisation of corn stover. Australian Journal of Soil Research 48: 618-626.

Glaser, B; Lehmann, J; Zeck, W. 2002. Ameliorating physical and chemical properties of highly weathered soils in the tropics with charcoal - a review. Biol. Fertil. Soils 35: 219-230.

Guiracocha, G; Harvey, C; Somarriba, E; Krauss, U; Carrillo, E. 2001. Conservación de la biodiversidad en sistemas agroforestales con cacao y banano en Talamanca, Costa Rica. Agroforestería en las Américas 8 (30): 7-11.

Henreux, J. 2012. Efecto del biocarbón combinado con fertilizantes orgánicos y microorganismos benéficos sobre el desarrollo, productividad y resistencia de las plantas, Turrialba, Costa Rica. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba, CR. 113 p.

Henríquez, C; Calbalceta, G. 1999. Guía práctica para el estudio introductorio de los suelos con un enfoque agrícola. San José, CR: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS). 112 p.

Hinojosa, V; Stoian, D; Somarriba, E. 2003. Los volúmenes de negocio y las tendencias de precios en los mercados internacionales de cacao (*Theobroma cacao*) y banano orgánico (*Musa AAA*). Agroforestería en las Américas, 10 (37-38): 63-68.

IUSS Working Group WRB. 2007. World Reference Base for Soil Resources 2006, first update 2007. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. 116 p.

Kapp, GB. 1989. Perfil Ambiental de la Zona Baja de Talamanca, Costa Rica. Turrialba, Costa Rica, Proyecto de Cooperación Agroforestal CATIE-GTZ-DGF. 100 p.

- Kimetu, JM; Lehmann, J; Ngoze, SO; Mugendi, DN; Kinyangi, JM; Riha, S; Verchot, L; Recha, JW; Pell, AP. 2008. Reversibility of soil productivity decline with organic matter of differing quality along a degradation gradient. *Ecosystems* 11: 726-739.
- Laird, D; Fleming, P; Wang, B; Horton, R; Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158: 436-442.
- Lehmann, J; Silva Junior, JP da; 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: 343-357.
- Liang B; Lehmann J; Solomon D; Kinyangi J; Grossman J; O'Neill B; Skjemstad JO; Thies J; Luizão FJ; Petersen J; Neves EG. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70 (5): 1719-1730.
- Linhares, CR; Lemke, J; Auccaise, R; Duó, DA; Ziolli, RL; Kwapinski, W; Novotny, EH. 2012. Reproducing the organic matter model of anthropogenic dark earth of Amazonia and testing the ecotoxicity of functionalized charcoal compounds. *Pesq. Agropec. Bras.* 47 (5): 693-698.
- Major, J; Rondon, M; Molina, D; Riha, SJ; 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.
- Mandarino, EP; Gomes, ARS. 2009. Produtividade do cacauzeiro (*Theobroma cacao* L.) cultivados em blocos monoclonais, no sul da Bahia, Brasil. *Boletim Técnico* n. 197. Ilhéus, Bahia, BR. CEPLAC/CEPEC. 32 p.
- Masulili, A; Utomo, WH; Syechfani, MS. 2010. Rice husk biochar for rice based cropping system in acid soil 1. The characteristics of rice husk biochar and its influence on the properties of acid sulfate soils and rice growth in West Kalimantan, Indonesia. *Journal of Agricultural Science* 2 (1): 39-47

- Mills HA, Jones JB Jr. 1996. Plant Analysis handbook II: a practical sampling, preparation, analysis, and interpretation guide. Athens, GA, USA: Micro-Macro Publishing. 422 p.
- Namgay, T; Singh, B; Singh, BP. 2010. Influence of biochar application to soil on the availability of As, Cd, Cu, Pb, and Zn to maize (*Zea mays* L.). Australian Journal of Soil Research. 48: 638-647.
- Novak, JM; Busscher, WJ; Laird, DL; Ahmedna, M; Watts, DW; Niandou, MAS. 2009. Impact of biochar amendment on fertility of a Southeastern Coastal Plain Soil. Soil Sci. 174 (2): 105-112.
- Oliveira, ML; Luz, EDMN. 2005. Identificação e Manejo das Principais Doenças do Cacaueiro no Brasil. Ilhéus, Bahia, BR. CEPLAC/ CEPEC/SEFIT. 132 p.
- Orozco, L; Villalobos, M; Ortiz, A; Riascos, L; Méndez, J; Sánchez, V. 2008. Las fincas indígenas bribri y cabécar de Talamanca, Costa Rica. Agroforestería en las Américas 46: 104-109.
- Polidoro, B; Winowiechi, L; Johnson-Maynard, J; McDaniel, P; Morra, M. 2008. Suelos del valle y del piedemonte en Talamanca: un paisaje dinámico para el almacenamiento de carbono. Agroforestería en las Américas 46: 44-44.
- Phillips-Mora, W; Cerda, R. 2010. Catálogo: enfermedades del cacao en Centroamérica. Serie técnica. Manual técnico / CATIE; no. 93. Eds. Somarriba, E; Orozco S. 1 ed. Turrialba, CR: CATIE. 24p.
- _____; Arciniégas, LA; Mata, AQ; Motamayor, JCA. 2012. Catálogo de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales. Serie técnica. Manual técnico / CATIE; n. 105. 1 ed. Turrialba, CR. 68 p.
- Santos, VB dos; Castilhos, DD; Castilhos, RMV; Pauletto, EA; Gomes, AS; Silva, DG da. 2004. Biomassa, atividade microbiana e teores de carbono e nitrogênio totais de um planossolo sob diferentes sistemas de manejo. R. bras. Agrociência 10 (3): 333-338.

- Scivittaro, WB; Oliveira, RP; Morales, CFG; Radmann, EB. 2004. Adubação nitrogenada na formação de porta-enxertos de limoeiro 'cravo' em tubetes. Rev. Bras. Frutic. 26 (1): 131-135
- Seachar. 2012. Positive tools for carbon-negative living (en línea). Consultado 20 octubre 2012. Disponible en <http://www.seachar.org>.
- Sohi, SP; Krull, E; Lopez-Capel, E; Bol R. 2010. A review of biochar and its use and function in soil. Advances in Agronomy 105: 47-82.
- Somarriba, E; Harvey, C. 2003. ¿Cómo integrar producción sostenible y conservación de biodiversidad en cacaotales orgánicos indígenas? Agroforestería en las Américas 10 (37-38): 12-17.
- _____ ; Trivelato, M; Villalobos, M; Suárez, A; Benavides, P; Moran, K; Orozco, L; López, A. 2003. Diagnóstico agroforestal de pequeñas fincas cacaoteras orgánicas de indígenas Bribri y Cabécar de Talamanca, Costa Rica. Agroforestería en las Américas 10 (37-38): 24-30.
- _____ ; Astorga, C; Cerda, R; Villalobos, M; Say, E; Prado, J; Orozco, L; Vásquez, N. 2010. El cacaotal mejorado: guía del facilitador. Serie técnica. Materiales de extensión / CATIE; n. 2. 1 ed. Turrialba, CR.: CATIE. 31 p.
- Souza Júnior, JO; Carmello, QAC. 2008. Formas de adubação e doses de uréia para mudas clonais de cacau cultivadas em substrato. R. Bras. Ci. Solo 32: 2367-2374.
- _____ ; Ker, JC; Mello, JWV; Cruz, CD. 1999. Produtividade do cacau em função de características do solo. II. Características físico-morfológicas e alguns elementos extraídos pelo ataque sulfúrico. R. Bras. Ci. Solo 23 (4): 873-880
- Steinbeiss, S; Gleixner, G; Antonietti, M; 2009. Effect of biochar amendment on soil carbon balance and soil microbial activity. Soil Biology & Biochemistry 41: 1301-1310.

Steiner, C; Teixeira, WG; Lehmann, J; Nehls, T; Macedo, JLV de; Blum, WEH; Zech, W. 2007. Long term effects of manure, charcoal and mineral fertilization on crop production and fertility on a highly weathered Central Amazonian upland soil. *Plant Soil* 291: 275-290.

_____; Glaser, B; Teixeira, WG; Lehmann, J; Blum, WEH; Zech, W. 2008. Nitrogen retention and plant uptake on a highly weathered central Amazonian Ferralsol amended with compost and charcoal. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 171: 893-899.

Suárez, A. 2001. Aprovechamiento sostenible de madera de *Cordia alliodora* y *Cedrela odorata* de regeneración natural en cacaotales y bananales de indígenas de Talamanca, Costa Rica. Tesis M.Sc. CATIE, Turrialba, Costa Rica. 74 p.

_____. 2008. ¿Cuántos y cuáles árboles de laurel (*Cordia alliodora*) se pueden cosechar en los cacaotales y bananales indígenas de Talamanca, Costa Rica? *Avances de Investigación, Agroforestería en la Américas* 46: 104-109.

Stavi, I; Lal, R. 2012. Agroforestry and biochar to offset climate change: a review. *Agronomy for Sustainable Development* 32: 1-16.

Chepote, RE; Santana, SD; Araujo, QR; Sodré, GA; Reis, EL; Pacheco, RG; Marrocos, PCL; Serôdio, MHCF; Menezes, AA; Valle, RR. 2007. Aptidão agrícola e fertilidade de solos para a cultura do cacaueteiro. *In* Valle, RR. ed. *Ciência, tecnologia e manejo do cacaueteiro*. CEPLAC/CEPEC/CEFIS. Ilhéus, Bahia, BR. 467 p.

Van Zwieten, LV; Kimber, S; Morris, S; Chan, KY; Downie, A; Rust, J; Joseph, S; Cowie, A. 2010. Effects of biochar from slow pyrolysis of papermill waste on agronomic performance and soil fertility. *Plant Soil* 327: 235-246.

Visser, S; Parkinson, D. 1992. Soil biological criteria as indicators of soil quality: Soil microorganisms. *American Journal of Alternative Agriculture* 7 (1-2): 33-33.

Wadea, ASI; Asaseb A; Hadley, P; Mason, J; Ofori-Frimpong, K; Preece, D; Springg, N; Norrison, K. 2010. Management strategies for maximizing carbon storage and tree species

diversity in cocoa-growing landscapes. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 138: 324–334.

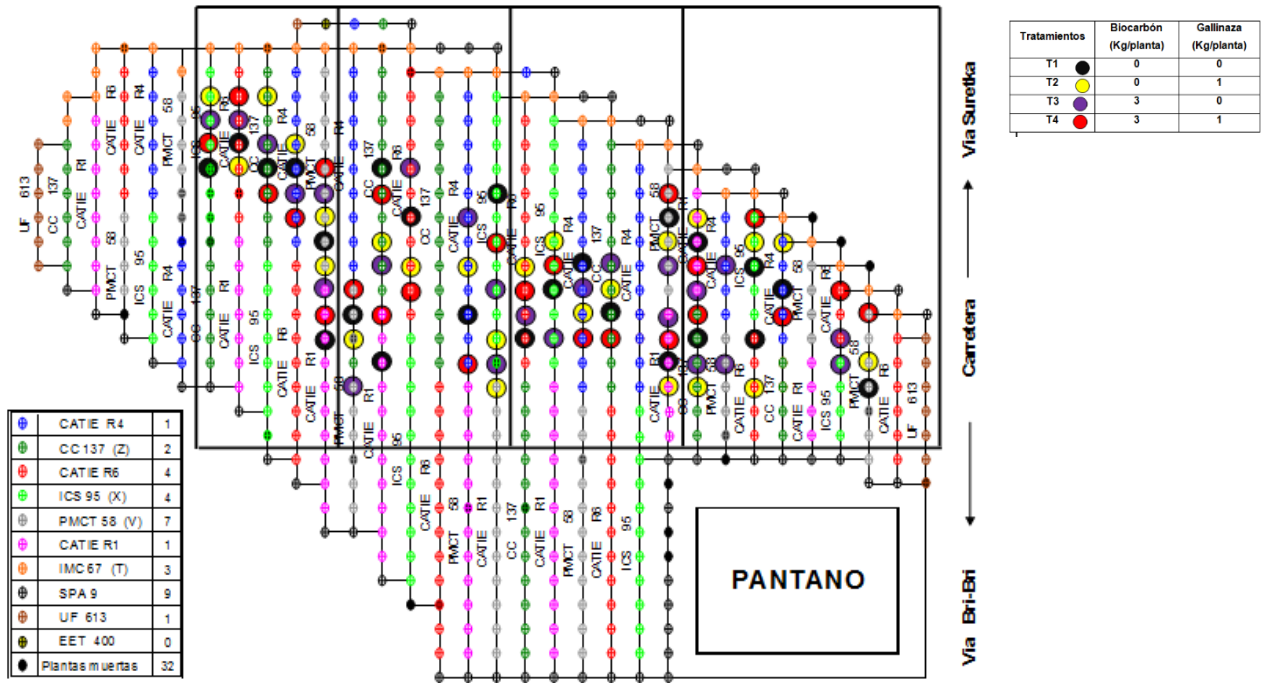
Yeboah, E; Ofori, P; Quansah, GW; Dugan, E; Sohi, SP. 2009. Improving soil through biochar amendments to soil. *African Journal of Environmental Science and Technology* 3 (2): 34-41.

Zagal, E; Rodriguez, N; Vidal, I; Quezada, L. 2002. Microbial activity in a volcanic ash soil under different agricultural management. *Agricultura Técnica* 62 (2): 297-309.

Zibilske, LM. 1994. Carbon Mineralization, *Methods of Soil Analysis, part 2. Microbiological and Biochemical Properties-SSSA, Book Series, n. 5.* p. 857-858.

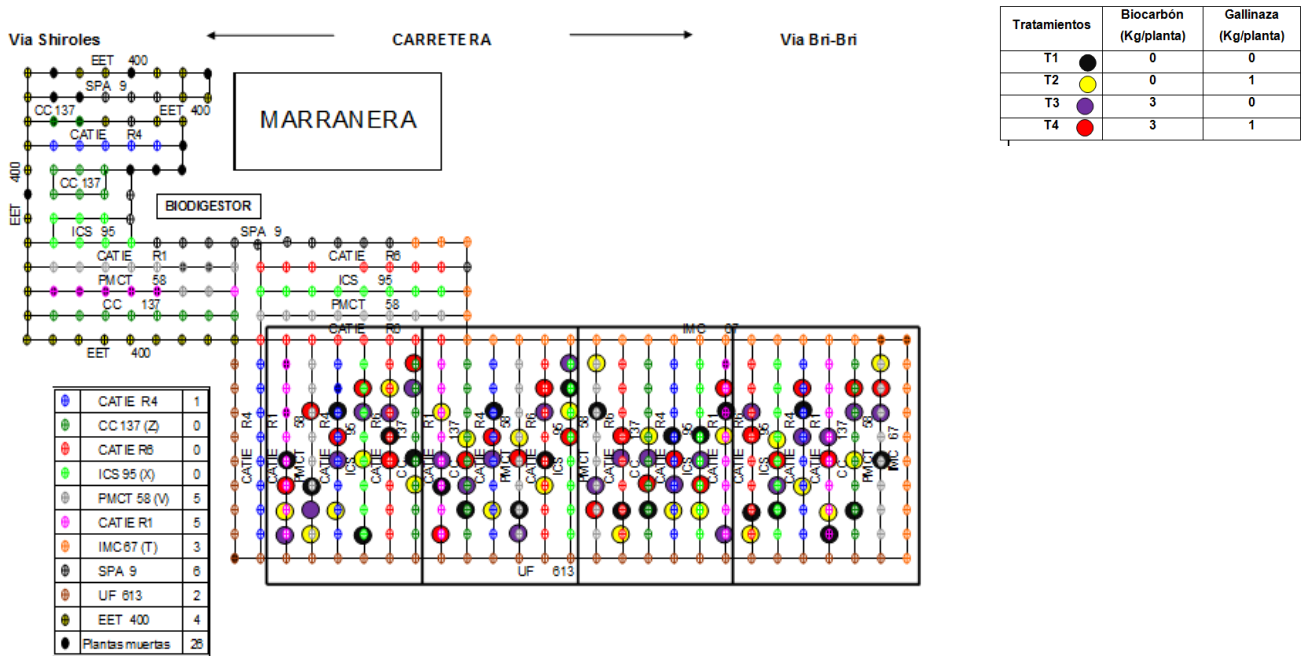
ANEXOS

Anexo 1. Esquema del jardín clonal de Watsi y ubicación de las plantas de cacao con los distintos tratamientos.



Fuente: Adaptado del Informe Parcelas de Cacao, PCC, Costa Rica, 2008.

Anexo 2. Esquema del jardín clonal de Suretka y ubicación de las plantas de cacao con los distintos tratamientos



Fuente: Adaptado del Informe Parcelas de Cacao, PCC, Costa Rica, 2008.

Anexo 3. Modelos utilizados para cada variable del suelo en los jardines clonales de Watsi y Suretka, mejores modelos según los criterios de *Akaike* (AIC) y del criterio de información *Bayesiano* (BIC).

Variable	Watsi	Suretka
	Modelo	
Densidad aparente (mg cc-1)	VarExp ()	VarExp ()
Humedad Gravimétrica (%)	Modelo Y	Modelo Y
pH (H ₂ O)	VarIdent (Trat.)	Modelo Y
Acidez (cmol(+)/l)	Modelo Y	Rango
Ca (cmol(+)/l)	Modelo Y	Modelo Y
Mg (cmol(+)/l)	Modelo Y	VarPower ()
K (cmol(+)/l)	Modelo Y	Modelo Y
P (mg/l)	Modelo Y	Rango
Cu (mg/l)	Modelo Y	Modelo Y
Zn (mg/l)	Rango	Rango
Mn (mg/l)	Modelo Y	Modelo Y
Fe (mg/l)	Modelo Y	Modelo Y
N (%)	Modelo Y	VarExp ()
C (%)	VarExp ()	Modelo Y
CICE	Modelo Y	Modelo Y
C/N	VarExp ()	VarExp ()
%MO	VarExp ()	Modelo Y
Respiración microbiana	Modelo Y	VarExp ()
Biomasa microbiana	VarIdent (Trat.)	Modelo Y
Cociente metabólico	Modelo Y	VarIdent (Trat.)
Índice de mineralización	Modelo Y	VarIdent (Trat.)

Anexo 4. Promedio de la densidad aparente (g cc^{-1}) y humedad gravimétrica (%)* de los suelos de los jardines clonales de Watsi y Suretka al final del experimento, Talamanca, Costa Rica, 2012.

Indicadores	Control (TC)	Gallinaza (TG)	Biocarbón (TB)	Bioc+Galli (TBG)	Valor F	Valor p
Watsi (inceptisol)						
Densidad aparente (mg cc^{-1})	0,85 \pm 0,04b	0,91 \pm 0,04a	0,79 \pm 0,04c	0,83 \pm 0,04b	22,42	<0,0001
Humedad Gravimétrica (%)	40,93 \pm 2,37	33,42 \pm 2,37	39,79 \pm 2,37	37,92 \pm 2,37	1,94	0,1776
Suretka (ultisol)						
Densidad aparente (mg cc^{-1})	0,76 \pm 0,02a	0,75 \pm 0,02ab	0,68 \pm 0,03bc	0,62 \pm 0,04c	4,68	0,0218
Humedad Gravimétrica (%)	43,16 \pm 1,59	42,50 \pm 1,59	44,12 \pm 1,59	46,09 \pm 1,59	2,85	0,0821

*Medias con una letra común no son significativamente diferentes (LSD, $p > 0,05$).

Anexo 5. Promedio de los indicadores químicos del suelo en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) al final del experimento. Talamanca, Costa Rica, 2012.

Indicadores	Control (TC)	Gallinaza (TG)	Biocarbón (TB)	Bioc+Galli (TBG)	Valor F	Valor p	Rango Óptimo
pH (H_2O)	5,60 \pm 0,10	5,63 \pm 0,10	5,77 \pm 0,10	5,77 \pm 0,14	1,68	0,2689	5,1-6,5*
Acidez ($\text{cmol}(+)/\text{l}$)	0,14 \pm 0,02a	0,16 \pm 0,02ab	0,10 \pm 0,02bc	0,10 \pm 0,02c	6,57	0,0253	<0,5'
Ca ($\text{cmol}(+)/\text{l}$)	17,66 \pm 0,63	17,69 \pm 0,63	16,62 \pm 0,63	17,12 \pm 0,63	1,23	0,3769	4-18,2**
Mg ($\text{cmol}(+)/\text{l}$)	4,78 \pm 0,36	4,94 \pm 0,36	4,30 \pm 0,38	4,35 \pm 0,38	3,69	0,08	0,8-2,0**
K ($\text{cmol}(+)/\text{l}$)	0,49 \pm 0,12	0,56 \pm 0,12	0,72 \pm 0,12	0,45 \pm 0,12	1,11	0,4143	0,2-0,4**
CICE ($\text{cmol}(+)/\text{l}$)	23,00 \pm 0,59	23,41 \pm 0,59	21,71 \pm 0,59	21,96 \pm 0,59	1,93	0,2262	12-30*
P (mg/l)	7,13 \pm 1,46	6,13 \pm 1,46	7,30 \pm 1,46	9,53 \pm 1,46	2,78	0,1325	12-20'
Cu (mg/l)	4,70 \pm 0,30	5,43 \pm 0,30	4,80 \pm 0,30	4,77 \pm 0,30	1,70	0,2652	8-12'
Zn (mg/l)	7,60 \pm 0,95	8,30 \pm 0,95	7,93 \pm 0,95	8,17 \pm 0,95	0,74	0,5635	20-100'
Mn (mg/l)	19,93 \pm 6,04a	20,23 \pm 6,04a	15,87 \pm 6,04b	15,50 \pm 6,04b	4,77	0,0497	50-300'
Fe (mg/l)	128,6 \pm 13,1	118,3 \pm 13,1	129,3 \pm 13,1	116,3 \pm 13,1	0,89	0,4980	60-200'
N (%)	0,31 \pm 0,01	0,30 \pm 0,01	0,32 \pm 0,01	0,32 \pm 0,01	1,07	0,4283	0,2-0,4**
C (%)	2,97 \pm 0,13a	2,73 \pm 0,12a	3,47 \pm 0,18b	3,60 \pm 0,19b	13,07	0,0048	NE
MO (%)	5,13 \pm 0,23b	4,71 \pm 0,21b	5,99 \pm 0,30a	6,21 \pm 0,33a	12,95	0,0050	>5'
C/N	9,54 \pm 0,16b	9,30 \pm 0,16b	10,93 \pm 0,22a	11,15 \pm 0,24a	46,85	0,0001	10,5-15,5*

Medias con letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, $p < 0,05$). CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva. \pm : Desviación estándar. *Amores (2009). **Enríquez (2004). 'Bertsh (1995).

Anexo 6. Promedio de los indicadores químicos del suelo en el jardín clonal de Suretka (ultisol) al final del experimento. Talamanca, Costa Rica, 2012.

Indicadores	Control (TC)	Gallinaza (TG)	Biocarbón (TB)	Bioc+Galli (TBG)	Valor F	Valor p	Rango Óptimo
Acidez (cmol(+)/l)	2,50 ±0,68a	1,96 ±0,68a	1,74 ±0,68b	1,25 ±1,25	27	0,0007	<0,5'
Ca (cmol(+)/l)	2,36 ±0,81c	2,98 ±0,81b	3,12 ±0,81b	4,02 ±0,81a	15,75	0,0030	4-18,2**
Mg (cmol(+)/l)	1,16 ±0,17b	1,31 ±0,18ab	1,47 ±0,19a	1,78 ±0,24a	5,22	0,0414	0,8-2,0**
K (cmol(+)/l)	0,20 ±0,06	0,19 ±0,06	0,21 ±0,06	0,26 ±0,06	1,63	0,2796	0,2-0,4**
CICE (cmol(+)/l)	6,26 ±0,46	6,44 ±0,46	6,54 ±0,46	7,28 ±0,46	2,09	0,2035	12-30*
P (mg/l)	5,87 ±2,16c	6,13 ±2,16bc	6,80 ±2,16ba	11,50 ±2,16a	9,77	0,0100	12-20'
Cu (mg/l)	8,30 ±0,48	8,87 ±0,48	8,37 ±0,48	7,37 ±0,48	3,02	0,1159	8-12'
Zn (mg/l)	1,77 ±0,87	2,07 ±0,87	4,20 ±0,87	3,63 ±0,87	3,61	0,0849	20-100'
Mn (mg/l)	29,30 ±8,44	27,43 ±8,44	30,97 ±8,44	26,03 ±8,44	0,66	0,604	50-300'
Fe (mg/l)	293,0 ±35,6	305,0 ±35,6	288,6 ±35,6	299,0 ±35,6	0,78	0,5445	60-200'
N (%)	0,35 ±0,02c	0,34 ±0,02c	0,38 ±0,02b	0,41 ±0,02a	14,76	0,0035	0,2-0,4**
C (%)	3,58 ±0,28b	3,63 ±0,28b	4,88 ±0,28a	5,56 ±0,28a	21,53	0,0013	NE
MO (%)	6,18 ±0,48b	6,26 ±0,48b	8,41 ±0,48a	9,59 ±0,48a	21,38	0,0013	>5'
C/N	10,56 ±0,18b	10,55 ±0,18b	12,90 ±0,55a	13,46 ±0,76a	9,31	0,0112	10,5-15,5*

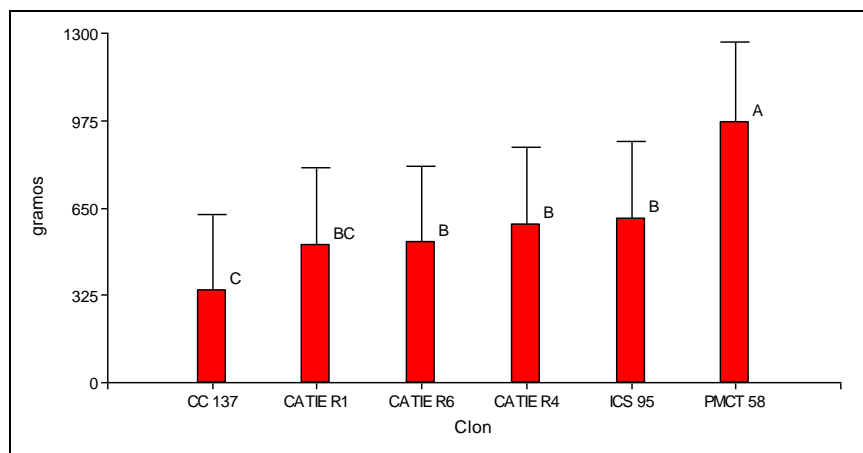
Medias con letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, $p < 0,05$). CICE: capacidad de intercambio catiónico efectiva. ±: Desviación estándar. *Amores (2009). **Enriquez (2004). 'Bertsh (1995).

Anexo 7. Promedio de los indicadores biológicos del suelo al final del experimento en el jardín clonal de Watsi (inceptisol) y en el jardín clonal de Suretka (ultisol), Talamanca, Costa Rica, 2012.

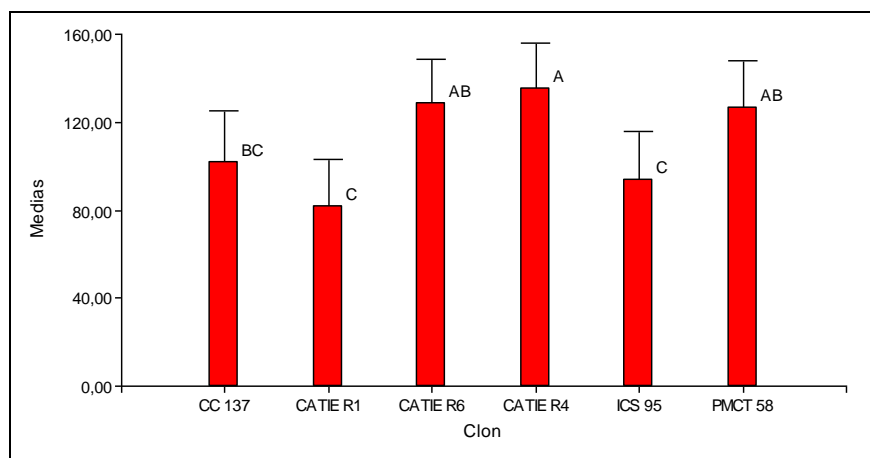
Indicadores	Control (TC)	Gallinaza (TG)	Biocarbón (TB)	Bioc+Galli (TBG)	Valor F	Valor p
Watsi (Inceptisol)						
Biomasa microbiana (mg C-biom kg ⁻¹ suelo)	792,3 ±55,9a	746,3 ±55,7ab	666,3 ±56,9b	760,3 ±76,1b	33,07	0,0004
Respiración microbiana (mg CO ₂ -C kg ⁻¹ suelo h ⁻¹)	2,67 ±0,39	2,07 ±0,39	1,94 ±0,39	2,35 ±0,39	0,69	0,5914
Índice de mineralización del C (% C 10 días ⁻¹)	1,87 ±0,30	1,37 ±0,30	0,96 ±0,30	1,04 ±0,30	1,91	0,2286
Cociente metabólico (µg CO ₂ -C mg ⁻¹ C-biom h ⁻¹)	3,42 ±0,64	2,85 ±0,64	2,98 ±0,64	3,15 ±0,64	0,30	0,8273
Suretka (Inceptisol)						
Biomasa microbiana (mg C-biom kg ⁻¹ suelo)	417,3 ±57,5	524,0 ±57,5	457,6 ±57,5	633,3 ±57,5	2,69	0,1400
Respiración microbiana (mg CO ₂ -C kg ⁻¹ suelo h ⁻¹)	1,74 ±0,50	1,71 ±0,29	1,76 ±0,18	2,69 ±0,18	1,19	0,3907
Índice de mineralización del C (% C 10 días ⁻¹)	1,41 ±0,17	1,49 ±0,01	1,24 ±0,23	1,82 ±0,33	0,81	0,5344
Cociente metabólico (µg CO ₂ -C mg ⁻¹ C-biom h ⁻¹)	4,73 ±1,23	3,32 ±0,43	3,96 ±1,02	4,19 ±0,37	4,62	0,0529

Indicadores con p>0,05 no presentan diferencia estadística entre las medias de los tratamientos. Para indicadores con p<0,05, medias con una letra común no son significativamente diferentes (p>0,05). ±: Desviación estándar.

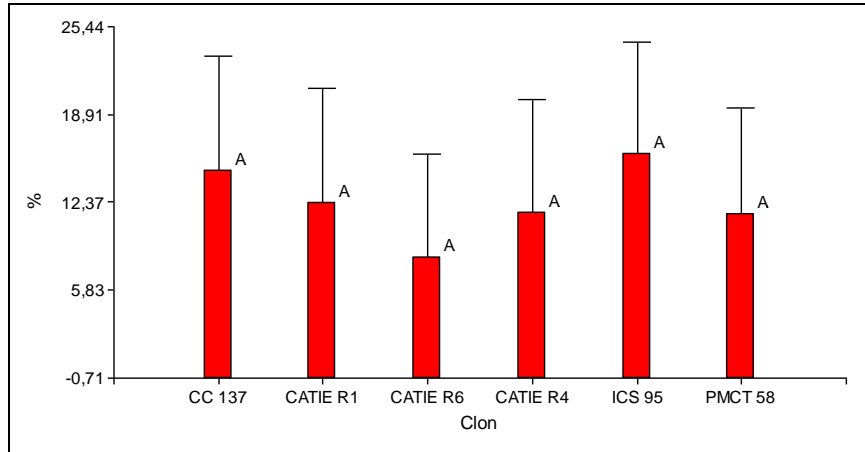
Anexo 8. Promedio de peso húmedo de semillas de cacao por árbol en los distintos clones en los jardines clonales estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, $p < 0,05$).



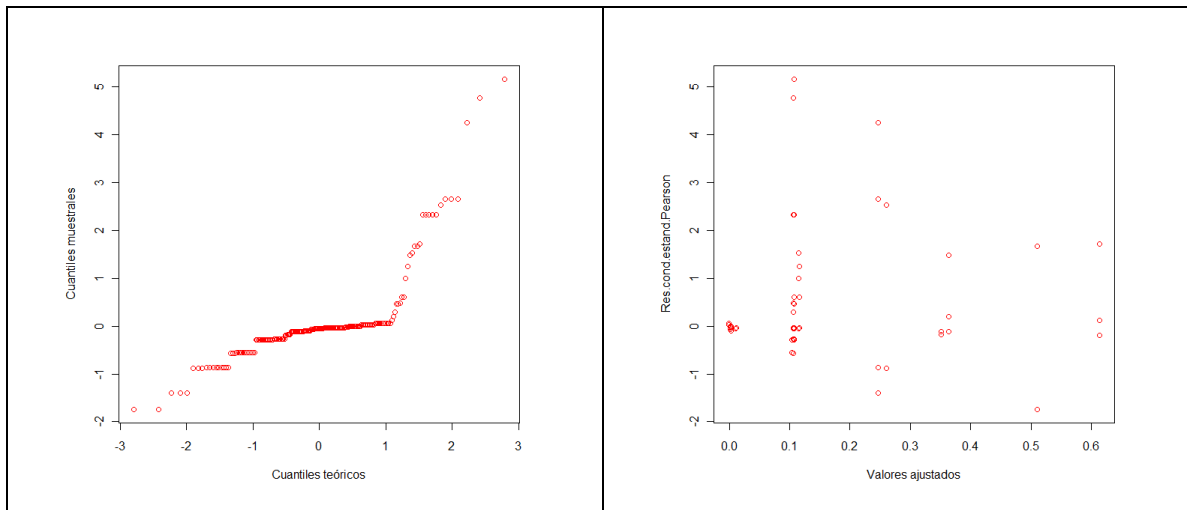
Anexo 9. Promedio de peso húmedo de semillas de cacao por fruto en los distintos clones en los jardines clonales estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, $p < 0,05$).



Anexo 10. Promedio de incidencia de monilia en los distintos clones en los jardines clonales estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, $p < 0,05$).



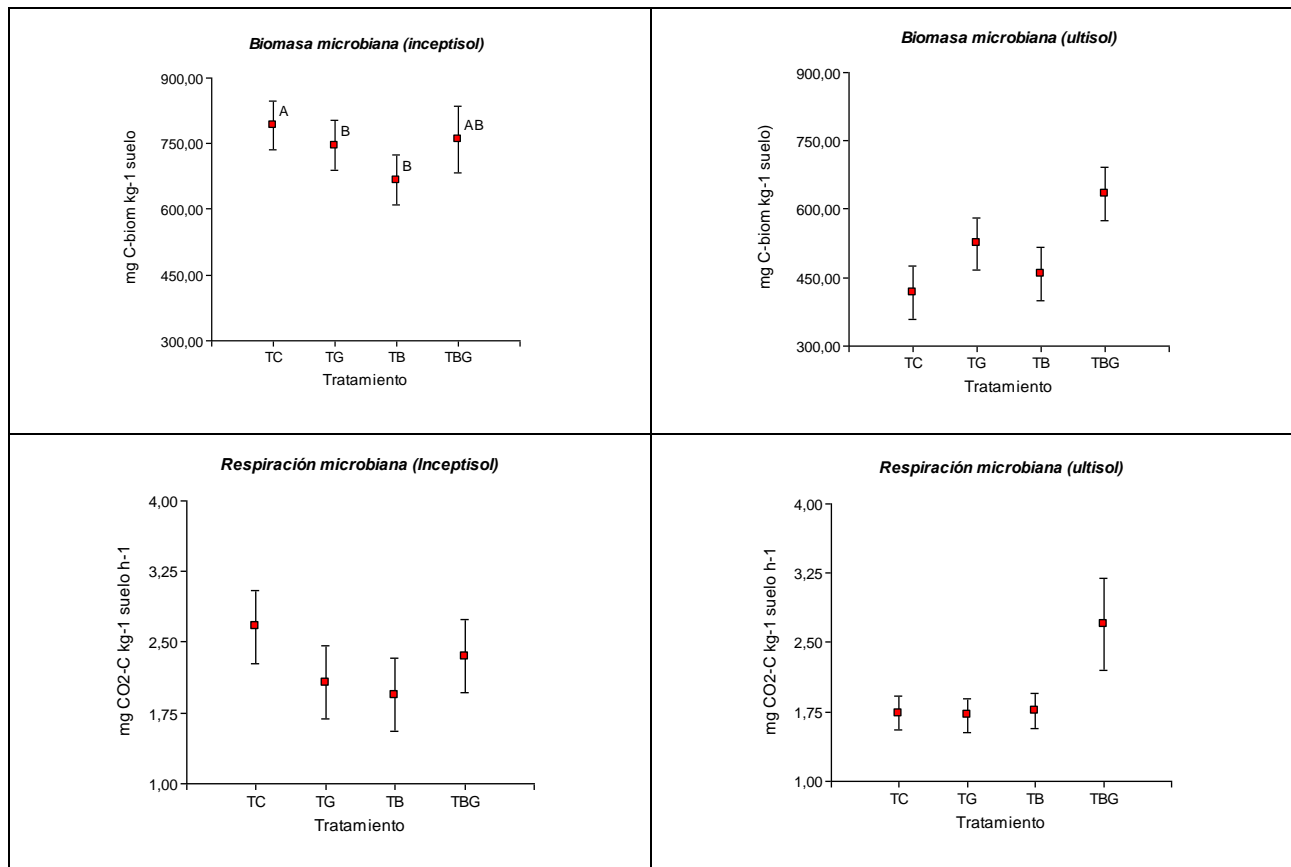
Anexo 11. QQ-plot (a) y fitted (b) de los resultado de número de frutos con incidencia de mazorca negra (*Phytophthora palmivora*).

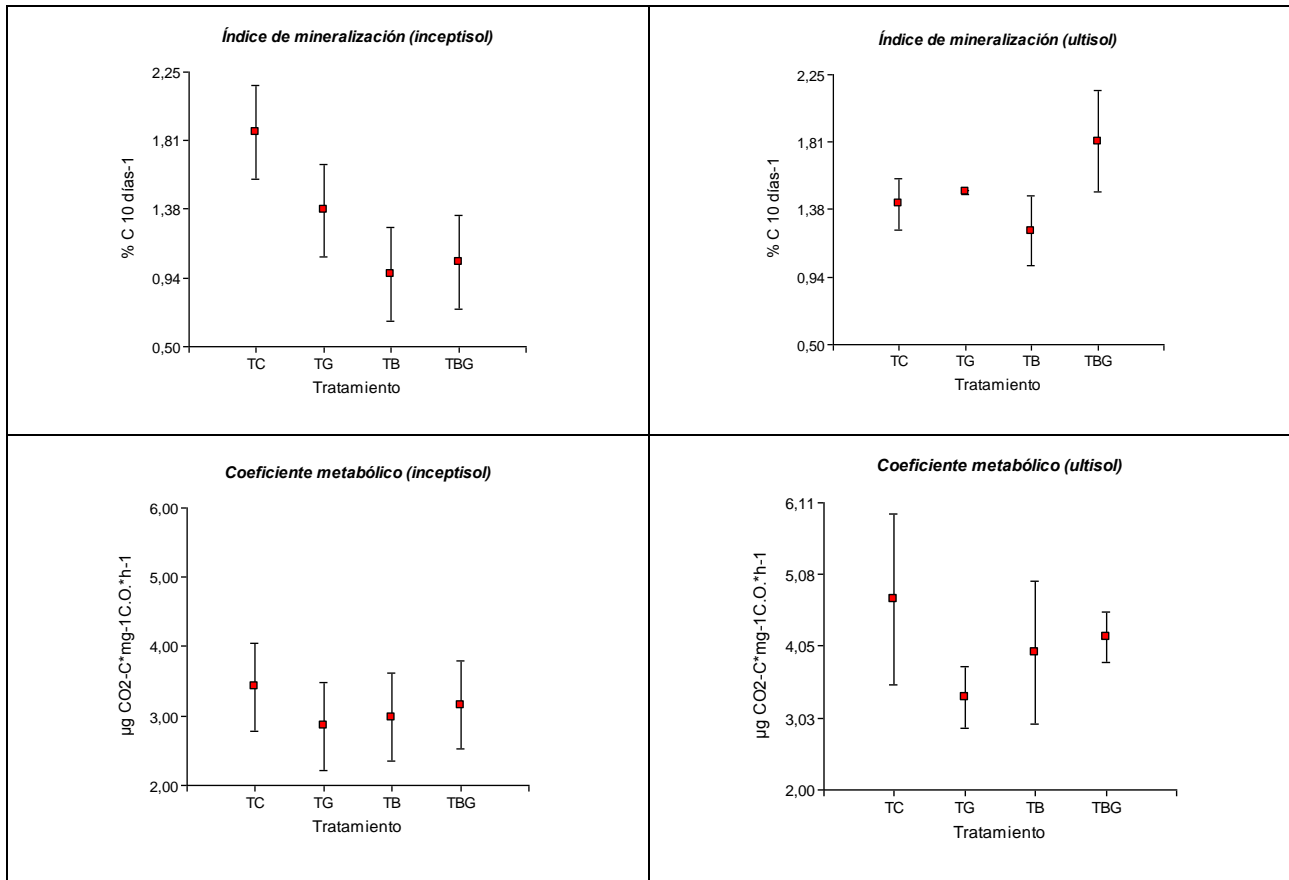


Anexo 12. Promedio del crecimiento en altura (cm) y diámetro del cuello (mm) de las plántula de cacao en vivero al final de tres meses de cultivo, Talamanca, Costa Rica, 2012. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher, $p < 0,05$).

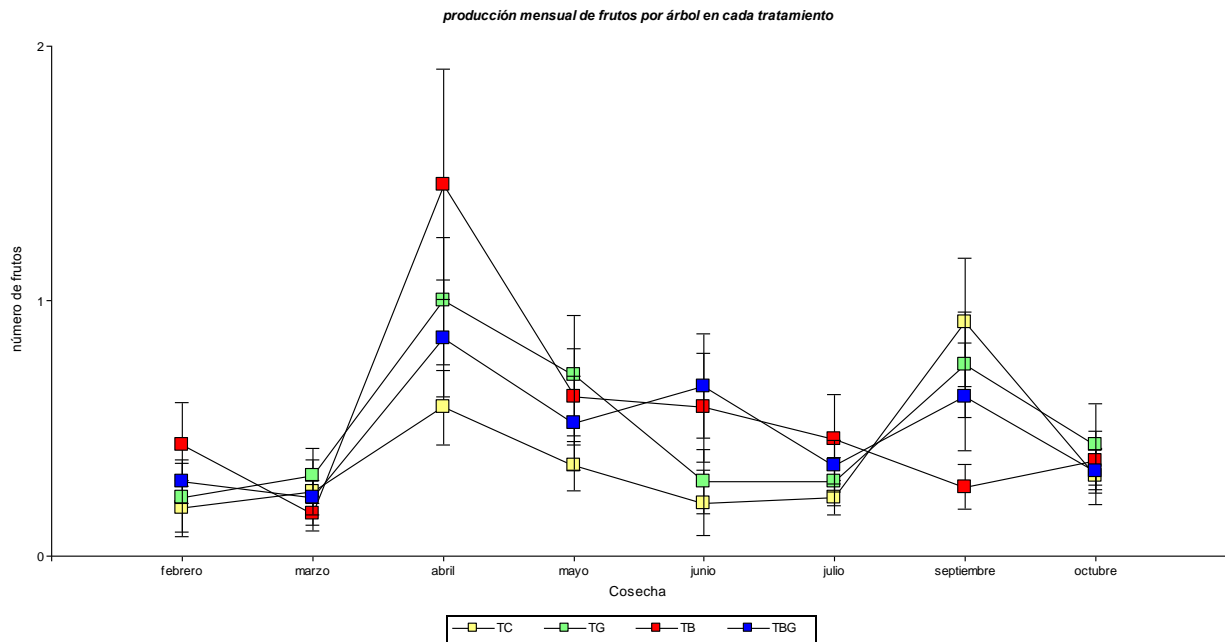
Indicadores	Control (TC)	Gallinaza (TG)	Biocarbón (TB)	Bioc+Galli (TBG)	Valor F	Valor p
Altura (cm)	18,08±1,06c	20,46±1,04b	19,77±0,98bc	22,91±1,00a	8,28	0,0008
Diámetro del cuello (mm)	4,74±0,24c	5,51±0,24b	5,83±0,24a	5,57±0,26ab	39,05	<0,0001

Anexo 13. Biomasa y respiración microbiana, índice de mineralización e coeficiente metabólico de los suelos en los jardines clonales de cacao orgánico estudiados en cada tratamiento, Talamanca, Costa Rica, 2012.

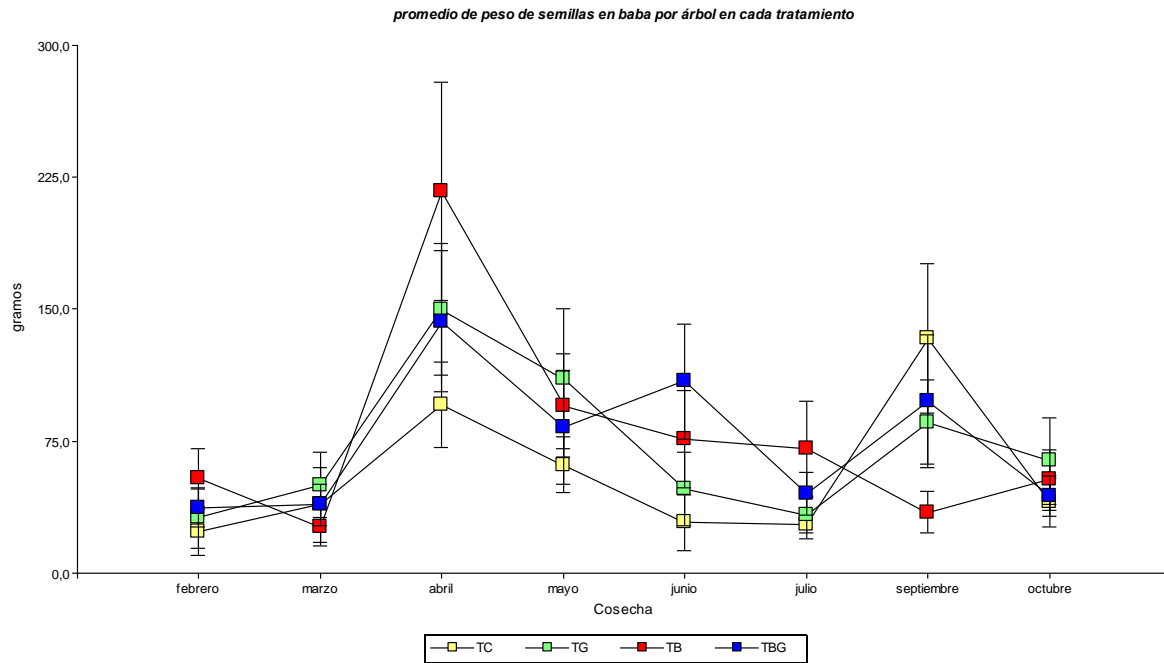




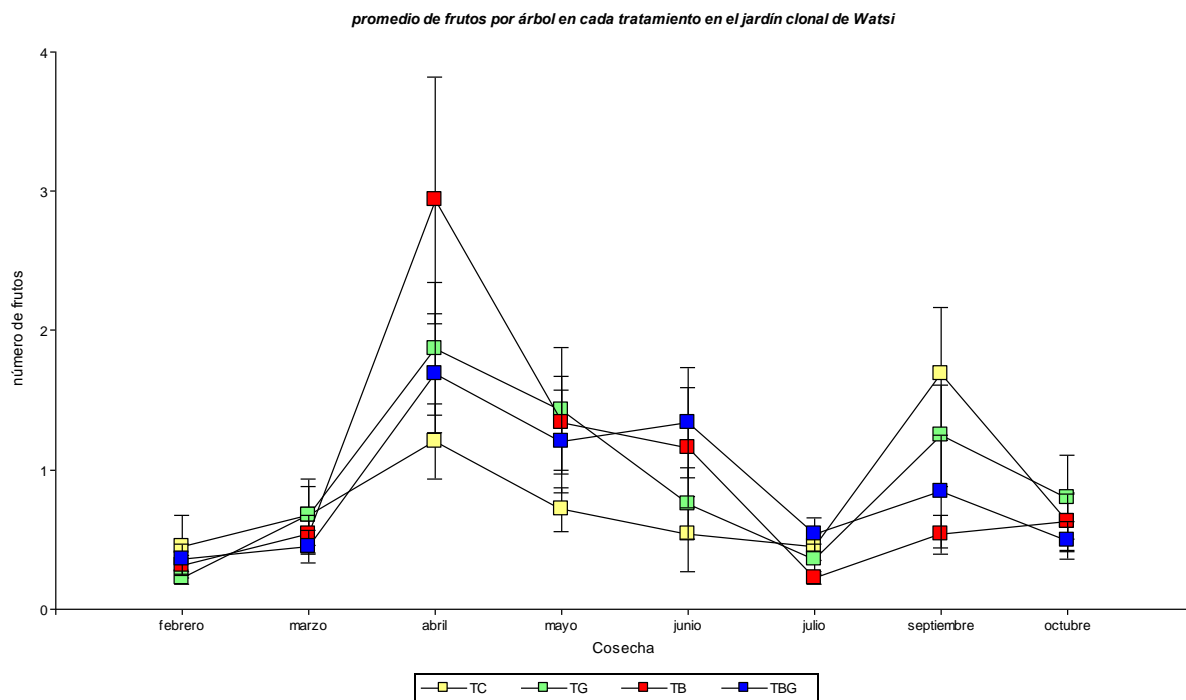
Anexo 14. Promedio mensual de frutos de cacao por árbol en cada tratamiento en los jardines clonales de cacao orgánico estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012.



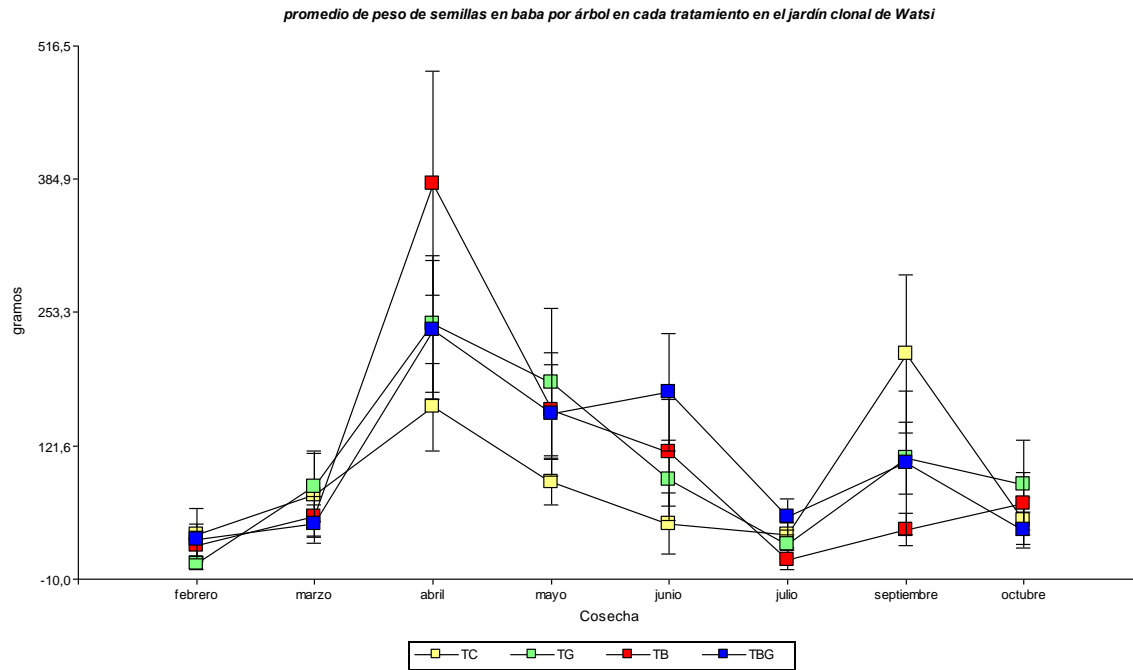
Anexo 15. Promedio mensual de peso de semillas en baba producido en cada tratamiento por cada árbol en los jardines clonales de cacao orgánico estudiados, Talamanca, Costa Rica, 2012.



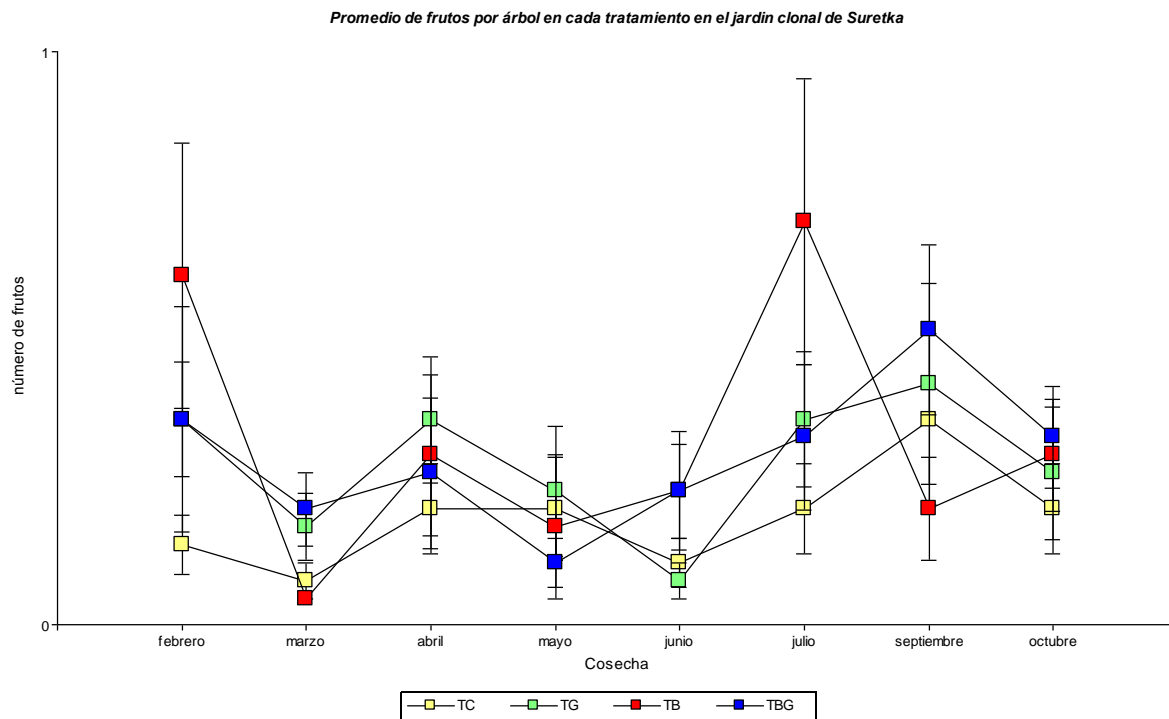
Anexo 16. Promedio mensual de frutos de cacao por árbol en cada tratamiento en el jardín clonal de cacao orgánico de Watsi, Talamanca, Costa Rica, 2012.



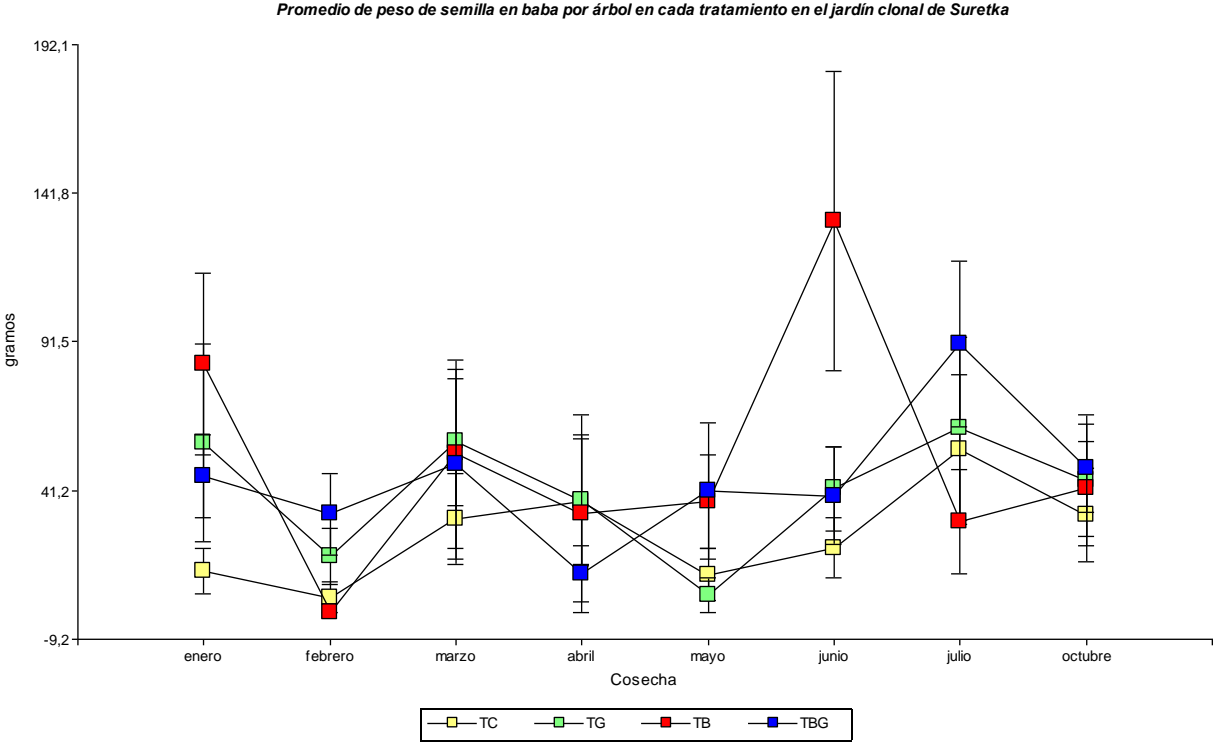
Anexo 17. Promedio mensual de peso de semillas en baba producido en cada tratamiento por cada árbol en el jardín clonal de cacao orgánico de Watsi, Talamanca, Costa Rica, 2012.



Anexo 18. Promedio mensual de frutos de cacao por árbol en cada tratamiento en el jardín clonal de cacao orgánico de Suretka, Talamanca, Costa Rica, 2012.



Anexo 19. Promedio mensual de peso de semillas en baba producido en cada tratamiento por cada árbol en el jardín clonal de cacao orgánico de Suretka, Talamanca, Costa Rica, 2012.



Anexo 20. Artículo publicado en el *Daily News* de National Geographic sobre el uso de la Estufa Finca de Seachar y el presente trabajo realizado en la Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica, 2013.



Biochar Cookstoves Boost Health for People and Crops

Stacey Schultz

For National Geographic News

Published January 29, 2013

Like many of her neighbors in Amubri, an indigenous community at the southern tip of Costa Rica, Gloria Torress Buitrago relied for years on a fogón for cooking. The traditional open-fire stove is common in Amubri (map), and so are the dire health effects. "It was hard to look around and just breathe without feeling the smoke burning the eyes or throat," Buitrago said. One cousin suffered from asthma, and everyone in her family was constantly tearing up from the wood fire's smoke.

Buitrago was just one of three billion people worldwide who rely on such open-fire cookstoves. A recent global health study found that the fumes from those stoves was the largest environmental health threat in the world today, killing 3.5 million people a year—more deaths than caused by malaria and HIV/AIDS combined. (See related blog post: "Cookstove Smoke Is 'Largest Environmental Threat,' Global Health Study Finds.") Cookstoves that burn cleaner can help fight this epidemic, but they can do even more than that when configured to produce biochar, a dark, fine-grained residue that can become a prized asset for rural communities.

In regions as diverse as the high mountain valleys of Costa Rica and the agricultural fields of western Kenya, biochar cookstoves are being used to simultaneously clear the air and enrich the soil. Biochar, a type of charcoal produced when biomass burns in an oxygen-free environment, can boost water and nutrients in dry, depleted soil while serving as a vehicle for burying the carbon that contributes to global warming.

Breathing Easier

Groups like Seattle, Washington-based SeaChar, the recipient of a \$72,000 grant from National Geographic's Great Energy Challenge initiative, have been testing new variations on clean cookstoves. SeaChar's Estufa Finca ("Farm Stove" in Spanish) burns biomass cleanly while turning it into biochar. It's not a fancy apparatus: Fashioned from local materials, its components include a five-gallon steel paint bucket, some corrugated steel roofing material, and half of a one-gallon tomato sauce can.

Gloria Torres Buitrago's family is one of 110 households that acquired one of the stoves last year through SeaChar's Estufa Finca program in Costa Rica's Talamanca region. Buitrago says the stove has relieved not only the smoke problem in her home, but also the effort required to keep fires burning. "The time and money it takes to get wood has been reduced a lot," Buitrago said in an interview with a SeaChar staff member, who then translated and emailed her responses. "This time can be used to share with family or just do other things in the garden." (See related story: "Protecting Health and the Planet With Clean Cookstoves.")

In addition to wood, the stove burns garden debris, dried animal dung, and food material such as dried corn cobs and coconut husks. A family cooking a pot of beans will use 40 percent less wood with the Estufa Finca than with an open-fire stove, said SeaChar President Art Donnelly, who designed the stove. "Those are trees you do not have to cut down."

Donnelly said tests conducted by SeaChar show a significant reduction in exposure to harmful smoke. "In laboratory testing, these stoves reduced particulate matter emissions by 92 percent and the carbon monoxide emissions by 87 percent as compared to an open cooking fire," he said in an email. "These two are the big drivers of respiratory disease."

Another grantee of the Great Energy Challenge, the African Christians Organization Network (ACON), has been working since 2004 with local farmers to reduce deforestation and improve soil conditions in western Kenya. Introducing innovative cookstoves to local families is part of that effort, and ACON's Salim Mayeki Shaban said that feedback on the stoves has been positive. "[Women] reported that the reduction of smoke in the house decreased irritation of their and their children's eyes, runny noses, coughing, chest discomfort, and difficulties in breathing, along with cost savings due to fewer hospital visits," Shaban said in an email.

Table-to-Farm Cooking

In Costa Rica, Donnelly said, many local families initially expressed interest in the new stove because it is smoke-free. "The real hook though, is the biochar," he said.

SeaChar offers a biochar buyback program, through which households can earn an extra \$15-20 per month by selling the biochar produced by their cookstoves. Currently 22 households regularly participate in the program, and SeaChar has collected 273 feed sacks of biochar, paying families about \$5 per sack.

The biochar is buried in the ground for research and demonstration projects, and used at locations such as cacao farms, large organic nurseries, and school garden projects, according to Donnelly.

A recent field study in Costa Rica on the effects of adding biochar and chicken manure to soil showed an increased crop yield of cacao. Juliano Hojah da Silva, a second-year graduate student at the Center for Tropical Agricultural Investigation and Education (CATIE) who led the study, said in an email that the biochar improved the soil's chemical and physical quality.

"All the applications made of biochar increased total soil carbon amounts, as well as soil organic matter, gains which were stable even after one year of implementation," Hojah da Silva said.

"These gains are expected to be a persistent beneficial long-term effect." SeaChar will continue to study the effects of biochar on soil in the coming year, Donnelly said.

ACON also has observed benefits for crops treated with biochar. In 2009, it trained farmers in the use of biochar as a soil supplement to help with water and nutrient retention in the western Kenya region of Bungoma (map), which often experiences periods of drought. In subsequent field trials, ACON found that vegetable and cereal crops fared better in plots that were fertilized with biochar and a 15 percent solution of human urine.

In the process of researching biochar, ACON also has found a way to target an aquatic pest while easing resource strain on forests. The group harvests water hyacinth, an invasive species in nearby Lake Victoria that can be dried and converted into fuel briquettes for the cookstoves.

Buried Treasure?

Biochar enthusiasts say that in addition to helping boost crop production, it can be a powerful tool to fight global warming. The International Biochar Initiative, a nonprofit organization that promotes biochar applications, estimates that biochar could help store 2.2 gigatons of carbon annually by 2050.

Kurt Spokas, a research soil scientist with the USDA Agricultural Research Service in St. Paul, Minnesota, agrees that biochar can reduce atmospheric carbon dioxide concentrations, and he says there is scientific evidence that the carbon remains stable in the soil. "The difficulty is in extrapolating to the future," he said.

Projecting carbon sequestration over the long term, especially to the levels of multiple gigatons, would require infrastructure that is not currently in place, Spokas said. "In order to get to that scale, we would have to have industrial plants that are converting biomass into the biochar," he said. "When you look at those numbers, it's scientifically, technologically feasible, but we just don't have that type of infrastructure developed yet."

Spokas noted that the production of charcoal has historically evoked an economic conflict over its value as both a fuel and a soil enhancer. "The cookstoves are a very good model of a system where biochar can work," he says. "They need to burn biomass to produce energy for cooking, so they are not trying to wedge into a new economic scheme. Instead, they are modifying the stoves to simultaneously cook food and produce biochar for soil application."

In the coming year, SeaChar and ACON both plan to expand their projects. SeaChar is developing an Urban Stove for use in homeless encampments in the Seattle area, and is working to educate local farmers, gardeners, landscapers, and kids on the benefits of biochar. ACON's Shaban hopes to scale up his program to other parts of Kenya and to other regions around the world.

While some environmental benefits of biochar stoves may take time to materialize, the health impact remains immediate for the home cooks, so many of them women with children nearby, who finally can prepare meals without suffering devastating health consequences. (See related blog post: "Time to Clear the Smoke.") "The difference that a smoke-free stove makes in the household is very evident," said Gloria Torress Buitrago. "It is even better for the cook."

This story is part of a special series that explores energy issues. For more, visit The Great Energy Challenge.

Fuente:

<http://news.nationalgeographic.com/news/energy/2013/01/130129-biochar-clean-cookstoves/>