

CAPÍTULO I

Impacto de la adición de biocarbón en el mejoramiento de suelos, rendimiento e incidencia de *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora palmivora* en cacao orgánico en Talamanca, Costa Rica

Jorge Orlando Acosta Buitrago^{ab}, Gabriela Soto^c, Fernando Casanoves^d, Miguel Angel Dita^e, Luis Pocasangre^f, Francisco Estrada^g

^{adg} Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, Costa Rica

^b *Seattle Biochar Working Group*, EEUU

^c Universidad Nacional, Costa Rica

^e Embrapa, Brasil

^f Universidad Earth, Costa Rica

Resumen

Se estudió el efecto de la adición de biocarbón (BC) de *Gmelina arborea* y gallinaza en suelos Ultisoles e Inceptisoles y en el rendimiento e incidencia de *Moniliophthora roreri* y *Phytophthora palmivora* en seis clones mejorados de cacao en Bribri, Talamanca, Costa Rica. Cuatro tratamientos se evaluaron: 1) testigo (TC), 2) gallinaza (TG) 1kg/árbol/año, 3) biocarbón (TB) 1kg/árbol/ en el primer mes de inicio del experimento y 4) biocarbón y gallinaza (TBG) 1kg de gallinaza/árbol/año y 1kg de BC/árbol/ en el primer mes de inicio del experimento. Después de 24 meses se encontró un aumento promedio del pH del 6.52% en los dos suelos, aumento del 36.38% en materia orgánica en el Ultisol y 23.14% en el Inceptisol, la acidez disminuyó 68.61% en el Ultisol y 25.45% en el Inceptisol y el fósforo aumentó 94.59% en el Ultisol y 153.96% en el Inceptisol. También se obtuvo diferencia significativa en la densidad aparente con los tratamientos TBG (78 g/cm³) y TB (73 g/cm³). Se encontró que la biomasa microbiana del Ultisol obtuvo 794.04 ±30.44 mg de C por kilogramo de suelo mientras que en el Inceptisol se obtuvo 520.29±30.44 mg C/Kg suelo; la respiración microbiana en el Ultisol obtuvo 16.96 ±1.52 mg de CO₂ por kilogramo de suelo mientras que el Inceptisol obtuvo 8.04±1.52 mg de CO₂ por kilogramo de suelo. Los porcentajes de moniliasis indican que existió mayor incidencia en el Ultisol (TBG 18.4%, TC=14.3%, TG 10% y TB 4.1%), sin observarse diferencias significativas entre tratamientos. El Inceptisol registro menores porcentajes de moniliasis (TB=11.2%, TG=7%, TBG 7% TC 5.7%). La incidencia más alta de mazorca negra la obtuvo el suelo Inceptisol (TG=25.3%, TC=13.5%, TB =11.1%, TBG 6.8%) el suelo Ultisol registro menor incidencia (TG=8.7%, TBG=6.3%, TC=4.7%, TB=4). El rendimiento (semilla fresca en seis meses) indicó que en el suelo Inceptisol se produjeron 864 kg y en el Ultisol 217 kg. Se alcanzaron altos

rendimientos en el suelo Ultisol con el clon ICS95T1 (497 kg), y el suelo Inceptisol con los clones CATIE R4, CC137 y PMCT58 que produjeron 1 592 kg, 1 231 kg y 1 068 kg respectivamente. En conclusión este estudio encontró mejorías con biocarbón en la calidad química de suelos, altamente significativos para el Ultisol y moderadas para el Inceptisol.

Abstract

Were studied the effect of the addition of biochar (BC) of *Gmelina arborea* and gen manure in Ultisols and Inceptisols, also yield and incidence disease of *Phytophthora palmivora* and *Moniliophthora roreri* with six cocoa clones in Bribri, Talamanca, Costa Rica. Four treatments were evaluated: 1) control (TC), 2) gen manure (TG) 1 kg/tree/year 3) biochar (TB) 1 kg/tree/ in the first month of start of the experiment and 4) biochar and gen manure (TBG) 1kg of gen manure/tree/year and 1kg of BC/tree/ in the first month of start of the experiment. After two years increased pH of 6.52% on average was found in the two soils, organic matter was increased 36.38% in Ultisol and 23.14% in Inceptisol, acidity decreased 68.61% in Ultisol and 25.45% in Inceptisol and phosphorus increased 94.59% in Ultisol and 153.96% in Inceptisol. Also significant difference was obtained in bulk density with TBG (78 g/cm³) and TB (73 g/cm³) treatments. Microbial biomass obtained in Ultisol 794.04 ± 30.44 mg of C per kilogram of soil while the Inceptisol was obtained 520.29 ± 30.44 mg C/kg soil; microbial respiration in Ultisol obtained was 16.96 ± 1.52 mg of CO₂ per kilogram of soil while Inceptisol obtained 8.04 ± 1.52 mg CO₂ per kilogram of soil. Moniliasis percentages disease indicate greater incidence in Ultisol (TBG 18.4%, TC = 14.3%, 10% TG and TB 4.1%), with no significant differences between treatments. The lowest percentages of Moniliasis were in Inceptisol (TB = 11.2%, TG = 7%, 7% TC TBG 5.7%). The highest incidence of black pod were obtained in Inceptisol (TG = 25.3%, 13.5% TC = TB = 11.1%, 6.8% TBG) the lower incidence of black pod were in Ultisol (TG = 8.7%, TBG = 6.3%, TC = 4.7%, TB = 4). The yield (fresh seed in six months) indicated that Inceptisol produced 864 kg and Ultisol 217 kg. High yields were achieved in Ultisol with the clone ICS95T1 (497 kg), Inceptisol with the clones CATIE Inceptisol R4, CC137 and PMCT58 which produced 1592 kg, 1231 kg and 1068 kg, respectively. In conclusion, this study found improvements with biochar in soil chemical quality, highly significant for Ultisol and moderate for Inceptisol.

1. Introducción

Se estima que en Costa Rica hay aproximadamente 4 300 ha sembradas de banano criollo *Gros Michel*, el 87% se encuentra en Talamanca (Ramírez et al. 2011). Talamanca también tiene 1 800 hectáreas de cacao, es decir el 56% del área del país, con un promedio por productor de 1.4 ha y aproximadamente 1 300 familias cacaoteras que dependen del cultivo.

El cacao y el banano son los dos cultivos que sostienen económicamente a las familias indígenas y campesinas de la región (Orozco et al. 2008). En esta región la población que

produce cacao, se encuentra limitada económicamente por el bajo rendimiento del cultivo (Somarriba *et al.* 2003), asociado entre otros factores a las condiciones del suelo.

El biocarbón (BC) es un producto resultante de la combustión de biomasa en parcial ausencia de oxígeno (Mclaughlin 2010). El BC representa una herramienta de multinivel adaptada para los pequeños agricultores, puesto que permite la producción en finca (Avilés-López, 2014), el aprovechamiento de la energía almacenada en la biomasa (Torres-Rojas *et al.* 2011), la mejora en la calidad de suelo de la finca (Woods *et al.* 2006) y ayuda al secuestro efectivo de carbono (De Pinto *et al.* 2010).

Es ampliamente aceptado que la aplicación de BC a los suelos, mejora la productividad de las plantas (Jeffery *et al.* 2011), el contenido de materia orgánica (Laird 2008), la capacidad de intercambio catiónico (Liang *et al.* 2006), el pH de suelos ácidos (Van Zwieten *et al.* 2010), la capacidad de absorción de nutrientes y prevención de la lixiviación (Laird *et al.* 2010) y la diferenciación de comunidades microbianas (Nielsen *et al.* 2014).

Los estudios con cacao y la aplicación de BC han sido muy pocos, los existentes se han hecho para África (Odesola y Owoseni 2010; Duku *et al.* 2011; Ogunjobi y Lajide 2013) y Costa Rica, con los estudios de Henreaux (2012), Hojah (2013) y Pérez Salas *et al.* (2013) quienes han realizado investigaciones con BC de *Gmelina arborea* -pero solo Hojah (2013) se refiere al cacao.

Esta investigación dio continuidad al trabajo iniciado por Hojah (2013), evaluando el impacto de la aplicación de biocarbón y gallinaza en suelos Ultisoles e Inceptisoles en un cacaotal orgánico de Talamanca; además se evaluó la incidencia de *Moniliophthora roreri* (Moniliasis) y *Phytophthora palmivora* (Mazorca negra) y la productividad del cacao. Los resultados de esta investigación corresponden a datos analizados durante 24 meses.

2. Materiales y métodos

2.1 Características de suelo

Este trabajo se desarrolló en dos jardines clonales de cacao orgánico en las poblaciones de Watsi y Suretka, dentro de la reserva indígena de Talamanca en Costa Rica. El jardín clonal de Watsi tiene un área de 4 800 m² con relieve plano (80 %) y ondulado (20 %); el jardín clonal de Suretka cuenta con 3 600 m², y relieve plano (30 %) y poco ondulado (70 %).

Originalmente el suelo Ultisol presentó pH de 4.6 y bajos niveles de calcio (2.02 cmol(+)/l), magnesio (1.58 cmol(+)/l), potasio (0.18 cmol(+)/l), fósforo (3.27 mg/l), cobre (7.99 mg/l), zinc (1.95 mg/l) y manganeso (34.53 mg/l); además se encontraron contenidos medios de hierro (254.09 mg/l) y altos contenidos de materia orgánica (6.64 %).

El suelo Inceptisol contenía 5.73 de pH, contenidos medios de calcio (18.08 cmol(+)/l), magnesio (4.98 cmol(+)/l) y materia orgánica (4.3 %); bajos contenidos de potasio (0.43 cmol(+)/l), fosforo (2.57 cmol(+)/l), cobre (4.47 mg/l), zinc (6.47 mg/l), manganeso (27.27 mg/l) e hierro (74.33 mg/l). Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Tejido vegetal y Aguas del CATIE.

2.2 Clones de cacao

Se trabajó con seis clones (Cuadro 1 y Figura 1) desarrollados por el proyecto de Mejoramiento Genético de cacao del CATIE y establecidos por el Proyecto Centroamericano de Cacao. Los clones se establecieron hace seis años, la distancia de siembra entre clones fue de 3 m por 3 m y estaban agrupados en parcelas que representaban a cada clon.

Cuadro 1. Clones de cacao establecidos en Jardines Clonales en Talamanca, su productividad e incidencia de enfermedades en la finca La Lola, en el Atlántico, Costa Rica. Fuente: Phillips-Mora et al. (2012), modificado por el autor.

Clon	Rendimiento promedio (kg/ha/año)	Pérdida por Moniliasis (%)	Pérdida por Mazorca negra (%)
ICS – 95	636	32	4
CC – 137	900	43	0
PMCT 58	789	35	2
CATIE R1	1066	15	6
CATIE R4	1336	12	1
CATIE R6	1485	4	0

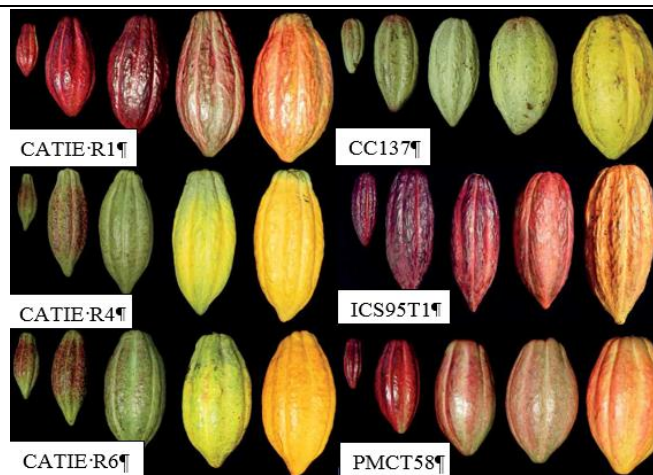


Figura 1. Diferenciación en el desarrollo del fruto de los seis clones estudiados. Fuente: adaptación del autor citando a (Phillips-Mora et al. 2012).

2.3 Uso del biocarbón y gallinaza en los tratamientos

Durante los meses 13 al 24 se decidió no aplicar BC de *Gmelina arborea* con el fin de evaluar el impacto en el tiempo de la aplicación de BC realizada en el mes uno; la gallinaza usada a partir del mes 13 fue proporcionada por la familia dueña del jardín de Suretka y se aplicó en los suelos de los dos jardines; la composición química de la gallinaza (Cuadro 2) fue determinada en el Laboratorio de Análisis de Suelo, Tejido Vegetal y Aguas del CATIE.

Cuadro 2. Análisis químico del BC de *Gmelina arborea** y la gallinaza.

Elemento	BC <i>Gmelina</i> *	Gallinaza
N%	0.33	2.4
C%	60.6	32.48
pH	8.06	-
Ca%	0.13	9.44
Mg%	0.07	0.66
K%	0.68	2.57
P%	0.02	1.72
Cu mg/kg	1	56
Zn mg/kg	30	573
Mn mg/kg	378	291
Fe mg/kg	383	649
B mg/kg	2	

*Analizado químicamente en el Centro de Investigación Agronómica (CIA) de la UCR en 2011.

2.4 Variables y recolección de datos

2.4.1 Productividad e incidencia de enfermedades

Se realizó una medición mensual durante seis meses, donde se contabilizaron los frutos de cada clon y se registró el peso húmedo (en baba) de las semillas de cada fruto. Asimismo se determinó el porcentaje de incidencia de enfermedad de acuerdo con Phillips-Mora *et al* (2012); se contó el número de frutos sanos y el número de frutos enfermos -por Moniliasis

(*Moniliophthora roreri*) y Mazorca negra (*Phytophthora palmivora*)- por cada clon y en cada tratamiento.

2.4.2 Indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo.

Para los indicadores químicos se muestrearon los suelos a 15 cm de profundidad, con seis submuestras, para un total de 24 muestras, correspondientes a los cuatro tratamientos y a los seis clones en cada suelo, las variables evaluadas fueron pH, materia orgánica, macro y micro nutrientes.

Con respecto a los indicadores físicos de suelo, se tomaron seis muestras de suelo por tratamiento para determinar densidad aparente y humedad gravimétrica. Se utilizó la metodología en campo descrita por Black y Hartge (1986) que consistió en introducir un cilindro metálico (cilindro de Kopecky) para la extracción de suelo de volumen conocido. Se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento en los dos tipos de suelo.

Para el caso de los indicadores microbiológicos de suelo, se determinó la respiración y biomasa microbiana según la metodología de Anderson e Ingram (1992). Se realizaron tres repeticiones por cada tratamiento en los dos tipos de suelo. Todos los análisis – indicadores físicos, químicos y biológicos del suelo- se realizaron en el Laboratorio de Suelos, Tejido Vegetal y Aguas del CATIE.

2.5 Diseño experimental

Se utilizó el diseño propuesto por Hojah (2013), que consistió en bloques completamente al azar con parcelas divididas repetidas en dos localidades. En cada parcela principal se ubicaron seis clones, luego se seleccionaron cuatro arboles de cada clon que correspondieron a las subparcelas, luego se aleatorizaron los tratamientos (T). Los T surgen de un arreglo bifactorial: con y sin biocarbón, con y sin gallinaza que resultaron en cuatro tratamientos: el testigo (TC), 1 kg de gallinaza por árbol (TG), 3 kg de biocarbón por planta (TB) y un cuarto tratamiento de 3 kg de biocarbón y 1 kg de gallinaza por planta (TBG) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Tratamientos del experimento en campo y kilogramos de abono orgánico aplicados a cada unidad experimental entre los 24 meses.

Tratamientos	A los cero meses		A los 13 meses	
	Biocarbón*	Gallinaza*	Biocarbón*	Gallinaza*
Testigo (TC)	0	0	0	0

T Gallinaza (TG)	0	1	0	1
T Biocarbón (TB)	3	0	0	0
T Biocarbón y Gallinaza (TBG)	3	1	0	1

*La aplicación del biocarbón y la gallinaza se efectuó en dosis de kg/árbol.

Modelo para las observaciones

La unidad experimental fue un clon (un árbol) de cacao, en total se evaluaron 192 unidades experimentales. El modelo que se utilizó para el análisis de los datos fue el siguiente:

$$Y_{ijk} = \mu + T_i + \beta_j + (T\beta)_{ij} + \gamma_{ijk} + (T\gamma)_{ik} + \epsilon_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} = una observación en el k-ésimo tratamiento del factor aplicado al bloque, del i-ésimo sitio en el j-ésimo bloque

T_i = representa el i-ésimo tratamiento del factor aplicado al sitio

β_j = efecto de j-ésimo bloque

$(T\beta)_{ij}$ = error experimental de los sitios (variación aleatoria entre sitios, tratados de la misma forma).

γ_{ijk} = efecto del k-ésimo tratamiento del factor asociado a la subparcela dentro del i-ésimo sitio en el j-ésimo bloque.

$(T\gamma)_{ik}$ = interacción del sitio con el factor aplicado a los tratamientos

ϵ_{ijk} = error aleatorio experimental a nivel de tratamientos, supuestamente distribuido normal e independiente con media cero y varianza constante.

Para el análisis de los datos se usaron modelos lineales y mixtos cuando las variables no presentaron varianzas homogéneas entre los tratamientos. Los datos fueron analizados mediante el programa estadístico InfoStat usando un enlace con la plataforma R (Di Rienzo *et al.* 2011).

3. Resultados

3.1 Indicadores físicos, químicos y microbiológicos de suelo

3.1.1 Densidad aparente

Se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.002$), se registraron los menores valores para los tratamientos BC+G ($0,78 \text{ g/cm}^3$) y BC ($0,73 \text{ g/cm}^3$), siendo BC estadísticamente diferente del testigo (Figura 2). Asimismo se registraron diferencias en el tiempo ($p=0.001$), en los primeros 12 meses se obtuvo una media de 0.76 g/cm^3 y al mes 24 se obtuvo una media de 0.84 g/cm^3 . En la clasificación de órdenes de suelo también se encontraron diferencias ($p=0.0004$), se obtuvo valores promedio de 0.84 g/cm^3 para el Inceptisol y 0.76 g/cm^3 para el Ultisol.

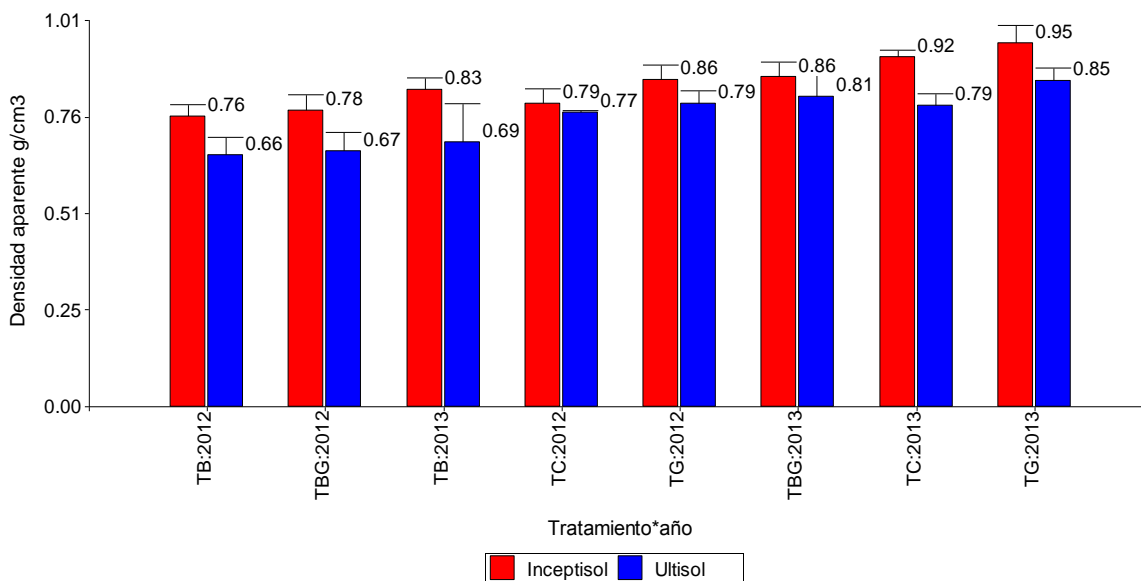


Figura 2. Densidad aparente para los cuatro tratamientos y los dos tipos de suelos en el tiempo.

Al modelar la variable de humedad gravimétrica no se encontraron diferencias para tratamientos ($p=0.2300$); tampoco se encontró diferencia para los dos tipos de suelos ($p=0.8961$).

3.1.2 Indicadores químicos en el suelo

Se usaron modelos lineales y mixtos cuando las variables no presentaron varianzas homogéneas entre los tratamientos, se realizaron transformaciones de datos a rangos y se modelaron con las covariables correspondientes a los 24 meses de investigación, se eligió la covariable de los datos iniciales –antes de comenzar el experimento- por reportar mejores criterios AIC y BIC y así se modeló una base de datos.

Se encontró diferencias entre tratamientos indistintamente del suelo en las siguientes variables: pH (p=0,001) calcio (p=0.001), cobre (p=0.0054) y capacidad de intercambio catiónica efectiva (p=0.001) (Cuadro 4); entre suelos se encontró diferencias indistintamente del tratamiento, a saber: Inceptisol (p=0.0001) pH 5.7±0.03 y Ultisol pH 4.7±0.03.

Por otro lado, se obtuvieron diferencias combinadas entre tratamientos y tipos de suelos para las siguientes variables: acidez (p=0.0001), Mg (p=0.0008), K (p=0.0001), P (p=0.0078), Zn (p=0.0101), Mn (p=0.0140), Fe (p=0.0001), N (p=0.0001), relación carbono/nitrógeno (p=0.0319), porcentaje de saturación de acidez (p=0.0001) y porcentaje de materia orgánica (p=0.0001) (Cuadro 5).

Cuadro 4. Promedios de indicadores químicos de los dos tipos de suelos con datos consolidados de 24 meses de experimento.

	Testigo	Gallinaza	Biocarbón	Biocarbón y Gallinaza	Valor p	Rango óptimo
Indicadores						
pH (- Log ₁₀ (H ⁺))	5.06±0.02 C	5.23±0.02 B	5.11±0.02 C	5.39±0.02 A	<0.0001	5.5 hasta 6.5
Ca (cmol(+)/l*)	10.90± 3.55 B	13.64±3.93 A	11.30±3.6 B	13.31±3.6 A	<0.0001	4 hasta 18.2
Cu (mg/l)*	5.97±0.68 A	6.33±0.79 A	5.62±0.69 B	5.60±0.69 B	0.0054	2 hasta 60**
CICE	15.49±4.17 B	18.16±4.57 A	15.98±4.27 B	17.79±4.23 A	0.0001	12 hasta 30

Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher p<0.05); ± desviación estándar; * se modelo como rango pero se presentan sus valores medios originales, ** partes por millón según (Huertos y Romero 2008).

Luego de los análisis univariados se muestra un gráfico de componentes principales, consolidando las relaciones que existieron entre los nutrientes, el tiempo y los tratamientos (Figura 3); de igual modo se presenta un dendograma para resaltar los cambios y similitudes encontrados (Figura 4).

Resultó que TBG aumentó el pH del suelo, en el Ultisol presentó un aumento del 16 % desde el inicio del experimento, en el Inceptisol aumentó 5.9 %. La mejoría del Ultisol se visualiza en el gráfico de componentes principales donde se relaciona con los resultados favorables de materia orgánica obtenidos en 2013. En ambos suelos se observó una disminución de Cu disponible de 6.2 % desde los análisis en 2011.

Cuadro 5. Promedios de indicadores químicos de suelo donde se reportan diferencias significativas para tratamientos y suelos con datos consolidados de 24 meses de experimento.

Indicadores	Testigo Ultisol	Biocarbón Ultisol	Gallinaza Ultisol	Biocarbón y Gallinaza Ultisol	Biocarbón Inceptisol	Testigo Inceptisol	Gallinaza Inceptisol	Biocarbón y Gallinaza Inceptisol	Valor de p	Rango Optimo
Acidez (cmol(+)/l)	1.38±0.04 A	1.34±0.08 A	0.83±0.02 B	0.58±0.01 C	0.09±0.08 D	0.09±0.04 D	0.09±0.02 D	0.06±0.01 D	<0.0001	<0.05
Mg (cmol(+)/l)*	1.59±0.03 C	1.63±0.06 C	2.01±0.08 BC	2.14±0.00 B	5.45±0.02 A	5.17±0.12 B	5.47±0.14 AB	5.3±0.03 B	0.0008	0.8 hasta 2
K (cmol(+)/l)	0.26±0.01 F	0.21±0.01 G	0.27±0.01 F	0.35±0.01 E	0.61±0.01 B	0.70±0.01 A	0.39±0.01 D	0.51±0.01 C	<0.0001	0.2 hasta 0.4
P (mg/l)	3.7±0.30 D	2.76±0.26 D	7.4±0.30 B	7.2±0.25 B	6.93±0.23 B	5.06±0.20 C	16.66±0.26 A	17.6±0.43 A	0.0064	12 hasta 20
Zn*(mg/l)	2.16±0.03 F	1.96±0.08 G	3.33±0.13 E	3.50±0.10 D	8.00±0.28 BC	7.56±0.03 C	10.13±0.42 A	8.46±0.08 B	0.0101	20 hasta 100
Mn (mg/l)	52.30±2.22 A	46.63±2.22 AB	50.94±2.23 A	42.31±2.22 B	40.36±2.22 BC	35.37±2.22 C	27.28±2.23 D	26.14±2.31 D	0.0140	50 hasta 300
Fe (mg/l)	19.80±2.35 AB	14.19±2.24 BCD	17.14±2.37 ABC	22.11±2.25 A	5.31±2.24 EF	11.20±2.36 CDE	7.86±2.37 DEF	2.39±2.25 F	0.0001	60 hasta 200
N %	0.37±0.01 BC	0.34±0.01 DE	0.38±0.01 B	0.41±0.01 A	0.35±0.01 CD	0.29±0.01 F	0.36±0.01 C	0.33±0.01 E	<0.0001	0.2 hasta 0.4
C/N *	10.78±0.06 D	11.84±0.08 AB	11.05±0.02 BC	13.35±0.13 A	10.86±0.08 CD	9.64±0.08 E	9.59±0.07 E	10.66±0.08 CD	0.0319	10.5 hasta 15.5
%Saturación	21.79±0.67 A	20.56±0.57 A	10.18±0.59 B	6.84±0.54 C	0.56±0.23 D	0.55±0.23 D	0.45±0.23 E	0.41±0.24 E	<0.0001	-
Acidez										
% MO	6.79±0.09 C	6.74±0.09 C	7.22±0.08 B	9.26±0.25 A	6.62±0.08 CD	4.97±0.08 F	5.95±0.08 E	6.12±0.25 DE	<0.0001	>5

Promedios con la misma letra no son significativamente diferentes (Prueba LSD Fisher $p < 0.05$); \pm desviación estándar; *Se modelo como rango pero se presentan sus valores medios originales.

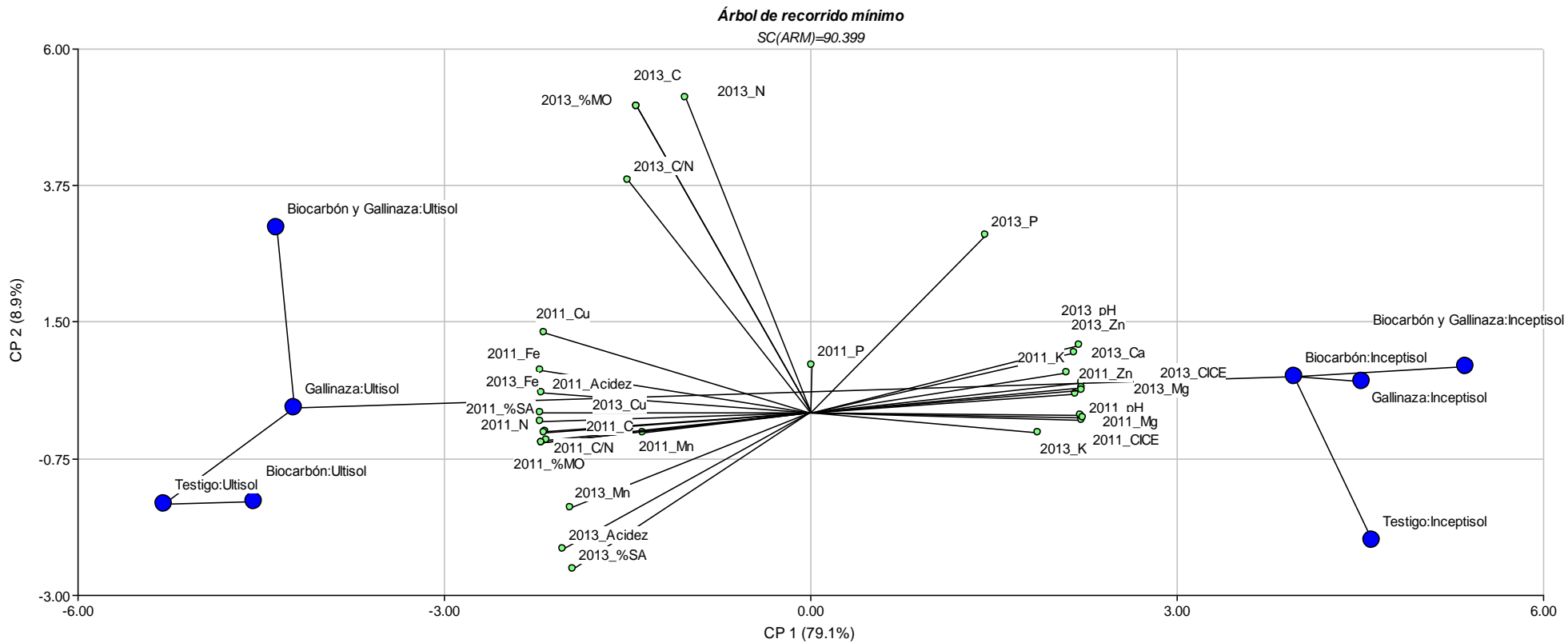


Figura 3. Análisis de componentes principales (ACP) para los 4 tratamientos, las variables químicas del suelo y los años 2011 y 2013 que corresponden a 24 meses de experimento.

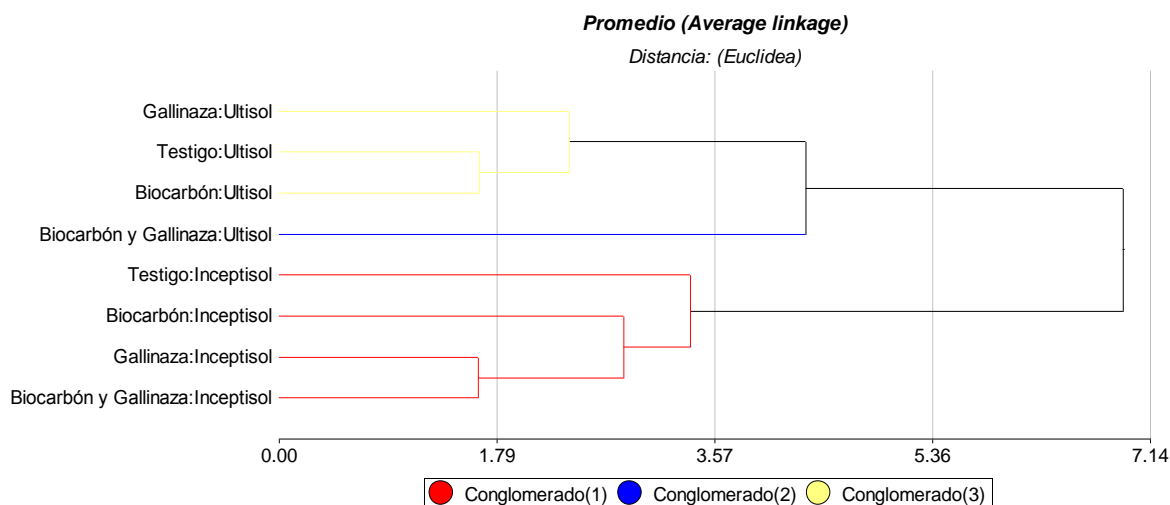


Figura 4. Análisis por conglomerados para los cuatro tratamientos y los dos órdenes de suelos.

Los análisis que reportaron la interacción tratamientos y suelos sugieren que se lograron significativos cambios en las condiciones de calidad química del suelo Ultisol, comparando TC con el tratamiento TBG, por ejemplo en los niveles de saturación de la acidez se redujo en 68.6 %, la materia orgánica se incrementó en 36.7 % y la acidez se redujo en 57.9 %; En el Inceptisol, comparando TC con TBG, el fósforo se incrementó de manera sobresaliente en 153 %, también la acidez se redujo en 33.3 %.

3.1.3 Indicadores microbiológicos en el suelo

En las modelaciones para la biomasa microbiana no se encontraron diferencias entre tratamientos ($p=0.5985$), los valores oscilaron entre 613.42 y 693.17 mg de Carbono por kilogramo de suelo; no obstante, se halló diferencia entre suelos ($p<0.001$), el Ultisol obtuvo 794.04 ± 30.44 mientras que el Inceptisol obtuvo 520.29 ± 30.44 .

En cuanto a la respiración microbiana -los datos se transformaron a rangos- no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.1511$), los valores oscilaron entre 15.25 y 9.83 mg de CO_2 por kilogramo de suelo; sin embargo si se halló diferencia significativa entre suelos ($p=0.0010$), el Ultisol obtuvo 16.96 ± 1.5 mientras que el Inceptisol obtuvo 8.04 ± 1.52 .

3.2 Enfermedades

Los resultados respecto a Moniliasis y Mazorca negra indicaron que después de modelados los datos no se cumplieron los supuestos de normalidad ni de homogeneidad de varianzas, pero se presentan resultados descriptivos tanto para clones como para tipos de suelo divididos por tratamientos (Figura 5, 6, 7 y 8).

El clon CATIE R1 presentó la incidencia más alta a la Monilia, en el TC (29 % de frutos enfermos), el TBG alcanzó 19 %, mientras que los TG y TB un 14 % y 4 % respectivamente.

El Clon CATIE R6 no presentó incidencia (nunca se enfermó) en los TC, TB y TBG; solo en el TG se observó un 2.5% de frutos dañados (Fig. 5).

Cuando se compararon los tipos de suelos, el Ultisol resultó ser el más afectado por Moniliasis, el TBG alcanzó 18 % de frutos enfermos, el TC 14 %, el TG 10 % y el TB 4 %, en el suelo Inceptisol el TB alcanzó 11 %, TG y TBG alcanzaron 7 % y el TC 6 %.

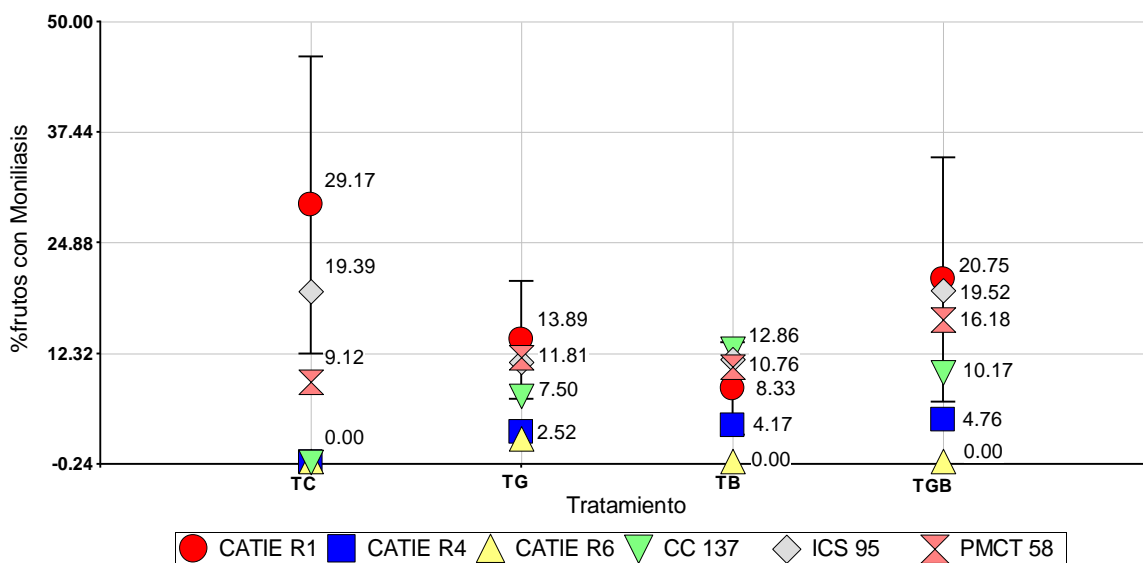


Figura 5. Porcentaje de frutos afectados por *Moniliophthora roreri* (Moniliasis) en cada clon según tratamiento, promedio de los dos tipos de suelos.

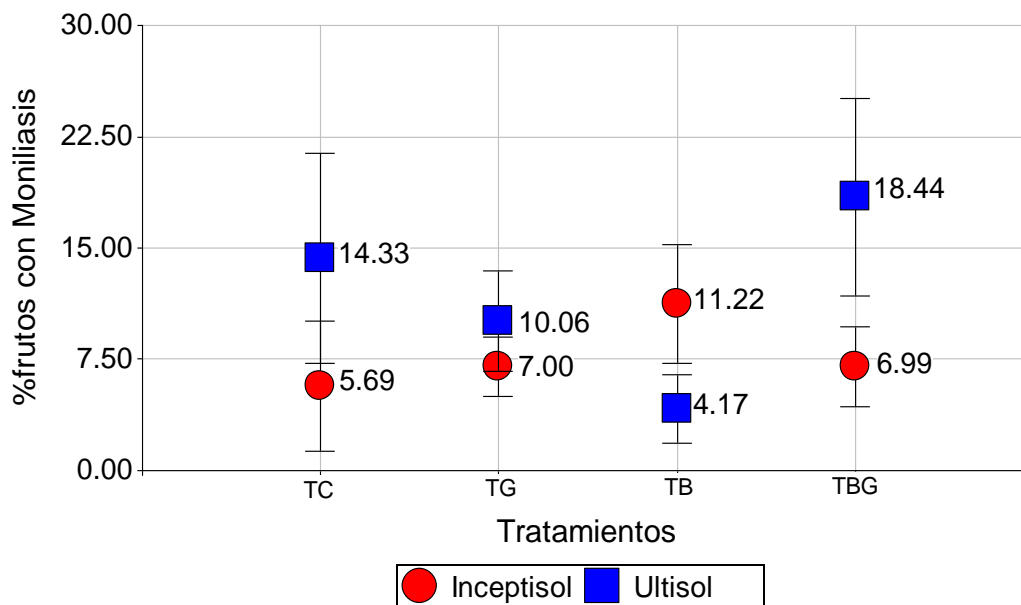


Figura 6. Porcentaje de frutos afectados por *Moniliophthora roreri* (Moniliasis) en cada tratamiento y en cada orden de suelo.

Respecto a los clones afectados por *Moniliophthora roreri*, el CATIE R1 presentó mayor incidencia de enfermedad con el 44 % de frutos infectados para el TG, el TB alcanzó 25 %, el TC 23 % y el TBG solo 2 % de frutos infectados. Por el contrario los clones CC137, CATIE R4 y PMCT58 presentaron menor incidencia de la enfermedad (Fig.5).

Cuando se evaluó a *Phytophthora palmivora* según los tipos de suelo, el Inceptisol presentó mayor incidencia de la enfermedad, 25 % de frutos infectados presentó el TG, seguido del TC con 13 %, el TB con 11 % y -el de mayor resistencia a la enfermedad- el TBG con 7 % de frutos infectados. Respecto al Ultisol el TG alcanzó 9 %, el TBG alcanzó 6 %, el TC 5 % y el TB solo registró 4 % de frutos infectados por el patógeno.

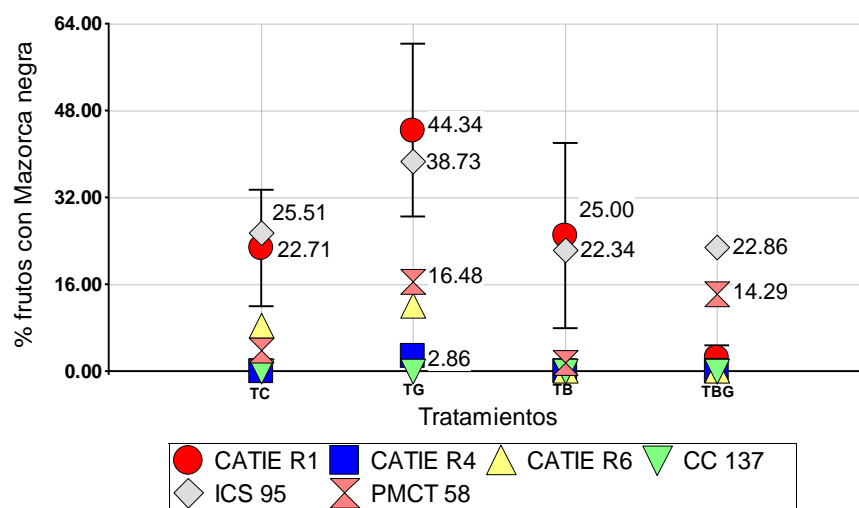


Figura 7. Porcentaje de frutos afectados por Mazorca negra en cada tratamiento y en cada clon, promedio de los dos tipos de suelos.

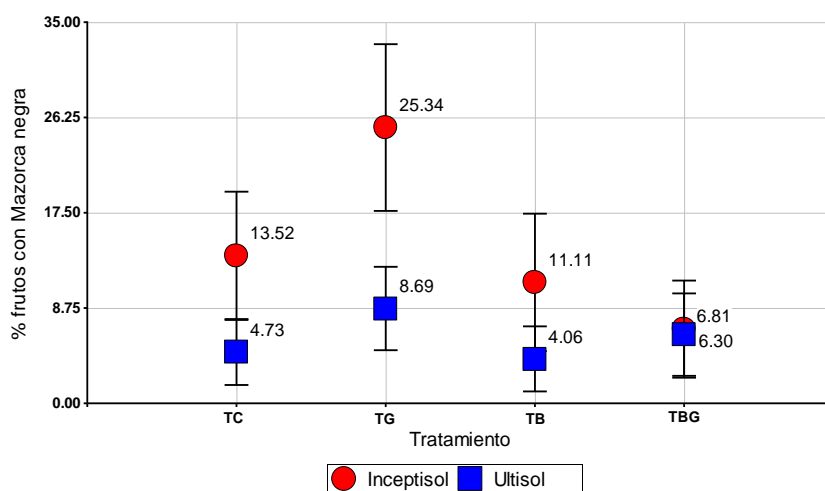


Figura 8. Porcentaje de frutos afectados por Mazorca negra en cada tratamiento y en cada suelo.

3.3 Rendimiento

No se registraron diferencias significativas entre tratamientos ($p=0.7099$) en el rendimiento, pero si se encontró diferencia entre los seis clones ($p=0.009$) siendo ICS95T1 el mejor en el Ultisol con 497 kg, en el Inceptisol los clones que más rindieron fueron CATIE R4, CC137 y PMCT58 (1 592 kg, 1 231 kg y 1 068 kg respectivamente); un análisis de componentes principales (ACP) muestra las relaciones existentes entre variables de rendimiento y tipos de clones en el suelo Ultisol (Figura 9).

Se observaron diferencias significativas por tipo de suelo ($p=0.005$); el Inceptisol fue el mejor con 864 kg de cacao fresco/ha y el Ultisol presentó 217,3 kg de cacao fresco/ha; en la variable número de frutos sanos no se encontró diferencia entre tratamientos, pero si se encontró diferencia para la variable tipo de suelos ($p= 0.0064$), con 484 frutos en el Inceptisol y 181 frutos en el Ultisol.

En cuanto al suelo Inceptisol, el análisis multivariado por componentes principales (ACP) permitió relacionar la mejor adaptación de los clones CATIE R4 y CC137 con este suelo, ya que fueron los que más rendimiento obtuvieron (Figura 10).

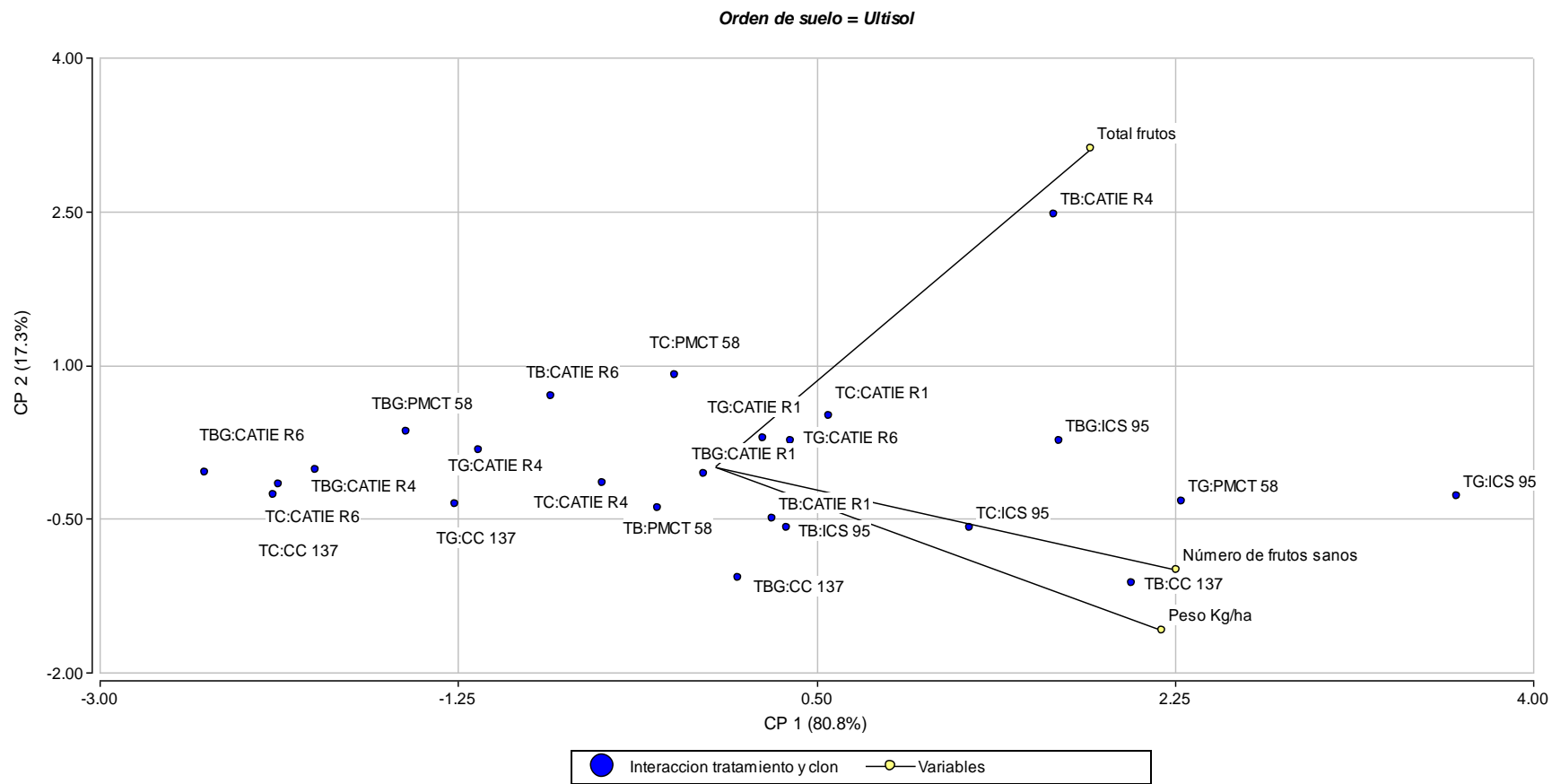


Figura 9. Biplot de componentes principales con relaciones entre variables evaluadas en el suelo Ultisol. TC: tratamiento testigo, TG: tratamiento con gallinaza, TB: tratamiento con biocarbón, TBG: tratamiento con biocarbón y gallinaza.

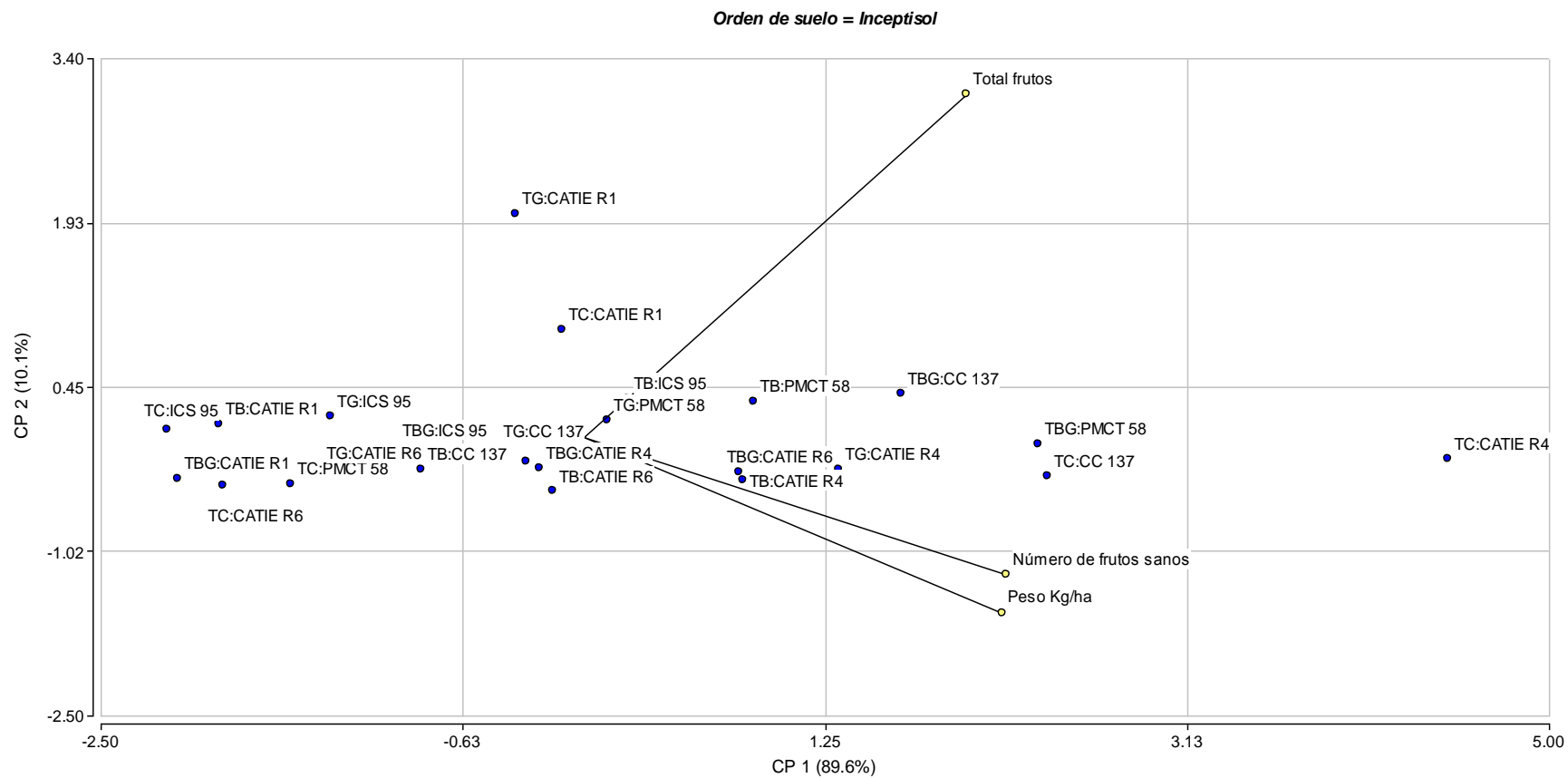


Figura 10. Biplot de componentes principales en el suelo Inceptisol. TC: tratamiento testigo, TG: tratamiento con gallinaza, TB: tratamiento con biocarbón, TBG: tratamiento con biocarbón y gallinaza.

4 Discusión de resultados

4.1. Indicadores de suelos

4.1.1 Densidad aparente

El uso de BC en los tratamientos TB Y TBG ayudo a disminuir significativamente la densidad aparente del suelo cuando se comparó con TG y el TC (Figura 2); sin embargo la densidad aparente de los suelos en Talamanca no limita la producción agrícola ya que es particularmente baja (Cerde 2007), por tanto no representó un factor determinante para mejorar el rendimiento del cultivo de cacao con cinco años de establecido, pero se desconoce cuál sería la respuesta experimentando con un cultivo que se inicie desde semillero.

La literatura corrobora la mejoría de la densidad aparente en suelos tropicales con BC, por ejemplo en indonesia en el cultivo de arroz se logró disminuir significativamente la densidad aparente (Masulili *et al.* 2010); pero también se ha corroborado en otras latitudes, como en la investigación de Laird *et al* (2010) que reveló mejorías en la reducción de la densidad de un Molisol y mejorías en la calidad y fertilidad al aumentar 20% la CICE.

4.1.2 Indicadores químicos

4.1.2.1 Acidez

Cuando se comparó TBG contra TC indistintamente del tipo suelo, el pH se aumentó 6.52%, un aumento del pH entre 0.1 y 0.46 unidades en un Ultisol fue encontrado por Peng *et al* (2011) quienes además resaltaron que con BC se consigue una situación ganar-ganar al secuestrar carbono y mejorar químicamente un suelo pobre, lo cual es consistente con los resultados de esta investigación.

Los resultados de la interacción suelo y tratamiento que ocurrieron en el Ultisol (Cuadro 5) indican que se aumentó el pH y por esto se produjeron reducciones significativas de acidez y por consiguiente de la saturación de acidez, estos resultados concuerdan con los resultados de Houben *et al.* (2014) quienes encontraron aumentos de pH de 0.6 unidades hasta de 3.6 aplicando entre 1% y 3% de BC en el total del suelo (100%); considerando que en esta investigación se aplicó muy poco BC <1% (3.33 toneladas/ha) los cambios pudieran haber sido impactantes aplicando 10, 20 o 30 ton/ha.

La reducción de la acidez en el Inceptisol no es un resultado agronómicamente significativo puesto que en estos suelos la acidez se encuentra en niveles bajos y no es un problema agronómico que limite el rendimiento.

4.1.2.2 Materia orgánica

En el Inceptisol y el Ultisol luego de dos años desde la aplicación del BC se aumentó la materia orgánica y no se mineralizó; esto lo puede explicar la literatura, por ejemplo un estudio en laboratorio logró demostrar el tiempo de residencia del BC en cuatro contrastantes tipos de suelos (Fang, *et al* 2014), encontrando rangos entre 44 y 610 años, en este estudio se corroboró en campo que después de dos años el BC aplicado no se perdió; al mantener en el tiempo la materia orgánica que se ganó con la aplicación de BC, se hizo efectivo el secuestro de carbono y al mismo tiempo se aumentó la disponibilidad de nutrientes indispensables para los arboles del cacao.

4.1.2.3 Macronutrientes

En el Inceptisol el tratamiento TBG aumentó 1.5 veces el contenido de fósforo (Cuadro 7), lo cual es consistente con reportes de aumentos en la disponibilidad de fósforo en suelos ácidos publicados en China (Xu *et al.* 2014); aunque no se registraron diferencias estadísticas en el rendimiento, el efecto del BC en el aumento notable del fosforo pudiera ser muy benéfico para los arboles de cacao en la época de trasplante pues se favorecería el desarrollo óptimo de raíces y los procesos fisiológicos de fotosíntesis y crecimiento.

También se registraron aumentos del nitrógeno en los cuales el Ultisol se favoreció más al recibir la combinación TBG, mientras que en el Inceptisol el TG aumentó más el nitrógeno que TBG; estos resultados concuerdan con recientes hallazgos respecto al aumento de macro nutrientes disponibles para las plantas en suelos ácidos con biocarbón (Houben *et al.* 2014). Respecto al potasio, se encontró aumento en el Ultisol pero disminución en el Inceptisol (Cuadro 7), otros autores han investigado en específico el efecto del BC y el potasio en el maíz, ellos indicaron la sinergia que puede existir usando BC y dosis químicas de potasio (Widowati y Asnah, 2014), encontrando que BC puede reemplazar al potasio o combinarse con la dosis adecuada y mejorar los rendimientos.

Los resultados de esta investigación (Cuadro 5 y Cuadro 7) sugieren que la cantidad de potasio presente en la gallinaza o en el BC de *Gmelina* no fue la suficiente para mantener los niveles de potasio en el Inceptisol, y si fue suficiente en el Ultisol, posiblemente ocurrió una deficiencia respecto a lo que la planta está tomando para la cosecha (874kg en Inceptisol y 217kg en Ultisol), dado que Hojah (2013) no reportó este efecto, se necesitarían más años de estudio para ser concluyentes y precavidos con la fertilización potásica cuando se use BC en Inceptisoles.

4.1.2.4 Micronutrientes

Un resultado interesante ocurrió al comparar a TBG y TC, pues el cobre disminuyó en promedio en los dos suelos 6.2% (Cuadro 6), esto concuerda con lo publicado por Rees *et al.* (2014) quienes sugieren que existe un beneficio directo por aplicar BC y aumentar el pH, ya

que se controla la disponibilidad de metales pesados, consistentemente con Rees *et al*, esta investigación encontró que con BC se aumentó el pH, lo que incidió en la bioremediación del suelo y al mismo tiempo incrementó la disponibilidad de macro y micronutrientes y aproximadamente 15% de la CICE (Cuadro 7).

Respecto al magnesio, el calcio o el zinc, se aumentó su disponibilidad para las plantas con mayores cambios en el Ultisol (Cuadro 7), estos resultados son consistentes con los que encontró Mayor *et al*, (2010) quienes en Oxisoles y después de 4 años de estudio reportaron aumentos en la disponibilidad de esos nutrientes y los relacionaron con los más altos rendimientos.

Cuadro 6. Indicadores con porcentaje de aumento o disminución comparando el TBG contra el TC.

Indicador	Comparación con BC comparado con el testigo	
	% de aumento (+) o disminución (-)	
pH	6.52%	
Ca	22.11%	
Cu	-6.20%	
CICE	14.85%	

Cuadro 7. Indicadores con porcentaje de aumento, disminución o ningún efecto, comparando suelos y el tratamiento TBG contra el testigo TC.

Indicador	ULTISOL	INCEPTISOL
	con biocarbón y gallinaza comparados con el testigo	
	% aumento o disminución	% aumento o disminución
Acidez	-57.97%	-33.33%
Magnesio	34.59%	2,25%
Potasio	34.62%	-27.14%

Fósforo	94.59%	153.9%
Zinc	62.04%	11.90%
Manganeso	-19.10%	-26.10%
Hierro	11.6%	-78.66%
Nitrógeno	32.26%	13.79%
Carbono/Nitrógeno	23.84%	10.58%
%Saturación de Acidez	-68.61%	-25.45%
%Materia orgánica	36.38%	23.14%

4.2 Enfermedades

Esta investigación resultó en continuidad del estudio de Hojah (2013) y se esperaba encontrar cambios significativos con los tratamientos de BC después del segundo año, dado que otros investigadores como Mayor *et al* (2010) esperaron hasta 4 años para observar cambios; en esta investigación de dos años, los cambios no ocurrieron, la incidencia de Monilia y Mazorca negra no fue estadísticamente diferente entre tratamientos y por consiguiente tampoco se evidenció algún efecto colateral en los rendimientos.

Probablemente las bajas dosis de BC que se usaron (3.33 Ton /ha) y de gallinaza (2.22 Ton/ha) no fueron suficientes para provocar cambios, en el futuro se podrían incrementar las dosis de fertilización a 20 o 30 Ton/ha y reevaluar los árboles en un cuarto o quinto año de estudio, ya que fue comprobado que los clones mejorados genéticamente resistieron las enfermedades en porcentajes normales (Figura 6 y Figura 8) aún con bajas dosis de fertilizantes orgánicos.

En Talamanca se necesitan hacer más estudios que incorporen las otras medidas de control de enfermedad que sean económicas para el productor, como mantener siempre 50% de sombrío, ser rigurosos con la recolección y el alejamiento del cultivo de frutos enfermos, aplicar microorganismos de montaña e incorporar nuevo biocarbón producido localmente con las tecnologías existentes en la zona (Aviles, 2014).

4.3 Rendimiento de clones

Las estrategias de selección de clones de cacao utilizada por Phillips-Mora *et al* (2012) en el CATIE han obedecido fundamentalmente a la búsqueda de resistencia genética a Monilia, pero evidentemente no han considerado evaluar los clones en distintos tipos de suelos; adicionalmente el manejo de fertilidad y malezas ha sido hecho con químicos sintéticos; por

lo tanto, esta investigación es relevante para indicar el comportamiento del rendimiento de los clones con manejo de la fertilización 100% orgánica en dos suelos contrastantes.

No queda duda que el alto rendimiento lo determinó la calidad del tipo de suelo y no los tratamientos o la resistencia a enfermedades de los clones, que aunque estuvo presente en los dos suelos en rangos normales (Figura 6 y Figura 8), no fue por si misma significativa para el alto rendimiento, puesto que por cada kilo de cacao producido en el Ultisol (217.3Kg/ha) se produjeron aproximadamente cuatro en el Inceptisol (864kg/ha), adicionalmente se corroboró que el manejo de podas y sombrío en ambos sitios fue similar y de acuerdo con las indicaciones técnicas del CATIE (Phillips-Mora *et al* 2012).

Los bajos rendimientos en el Ultisol hacen necesario ubicar a los clones mejor adaptados para futuras investigaciones y proyectos productivos; el análisis multivariado permitió relacionar al Ultisol con alta productividad del clon ICS95T1 y fue contrario a lo publicado por Phillips-Mora *et al* (2012) quienes reportaron a ICS95T1 como el menos productivo de los clones que han venido evaluando en suelos de mejor calidad.

Según Hojah (2013) sus resultados en el Ultisol concuerdan con los encontrados en este estudio, puesto que se mantuvo la productividad más alta con ICS95T1 y PMCT58, los clones CATIE R1 y CATIE R6 han indicado la más baja, esos rendimientos son contrarios con lo que reportaron Phillips-Mora *et al* (2012) y se pueden explicar por el manejo de fertilización orgánica que se dió al experimento, lo que permitió a ICS95T1 y PMCT58 expresar su potencial de rendimiento y mejor adaptación ante un suelo químicamente limitante.

Según un estudio en Ultisoles sobre la fertilización del cacao para alcanzar altos rendimientos de biomasa, se determinó la necesidad de obtener altos niveles de saturación de bases entre 40% y 60% (Nakayama *et al.* 1987), lo que indicaba que se debían encontrar tecnologías eficientes para lograr hacer productivos a esos suelos y que al mismo tiempo resultaran económicas para los productores.

Sin embargo ahora se sabe que la productividad de los cacaotales depende no solo de la suficiente disponibilidad de nutrientes sino de varias prácticas integrales (Deheuvels *et al.* 2012), en las cuales ahora pudiera incluirse al BC como una alternativa prometedora, evidenciado en los cambios registrados en la calidad de los suelos (Figura 3 y Figura 4) con los pocos insumos aplicados.

Los determinantes de la productividad del cacao que ahora se estudian implican: a) alto porcentaje de diversidad botánica, b) óptima estructura del sombrío, c) resistencia genética a las enfermedades y d) la adaptación a los factores cambiantes del ambiente (Deheuvels *et al*

2012); pero autores como Agama *et al.* (2009) indican que las enfermedades son las que más limitan la productividad, así como Leandro (2011) y Chavez *et al* (2011).

Las investigaciones de Baquero en la Universidad EARTH (2014)¹ indican que con sistemas agroforestales (SAF) optimizados con altas dosis de fertilizantes orgánicos (20 ton /ha) y control mecánico de arvenses repercuten en altos rendimientos cercanos a 2,5 ton /ha, es decir más del 1200% de rendimiento en comparación con lo que reportan los cacaotales manejados por comunidades indígenas en Talamanca.

Los altos rendimientos en la EARTH pueden explicarse por la sinergia que se ha formado adicionando a) materia orgánica de manera intensiva; b) uso de los microorganismos benéficos, c) el manejo óptimo del sombrero y d) las oportunas remociones de frutos enfermos del cultivo; esas prácticas resultan costosas y requieren de productores que cuenten con capital semilla, preparación técnica y disponibilidad para laborar de manera intensiva, pero se compensan con la venta del cacao y la venta o uso de los subproductos del sistema como el banano y la madera.

Finalmente, fue interesante el haber registrado el grosor del tallo de los clones (Anexos, Figura 14), puesto que se comprobó que con TBG en Ultisoles se pueden alcanzar grosores de tallos similares al grosor que se alcanza en Inceptisoles, lo que significa que con el uso del TBG se almacenó más carbono que sin aplicar nada (el testigo) y se aumentó la productividad de biomasa; este reporte puede soportar más estudios agronómicos y forestales para validar el uso de biocarbón en fincas con mecanismos de pago por almacenamiento del carbono o con mecanismos de PSA en suelos Ultisoles de Costa Rica o fuertemente ácidos.

5. Conclusiones

Este estudio encontró mejorías en la calidad química altamente significativas para el suelo Ultisol y beneficios moderados para el suelo Inceptisol; la reducción del porcentaje de saturación de acidez y el mejoramiento de la materia orgánica fueron los dos resultados más importantes hallados en cuanto a indicadores químicos de suelos.

Los seis clones evaluados indicaron rendimientos diferentes y contrastantes a los reportados por sus desarrolladores del CATIE, explicado por la relación genotipo por ambiente, en la cuál el ambiente se modificó con el manejo orgánico de la fertilización.

¹ Baquero, R. 2014. Plática informal sobre cacao en Costa Rica. Universidad EARTH, sede Atlántico. (comunicación personal). Costa Rica.

Los clones que cosecharon más fruta fresca en seis meses, e independientemente del tratamiento fueron ICS95T1 con 497kg en el suelo Ultisol y CATIE R4, CC137 y PMCT58 en el suelo Inceptisol con 1592 kg, 1231 kg y 1068 kg respectivamente.

La variable de humedad gravimétrica y las variables microbiológicas de biomasa y respiración microbiana no se afectaron con ningún tratamiento de BC o gallinaza, por tanto se requieren de dosis mayores que las usadas en este experimento para obtener cambios significativos.

Las enfermedades se redujeron en casos específicos de ciertos clones, pero en general no se obtuvo diferencias estadísticas significativas con el uso de BC, aclarando que se experimentó con un cultivo de cinco años de establecido y que se aplicó poco BC en comparación con otras investigaciones.

En Talamanca el uso del BC de Gmelina en mixtura con gallinaza en cacaotales orgánicos tiene suficiente validez para promocionarse dentro de una estrategia para alcanzar la sostenibilidad agronómica, en específico y referente a la calidad del suelo, pero falta realizar nuevos estudios con mayores dosis de BC producido localmente relacionados con estudios de factibilidad económica para lograr cultivos sostenibles con altos rendimientos y sanidad vegetal.

Recomendaciones

Se recomienda realizar nuevos estudios en la zona, partiendo desde semillero y adicionando técnicas económicas como el biocontrol de enfermedades con el uso de los microorganismos de montaña MM y prácticas culturales como la cosecha semanal de frutos enfermos y su eliminación, así como la reducción estricta del sombrío por lo menos al 50%.

Se recomienda generar modelos informáticos de predicción con biocarbón para agroecosistemas orgánicos, considerando las diferencias entre tipos de suelos ya que resultarían interesantes para entender el impacto de esta tecnología en las dinámicas de nutrientes de distintos suelos, así como su potencial impacto para la mitigación y la adaptación al cambio climático.

Se recomienda que las prácticas que deterioran la calidad ambiental y del suelo en cultivos de cacao deben evitarse dentro de los planes de mejoramiento y selección de clones de cacao en el CATIE y que se realicen nuevas investigaciones.

Se recomienda al gobierno de Costa Rica y las instituciones de educación formal o técnica del país o las universidades que aboguen por la instalación de estaciones meteorológicas en Talamanca para poder correlacionar los factores del clima con este tipo de investigaciones.

6. Agradecimientos

A los productores y sus respectivas familias “Antony Salazar y su esposa Rosita, y a Felipe y esposa Katya” por facilitar el estudio en sus fincas orgánicas.

A Seattle Biochar Working Group, en especial al presidente Art Donnelly por financiar esta investigación

7. Bibliografía

- Agama, J.; Amores, F.; Eskes, A.; Vasco, A.; Zambrana, J. 2009. Estudio Base de Acercamiento e Implementación de Investigación Participativa para la Selección de Clones Superiores de Cacao en Tres Areas Productoras Tradicionales del Ecuador. *In International Workshop on Cocoa Breeding for Farmers’ Needs* 2009. p. 31.
- Anderson, J.M. y J.S.I. Ingram. 1992. *Tropical Biology Soil Fertility: A Handbook of Methods*. 2nd Edic. Oxford. U.K. CAB International. 221 p.
- Black, G.; Hartge, K. 1986. Bulk density. *Methods of soil analysis*. Part 1: 347-380.
- Avilés López, L. 2014. Evaluación participativa del Proyecto Estufa Finca en familias Bribri de Talamanca, Costa Rica. Trabajo de graduación, MPD.CATIE, Turrialba, CR 97p.
- Cerda, R. 2007. Calidad de suelos en plantaciones de cacao (*Theobroma cacao*), banano (*Musa AAA*) y plátano (*Musa AAB*) en el valle de Talamanca, Costa Rica. Tesis M. Sc. CATIE, Turrialba, CR. 60 p.
- Chávez, E; León, R; Ruíz, O; Averos, C; Peralta, E. 2011. Aplicación de biofertilizantes líquidos de producción local y su efecto en la rehabilitación de plantaciones de cacao fino y de aroma. CIBE, ESPOL. Guayaquil, Ecuador 6p.
- Deheuvels, O.; Avelino, J.; Somarriba, E.; Malezieux, E. 2012. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 149: 181-188.
- Di Rienzo, J.; Casanoves, F.; Balzarini, M.; Gonzalez, L.; Tablada, M.; Robledo, y.C. 2011. InfoStat versión 2011. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>.
- Duku, M.H.; Gu, S.; Hagan, E.B. 2011. Biochar production potential in Ghana—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15(8): 3539-3551.
- Fang, Y., Singh, B., Singh, B. P. and Krull, E. (2014), Biochar carbon stability in four contrasting soils. *European Journal of Soil Science*, 65: 60–71. doi: 10.1111/ejss.12094.

- Foereid, B.; Lehmann, J.; Major, J. 2011. Modeling black carbon degradation and movement in soil. *Plant and soil* 345(1-2): 223-236.
- 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. *Biodiversity conservation in cocoa and banana agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. Agroforestería en las Américas (CATIE)* 8(30): 7-11.
- Henreaux, J. 2012. Efecto del biocarbón combinado con fertilizantes orgánicos y microorganismos benéficos sobre el desarrollo, productividad y resistencia de las plantas, Tesis, Mag. Sc. CATIE Turrialba CR.
- Hojah, J. 2013. Impacto del uso de biocarbón sobre la calidad de suelos y producción de cacao (*Theobroma cacao* L.) en sistemas agroforestales, Reserva Indígena Bribri, Talamanca, Costa Rica. Tesis MSc. CATIE. Turrialba, CR, 93 p.
- Huertos, E.; Romero, A. 2008. Contaminación de Suelos por Metales Pesados. *Revista de la sociedad española de mineralogía*: 48-61. Disponible en: http://www.ehu.es/sem/macla_pdf/macla10/Macla10_48.pdf
- Houben, D.; Sonnet, P.; Cornelis, J.-T. 2014. Biochar from *Miscanthus*: a potential silicon fertilizer. *Plant and soil* 374(1-2): 871-882.
- Jeffery, S.; Verheijen, F.; Van Der Velde, M.; Bastos, A. 2011. A quantitative review of the effects of biochar application to soils on crop productivity using meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 144(1): 175-187.
- Laird, D.; Fleming, P.; Wang, B.; Horton, R.; Karlen, D. 2010. Biochar impact on nutrient leaching from a Midwestern agricultural soil. *Geoderma* 158(3): 436-442.
- Laird, D.A. 2008. The charcoal vision: a win-win-win scenario for simultaneously producing bioenergy, permanently sequestering carbon, while improving soil and water quality. *Agronomy Journal* 100(1): 178-181.
- Leandro, M. 2011. Efecto de los factores macro y microclimáticos y las características productivas del cacao sobre la epidemiología de la moniliasis. Tesis, Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica. 87p
- Liang, B.; Lehmann, J.; Solomon, D.; Kinyangi, J.; Grossman, J.; O'Neill, B.; Skjemstad, J.; Thies, J.; Luizao, F.; Petersen, J. 2006. Black carbon increases cation exchange capacity in soils. *Soil Science Society of America Journal* 70(5): 1719-1730.
- McLaughlin, H. 2010. *The Biochar Revolution: Transforming Agriculture and Environment: Chapter 6 What is Biochar* Victoria, Australia, (Global publishing group 1st ed.)

- Nakayama, L.; Pinto, L.; Santana, C.d.; Cocoa Producers' Alliance, L. 1987. Efeito de doses de calcário na cultura do cacau (*Theobroma cacao* L.). Actas. Proceedings. *In* 10. International Cocoa Research Conference. Santo Domingo (R. Dominicana). 17-23 May 1987. 1987. p.
- Nielsen, S.; Minchin, T.; Kimber, S.; van Zwieten, L.; Gilbert, J.; Munroe, P.; Joseph, S.; Thomas, T. 2014. Comparative analysis of the microbial communities in agricultural soil amended with enhanced biochars or traditional fertilisers. *Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Ndubuaku, T.; Asogwa, E. 2006. Strategies for the Control of Pests and Diseases for Sustainable Cocoa Production in Nigeria. *African Scientist* 7: 209-216.
- Odesola, I.; Owoseni, T. 2010. Development of local technology for a small-scale biochar production processes from agricultural wastes. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences* 1(2): 205-208.
- Ogunjobi, J.K.; Lajide, L. 2013. The Potentials of Cocoa Pods and Plantain Peels as Renewable Sources in Nigeria. *International Journal of Green Energy* (just-accepted).
- Peng, Xin, Ye , L; Wang, C; Zhoua,H; Sun, B. 2011 "Temperature-and duration-dependent rice straw-derived biochar: Characteristics and its effects on soil properties of an Ultisol in southern China." *Soil and Tillage Research* 112.2 : 159-166.
- Pérez Salas, R.A.; Tapia Fernández, A.C.; Soto, G.; Benjamin, T. 2013. Efecto del Bio-carbón sobre *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense y el desarrollo de plantas de banano (*Musa AAA*). *InterSedes* 14(27): 66-100.
- Phillips-Mora, W.; Arciniégas, L.; Mata, A.; Motamayor, J. 2012. Catálogo de clones de cacao seleccionados por el CATIE para siembras comerciales. 1 ed. Turrialba, CR. 68 p. (Serie técnica. Manual técnico / CATIE ; no. 105).
- Somarriba, E.; 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.
- Torres-Rojas, D.; Lehmann, J.; Hobbs, P.; Joseph, S.; Neufeldt, H. 2011. Biomass availability, energy consumption and biochar production in rural households of Western Kenya. *biomass and bioenergy* 35(8): 3537-3546.
- Van Zwieten, L.; Kimber, S.; Morris, S.; Chan, K.; 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 and soil* 327(1-2): 235-246.

- Widowati, W.; Asnah, A. 2014. Biochar Can Enhance Potassium Fertilization Efficiency and Economic Feasibility of Maize Cultivation. *Journal of Agricultural Science* 6(2): p24.
- Woods, W.I.; Falcão, N.P.; Teixeira, W.G. 2006. Biochar trials aim to enrich soil for smallholders. *Nature* 443(7108): 144-144.
- Woolf, D.; Lehmann, J. 2012. Modelling the long-term response to positive and negative priming of soil organic carbon by black carbon. *Biogeochemistry* 111(1-3): 83-95.
- Xu, G.; Sun, J.; Shao, H.; Chang, S.X. 2014. Biochar had effects on phosphorus sorption and desorption in three soils with differing acidity. *Ecological Engineering* 62: 54-60.

Anexos

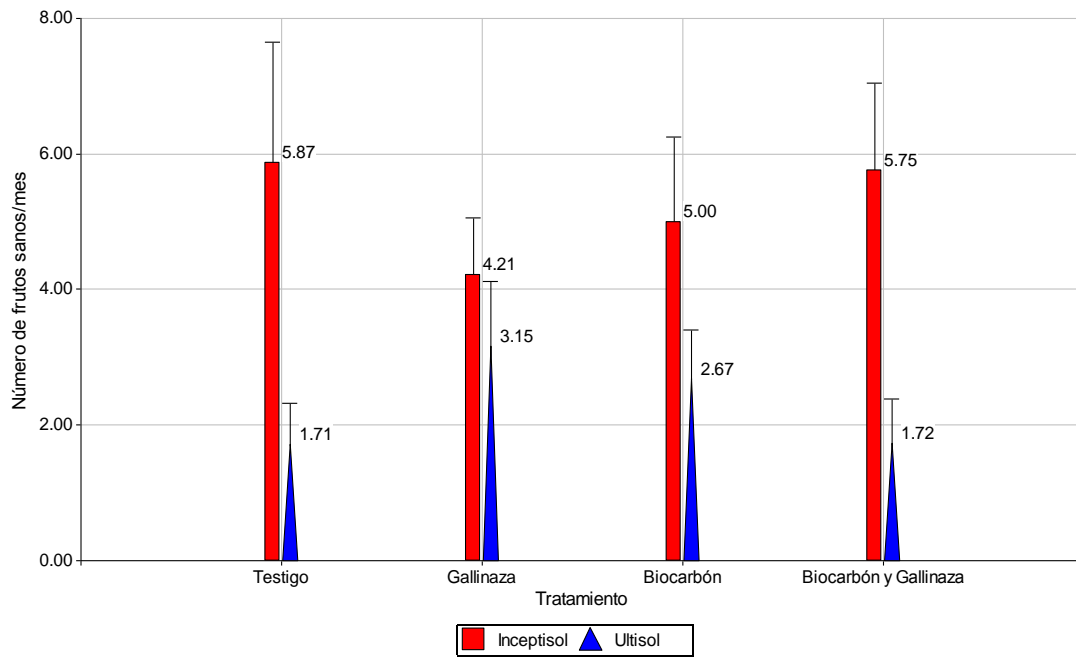


Figura 11. Promedio mensual del número de frutos sanos por tratamientos y por orden de suelo.

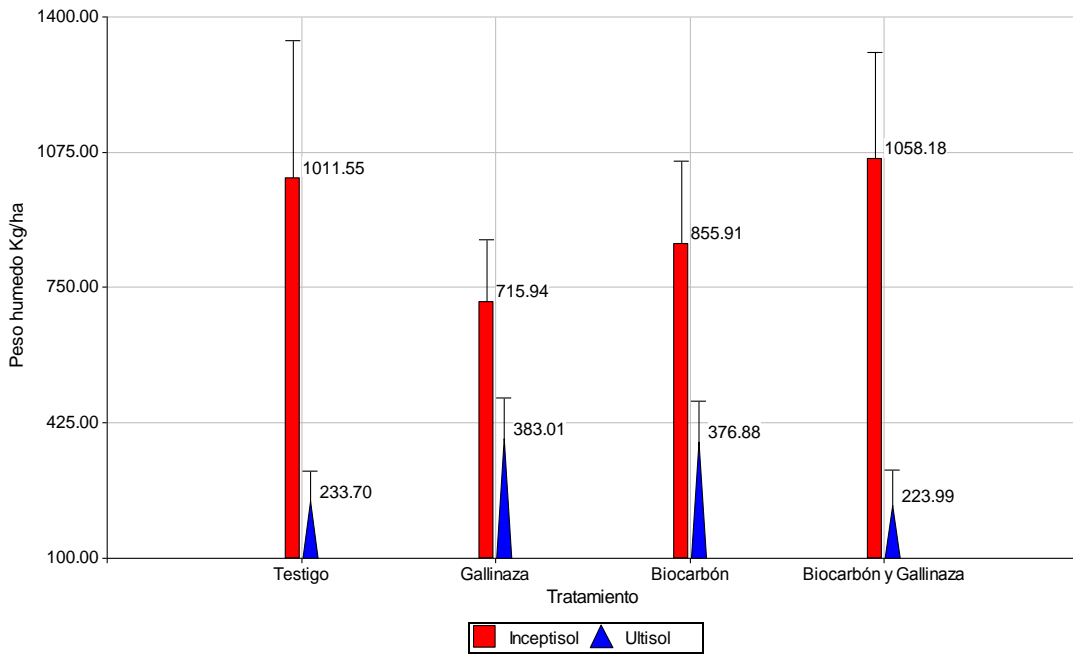


Figura 12. Promedio mensual del peso húmedo de semillas de los 4 tratamientos diferenciados por orden de suelo.

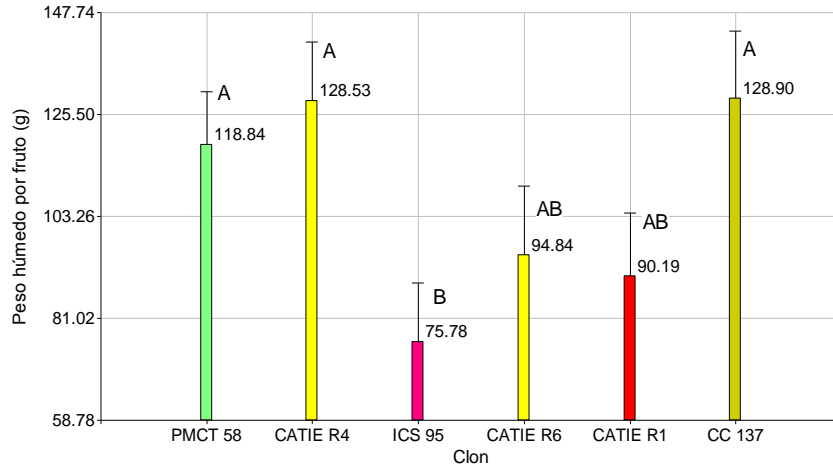


Figura 13. Promedio mensual del peso húmedo de semillas (g) por fruto de los seis clones con diferencia estadística.

Almacenamiento de carbono en troncos

Se realizó la medición del diámetro de todas las unidades experimentales, la metodología de medición se hizo a 30 cm del suelo, se encontró una tendencia importante en el Ultisol, cuando se aplicó abono orgánico, los diámetros fueron similares a los del suelo Inceptisol, el tratamiento TBG obtuvo 31.4 cm de media (Figura14).

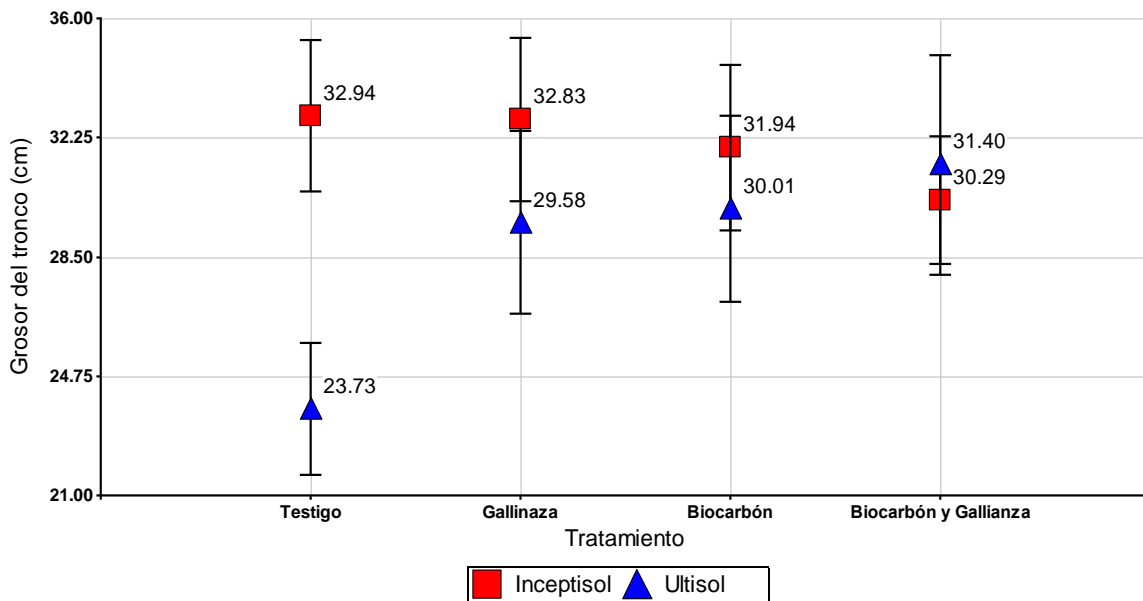


Figura 14. Promedio del grosor del tronco a 30 cm del suelo para los 4 tratamientos en los dos suelos.

Frutos abortados

Los clones CATIE R1 e ICS95T1 registraron la mayoría de abortos entre 5 y 29 frutos por mes (Figura 15); en suelos Ultisoles se presentó una reducción entre 7 a 5 frutos del TBG comparándolo con el TC, así mismo en el Inceptisol se redujo entre 8 y 7 el número de frutos abortados cuando se usó TBG (Figura 16).

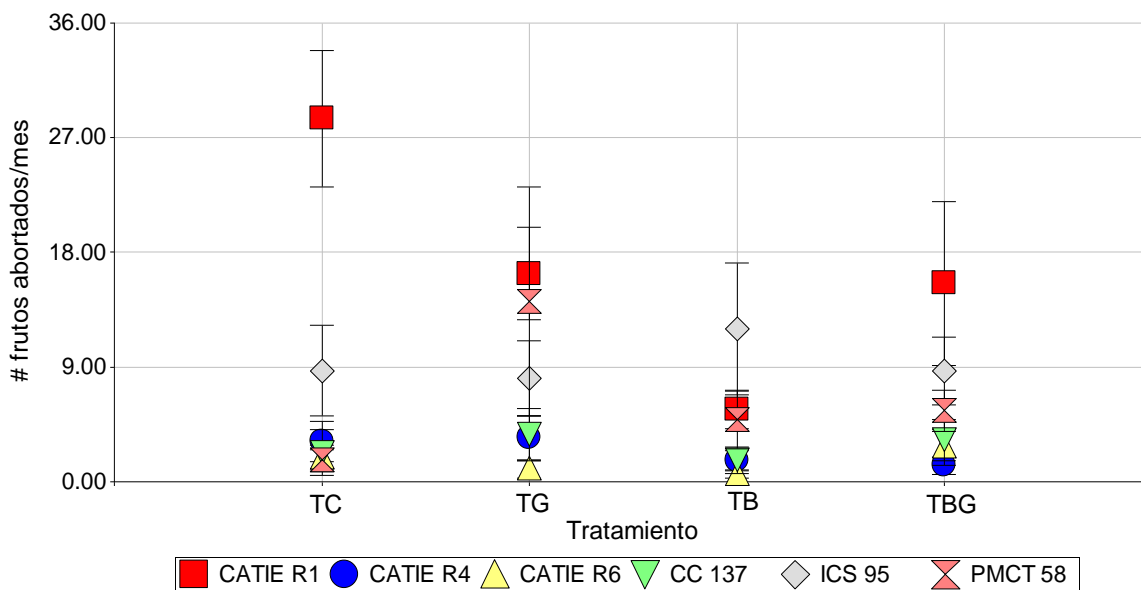


Figura 15. Promedio mensual del número de frutos abortados en cada clon y en cada tratamiento.

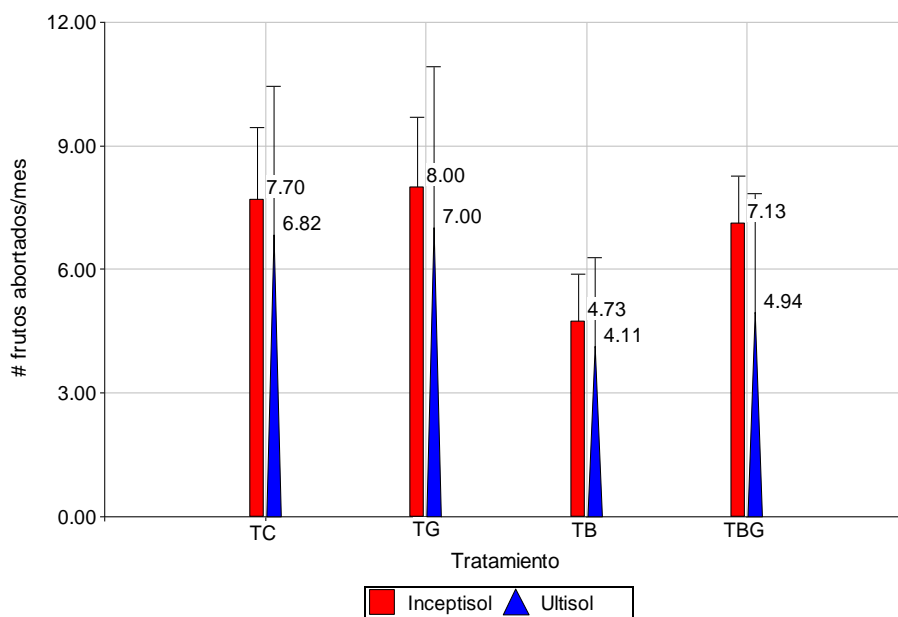


Figura 16. Promedio mensual del número de frutos abortados en cada tratamiento y en cada suelo.

Frutos comidos por las ardillas

Se registró pérdida de la producción en el suelo Ultisol asociada específicamente a las ardillas. Se conocen estudios donde se advierten las pérdidas (Guiracocha *et al.* 2001), aunque no se puede aseverar que se trate de una relación por deficiencias del suelo, tampoco puede descartarse; las pérdidas rondaron entre el 25.47% en el TBG, 35% en el TG y 30.70% en el tratamiento testigo, lo que sugiere un descenso en el consumo de la ardilla cuando se mejoró la calidad del suelo con BC.

Indistintamente del tratamiento, se encontró que la ardilla prefiere los clones PMCT 58, CATIE R6 Y CATIE R4, según (Phillips-Mora *et al.* 2012) estos 3 clones comparados con CATIE R1, ICS 95 Y CC137 tienen más cantidad de semillas por fruto (34.3 comparados con 29.6), tienen más porcentaje de grasa, menos cafeína, y menos epicatequina, lo que indica que la ardilla posee sensores y mecanismos que le indican la cantidad de energía que va a consumir, el trabajo que debe realizar así como receptores químicos para evitar la cafeína y la epicatequina.

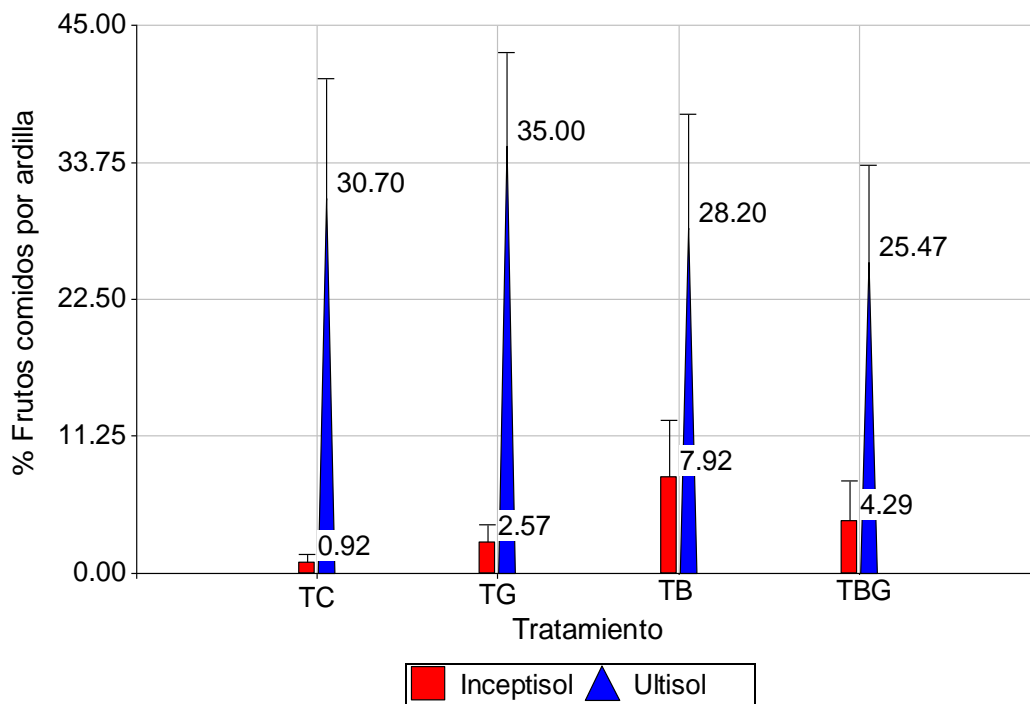


Figura 17. Porcentaje de frutos comidos por ardillas en cada tratamiento y en cada suelo. Las ardillas pueden representar pérdidas de hasta el 35% de la producción, aunque con el uso del TBG se redujo la ingesta de frutos, la ecología de la ardilla y su conducta sugiere ubicar, proteger o cuidar a los clones con mayor porcentaje de grasa y mayor número de semillas por fruto para impedir su consumo desmedido.