

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUÍMICAS Y FARMACIA**

**MACROFAUNA Y PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES CON CACA O (*THEOBROMA CACA O* L.) Y BOSQUES SECUNDARIOS EN EL
SUR OCCIDENTE DE GUATEMALA.**

Laura Sáenz Domínguez

Bióloga

Guatemala, febrero de 2011

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS Y FARMACIA**

**MACROFAUNA Y PROPIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS DEL SUELO EN SISTEMAS
AGROFORESTALES CON CACAO (*THEOBROMA CACAO* L.) Y BOSQUES SECUNDARIOS EN EL
SUR OCCIDENTE DE GUATEMALA.**

Informe Final de Tesis

Presentado por

Laura Sáenz Domínguez

**Para optar al título de
BIÓLOGA**

Guatemala, febrero de 2011

JUNTA DIRECTIVA

DECANO:	Dr. Oscar Cobar Pinto
SECRETARIO:	Lic. Pablo Ernesto Oliva Soto
VOCAL I:	Licda. Lillian Raquel Irving Antillón
VOCAL II:	Licda. Liliana Vides de Urizar
VOCAL III:	Lic. Luis Antonio Gálvez Sanchinelli
VOCAL IV:	Br. José Roy Morales Coronado
VOCAL V:	Br. Cecilia Liska de León

DEDICATORIA

A quienes me apoyaron durante la trayectoria de mi carrera universitaria.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor de tesis Guillaume Rousseau por su apoyo en la capacitación para el trabajo de campo y de laboratorio, discusiones de resultados y correcciones al documento en sus diferentes etapas. A Eduardo Say y Jorge Mario Vargas, por sus valiosos comentarios y revisiones. A Juan Francisco Pérez (Unidad de Análisis Instrumental, Escuela de Química), Ricardo Véliz (Departamento de Análisis Inorgánico, Escuela de Química), Filadelfo Guevara (Laboratorio de Entomología, Facultad de Agronomía), Rosalito Barrios (Escuela de Biología), German Peña (Escuela de Biología), Roselvira Barillas (Departamento de Botánica, Escuela de Biología) y Antonieta Rodas (Laboratorio de Entomología Aplicada y Parasitología LENAP, Escuela de Biología) por autorizar el uso tanto de equipo como de laboratorios. Gracias a Andrea Paiz por la toma de datos de física del suelo y al Laboratorio de Suelos del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) en Costa Rica, por los resultados químicos. Aprecio el apoyo tanto en la logística como en la ejecución del trabajo de campo, al personal de CATIE Guatemala, a las asociaciones ASECAN y APROCA, Finca Bulbuxyá, ayudantes de campo y propietarios de las fincas de cacao en el Sur Occidente.

Este estudio forma parte del proyecto Competitividad y Ambiente en los Territorios Cacaoteros de Centroamérica (PCC), apoyado por la Embajada de Noruega en Nicaragua.

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN	2
3. ANTECEDENTES.....	3
3.1. Macrofauna	3
3.2. Física del Suelo	7
3.2.1. Textura.....	8
3.2.2. Porosidad	9
3.2.3. Densidad aparente.....	10
3.2.4. Humedad del suelo	10
3.2.5. Porcentaje de saturación.....	12
3.3. Química del suelo	12
3.3.1. pH	12
3.3.2. Nitrógeno (N)	13
3.3.3. Carbono (C).....	13
3.3.4. Relación C:N	13
3.3.5. Relación N:P.....	14
3.3.6. Macro y microelementos	14
3.3.7. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	15
3.4. Investigación e iniciativas recientes para el cultivo de <i>Theobroma cacao</i> L. en Guatemala	16
4. JUSTIFICACIÓN.....	18
5. OBJETIVOS.....	19
5.1. General.....	19
5.2. Específicos	19
6. HIPÓTESIS.....	20
7. MATERIALES Y MÉTODOS	21
7.1. Área de estudio	21
7.2. Universo.....	21

7.3.	Materiales.....	23
7.4.	Métodos	25
7.4.1.	Diseño del muestreo	25
7.4.2.	Extracción de macrofauna	25
7.4.3.	Muestras y análisis de suelo.	26
7.4.4.	Análisis estadísticos.....	27
8.	RESULTADOS.....	28
8.1.	Atributos físico-químicos y tipología de referencia.....	28
8.2.	Macrofauna y sus correlaciones con las variables físico-químicas del suelo	35
9.	DISCUSIÓN.....	42
9.1.	Atributos físico-químicos y tipología de referencia.....	42
9.1.1.	Indicadores de calidad de suelo	42
9.1.2.	Elementos y cacao	43
9.1.3.	Cacao y bosques	45
9.2.	Macrofauna y sus correlaciones con las variables físico-químicas del suelo	46
9.2.1.	Comunidades de fauna.....	46
10.	CONCLUSIONES.....	50
11.	RECOMENDACIONES	51
12.	REFERENCIAS	52
13.	ANEXOS.....	59
13.1.	Coordenadas de fincas de cacao y bosques secundarios	59
13.2.	Procedimientos para análisis de suelo en Laboratorio CATIE Costa Rica	61
13.2.1.	Textura, método de Bouyoucos	61
13.2.2.	Nitrógeno y Carbono total	63
13.2.3.	Elementos mayores y menores	63

1. RESUMEN

Se estudiaron las propiedades físicas y químicas del suelo para determinar una tipología de referencia y para analizar sus correlaciones con la macrofauna, en los sistemas agroforestales con cacao y bosques secundarios del Sur Occidente del país. Las muestras de suelo y hojarasca fueron colectadas en 36 fincas de cacao y 3 bosques secundarios. Para seleccionar indicadores y establecer una tipología de referencia, se analizaron 25 variables físico-químicas, en un Análisis de Componentes Principales. Con los resultados y en base a la literatura, se escogió un grupo de 6 indicadores (suma de bases, densidad aparente, porosidad, humedad gravimétrica y relaciones C:N y N:P), que luego en un Análisis de Conglomerados, formaron 5 grupos de diferente calidad de suelos. Cada categoría se nombró a partir de las variables más determinantes (+Bases, Alta N:P, Alta DA, ±Bases y -Bases). Según datos óptimos de concentraciones de elementos para el cultivo del cacao, se observó que estos suelos tienen bajos niveles de fósforo y sólo la categoría de -Bases presenta deficiencia de nutrientes. Entre sus cualidades para el cultivo de cacao están el pH neutro, la textura arcillosa, la baja densidad aparente y los altos contenidos de materia orgánica. Además, los cacaotales presentan una estructura similar a los bosques de la región. La fauna se clasificó en 26 grupos, donde las hormigas fueron las más abundantes (42%). Los grupos de macrofauna no mostraron diferencias significativas ($P > 0,05$) con las categorías del suelo. Pero en un Análisis de Correspondencias Canónicas entre la fauna y las variables indicadoras, los grupos funcionales se distribuyeron en dos comunidades, una relacionada a las concentraciones de bases y relación N:P y la otra asociada a un gradiente de densidad aparente, porosidad y humedad, lo que sugiere que estos indicadores pueden ser importantes en la regulación de la fauna.

2. INTRODUCCIÓN

El Sur Occidente de Guatemala es un área de alta actividad ganadera y agrícola, donde sus principales cultivos son café, hule, caña de azúcar, cacao, granos básicos y diversidad de frutas (Instituto Geográfico Nacional, 2000; Universidad del Valle de Guatemala –Centro de Estudios Ambientales, 2003). Los departamentos de esta región en los cuales se cultiva cacao son San Marcos, Suchitepéquez y Retalhuleu. Las plantaciones de cacao en esta área son bastante heterogéneas, varían entre edades de 5 a más de 50 años, colindan con diferentes tipos de cultivos, bosques secundarios, carreteras, casas, potreros y ríos (encuesta PCC y obs. pers.). Este sistema agroforestal crece en conjunto con una diversa variedad de árboles de sombra, incluyendo especies maderables y frutales (encuesta PCC y obs. pers.).

Esta investigación es parte del proyecto Competitividad y Ambiente en los Territorios Cacaoteros de Centroamérica (PCC), que a través de un programa de investigación integral, pretende apoyar a pequeños productores en el desarrollo de sus cultivos. En su componente relacionado con producción y ambiente, se incluye el estudio de la calidad del suelo y la diversidad de macrofauna. Estudiar el suelo es importante porque allí se ponen a disposición de las plantas, los nutrientes necesarios para su desarrollo (Fassbender, 1992; Winowiecki, 2008), mientras que la macrofauna modifica las propiedades físicas del suelo y promueve la actividad de los microorganismos, para la descomposición química (Lavelle y Spain, 2001).

El objetivo de este trabajo fue estudiar la diversidad de macrofauna y calidad de los suelos, en las plantaciones de cacao y bosques secundarios, con el fin de: 1) escoger un grupo reducido de variables físico-químicas, que funcionaran como indicadores y que además, fueran de utilidad para establecer una tipología de referencia, con suelos de diferente calidad; 2) conocer si en base a las propiedades físicas y químicas de sus suelos, los bosques secundarios forman una categoría independiente o son similares al cacao; y 3) determinar las variables físico-químicas más correlacionadas con los grupos de macrofauna.

Para el trabajo de campo se realizó la toma de muestras en 36 fincas de cacao y 3 bosques secundarios, distribuidos en los departamentos de Suchitepéquez y Retalhuleu. En cada finca se obtuvo datos físicos y químicos de los suelos, así como las abundancias de los grupos de macrofauna.

3. ANTECEDENTES

En un estudio piloto en Turrialba, Costa Rica, se elaboró un marco de referencia para evaluar y comparar suelos de diferente calidad, entre sistemas agroforestales con cacao y bosques maduros (Rousseau *et al.*, en prep.). Seleccionaron un grupo reducido de variables físico-químicas, para elaborar una tipología de referencia. El grupo reducido de variables indicadoras fue definido a partir de la bibliografía y trabajo de campo, también se seleccionaron grupos funcionales de macrofauna que mejor explicaran a las variables indicadoras (Rousseau *et al.*, en prep.). Trabajos como el de Costa Rica han sido ampliados a los países centroamericanos de Nicaragua, Panamá, Honduras, Belice y Guatemala (Deheuvels *et al.*, 2009), donde las condiciones de producción de cacao son muy diferentes a las de Costa Rica.

3.1. Macrofauna

Los organismos clasificados como macrofauna son los invertebrados con un largo promedio mayor a 2 mm (Lavelle y Spain, 2001). En base a la clasificación de grupos funcionales de Lavelle *et al.* (2003) en el Cuadro 1, se presenta una descripción de las características principales de cada grupo.

Cuadro 1. Lista de unidades taxonómicas o grupos funcionales de macrofauna del suelo y sus características principales. Información tomada de: Stehr (1991), Lavelle *et al.* (2003) y Borror *et al.* (2005).

Grupos funcionales de macrofauna (nombre común)	Características principales
Aranea (arañas)	Este grupo de arácnidos está ampliamente distribuido, es diverso y por lo general abundante. Tienen el cuerpo dividido en 2 partes, cefalotórax y abdomen. El abdomen no está segmentado y posee hileras. Todas sus especies son depredadoras y se alimentan principalmente de insectos.
Blattaria (cucarachas)	Son insectos tropicales, que se movilizan velozmente por tener patas cursoriales. El cuerpo es ovalado y aplanado, en vista dorsal la cabeza se oculta debajo del pronoto (primer segmento del tórax),

sus alas son tegminas, tienen antenas filiformes y su aparato bucal es masticador. Las cucarachas son generalistas.

- Chilopoda (ciempiés) Es común encontrar estos miriápodos en el suelo, debajo de la corteza de los árboles o en troncos podridos. Son alargados y aplanados. En cada segmento del cuerpo poseen un par de patas. En la cabeza tienen dos apéndices llamados forcípulas, que utilizan para inyectar veneno. Son organismos depredadores.
- Coleoptera (escarabajos) **Adultos:** Es el grupo más diverso de insectos y se encuentran en cualquier tipo de hábitat. El primer par de alas son élitros, presentan una gran variedad de formas de antenas y patas, dependiendo del hábito y tienen un aparato bucal masticador. Se alimentan de todo tipo de plantas y animales.
Larvas: Son organismos diversos, que están presentes en todo tipo de hábitat. Por lo general, estas larvas tienen tres pares de patas torácicas y la cabeza bien desarrollada.
- Diplopoda (milpiés) Estos miriápodos están en el suelo, debajo de hojas o piedras, en musgo y madera en descomposición. Son alargados y cilíndricos, pero algunos pueden ser un poco aplanados. En cada segmento del cuerpo poseen dos pares de patas, tienen la cabeza convexa, debajo de la cual hay una estructura en forma de labio llamada gnatoquilario, útil para diferenciar especies. La mayoría son carroñeros y sólo algunos son depredadores.
- Diptera (moscas) **Larvas:** Las moscas son un grupo diverso y abundante, sus individuos están en todo tipo de hábitat. Por lo general, la cabeza está poco desarrollada, pero se distingue un par de garras (mandíbulas). Estas larvas no tienen patas torácicas.
- Enchytraeidae Son anélidos emparentados con las lombrices. Los Enchytraeidae son pequeños, blancos y con el cuerpo casi transparente, que es posible ver el sistema digestivo. La segmentación del cuerpo no es evidente.

Formicidae (hormigas)	Es un grupo diverso de insectos sociales, con gran variedad de hábitos y aparecen en todo tipo de hábitat. A diferencia de avispas y abejas, tienen una glándula metapleuraleal y una (o dos) constricción entre el 2o y 3er segmento abdominal (llamado pecíolo/s), su aparato bucal es masticador y la casta reproductiva posee alas membranosas. Por lo general, las especies que habitan el suelo son depredadoras, a excepción de las cortadoras de hojas que cultivan hongos.
Gastropoda (conchas, caracoles, etc.)	Este grupo de organismos abarca una gran variedad de individuos, que son principalmente acuáticos; y los que son terrestres, necesitan mucha humedad para desarrollarse. Se caracterizan por tener un exoesqueleto duro.
Heteroptera (chinchas)	Heteroptera es un grupo grande de insectos y ampliamente distribuido, la mayoría de sus especies son terrestres, pero también las hay acuáticas. Su primer par de alas son hemélitros, tienen un aparato bucal picador chupador y poseen glándulas odoríficas a los lados del tórax. Se alimentan de los jugos de las plantas, otras son depredadoras o chupan sangre de los animales.
Hirudinea (sanguijuela)	Son anélidos, con apariencia de gusanos. Su cuerpo no está segmentado y en la región bucal tienen una estructura en forma de ventosa.
Homoptera (cigarras, toritos, chicharritas)	Este grupo es muy similar a Heteroptera porque tienen un aparato bucal picador chupador, las alas pueden ser membranosas o tegminas, sus antenas parecen un pelo corto. Todos se alimentan de plantas.
Hymenoptera (abejas, avispas y hormigas)	Aquí se incluyen las hormigas, pero éstas fueron tomadas como un grupo independiente. Los himenópteros son insectos sociales, con un aparato bucal masticador y alas membranosas (algunas especies no tienen alas, como los que habitan el suelo).
Isopoda (cochinillas de)	Son crustáceos con preferencia por los ambientes húmedos. Estos

humedad)	organismos son aplanados dorsoventralmente, el tórax cuenta con 7 segmentos y un par de patas en cada uno. Los segmentos del abdomen parecen fusionados y son de menor tamaño que los del tórax.
Isoptera (termitas)	Es un grupo de insectos sociales relativamente pequeño, distribuido en todo el mundo. Tienen antenas filiformes o moniliformes, aparato bucal masticador, la casta reproductiva tiene dos pares de alas membranosas del mismo tamaño, la casta obrera cuenta con machos y hembras. Se alimentan de plantas y pueden digerir la celulosa gracias a una simbiosis con bacterias y protistas.
Lepidoptera (mariposas)	Larva: Este grupo presenta una gran diversidad de formas y hábitos. Las larvas de Lepidoptera tienen tres pares de patas torácicas y otras pseudopatas abdominales. Por lo general, la cabeza está bien desarrollada.
Neuroptera (hormigas león)	Larva: Tiene una forma campodeiforme, es decir, una cabeza alargada con un cuerpo aplanado dorsoventralmente. Poseen un aparato bucal masticador y son depredadoras.
Oligochaeta (lombrices)	Son organismos que pueden habitar exclusivamente el suelo o salir a la superficie, ya sea sólo para alimentarse o también para vivir sobre el suelo. En estos anélidos la segmentación es evidente superficialmente, se diferencian de otros por tener una estructura en forma de anillo llamada clitelo.
Opilionidae (viejitos, papaítos piernas largas)	Se asemejan a las arañas. A pesar de tener el cuerpo dividido en 2 partes, pareciera que sólo tuvieran uno. Tiene ojos tuberculados y algunos poseen patas muy largas. La mayoría de sus especies son depredadoras y otras se alimentan de animales muertos.
Orthoptera (grillos y saltamontes)	Son insectos con el cuerpo alargado y con cercos bien desarrollados. Tienen un aparato bucal masticador, cuando poseen alas el primer par son tegminas, tienen antenas largas y el fémur de las patas traseras está bien desarrollado. A diferencia los que

	escavan en el suelo, tienen antenas cortas y el primer par de patas ancho en forma de espátula. La mayoría se alimenta de plantas, sólo algunos son depredadores, carroñeros u omnívoros.
Pseudoscorpionidae (falso escorpión)	Son pequeños arácnidos que a diferencia del resto de grupos, no tienen una patela entre los segmentos de la pata. Se encuentran debajo de piedras o de la corteza de los árboles, en musgo y hojarasca. Se parecen a los escorpiones porque tienen pedipalpos con quelas, pero no poseen una cola ni un aguijón, y su opistosoma es largo y oval. Se alimentan de insectos muy pequeños.
Schizomidae	Son arácnidos muy pequeños, delgados y poco comunes. El primer par de patas son delgadas y no las utilizan para caminar, el cuarto par lo tienen modificado para saltar, no tienen glándulas de veneno ni ojos.
Symphyla (sínfilos)	Estos miriápodos están en el humus, debajo de rocas y en troncos caídos. Son organismos muy pequeños, de color blanco y con una cabeza bien desarrollada. Se alimentan de plantas.
Thelastomatidae	Son un tipo de nematodos, que se tomaron en cuenta para esta clasificación, debido a que son evidentes y abundantes en el suelo. Tienen una forma homogénea y parecen hilos blancos que pueden llegar a medir varios centímetros.
Thysanura (pescaditos de plata)	Son un pequeño grupo de insectos apterigotos. Tienen el cuerpo alargado y un poco aplanado, al final del abdomen poseen 3 apéndices largos. Su aparato bucal es masticador.
Indeterminados	Fueron todos aquellos organismos, tanto larvas como adultos, que no fue posible identificar porque estaban en mal estado.

3.2. Física del Suelo

Las propiedades físicas del suelo van a determinar los usos para los cuales éstos son adecuados. Son las características responsables del crecimiento de las raíces, la aireación y el drenaje del agua (Amoros, 1960; Foth, 1987).

3.2.2. Porosidad

La porosidad es el sistema de espacios vacíos en el suelo que no está ocupado por sólidos (Forsythe, 1980). Se expresa como el porcentaje del volumen del suelo ocupado por poros y se puede clasificar como se indica en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Tipo de suelo según su porosidad.

Tipo de suelo según su porosidad	Porcentaje
Ligeros	30 – 45
Medios	45 – 55
Pesados	50 – 65
Turbosos	75 – 90

La fórmula utilizada para obtener la porosidad fue la siguiente (Amoros, 1960):

$$P = \frac{1 - \rho}{2,65} * 100$$

En donde:

P = porosidad.

ρ = densidad aparente (su cálculo se explica más adelante).

2,65 = densidad real de las partículas. En los suelos con cantidades normales de minerales pesados está alrededor de 2,65 que es un valor estándar, propuesto por Leenheer y Boodt (Forsythe, 1980).

La porosidad depende de la textura y la estructura (arreglo de las partículas) del suelo. Se espera que el porcentaje de porosidad sea mayor, cuando las partículas de textura son más finas, es decir, los suelos arcillosos son más porosos que los arenosos. Además la aireación y drenaje del agua también dependen de su porosidad (Amoros, 1960).

3.2.3. Densidad aparente

La densidad aparente es el peso por unidad de volumen de suelo seco, expresado en gramos por centímetros cúbicos (Amoros, 1960; Foth, 1987).

Para obtener los datos de la densidad aparente se utilizó la siguiente fórmula (Foth, 1987):

$$\rho = \frac{m_s}{V}$$

En donde:

ρ = densidad aparente.

m_s = peso seco en gr (peso de los sólidos de la muestra).

V = volumen de los sólidos de la muestra en cm^3 (para obtener el volumen se utilizó un cilindro de metal de 10 x 5,4 cm).

Si un suelo es muy compacto tiene mayor densidad y retiene menor cantidad de agua. Por lo general, el primer horizonte del suelo es menos denso que los más profundos (Amoros, 1960).

3.2.4. Humedad del suelo

Se refiere al contenido de agua en una cantidad determinada de suelo. El tipo de humedad que se midió fue la higroscópica, que es la que aún conserva el suelo luego de haber sido secado al aire y la que pierde al someterlo a temperaturas de 105°C. Se considera que la humedad higroscópica está presente en el suelo, como una delgada película de espesor aproximadamente molecular, ésta varía dependiendo de la atmósfera con respecto al vapor del agua (Forsythe, 1980).

La humedad del suelo puede ser expresada gravimétricamente, con base en la masa o volumétricamente, con base en el volumen.

La humedad gravimétrica se representa como un porcentaje en peso, se refiere a la masa de agua contenida por unidad de masa de sólidos del suelo. La fórmula utilizada para obtener la humedad gravimétrica fue (Forsythe, 1980):

$$H_g = \frac{m_h - m_s}{m_h} * 100$$

En donde:

H_g = humedad gravimétrica.

m_h = peso del suelo húmedo.

m_s = peso del suelo seco.

El peso seco (m_s) se refiere a la masa del suelo secada al horno hasta que pierde toda el agua. Esto se logra a 100-110°C por 48 hrs (Deheuvels *et al.*, 2009). La masa seca se utiliza para calcular el contenido de humedad, debido a que naturalmente es más constante y es reproducible en diferentes condiciones ambientales (Amoros, 1960).

La humedad volumétrica se expresa como un porcentaje en volumen, se podría interpretar como la lámina de agua contenida en una cantidad determinada de profundidad de suelo (Amoros, 1960). La fórmula utilizada para obtener la humedad volumétrica es (Forsythe, 1980):

$$H_v = \frac{m_h - m_s}{V} * 100$$

En donde

H_v = Humedad volumétrica.

m_h = peso del suelo húmedo.

m_s = peso del suelo seco.

V = volumen del cilindro utilizado para extraer la muestra (10 x 5,4cm).

3.2.5. Porcentaje de saturación

El porcentaje de saturación se refiere a la cantidad máxima de agua que un suelo tiene. Este porcentaje se relaciona con el contenido y tipo de arcillas, ya que los suelos arcillosos retienen mayor cantidad de agua que los arenosos. También se relaciona con el contenido de materia orgánica, a mayor contenido de materia orgánica y menor tamaño de partículas en el suelo (textura fina), el porcentaje de saturación aumenta (Forsythe, 1980).

La medición de esta variable se hizo de la siguiente forma (Foth, 1987):

$$\% S = \frac{\% H_v}{P} * 100$$

En donde:

% S = porcentaje de saturación.

% H_v = porcentaje de humedad volumétrica = % agua/volumen.

P = porosidad.

3.3. Química del suelo

En el suelo se pone a disposición la mayoría de elementos necesarios para el crecimiento de las plantas. Otros componentes como el carbono (C), hidrógeno (H) y oxígeno (O) son combinados en la fotosíntesis y se obtienen del aire o del agua.

En particular para el cultivo de cacao es importante que la capa superficial sea rica en materia orgánica y que el pH sea neutro (Barros, 1982).

3.3.1. pH

El pH es la medición de la acidez o alcalinidad, es decir las concentraciones de H⁺ y OH⁻. Puesto que los resultados son valores muy pequeños, se representan como el logaritmo negativo de la concentración del ion hidrógeno, en mol/L (Chang, 1991):

$$\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$$

Para las muestras de suelo, el pH se puede determinar en el campo, con condiciones naturales de humedad o bien en el laboratorio, a partir de muestras que fueron secadas al aire. Esta última es la técnica que más comúnmente se usa y fue la aplicada en este estudio.

Respecto a las plantas de cacao, se conoce que pueden desarrollarse en condiciones de pH ácidas y básicas, pero un pH alrededor de 6,5 es lo ideal (Barros, 1982).

3.3.2. Nitrógeno (N)

Es un elemento importante en la composición de las proteínas y clorofila de las plantas (Foth, 1987). Las formas minerales del N (amonio (NH_4) y nitratos), provienen principalmente de la descomposición de la materia orgánica, por los micro y macroorganismos del suelo (Chang, 1991).

El clima es el factor más influyente en el porcentaje de N en el suelo, parece incrementarse al bajar la temperatura y aumentar la precipitación, dentro de ciertos límites (Fassbender, 1975). El contenido de N tiende a disminuir con la profundidad del suelo y su concentración es variable en el humus (Foth, 1987).

3.3.3. Carbono (C)

El carbono es un elemento no metal, que conforma la mayor proporción de un ser viviente. A diferencia del N, el contenido de C es menos variable en el humus. Al conocer su porcentaje, puede estimarse el contenido de materia orgánica (Foth, 1987).

3.3.4. Relación C:N

La relación C:N varía según la naturaleza del humus, el estado de descomposición y la profundidad del suelo. Esta es una forma útil de expresar el contenido de N, si la proporción es pequeña hay una alta disponibilidad y viceversa. Cuando la razón C:N es <15 , significa que la mineralización excede la inmovilización y >30 la inmovilización excede a la mineralización (Foth, 1987).

3.3.5. Relación N:P

La relación N:P es una forma de expresar la disponibilidad de fósforo en un ambiente. Cuando hay más nitrógeno, este ayuda a una mejor absorción del fósforo (que se disuelve poco en agua) (Forth, 1987). Estos nutrientes van a variar dependiendo de la edad de la plantación, diferencias de manejo y condiciones ambientales (Hartemink, 2005).

La mayoría de estudios donde se ha utilizado la relación N:P es en los sistemas acuáticos (Sterner y Elser, 2002). Para los ecosistemas terrestres cuando se hacen correlaciones de las concentraciones de nitrógeno y fósforo en las plantas (ej. Garten, 1976), se asume que esta razón refleja la disponibilidad relativa de estos elementos en los suelos (Garrish *et al.*, 2010).

Como sugiere Güsewell (2004) la aplicación más importante de esta razón es para estudios ecológicos donde se desea investigar los cambios en el funcionamiento de los ecosistemas, causados por cambios antropogénicos. La variación de la razón N:P puede relacionarse con la fertilidad de los suelos o proporcionar información de los nutrientes limitantes, que podrían estar asociados como factores determinantes de la composición de las especies vegetales (Koerselman y Meuleman, 1996; Güsewell, 2004).

3.3.6. Macro y microelementos

Estos elementos son esenciales para el desarrollo de las plantas, ya que participan de diferentes formas en su ciclo de vida y nutrición. Los macroelementos se necesitan en grandes cantidades y los microelementos en menores cantidades. En el Cuadro 4 se resume la importancia de cada uno.

Cuadro 4. Macro y micronutrientes, su importancia y formas iónicas comúnmente absorbidas por las plantas. Tomado de Foth (1987).

Elemento	Símbolo químico	Formas iónicas	Importancia
Macronutrientes			
Nitrógeno	N	NO_3^- , NH_4^+	Constituyente de proteínas, clorofila, enzimas y ácidos nucleicos.
Fósforo	P	H_2PO_4^- , HPO_4^{2-}	Transmisión de energía; constituye proteínas, coenzimas, ácidos nucleicos y sustratos metabólicos.

Potasio	K	K^+	Mecanismos de regulación como en la fotosíntesis y síntesis de proteínas.
Calcio	Ca	Ca_2^+	Componente de la pared celular, estructura y permeabilidad de membranas.
Magnesio	Mg	Mg_2^+	Activador de enzimas y forma parte de la clorofila.
Micronutrientes			
Cobre	Cu		Catalizador para la respiración, forma parte de enzimas.
Manganeso	Mn	Mn_2^+	Controlador de sistemas redox, formación de oxígeno en la fotosíntesis.
Hierro	Fe	Fe_2^+	Síntesis de clorofila y en la transferencia de electrones.
Zinc	Zn	Zn_2^+	Constituyente de enzimas que regulan la actividad metabólica.

3.3.7. Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)

La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) se refiere a la cantidad de cationes intercambiables que puede absorber un suelo a un determinado pH. En otras palabras es una medida de las cargas negativas presentes en los suelos, sobre todo en los coloides de arcillas y materia orgánica.

Los factores que determinan el CIC de un suelo son: a) el tamaño de las partículas, entre más pequeñas mayor es el CIC; b) el tipo de cationes cambiables (ej. Tamaño pequeño o grande, monovalentes o divalentes, etc.); y c) pH, el CIC generalmente aumenta a un pH más alto (Amoros, 1960).

Una forma de obtener esta medición es utilizando la siguiente fórmula:

$$CIC = \text{Acidez} + K + Ca + Mg$$

Estos datos son importantes conocerlos ya que indican el potencial de acidez del suelo (Amoros, 1960).

3.4. Investigación e iniciativas recientes para el cultivo de *Theobroma cacao* L. en Guatemala

En Guatemala el sector cacaotero es apoyado por las instituciones: Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (MAGA) a través de la Agrocadena del Cacao; Programa de Desarrollo Rural de las Verapaces (PRODEVER) y Programa Nacional de Competitividad (PRONACOM). De las instituciones educativas, interesadas en el desarrollo del cacao están la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos (FAUSAC), con su estación experimental Centro de Agricultura Tropical Bulbuxyá; y el Instituto Agroecológico Bilingüe Fray Domingo de Vico. En la región cacaotera del Sur Occidente, las principales organizaciones de productores de cacao son la Asociación de Productores de Cacao del Sur Occidente (APROCA) y la Asociación de Sembradores de Cacao de la Cuenca del Nahualate; en la región norte existen varias organizaciones, entre ellas la Fundación Laguna Lachuá y la Asociación de Cacao de Alta Verapaz (APROCAV).

A finales de los años ochentas e inicios de los noventas, se promovió el cultivo de cacao en la región centroamericana a través de los Grupos de Asesores Nacionales (GAN), donde no se incluyó a los productores, sino que fue una iniciativa de instituciones estatales. Durante un trabajo apoyado por Panamericana para el Desarrollo, que tuvo el fin de detectar problemas en los cultivos y el tipo de organización de los productores en Retalhuleu y Suchitepéquez, surge la idea de retomar las actividades de la Asociación Nacional de Productores de Cacao (ANAPROCA), pero no tuvo éxito. Luego durante 2003 se llevó a cabo un diagnóstico del cultivo de cacao en el país, donde surge de nuevo la idea de retomar actividades por parte de ANAPROCA, pero lo hacen bajo el nombre de APROCA, quien inicia actividades en 2004.

A partir del año 2000, el cacao se ha vuelto importante a nivel internacional. La Asociación Nacional del Kakaw (ANAKAKAW), nace con la finalidad de promover el desarrollo del cacao a nivel nacional, pero con el propósito de entrar al mercado internacional. Esta asociación ha recibido apoyo de FONAGRO, del MAGA y del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza –CATIE a través del programa Salvemos al Cacao (2004). Durante 2005, se comienza a crear la Cadena Productiva del Cacao (Godínez, 2007; Mollinedo, 2007).

Después en el 2008, el Proyecto Cacao Centroamérica trabaja con al menos 6000 mil familias cacaoteras y sus organizaciones para fortalecer sus capacidades relacionadas a la competitividad y ambiente a nivel centroamericano. Como parte del componente de Producción y Ambiente se

desarrollaron varios temas de investigación, con el objetivo de conocer los factores relacionados a productividad y biodiversidad de flora y fauna (Deheuvels *et al.*, 2009), en las regiones del Sur Occidente (Retalhuleu y Suchitepéquez) y la Zona Norte (Cahabón, Alta Verapaz).

Además para la zona norte, está la propuesta de utilizar al cacao, en la restauración de otros tipos de hábitat (Barrios, 2007). En la región del Sur Occidente la mayoría de investigaciones se han realizado en el Centro de Agricultura Tropical Bulbuxyá (San Miguel Panán, Suchitepéquez), con temas enfocados al estudio de especies forestales, plagas, enfermedades, efecto de herbicidas, híbridos de cacao, etc. La única caracterización de insectos que se ha realizado es el trabajo de Guevara (2008), donde identifica la entomofauna asociada al cacao y sus cultivos aledaños.

4. JUSTIFICACIÓN

Por lo general, se considera que los sistemas agroforestales con cacao tienen un efecto positivo en la conservación de la biodiversidad y la calidad del suelo, porque mantienen estructuras similares a los bosques. De allí la importancia de enfocar investigaciones, en estudiar los potenciales de este sistema en el Sur Occidente, porque es un área que mantiene fuertes presiones ambientales debido a la alta explotación agropecuaria de la zona. En el territorio se evidencia la existencia de grandes extensiones de monocultivos, que han contribuido a que los bosques vayan desapareciendo.

Estudiar las propiedades físicas y químicas del suelo representa conocer los nutrientes disponibles para el crecimiento de las plantas y el potencial de los suelos para el desarrollo del cacao en esta región. El estrato del suelo y la hojarasca es una zona estrecha de alta biodiversidad, donde ocurren interacciones bióticas intensas y donde se llevan a cabo los procesos claves del ecosistema (descomposición de la materia orgánica, movilización de nutrientes, actividad microbiana, etc.). Esta investigación contribuye a un análisis de los suelos y la diversidad de macrofauna en 39 fincas del Sur Occidente, que en conjunto con otras investigaciones, ayudarán a determinar los servicios ambientales proporcionados por este sistema agroforestal y su relación con la producción. Para encontrar equilibrios entre producción y ambiente, con la finalidad de beneficiar a los agricultores de la zona.

Cuando se desea monitorear un área o hacer comparaciones entre diferentes prácticas de manejo, cada investigación parte de tipologías de referencia, donde se conocen claramente los factores dominantes en un área, sistema o hábitat. Para el caso de las plantaciones de cacao del Sur Occidente, dicha caracterización no existe. Por lo tanto, este estudio determinó una tipología de referencia para establecer categorías de diferente calidad de suelo.

Entre otras cosas, se promovió el trabajo comunitario porque se involucró y capacitó a personas de la región para la toma y procesamiento de muestras. También se trabajó con los propietarios de fincas, inscritos a las asociaciones presentes en el Sur Occidente, lo que apoya las iniciativas de dichas asociaciones. Además, se proporcionó a cada propietario de finca un análisis completo de sus suelos y se presentaron los resultados, tanto verbal como en un informe técnico, en vocabulario adecuado para hacer circular la información obtenida. Todo esto con el fin de fortalecer un camino, hacia una mejor relación entre ambiente y producción.

5. OBJETIVOS

5.1. General

Estudiar la relación existente entre la diversidad de la macrofauna y calidad físico-química de los suelos, en sistemas agroforestales de cacao (*Theobroma cacao* L.) y bosques secundarios en el Sur Occidente de Guatemala.

5.2. Específicos

- 5.2.1. Identificar grupos de cacaotales y bosques secundarios con suelos de diferente calidad a través de los atributos físicos y químicos del suelo.
- 5.2.2. Evaluar correlaciones entre la diversidad funcional de macrofauna y la calidad físico-química de los suelos en cacaotales y bosques secundarios.

6. HIPÓTESIS

- 6.1. Los grupos de macrofauna están correlacionados con algunas variables físico-químicas del suelo, las cuales son indicadoras de la calidad del mismo y permiten establecer una tipología de referencia.

7. MATERIALES Y MÉTODOS

7.1. Área de estudio

El Sur Occidente corresponde a la Región VI de Guatemala, que comprende los departamentos de Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, San Marcos, Suchitepéquez y Retalhuleu. Los últimos tres departamentos son productores de cacao, pero esta investigación se restringió a Suchitepéquez y Retalhuleu (Figura 2). En estos departamentos hay 1088 fincas de cacao (Mollinero, 2007) y dos asociaciones de productores, APROCA (Asociación de Productores de Cacao del Sur Occidente) y ASECAN (Asociación de Sembradores de Cacao de la Cuenca del Nahualate).

En Retalhuleu (área de 1856 km²) se trabajó en los municipios de San Sebastián y El Asintal; en Suchitepéquez (área de 2510 km²) en los municipios de Chicacao, San Miguel Panán y San Antonio Suchitepéquez. Estos departamentos están ubicados en la Planicie Costera del Pacífico (14°01'-14°42' oeste, 91°05'-92°10' norte) y colindan hacia el norte con la Cadena Volcánica (Figura 2). Se encuentran entre las zonas de vida de bosque muy húmedo subtropical (cálido) y bosque húmedo subtropical (cálido) (De la Cruz 1967). La temperatura promedio es de 27°C, con una precipitación pluvial de aproximadamente 3250 mm de mayo a octubre, y de noviembre a abril es época seca.

7.2. Universo

El universo son las fincas de cacao y bosques secundarios aledaños, en los departamentos de Suchitepéquez y Retalhuleu, e incluye sólo a propietarios que sean miembros de APROCA o ASECAN. La población comprende la macrofauna presente en las fincas de cacao y bosques secundarios bajo diferentes características respecto a las propiedades físicas y químicas de los suelos.

Se registraron los grupos de macrofauna y las propiedades físicas y químicas del suelo en un solo muestreo, en parcelas de 1000 m² (50 x 20 m). El número total de parcelas utilizadas fue de 39, de las cuales 36 son fincas de cacao y 3 son bosques secundarios (Figura 2) (Anexo 1). Las fincas fueron escogidas con anterioridad a este estudio, en base al criterio de obtener la mayor heterogeneidad del área. El muestreo se realizó del 15 de septiembre al 21 de octubre de 2009. El diseño presenta segregación espacial y temporal.

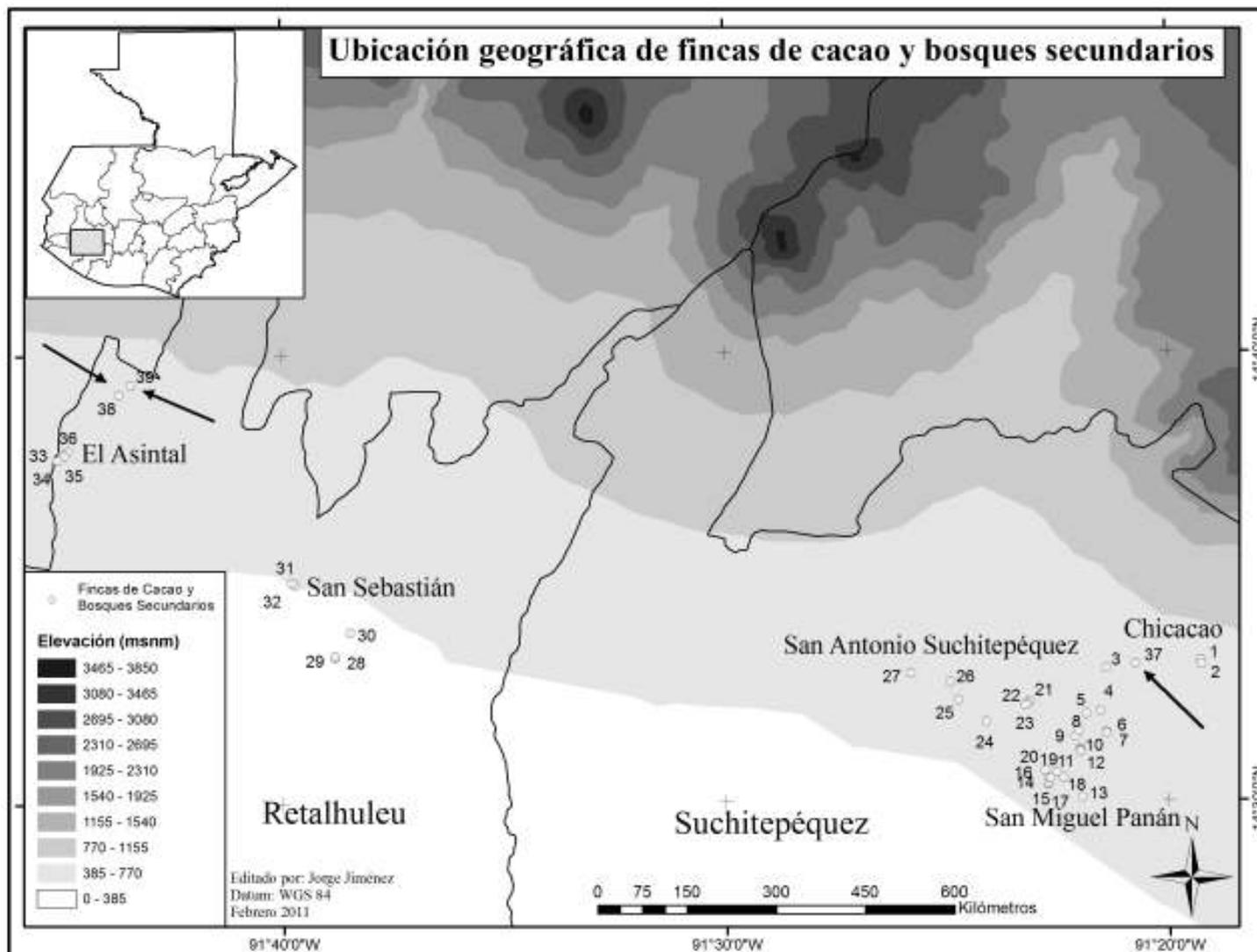


Figura 2. Mapa de la región del Sur Occidente, donde se indica la localización de cada una de las fincas de cacao y bosques secundarios (flechas) del Sur Occidente de Guatemala.

En cada parcela o unidad muestral se registraron las siguientes variables:

- Grupos de macrofauna presentes (Cuadro 1).
- Datos físicos del suelo: textura (arcilla, limo y arena), densidad aparente, porosidad, porcentaje de saturación, humedad del suelo (porcentaje en peso y en volumen).
- Datos químicos del suelo: acidez, pH, capacidad de intercambio de cationes (CIC), suma de bases (K+Ca+Mg), las relaciones N:P, C:N y Mg:K. Elementos mayores: carbono (C), nitrógeno (N), potasio (K), fósforo (P), calcio (Ca) y magnesio (Mg). Elementos menores: cobre (Cu), hierro (Fe), zinc (Zn) y manganeso (Mn).

7.3. Materiales

En el Cuadro 5 se listan los materiales y equipos necesarios tanto para el trabajo de laboratorio, como para la extracción de muestras de suelos y macrofauna en el campo. Se presentan en función de la actividad para la cual fueron utilizados.

Cuadro 5. Listado de materiales.

Descripción	Cantidad
Extracción macrofauna	
Cuadro de metal de 25 x 25 x 5 cm (muy resistente)	1
Mazo 1,5 kg	1
Costales	12
Bolsas de 40 x 60 cm de plástico grueso	40
Guantes tipo jardín	2
Bandejas plásticas color blanco	12
Pinzas para insectos	14
Colador pequeño (malla <0,5 mm)	2
Guantes de hule	2
Frascos 60 ml con tapadera hermética (10 por finca)	390
Formalina 37% en lt	1
Alcohol 95% en lt	30
Probeta 100 ml	1

Densidad aparente del suelo

Cilindro de metal Inox 10 x 5,4 cm	2
Mazo de hule	2
Madera dura (~20 x 6 x 3 cm)	2
Pala mediana	2
Cuchillo grande bien afilado	2
Bolsas de 20 x 35 cm de plástico grueso	400

Trabajo de de laboratorio

Estereoscopio con buena óptica 30x o más	1
Tamiz de 2 mm, Advantech de acero inoxidable	1
Termómetro	1
Horno con capacidad de calentar a 105°C	1
Bases de aluminio tipo cubilete	100
Desecadora	1
Silica gel en kg	1
Balanza semianalítica 0,01 g	1
Mortero	1
Cajas de petri	12

Otro material

Lona grande 4 x 7 m	1
Pita de nylon de 20 m	20
Marcador punta gruesa	4
Lápiz	4
Hules	50
Etiquetas	600
Cinta adhesiva transparente	1
Cinta adhesiva crepe	1
Linternas	3
Bolsas plásticas comunes	10
Computadora	1

7.4. Métodos

7.4.1. Diseño del muestreo

En cada una de las finca se buscó el centro y a partir de allí se señaló una parcela de 1000 m² (50 x 20 m), ubicada a favor de la pendiente y en dirección de la línea media (línea punteada en la Figura 3), orientada norte-sur. La parcela se dividió en 10 celdas de 10 x 10 m (Deheuvels *et al.*, 2009).

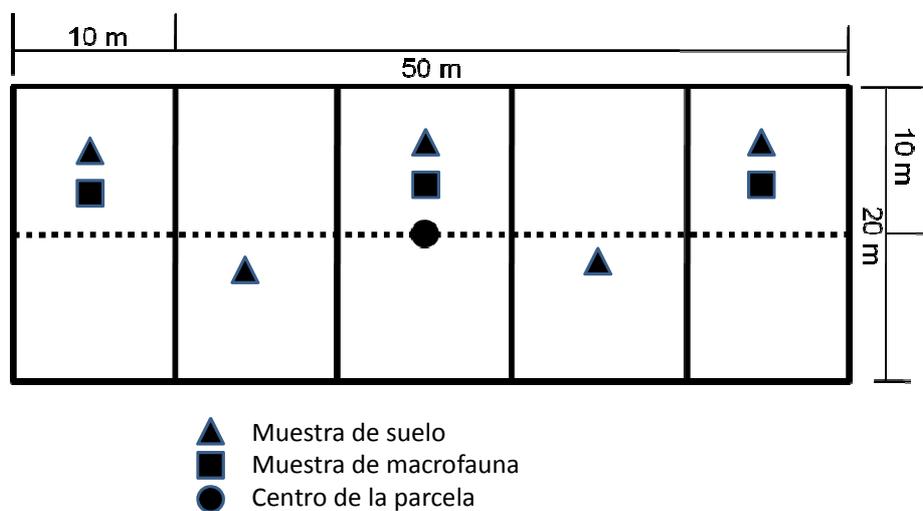


Figura 3. Diseño de parcela de 1000 m², para la toma de muestras de macrofauna y suelo.

La selección de fincas se realizó antes de este trabajo, bajo los siguientes 3 criterios (no fueron tomados como tratamientos): 1) dos rangos altitudinales, puesto que en esta zona no hay un rango contrastante, se clasificaron por encima de 350 m y por debajo de 330 m. 2) Dos condiciones de sombra, cerrado (60% ó más de sombra) y abierto (40% ó menos de sombra). 3) Tres condiciones ambientales a nivel del micro-paisaje, fragmentado (sistema de cultivo de cacao rodeado por 0 a 10% de cacao), poco fragmentado (11 a 89% de cacao alrededor) y no fragmentado (90 a 100% de cacao alrededor).

7.4.2. Extracción de macrofauna

La macrofauna se recolectó en 3 puntos de la parcela, siguiendo el método TSBF (“Tropical Soil Biology and Fertility”) (Anderson e Ingram, 1993) modificado. La muestra se limitó a la hojarasca y a los primeros 10 cm del suelo.

Los puntos para la toma de suelos se ubicaron cada 20 m, a un lado de la línea media de la parcela (Figura 3). En cada punto se excavó un monolito de 25 x 25 x 10 cm de suelo, colocando la hojarasca aparte. Las dos muestras (hojarasca y suelo) fueron colocadas en bolsas plásticas gruesas y revisadas en bandejas inmediatamente. Todos los animales visibles al ojo fueron colectados y preservados en alcohol al 70%, excepto las lombrices que en menos de 48 hrs se transfirieron a formol 4%, para sustituir el alcohol y preservarlas en mejores condiciones. En el laboratorio, las muestras con lombrices retornaron al alcohol antes de su conteo. Los grupos funcionales de macrofauna, fueron identificados hasta el nivel máximo del orden y sólo Formicidae a nivel de familia, de acuerdo con la clasificación de Lavelle *et al.* (2003) (Cuadro 1).

7.4.3. Muestras y análisis de suelo.

Las muestras de suelo se tomaron en 5 puntos de la parcela y en dos horizontes (0-10 y 10-20 cm), los puntos se ubicaron cada 10 m a un lado de la línea media (Figura 3). Para medir la densidad aparente, se insertó un cilindro de metal Inox de 5,4 x 10 cm (Arshad *et al.*, 1996), que fue retirado con mucha precaución para obtener el volumen exacto (Figura 3). El suelo fue recogido en bolsas plásticas gruesas y debidamente identificadas.

Para calcular la densidad aparente y la humedad, las muestras se pesaron en cuanto fueron tomadas en el campo, con una balanza de 0,1 gr de sensibilidad. Luego las bolsas se dejaron abiertas durante 15 días en un lugar seco, bien ventilado y sin recibir luz solar directa. En el laboratorio, las muestras secas al aire fueron pesadas y homogenizadas, con balanza de 0,01 gr de sensibilidad. Después se tomó una alícuota de 40 gr, para secarlos en un horno a 105°C por 48 hrs y así obtener el peso seco, a partir del cual se extrapolaron los datos a la muestra entera.

Al concluir las mediciones físicas, los suelos fueron tamizados con una rejilla de 2mm. Por cada finca se obtuvo una muestra compuesta, de la cual se enviaron 500 gr al Laboratorio de Suelos de CATIE en Costa Rica, donde se realizaron los análisis químicos que se detallan en el Anexo 2. La textura se determinó con el método del hidrómetro (Bouyoucos, 1951) (Anexo 2.1), el nitrógeno total por combustión en equipo autoanalizador Thermofinigan (Anexo 2.2) y el carbono orgánico por combustión previa digestión de carbonatos con HCl 1+1 (Anexo 2.2). Para determinar Cu, Zn, Mn, K y P se usó la extracción en Olsen modificado a pH 8,5 (Anexo 2.3); para obtener Ca, Mg y acidez intercambiable se hizo la extracción KCl 1N (Díaz y Hunter 1978) (Anexo 2.3) y el pH se midió en agua (Olsen y Sommers 1982).

7.4.4. Análisis estadísticos

Los análisis estadísticos se hicieron con el programa R 2.12.0 (2010). Los paquetes utilizados fueron ade4 en el Análisis de Componentes Principales (ACP), Cluster en el Análisis de Conglomerados y Vegan en el Análisis Canónico de Redundancia (ACR). Las gráficas de error estándar de la media se elaboraron en el programa SPSS 12.0 (2003).

Para seleccionar un grupo reducido de variables indicadoras, se llevó a cabo un ACP, con 25 atributos físico-químicos. Luego con el grupo reducido de variables, se hizo otro ACP, para analizar la información de los ejes y la distribución de las unidades muestrales. La matriz con todos los atributos físico-químicos y la del grupo reducido de variables, se analizó en un ACR, para saber el porcentaje de la varianza que explica el grupo reducido sobre el resto de variables (Legendre y Legendre, 1998).

Con los indicadores escogidos se establecieron grupos de diferente calidad de suelo, utilizando un análisis de conglomerados, basado en el método de Ward y distancia euclidiana (Legendre y Legendre, 1998). Este método presenta los resultados en un dendrograma, que tiene una escala para mostrar la distancia entre los grupos formados (Legendre y Legendre, 1998). Luego para determinar la inercia (porcentaje de varianza) y significancia de la clasificación, los grupos fueron evaluados con las pruebas entre clases (“between class”) y de permutación de Monte Carlo, con el paquete ade4. Finalmente para nombrar a cada categoría de calidad del suelo, se utilizó la gráfica y círculo de correlaciones obtenido en el análisis entre clases.

La matriz con los datos de los grupos de macrofauna y la del grupo de indicadores, también se analizó en un ACR, para determinar el porcentaje de la varianza que explican los grupos de macrofauna sobre el grupo reducido de variables. El porcentaje de inercia (varianza) y significancia de cada grupo funcional, también fue evaluado con las pruebas entre clases (“between class”) y de permutación de Monte Carlo.

Con los datos de macrofauna se calculó la riqueza específica (S = número total de grupos de macrofauna presentes), índice de diversidad de Shannon-Wiener ($H = -\sum p_i \log_2(p_i)$), en donde p_i es la proporción de cada grupo/número total de individuos) y equidad ($H' = H/\log_2 S$) (Legendre y Legendre, 1998). S , H y H' son variables que describen la riqueza y diversidad de los grupos de macrofauna y fueron estudiadas individualmente.

8. RESULTADOS

8.1. Atributos físico-químicos y tipología de referencia

Para la identificación de grupos de cacaotales y bosques secundarios en el Sur Occidente, se estudiaron 25 variables físico-químicas, seleccionadas a partir de estudios realizados en plantaciones de cacao (Cerdeira, 2008) y café (George, 2006; Porras, 2006) en Turrialba, Costa Rica. Con el Análisis de Componentes Principales (ACP), los 2 primeros ejes representan el 51% de la varianza de las 25 variables. El primer eje (valor propio = 31,5%) se relaciona con las concentraciones de bases, limo, carbono y nitrógeno opuestos al porcentaje de arena. El segundo eje (valor propio = 19,5%) se relaciona con un gradiente de humedad gravimétrica (H_2O_p) y porosidad (Porosidad), opuestos a uno de densidad aparente, hierro, acidez y arcilla (Figura 4b). En base a estos ejes las fincas se organizaron en 5 grupos (A, B, C, D y E). Las del grupo D están en el centro de la ordenación. Sobre el eje 1 el grupo A está correlacionado positivamente y el E negativamente. En el eje 2 el grupo B está correlacionado positivamente y el C negativamente (Figura 4a).

Para establecer la tipología de referencia se escogió un grupo de indicadores (DA, H_2O_p , KCaMg, Porosidad, C:N y N:P). Dentro de este grupo reducido de variables la densidad aparente, suma de bases y materia orgánica (relacionada con las razones C:N y N:P), son los indicadores más frecuentemente utilizados para medir la calidad del suelo (Rousseau *et al.*, en prep.). Además, las variables de porosidad y humedad en conjunto con suma de bases, densidad aparente y relación N:P presentaron las correlaciones más altas con los componentes de la ordenación (Figura 4b). Con los 6 indicadores escogidos, los primeros 2 ejes del ACP representan el 79% de la varianza. El primer eje (valor propio = 51,5%) se refiere a un gradiente de humedad y porosidad opuesto a uno de densidad aparente, el segundo (valor propio = 27,5%) a la concentración de bases y relaciones C:N y N:P (Figura 5b). Los grupos A, D y E se relacionan con la concentración de bases, el grupo C con la densidad aparente y el grupo B con un alto porcentaje de humedad, porosidad y relación N:P (Figura 5a).

Al contrastar la tabla de todos los atributos físico químicos (x = dependiente), con el grupo de indicadores (y = independiente), en un Análisis de Redundancias Canónicas (ARC), se encontró que los indicadores seleccionados explican en un 53% la varianza del resto de atributos.

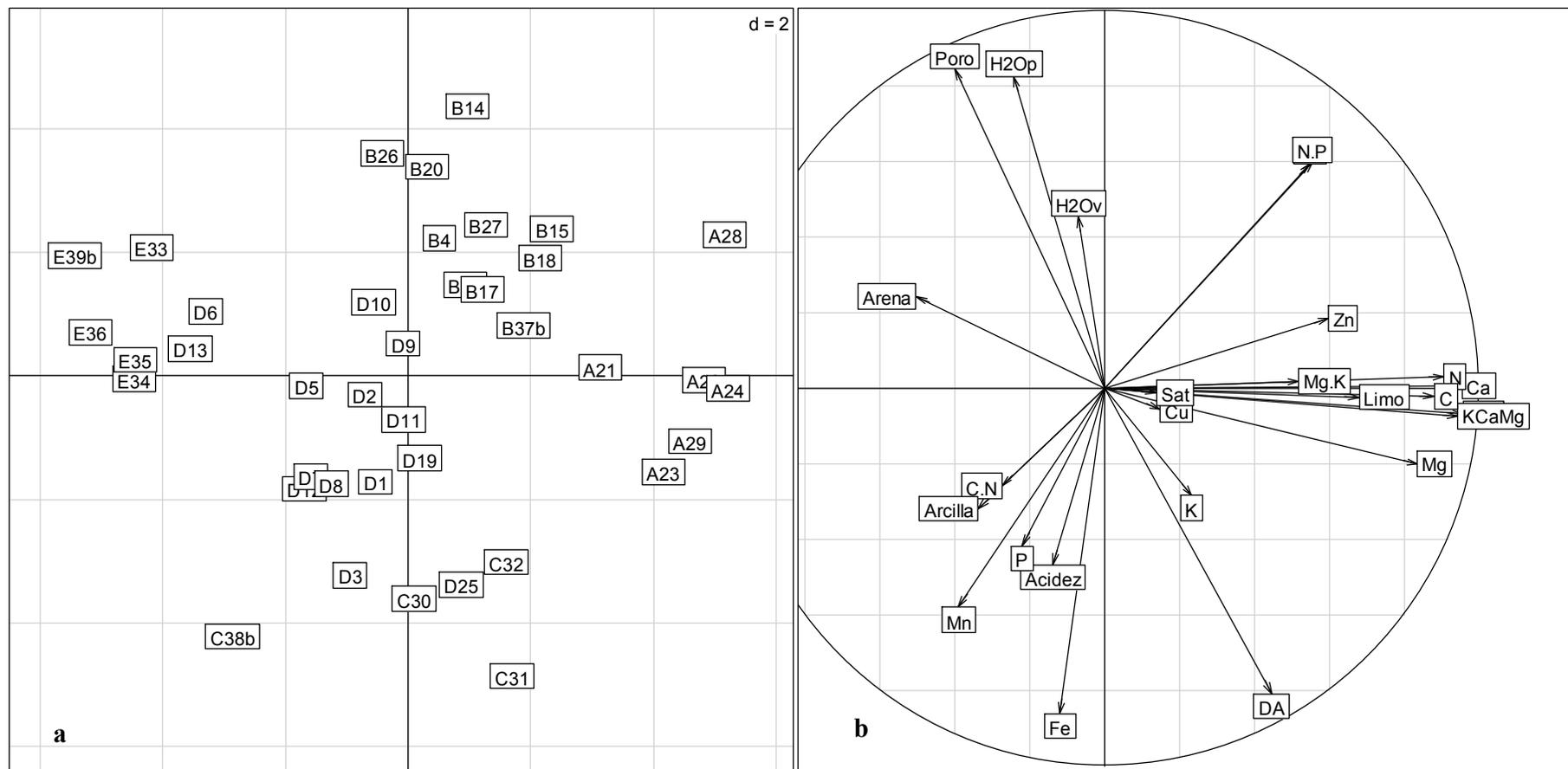


Figura 4. a) Gráfica de punteos de fincas del Sur Occidente, con el Análisis de Componentes Principales (ACP), donde se observa una división en 5 grupos (A, B, C, D y E). b) Círculo de correlaciones del ACP con 25 atributos físico-químicos del suelo. b = bosques.

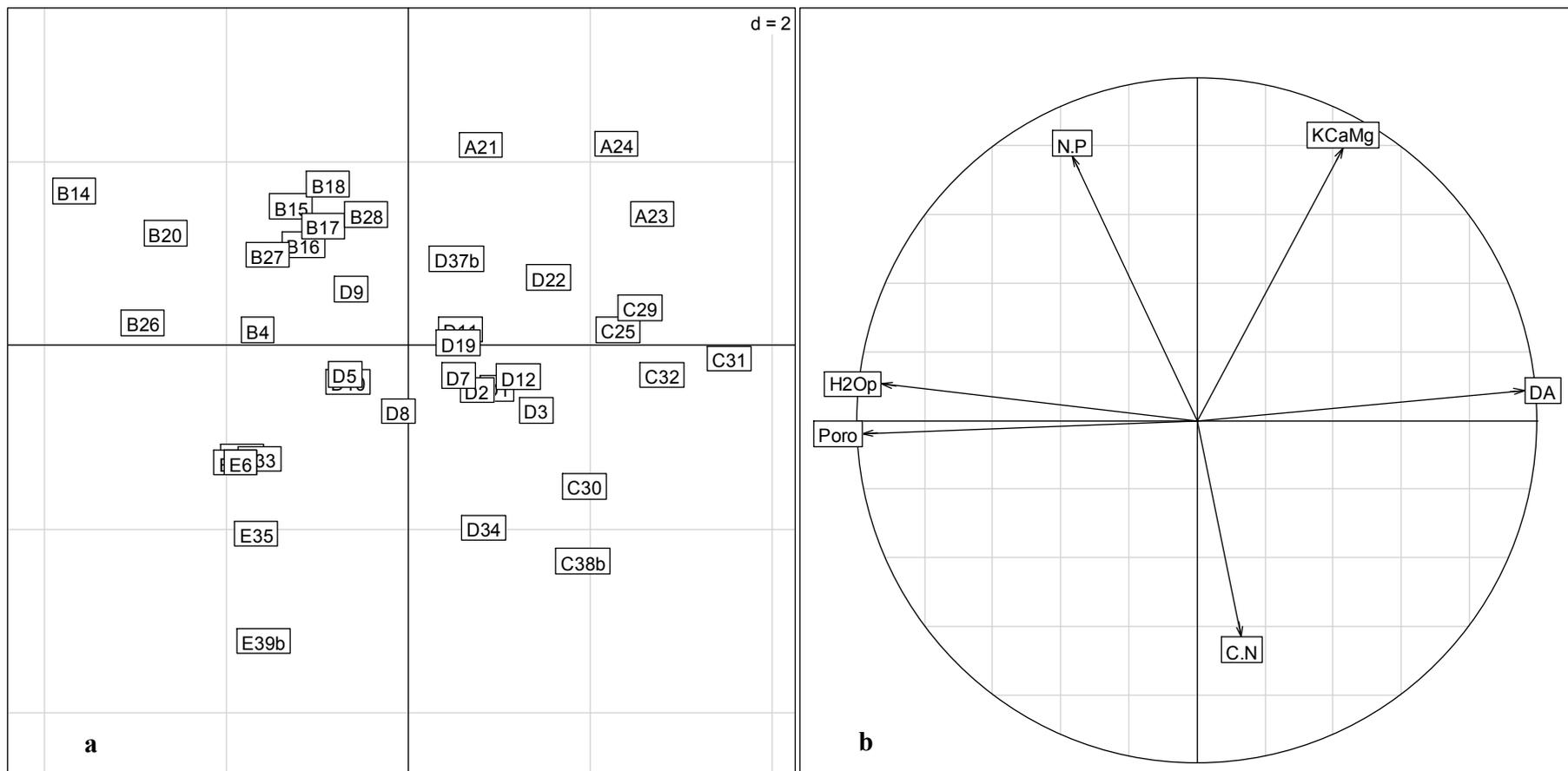


Figura 5. a) Gráfica de punteos de fincas del Sur Occidente, con el Análisis de Componentes Principales (ACP), donde se observa una división en 5 grupos (A = +Bases, B = Alta N:P, C = Alta DA, D = \pm Bases y E = -Bases). b) Círculo de correlaciones del ACP con 6 variables físico-químicas, elegidas como indicadores de calidad del suelo. b= bosques.

Con los indicadores escogidos (DA, H₂O_p, KCaMg, C:N y N:P) se hizo un Análisis de Conglomerados y se estableció la tipología de referencia (Figura 6). Se formaron 5 grupos, o categorías de calidad del suelo y cada uno se nombró según la variable con la que mejor se correlacionó. La concentración de bases fue la variable principal. Luego se nombraron de acuerdo al segundo indicador más determinante (DA y razón N:P): A. +Bases (fincas: 21, 23 y 24), B. Alta N:P (fincas: 4, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 26, 27 y 28), C. Alta DA (fincas: 25, 29, 30, 31, 32 y 38), D. ±Bases (fincas: 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 19, 22, 34 y 37) y E. –Bases (fincas: 6, 13, 33, 35, 36 y 39). Los bosques secundarios se distribuyeron en 3 categorías diferentes (±Bases, Alta DA y –Bases). De acuerdo al análisis entre grupos (Figura 7), la clasificación en 5 categorías tiene significancia con un $P < 0,0001$ y con un “ratio” de 67%, es decir los grupos formados tienen validez y explican el 67% de la varianza total de los datos.

En el Cuadro 6, se presentan los valores de cada atributo del suelo de acuerdo a la tipología de referencia. Las variables de porcentaje de arcilla, humedad volumétrica (H₂O% vol), porcentaje de saturación, acidez, fósforo (P) y zinc (Zn) tuvieron un $P > 0,05$, es decir que estas variables no responden a la forma en que se clasificaron las fincas de cacao y bosques secundarios de la región del Sur Occidente. El resto de variables si tienen diferencia significativa ($P < 0,05$) entre las cinco categorías de suelo definidas. (continua en pg. 35)

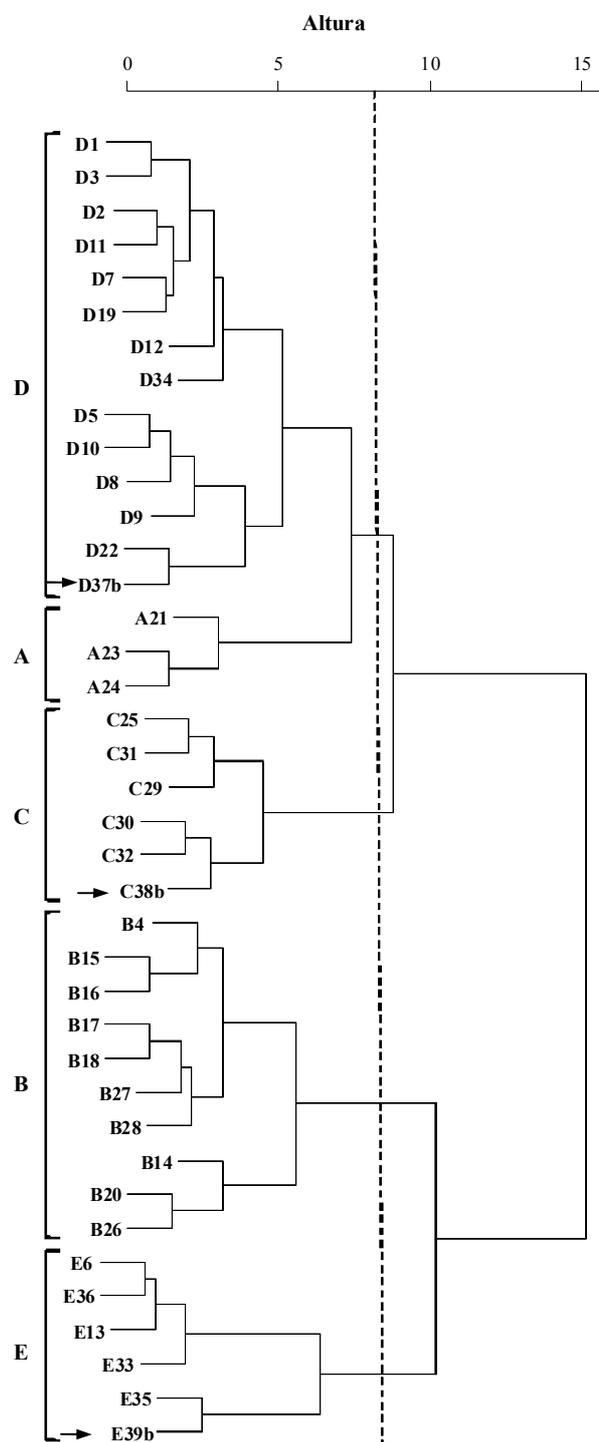


Figura 6. Dendrograma del Análisis de Conglomerados para las fincas de cacao y bosques secundarios (flechas) del Sur Occidente, basado en el método de Ward y distancia euclidiana. Con estos 5 grupos (A, B, C, D y E) se estableció la tipología de referencia. b= bosques.

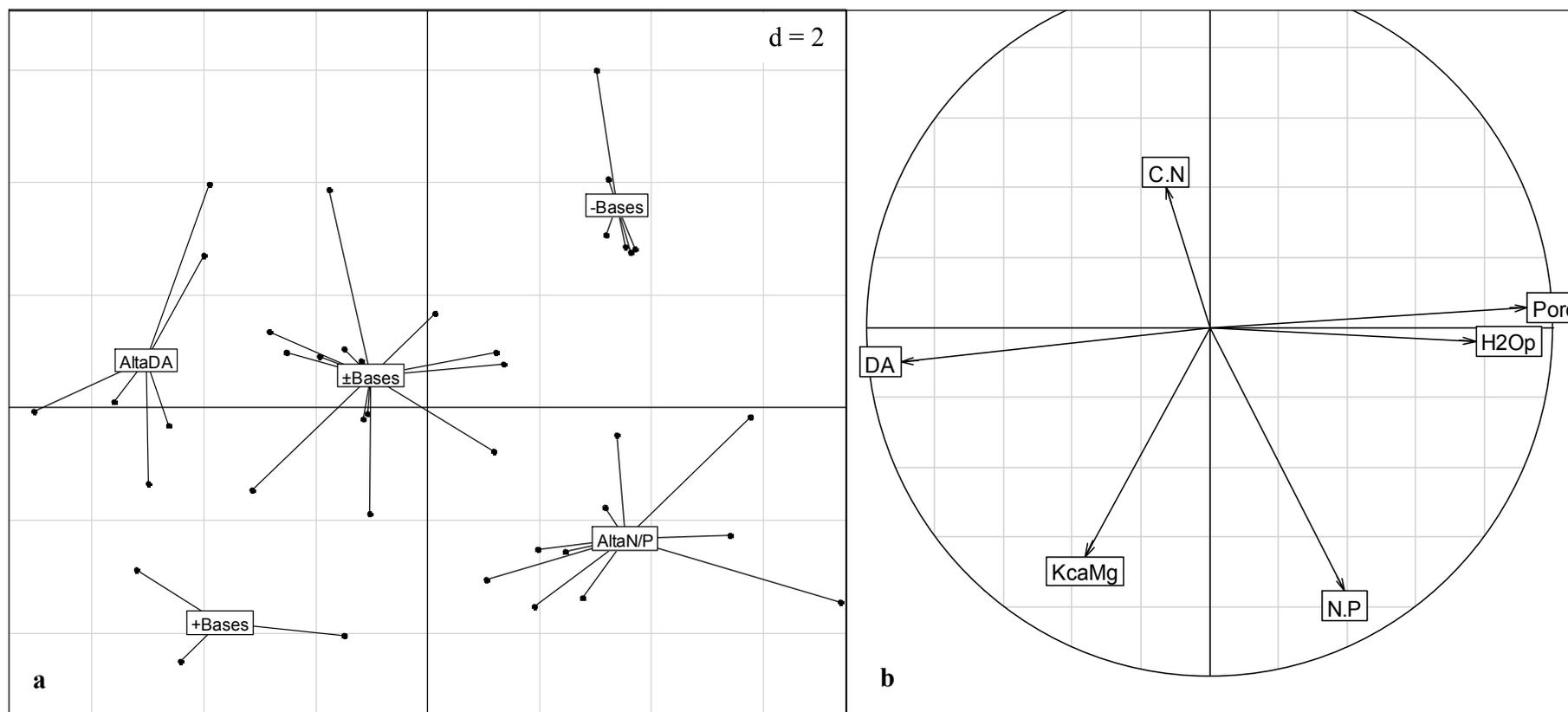


Figura 7. a) Análisis entre grupos para las 5 categorías (+Bases, Alta N:P, Alta DA, ±Bases y -Bases) de la tipología de referencia, determinada a partir de la selección de 6 atributos físico-químicos del suelo ($P < 0.0001$); b) Círculo de correlaciones del análisis entre grupos con el conjunto reducido de variables.

Cuadro 6. Atributos físico-químicos del suelo de muestras 0-20cm de profundidad, organizados en 5 grupos de acuerdo a la tipología de referencia para las fincas de cacao y bosques secundarios del Sur Occidente.

Atributos del suelo	Categorías de calidad de suelo					Significancia (P)	Datos óptimos
	+Bases	Alta N:P	AltaDA	±Bases	-Bases		
Grupo reducido							
KCaMg kg.ha ⁻¹	5252	3826,7	3815,7	3456,6	1762,3	0,0001	ND
C:N	9,7	10,4	11,3	10,4	10,8	0,002	10-12
N:P	2141	3093,1	999,6	942,7	617,5	0,0001	ND
DA g.cm ³	0,9	0,7	0,9	0,8	0,6	0,0001	ND
H ₂ O % peso	41,6	66,3	40,1	53	62,3	0,0001	ND
Porosidad	66,3	75,3	65,3	70,1	75,8	0,0001	ND
Otros atributos							
Arcilla %	10,9	11,3	15,2	13,1	15,1	0,1*	ND
Arena %	58	56,4	55,2	57,5	63,6	0,048	ND
Limo %	31	32,3	29,6	29,4	21,3	0,005	ND
H ₂ O % vol	36,5	41,5	36,5	41,2	39,9	0,07*	ND
Saturación %	54,9	55,1	55,9	58,7	52,7	0,2*	ND
pH	6,5	6,5	6,1	6,2	6,1	0,003	5,6-6,5
Acidez mol.ha ⁻¹	1009,7	1069,8	1792,2	1463,4	1092,5	0,1*	10 ⁴ -3.10 ⁴
Ca kg.ha ⁻¹	4009	2985,9	2892,6	2572,9	1256,4	0,0001	1600-8000
Mg kg.ha ⁻¹	503,1	386,1	469,5	302,4	179	0,0004	240-1200
K kg.ha ⁻¹	740	454,7	453,6	581,3	326,8	0,045	156-468
P kg.ha ⁻¹	4,6	2,5	8,6	7,7	7	0,07*	20-40
Cu kg.ha ⁻¹	30,4	10,7	14,3	12,9	16,2	0,036	4-40
Zn kg.ha ⁻¹	8,5	8,7	5,6	6,6	3,9	0,17*	4-20
Mn kg.ha ⁻¹	8,5	6,4	22,8	14,9	15,8	0,02	10-100
Fe kg.ha ⁻¹	110	88,5	198,3	165,6	113,8	0,0001	20-200
N kg.ha ⁻¹	9657,9	7387,5	7084,1	5536	3335,4	0,0001	ND
C mg.ha ⁻¹	94,1	77	79,7	57,7	35,8	0,0001	>40
CIC mmol.ha ⁻¹	262,4	194,2	197,2	170,2	87,2	0,0001	ND
Mg:K	0,7	1	1,1	0,6	0,6	0,02	ND

Ref. Los datos óptimos fueron tomados de Bertsch (1995) y para el C de Albrecht *et al.* (1992) y Thomasson (1978), todos calculados para densidad aparente = 1. CIC= Capacidad de Intercambio Catiónico, ND = no disponible, * = atributos sin diferencia significativa ($P > 0,05$)

8.2. Macrofauna y sus correlaciones con las variables físico-químicas del suelo

Se recolectó un total de 8098 individuos, que fueron clasificados en 26 grupos funcionales de macrofauna (Lavelle *et al.*, 2003). El grupo más abundante fue Formicidae (42%), seguido de Oligochaeta (9%), Isoptera (6%), Aranea (5%), Diplopoda (5%), larvas y adultos de Coleoptera (5%), Isopoda (4%), Chilopoda (4%), Gastropoda (4%) y Symphyla (4%). Éstos conforman el 92% del total, los otros 15 grupos equivalen al 8%.

De los 26 grupos de macrofauna, se escogieron los más abundantes y mejor corelacionados con los indicadores del suelo (17 grupos), el resto se unió en una categoría llamada “otros”, que representa los organismos menos frecuentes (>5 individuos). Al relacionar los 6 indicadores físico-químicos ($x =$ dependiente) y los 17 grupos de macrofauna ($y =$ independiente) en un Análisis de Redundancias Canónicas (ARC), se encontró que la macrofauna explica en un 48% a los indicadores físico-químicos. En la Figura 8, se puede observar la división de los grupos de macrofauna en dos comunidades, una relacionada con Alta DA (ARC1, valor propio = 30%) y la otra asociada a un gradiente en la concentración de bases y relación N:P (ACR2, valor propio = 10%), a esta última se relacionaron la mayoría de grupos de macrofauna.

En las Figuras 9, 10, 11, 12 y 13 están graficadas las abundancias promedio y desviaciones estándar de cada grupo de macrofauna, según las categorías de calidad de suelo: 1) En +Bases los organismos más numerosos fueron Formicidae, adultos de Coleoptera y Oligochaeta (Figura 9); 2) en Alta N:P son más abundantes los Formicidae, Isoptera y Gastropoda (Figura 10); 3) para Alta DA los grupos dominantes son Formicidae, Oligochaeta y larvas de Diptera (Figura 11), 4) en la categoría de \pm Bases los Formicidae, Oligochaeta e Isopoda son más abundantes (Figura 12) y 5) en -Bases fueron Formicidae, Isoptera y adultos de Coleoptera (Figura 13).

Los resultados obtenidos indican, que la diversidad de los grupos de macrofauna, no son afectados significativamente por las categorías de calidad del suelo ($P > 0,05$) (Cuadro 7). Sin embargo, la distribución de la fauna se correlaciona con las variables seleccionadas para establecer la tipología de referencia, en especial con la concentración de bases, densidad aparente, y relación N:P (Figura 8).

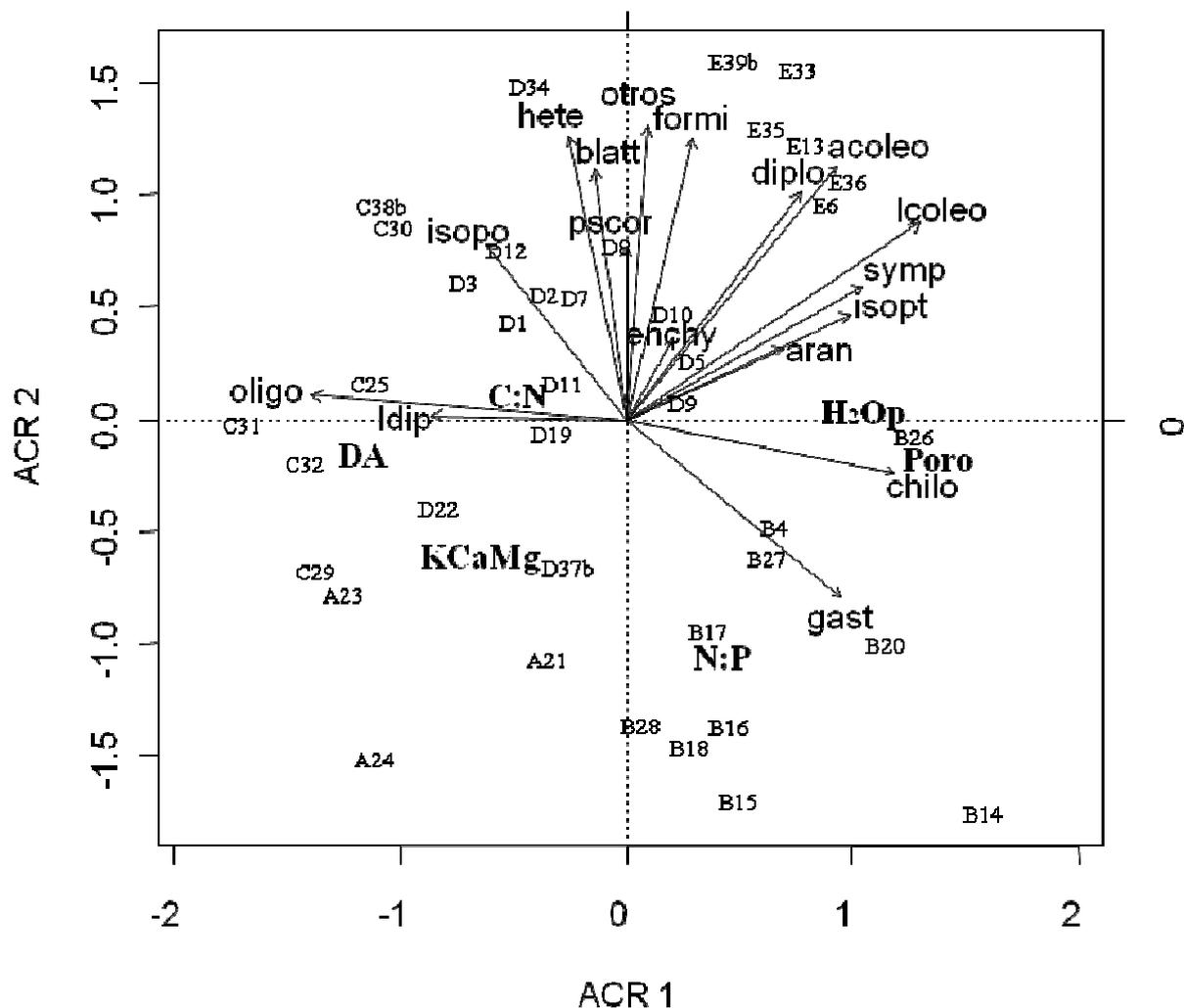


Figura 8. Gráfica de los grupos funcionales de macrofauna (y = variable independiente) relacionados con 6 indicadores físico-químicos de calidad del suelo (x = variable dependiente), en un Análisis de Redundancias Canónicas (varianza = 48%). C:N = razón C:N, DA = densidad aparente, KCaMg = suma de bases, N:P = razón N:P, H₂Op = humedad gravimétrica, Poro = porosidad, oligo = Oligochaeta, ldip = larva de Diptera, isopo = Isopoda, hete = Heteroptera, blatt = Blattaria, pscor = Pseudoscorpionidae, otros = grupos con menos de 5 individuos, formi = Formicidae, enchy = Enchytraeidae, acoleo = adultos de Coleoptera, diplo = Diplopoda, lcoleo = larvas de Coleoptera, symp = Symphyla, isopt = Isoptera, aran = Aranea, chilo = Chilopoda y gast = Gastropoda. A = +Bases, B = Alta N:P, C = Alta DA, D = ± Bases y E = +Bases.

En el Cuadro 7, se presenta la abundancia, desviación estándar e índices de diversidad para la macrofauna, clasificada de acuerdo a la tipología de referencia. En el grupo de \pm Bases se observó la mayor densidad de individuos y riqueza, seguido por el grupo $-$ Bases, Alta N:P, Alta DA y $+$ Bases. La riqueza e índices de diversidad (Shannon-Wiener, Equidad y Simpson) no muestran diferencia significativa ($P > 0,05$), según el análisis entre grupos.

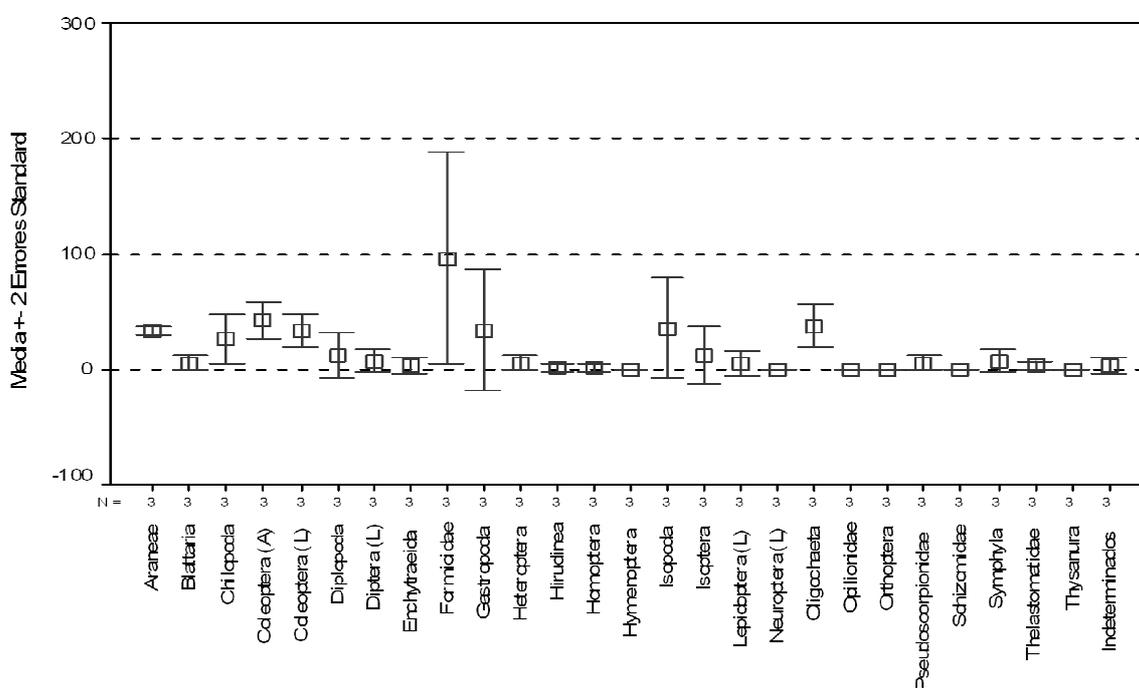


Figura 9. Promedio de los individuos por m^2 de cada grupo de macrofauna, en la categoría de calidad de suelos + Bases (Grupo A del dendograma de la Figura 6). N = número de parcelas.

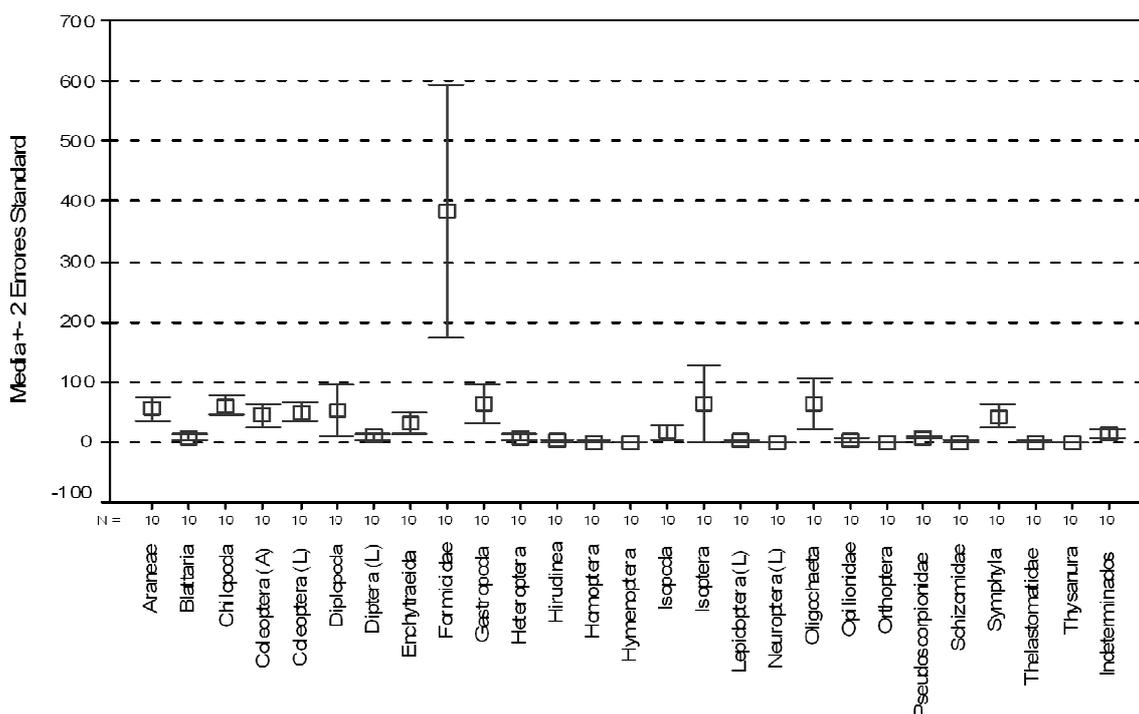


Figura 10. Promedio de los individuos por m² de cada grupo de macrofauna en la categoría de calidad de suelos Alta N:P (Grupo B del dendograma de la Figura 6). N = número de parcelas.

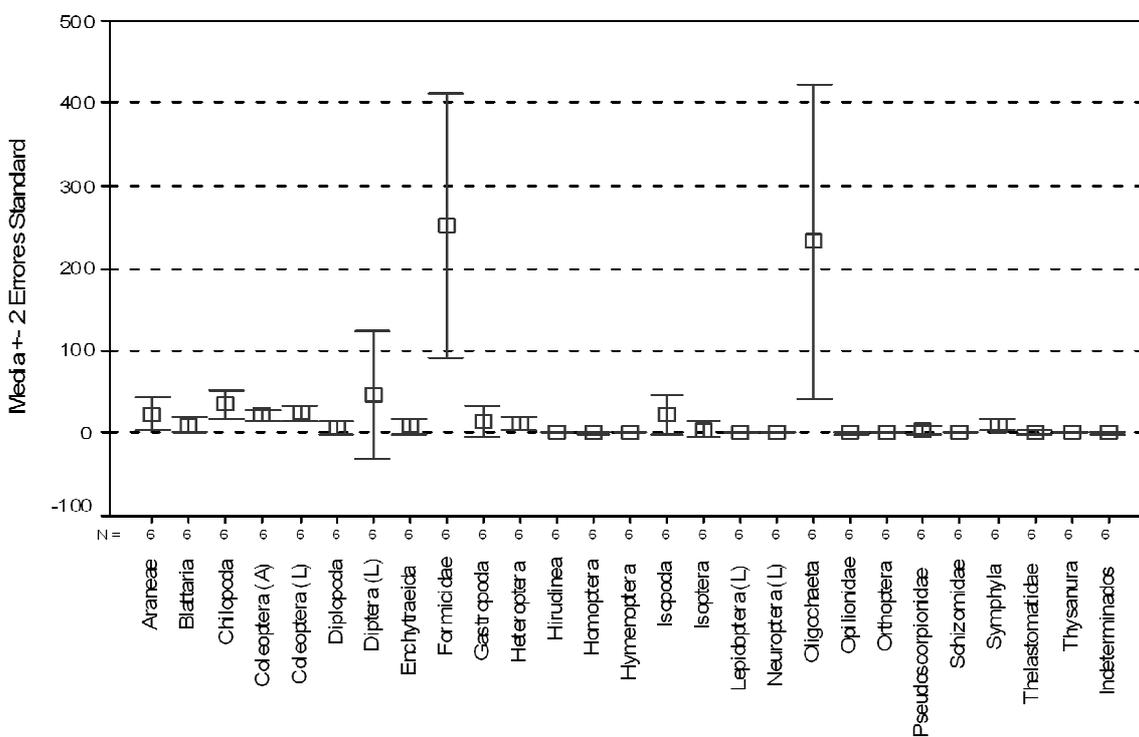


Figura 11. Promedio de los individuos por m² de cada grupo de macrofauna en la categoría de calidad de suelos Alta DA (Grupo C del dendograma de la Figura 6). N = número de parcelas.

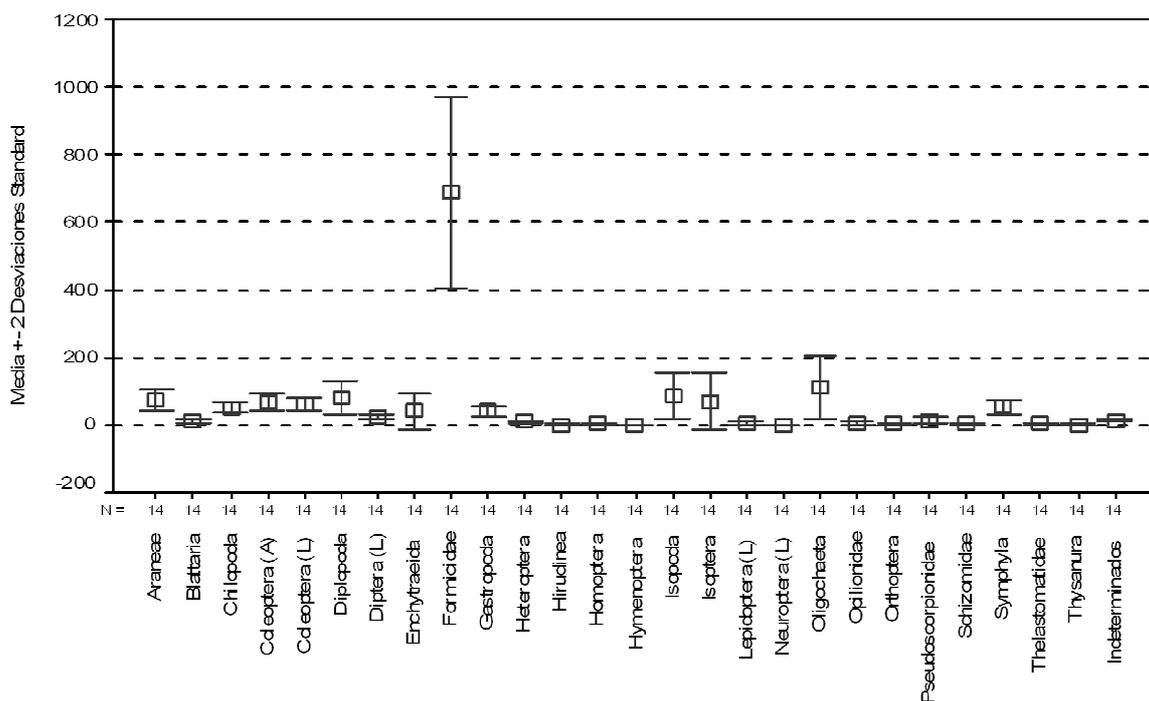


Figura 12. Promedio de los individuos por m^2 de cada grupo de macrofauna en la categoría de calidad de suelos \pm Bases (Grupo D del dendograma de la Figura 6). N = número de parcelas.

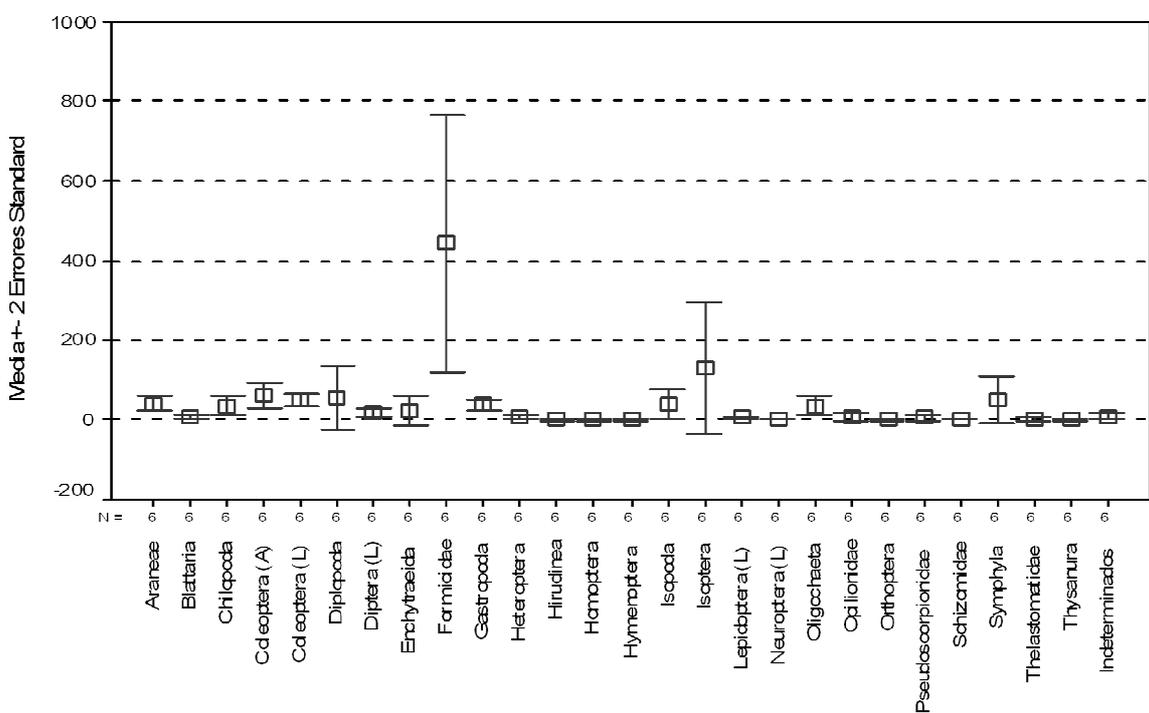


Figura 13. Promedio de los individuos por m^2 de cada grupo de macrofauna en la categoría de calidad de suelos -Bases (Grupo E del dendograma de la Figura 6). N = número de parcelas.

Cuadro 7. Grupos funcionales de macrofauna del suelo y hojarasca, organizados en 5 grupos de acuerdo a la tipología de referencia para las fincas de cacao y bosques secundarios del Sur Occidente. σ = desviación estándar, (P) = Significancia, A = adulto y L = Larva

Grupos funcionales	Categorías de calidad de suelos ind.m ⁻² (σ)					
	+Bases	AltaN:P	AltaDA	\pm Bases	-Bases	(P)
Araneae	33,8 (3,1)	55,5 (30,7)	23 (24,5)	73,5 (55,6)	41,8 (22)	0,09
Blattaria	5 (5)	8 (8)	9,8 (11,4)	12 (11)	8 (8,8)	0,74
Chilopoda	26,7 (18,5)	61 (46,8)	34,7 (32)	50 (50)	35,6 (30)	0,17
Coleoptera (A)	42,7 (14)	45 (30)	22 (8)	66 (46)	62 (39,6)	0,14
Coleoptera (L)	33,8 (12)	50 (25)	24 (10)	62,5 (35,5)	49,8 (17,4)	0,06
Diplopoda	12,4 (17)	54 (67)	6 (10,4)	77 (94)	55 (96,7)	0,35
Diptera (L)	7 (8)	8,5 (9)	46 (95)	22 (12,5)	18,7 (16)	0,37
Enchytraeidae	3,6 (6)	32,5 (28,5)	8 (12,5)	39,6 (100)	23 (46,5)	0,87
Formicidae	96 (79)	383,5 (341,8)	251,6 (199,8)	688,4 (605)	444,4 (399,4)	0,09
Gastropoda	33,8 (45,4)	64 (49)	15 (21,7)	40,8 (32,4)	37 (16,5)	0,13
Heteroptera	5 (5)	8 (9)	12,4 (9)	10 (7,5)	7 (8)	0,68
Hirudinea	1,8 (3)	1,6 (3,6)	0	2 (4,5)	1 (2)	0,89
Homoptera	1,8 (3)	0,5 (1,7)	1 (2)	3 (5,4)	1,8 (2,8)	0,53
Hymenoptera	0	0	0	1 (2)	1 (2)	0,36
Isopoda	35,6 (37,5)	16,5 (21)	23 (28,8)	85 (125,7)	40 (47)	0,27
Isoptera	12,4 (21,6)	64,5 (102)	4,4 (10,9)	69 (156)	130,7 (203)	0,55
Lepidoptera (L)	5 (9)	2 (3,7)	0	6 (8,8)	5 (4,8)	0,29
Neuroptera (L)	0	0	0	0,4 (1,4)	0	1
Oligochaeta	37 (16)	63 (66,7)	232 (235)	109 (177)	36,4 (29)	0,12
Opilionidae	0	3,7 (7)	1 (2)	5,7 (13,9)	6 (12,8)	0,87
Orthoptera	0	0	0	2,7 (4)	1 (2)	0,10
Pseudoscorpionidae	5 (5)	7,5 (3,7)	4,4 (7)	13 (15,5)	6 (8)	0,38
Schizomidae	0	0,5 (1,7)	0	3,4 (5,4)	0	0,10
Symphyla	7 (8)	43 (30)	9,8 (8,5)	53(41,7)	49,9 (70)	0,15
Thelastomatidae	3,6 (3)	1 (3,4)	1,8 (2,8)	3 (6,5)	2,7 (4,5)	0,89
Thysanura	0	0	0	0,8 (3)	1 (2)	0,87
Indeterminados	3,6 (6)	14 (13)	1 (2)	14,5 (10)	9 (8)	0,05

Diversidad						
Riqueza	21	23	20	27	25	1
Densidad	414	989	732	1515	1076	1
Shannon	2,5	2,3	1,9	2,2	2,2	1
Equidad	0,60	0,42	0,35	0,33	0,37	1
Simpson	0,89	0,82	0,77	0,77	0,80	1

9. DISCUSIÓN

9.1. Atributos físico-químicos y tipología de referencia

9.1.1. Indicadores de calidad de suelo

Cuando se habla de calidad del suelo su definición puede ser amplia y a veces resultar confusa, pero es clara en que no hace énfasis en maximizar la producción, sino optimizar el uso del suelo para mantener una productividad a largo plazo, es decir alcanzar una agricultura sostenible (Doran y Zeiss, 2000; Vezzani y Mielniczuk, 2009). Si bien es cierto que identificar indicadores de un hábitat en particular, no es el principal desafío para alcanzar una agricultura sostenible (Vezzani y Mielniczuk, 2009), es un primer acercamiento para poder hacer comparaciones entre diferentes prácticas de manejo (Letey *et al.*, 2003). Sobre todo en plantaciones de cacao del Sur Occidente, donde no existe investigación o es muy poca la información relacionada a las propiedades de los suelos y su fauna.

En este trabajo, la calidad del suelo fue evaluada a través del análisis de sus propiedades físicas y químicas (Arshad y Coen, 1992). Los indicadores escogidos y recomendados para establecer la tipología de referencia (densidad aparente (DA), porosidad (Poro), humedad gravimétrica (H₂O_p), suma de bases (KCaMg) y relaciones C:N y N:P), son considerados indicadores confiables porque presentan las correlaciones más fuertes entre los datos analizados. Además la densidad aparente, porosidad, materia orgánica (C total) y suma de bases están dentro de los indicadores más usados para evaluar la calidad del suelo (Rousseau *et al.*, en prep.). Por otro lado, son fáciles de medir para los productores (Doran y Zeiss, 2000).

En relación a los procesos del suelo, las características físicas de densidad aparente, porosidad y porcentaje de agua, se relacionan con la compactación, circulación de agua y aire en el suelo. La porosidad influye el desarrollo de las raíces, ya que el oxígeno disponible para éstas depende de los espacios vacíos en el suelo (van Noordwijk *et al.*, 1993). El contenido de agua influye en la tasa de movimiento y difusión de iones (Forth, 1987), también es importante para controlar la absorción y transmisión de calor hacia los horizontes más profundos, ya que en los suelos húmedos se distribuye más fácilmente el calor (Lavelle y Spain, 2001). Entre las características químicas, la suma de bases es considerada sinónimo de fertilidad, ya que proporciona una idea del porcentaje de cationes disponibles para las plantas. El contenido de materia orgánica y su dinámica, puede ser evaluado a

través de las mediciones de carbono (C) y nitrógeno (N) totales (Doran y Zeiss, 2000), en base a la relación C:N (Forth, 1987; Fassbender, 1992). La relación N:P ayuda a detectar deficiencias de fósforo (P), que a pesar de ser un macronutriente utilizado en la transmisión de energía y como constituyente de proteínas, coenzimas, ácidos nucleídos y sustratos metabólicos, es poco soluble en agua y resulta ser limitante en algunos ambientes (Foth, 1987).

9.1.2. Elementos y cacao

Los cacaotales del Sur Occidente se desarrollan en la Planicie Costera del Pacífico (Figura 2), entre una compleja matriz de diferentes usos del suelo, asociaciones de cultivos y con una alta variedad de tipos de árboles de sombra (encuesta PCC y obs. pers.). Debido a que sus suelos son de origen volcánico, obtienen un continuo enriquecimiento de nutrientes naturales, porque la ceniza y lava volcánica han contribuido a generar suelos fértiles y nutritivos (Fassbender, 1992; Coates, 2003). Los andisoles tienden a ser suelos con alta capacidad para retener agua, baja densidad aparente (Maeda *et al.*, 1977), son de color oscuro y con alto contenido de materia orgánica (Lavelle y Spain, 2001).

Los principales factores que determinan los porcentajes de carbono (C) y nitrógeno (N) en un sistema, son el clima y la vegetación (Lavelle y Spain, 2001). Puesto que las plantaciones de cacao crecen en zonas cálidas y sus plantas y árboles de sombra sueltan una gran cantidad de hojas, estos sistemas tienden a mantener un alto porcentaje de materia orgánica. La relación C:N para los suelos del Sur Occidente tiene rangos normales (10-20 suelos normales, 9-14 suelos agrícolas), con altos contenidos de N, que puede deberse a que estos suelos se derivan de cenizas volcánicas (Fassbender, 1992). En el Cuadro 6 se observa que las concentraciones de N disminuyen en relación a las categorías empleadas. Se conoce que al disminuir las concentraciones de bases, la acumulación de N también baja, ya que la descomposición de la materia orgánica es más lenta conforme los suelos ganan acidez (Fassbender, 1992). Las mismas observaciones aplican para el C, pero a diferencia del N es más estable. Las plantas de cacao de esta región tienen entre 5 a más de 50 años de edad (encuesta PCC), y al parecer todas han sido capaces de mantener niveles de materia orgánica adecuados.

El fósforo (P) es un elemento estable en el suelo, pero poco soluble en agua, lo que dificulta su transporte al interior de las plantas y resulta ser limitante (Fassbender, 1992). Con la razón N:P se pueden detectar deficiencias de P porque existe una relación directa entre ambos elementos (Garten,

1976). En todas las categorías de calidad de suelo el P está por debajo de su valor óptimo y las relaciones N:P son altas, sobre todo en el grupo Alta N:P (Cuadro 6). Hartemink (2005) indica que generalmente las plantaciones de cacao tienen bajas concentraciones de P en el suelo, ya que la mayoría se encuentra en la vegetación o en la hojarasca. Este podría ser el caso de las fincas de cacao del Sur Occidente. Otra explicación puede ser que los suelos de origen volcánico son ricos en hierro (Fe) y aluminio (Al), con quienes el P se fija fácilmente y deja de estar disponible para las plantas (Wada, 1985). Aunque esto suele suceder a pH ácidos y las plantaciones de la región están alrededor de un pH neutro; pero también si los suelos son muy húmedos se promueve dicha absorción (Lavelle y Spain, 2001).

La pérdida de fertilidad del suelo es consecuencia de una compleja combinación de factores. Una forma de estimar la fertilidad potencial es por medio de la suma de bases, ya que estos elementos son fisiológicamente importantes para las plantas (Fassbender, 1992; Lavelle y Spain, 2001) (Cuadro 4). Uno de los criterios de clasificación que se empleó para las categorías de calidad de suelo, fue que a mayor concentración de bases los suelos ofrecen más capacidad para el desarrollo de cultivos. En el Cuadro 6 se puede observar que las concentraciones de Ca, para todas las categorías excepto -Bases, está por encima de lo recomendado, al igual que K para el grupo +Bases; en esta región no se conoce si estos elementos presentan toxicidad. Entre las bases K, Ca y Mg, el K es requerido en mayores cantidades (Forth, 1987); la disponibilidad de este elemento aumenta cuando en la cosecha sólo se remueven las semillas del fruto y se dejan las cáscaras en la plantación (Fassbender, 1992; Hartemink, 2005).

El pH es una variable muy importante para los cultivos porque al disminuir puede provocar toxicidad, menor disponibilidad de nutrientes y baja actividad microbiana (Fassbender, 1992; Lavelle y Spain, 2001). A pesar de que el pH resultó ser un atributo con diferencia significativa ($P = 0,003$) entre categorías, todas varían alrededor de un pH neutro (Cuadro 6). En base a datos teóricos y óptimos para el cultivo del cacao, se sabe que puede desarrollarse en condiciones de pH ácidas y básicas, pero el ideal es alrededor de 6,5 (Barros, 1982), porque los suelos con pH neutro tienen mayor contenido de bases cambiables (Fassbender, 1992).

Respecto a la textura del suelo, las arcillas forman complejos estables que actúan como estabilizadores de la materia orgánica, además sus cargas negativas ayudan a mantener un equilibrio químico (Fassbender, 1992). Los suelos más apropiados para el desarrollo del cacao van desde arcillosos hasta franco arenosos (Barros, 1982); 36 de 39 de las unidades estudiadas tienen suelos

franco-arenosos, 2 son arcillo-arenosos y 1 franco. Por lo tanto, al parecer las fincas de esta región cuentan con una textura ideal para el desarrollo del cacao.

La acumulación de nutrientes en el suelo, depende de la edad de una plantación y sus árboles de sombra. Para conocer el potencial de los suelos en el desarrollo del cacao, es básico saber las concentraciones de sus elementos, ya que ellos representan la disponibilidad de nutrientes para las plantas (Winowiecki, 2008). En comparación a otros sistemas de cultivo, los cacaotales almacenan más nutrientes y pierden una cantidad menor durante la cosecha, con una capacidad de recuperación mayor (Hartemink, 2003).

En base a la física y química del suelo, se considera que los suelos de esta zona son apropiados para la producción de cacao. El pH y la textura son perfectos para la agricultura. En general, los niveles de micronutrientes y la relación C:N son adecuados para la producción de cacao, aún en las categorías de menor calidad de suelo. La densidad aparente está dentro de los rangos convenientes para el desarrollo de cultivos ($1,1 \text{ g.cm}^{-3}$, United States Department of Agriculture –Agricultural Research Service, 1998). Estos suelos además de ser de origen volcánico, mantienen niveles adecuados de carbono, el cual se relaciona inversamente con la densidad aparente (Walker y Adams, 1958). Las categorías que presentan elementos con valores por debajo de lo recomendado son: –Bases con Ca, Mg y C, +Bases y Alta N:P con Mn. Además, es necesario prestar atención a las concentraciones de fósforo, ya que es bajo en 37 de 39 unidades estudiadas, y se debería enfocar las investigaciones en medir sus impactos en esta región. En base a observaciones personales de potenciales problemas que pueden interferir en la producción de los cacaotales en el Sur Occidente, encontramos que los agricultores no conocen las propiedades físicas y químicas de sus fincas, a veces cuentan con poca capacitación sobre buenas técnicas de manejo (poda, fertilizantes, etc.), existen enfermedades en sus cultivos (ej. *Phytophthora*, encuesta PCC) y corren el peligro de robo de frutos en época de cosecha (obs. pers.).

9.1.3. Cacao y bosques

El cacao en la región del Pacífico, ha sido importante desde la época de los mayas, antes las plantaciones iban desde el Soconusco en Chiapas hasta Nicaragua. Posteriormente los españoles comenzaron a aumentar la producción. Esta región, con sus bosques tropicales, ofrecía un hábitat muy adecuado para el cultivo del cacao criollo, que necesita más sombra que las variedades actuales. Su decadencia inició a principios del siglo XIX, porque comenzó a haber competencia con

algunos países suramericanos, quienes comenzaron a tener producciones a mayor escala y a mediados del mismo siglo, con la revolución agrícola, el café comenzó a tomar impulso y a cultivarse en mayores proporciones (Webster, 1969). Debido a que el café fue muy exitoso, se decidió ampliar las vías del tren, con lo cual, se comenzó una tala excesiva de árboles para madera de construcción y además se ralearon los bosques, ya que el café tiene menos requerimientos de sombra que el cacao (Webster, 1969). De allí en adelante otros tipos de monocultivos (ej. caña de azúcar), han contribuido a que los bosques en esta región vayan desapareciendo y sólo encontramos bosques secundarios. Estos son el resultado de plantaciones viejas y abandonadas de café o cardamomo, que actualmente se están regenerando y son preservados para proteger los recursos hídricos. Algunos aún cuentan con un poco de vegetación nativa, que era utilizada como sombra del cultivo.

Que los bosques secundarios se distribuyeran en 3 grupos diferentes (Figura 6), sugiere que las propiedades físicas y químicas de los sistemas agroforestales de cacao y bosques son similares. Por consiguiente, el cacao tiene un impacto positivo en la conservación de las cualidades de los suelos (Schroth y Harvey, 2007), reforzando la idea de que este sistema agroforestal puede ser considerado un sistema benéfico para el suelo y hojarasca (Moço *et al.*, 2009; 2010).

9.2. Macrofauna y sus correlaciones con las variables físico-químicas del suelo

En todas las categorías de calidad de suelo, en especial la de \pm Bases (Figura 12), el grupo más abundante fue el de Formicidae, quienes suelen ser dominantes en el estrato del suelo y hojarasca, de las plantaciones de cacao y bosques (ej. Moço *et al.*, 2010; Rousseau *et al.*, en prep.). En conjunto con Isoptera y Oligochaeta, se les llaman “ingenieros del suelo” (Folgarait, 1998; Wolters, 2000). Éstos producen una descomposición físico-mecánica de la hojarasca y cuando hacen excavaciones o crean galerías, van dejando restos de materia orgánica y excretas, que promueven la activación de los microorganismos, quienes comienzan la descomposición bioquímica (Fassbender, 1992; Lavelle *et al.*, 1992).

9.2.1. Comunidades de fauna

En la comunidad relacionada con un gradiente en la concentración de bases (Figura 8) los Araneae, Formicidae y Coleóptera (adultos y larvas), que además de estar entre los grupos de artrópodos más

diversos, son de los principales depredadores del estrato del suelo y hojarasca. Un alto porcentaje de las especies de estos tres grupos se alimentan de pequeños organismos. Otro grupo de depredadores del suelo y la hojarasca son los pseudoscorpionidae (Borror *et al.*, 1989). Probablemente la distribución de esta fauna, no se vea influenciada por el tipo o la calidad de los suelos, sino más bien porque aquí son más abundantes los organismos de los cuales se alimentan.

Los grupos de descomponedores (Heteroptera y Gastropoda) y saprófagos (Isopoda, Blattaria, Diplopoda, Symphyla y Gastropoda) se relacionaron con suelos de intermedia a baja concentración de bases y con más fósforo disponible (menor relación N:P) (Figura 8). Puesto que este tipo de fauna, está más ligada a los procesos de descomposición de la materia orgánica, se consideró incluir datos de la biomasa seca de hojarasca (Robinson, PCC), bajo el criterio de que en suelos más ácidos la degradación es más lenta y por consiguiente hay mayor acumulación de hojarasca y un aumento en la abundancia de organismos. Pero su distribución se correlacionó negativamente con esta variable, lo que sugiere que estos organismos están más asociados al suelo que a la hojarasca. Posiblemente para esta región, sea más importante evaluar la calidad de la hojarasca (Moço *et al.*, 2010) que su cantidad. Una posible explicación para la correlación negativa de la macrofauna con la variable N:P, es la indispensable labor del fósforo en la productividad biológica, ya que es uno de los elementos más importantes que conforman un organismo después del H, O, C y N (Lavelle y Spain, 2001), lo que sugiere que estos macroinvertebrados prefieren suelos con mayores concentraciones de P.

La otra comunidad de fauna (larvas de Diptera, Oligochaeta, Chilopoda y Gastropoda) se relacionó con un gradiente de densidad aparente, porosidad y humedad. Como se mencionó antes, la densidad aparente para las fincas estudiadas, está por debajo del límite óptimo ($1,1 \text{ g.cm}^{-3}$, USDA-ARS 1998), lo cual es bueno tanto para la producción del cacao como para la biota del suelo. Un aumento en la densidad aparente o una disminución en la porosidad, conlleva a que las comunidades de organismos del suelo cambien, porque se crean microhábitat que favorecen otra fauna y se altera la cadena alimenticia, además de limitar la capacidad de los organismos para desplazarse dentro del suelo (Whalley, 1995; Lavelle y Spain, 2001). Generalmente, los Oligochaeta son un grupo beneficioso para reducir la compactación (Clement *et al.*, 1991; Whalley, 1995,) porque las propiedades de sus deposiciones fecales (sobre todo las de mayor tamaño $0,1 - > 2 \text{ cm}$) contribuyen a la formación de estructuras estables, que influyen en la porosidad y densidad aparente (Bal, 1982; Blanchart *et al.*, 1997). Sin embargo, también pueden propiciar efectos negativos como la compactación del suelo. En esta área los Oligochaeta se correlacionaron más con la variable de

densidad aparente, posiblemente debido a que las especies dominantes son compactadoras (Lavelle *et al.*, 1998; Blanchart *et al.*, 1997). El grupo Isoptera, además de estar relacionado con suelos de bajas concentraciones de bases, mostró cierta correlación con suelos húmedos y porosos, esto se debe a que sus galerías promueven suelos con baja densidad aparente, más aireación e infiltración de agua (ej. Wielemaker, 1984; Elkins *et al.*, 1986; Mando, 1997).

El grupo de las larvas de dípteros es importante, porque aquí se clasifica la familia Ceratopogonidae, que son los polinizadores exclusivos del cacao (Young, 1986), y de quienes poco se conoce sobre la biología de sus especies (Bystrak y Wirth, 1978). Este grupo se correlacionó con los suelos de Alta DA, pero estos organismos son saprófagos y viven en la hojarasca. Así que es muy probable que la hojarasca en estos suelos, presente características de importancia para el desarrollo de las larvas.

Al contrario de Diptera, los grupos de Chilopoda y Gastropoda tienen preferencia por suelos más húmedos y livianos (Figura 8). Los miembros de Chilopoda son depredadores y posiblemente en esta región tengan preferencia por presas de Gastropoda, que son organismos herbívoros y saprófagos.

Como se indicó antes, el fósforo (P) se reporta con bajas concentraciones en estos suelos y podría ser también limitante para los organismos. En la categoría Alta DA, los valores de P son más altos (Cuadro 6), quizá sea porque los Oligochaeta promueven la liberación de formas asimilables de este elemento, cuando hacen pasar la materia orgánica a través de su sistema digestivo (López-Hernández *et al.*, 1993; Brussaard *et al.*, 1996, 1998).

Entre otras variables la relación C:N varía con la naturaleza y estado de descomposición del humus, con la profundidad y textura del suelo y con las condiciones climáticas (Forth, 1987). Según los rangos óptimos para el cacao (10-12) (Cuadro 6), las fincas de esta región tienen alta disponibilidad de N, porque la relación C:N es <15 y esto significa que la mineralización excede la inmovilización. Es importante mantener niveles adecuados de N, porque cuando es muy bajo o existe una relación C:N alta, hay competencia de nutrientes entre los organismos del suelo y las plantas (Forth, 1987).

A pesar de que la colecta de macrofauna en el Sur Occidente se llevó a cabo en época de lluvia, donde los organismos suelen ser más abundantes (Lima *et al.*, 2010), parece que la densidad es más baja (945 ind/m²) en comparación con otros lugares como Turrialba, Costa Rica (1469 ind/m², Rousseau *et al.*, en prep.), donde también se cultiva cacao y se han llevado a cabo estudios

similares. La diferencia es que en Turrialba, los cacaotales se desarrollan alrededor de bosques primarios y en el Sur Occidente los bosques son secundarios y escasos. Además, en algunas de las fincas estudiadas, se observó la presencia de animales de corral, cerdos y en la mayoría hay tránsito de personas, lo que podría estar reduciendo la abundancia o diversidad de macrofauna, a través de la perturbación de su ambiente físico (Decaëns *et al.*, 1994).

Tanto en un sistema natural como agrícola es importante mantener una rica comunidad de organismos del suelo, porque ellos colaboran con el reciclaje de nutrientes. Cuando la macrofauna descompone en fracciones más pequeñas los restos de animales y plantas, los movilizan en la superficie y al interior del suelo, para promover la descomposición química de los microorganismos (Lavelle y Spain, 2001). Además, los microorganismos están naturalmente en sincronía con las plantas, ya que ellos liberan nutrientes cuando las plantas necesitan absorberlos (Lavelle *et al.*, 1992).

10.CONCLUSIONES

- 10.1. Las categorías de calidad de suelo establecidas, a partir de los indicadores seleccionados (densidad aparente, porosidad, humedad gravimétrica, suma de bases, relaciones C:N y N:P), muestran diferencia significativa ($P > 0,05$). Lo que demuestra que son una herramienta útil para medir la calidad de los suelos en la región cacaotera del Sur Occidente.
- 10.2. La capacidad de los suelos para el cultivo de cacao en esta región, se ve limitada por las bajas concentraciones de P ($< 20 \text{ kg.ha}^{-1}$) y en la categoría de $-$ Bases por los elementos de Ca ($< 1600 \text{ kg.ha}^{-1}$), Mg ($< 240 \text{ kg.ha}^{-1}$), Zn ($< 4 \text{ kg.ha}^{-1}$) y C ($< 40 \text{ mg.ha}^{-1}$). Otras propiedades como densidad aparente ($< 1,1 \text{ g.cm}^{-3}$), textura (de arcillosos a franco-arenosos), pH (neutro 6,5), relaciones C:N (10-12) y las concentraciones de Ca (1600-8000 kg.ha^{-1}), Mg (240-1200 kg.ha^{-1}), K (156-468 kg.ha^{-1}), Cu (4-40 kg.ha^{-1}), Zn (4-20 kg.ha^{-1}), Mn (10-100 kg.ha^{-1}), Fe (20-200 kg.ha^{-1}) y C ($> 40 \text{ mg.ha}^{-1}$) varían entre los rangos óptimos para el desarrollo de este cultivo.
- 10.3. En base a sus propiedades físicas y químicas, las 36 fincas de cacao y los 3 bosques secundarios, se clasificaron en 5 grupos de diferente calidad de suelo: A. $+Bases$ (fincas: 21, 23 y 24), B. Alta N:P (fincas: 4, 14, 15, 16, 17, 18, 20, 26, 27 y 28), C. Alta DA (fincas: 25, 29, 30, 31, 32 y 38), D. $\pm Bases$ (fincas: 1, 2, 3, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 19, 22, 34 y 37) y E. $-Bases$ (fincas: 6, 13, 33, 35, 36 y 39). Los bosques secundarios no formaron un grupo independiente, lo que indica que los cacaotales mantienen estructuras similares a las de los bosques, enfatizando la importancia de este sistema agroforestal en la preservación de diversidad y calidad del suelo.
- 10.4. La macrofauna se correlacionó con algunos atributos del suelo y se dividió en dos comunidades, una relacionada con las concentraciones de bases y relación N:P (depredadores: Araneae, Formicidae, Pseudoscorpionidae, larvas y adultos de Coleóptera; descomponedores: Heteróptera y Gastropoda; saprófagos: Isopoda, Blattaria, Diplopoda, Symphyla y Gastropoda), la otra con un gradiente de densidad aparente opuesto a uno de porosidad y humedad (Oligochaeta, las saprófagas larvas de Diptera y los depredadores Chilopoda). Por lo tanto, los grupos funcionales de macrofauna, son potencialmente regulados por estos indicadores de calidad de suelo.

11.RECOMENDACIONES

- 11.1. La cantidad y calidad de la materia orgánica, se relaciona con la diversidad de plantas de sombra utilizadas para el cultivo del cacao. Por lo tanto, es recomendable analizar los efectos de la vegetación utilizada como sombra, en los suelos de diferente calidad y en la diversidad de macrofauna.
- 11.2. En relación a los atributos físico-químicos del suelo, se recomienda evaluar los efectos de los elementos que se encuentran por arriba de los valores óptimos (Ca en todas las categorías excepto -Bases y K en +Bases) y analizar las posibles causas de las bajas concentraciones de fósforo y su repercusión en la producción de cacao.
- 11.3. En esta región la densidad de macrofauna es de 945 ind/m², en comparación con otros lugares, donde se han hecho estudios similares (Turrialba 1469 ind/m²), parece tener una abundancia menor. Por lo tanto, se recomienda evaluar el impacto de los animales domésticos y tránsito de personas, sobre la diversidad de macrofauna. Además, es importante realizar colectas en diferentes épocas del año, para conocer sus patrones temporales.
- 11.4. Se recomienda analizar más a detalle la relación N:P y su relación con la composición del dosel de sombra.

12. REFERENCIAS

- Albrecht, A., Rangon, L., & Barret P. (1992). Effets de la matière organique sur la stabilité structurale et la détachabilité d'un vertisol et d'un ferrisol (Martinique). *Cahiers Orstom, sér. Pédologie*, 27, 121-133.
- Amoros, J. L. (1960). *Los suelos; su origen, constitución y clasificación; introducción a la edafología*. Barcelona: Ediciones Omega.
- Anderson, J. M. & Ingram, J. S. (1993). *Tropical soil biology and fertility: a handbook of methods*. (2a ed.). Wallingford: CAB International.
- Arshad, M. A. & Coen, G. M. (1992). Characterization of soil quality: physical and chemical criteria. *American Journal of Alternative Agriculture*, 7(1-2), 25-31.
- Bal, L. (1982). *Zoological ripening of soils. 1. The concept and impact in pedology, forestry and agriculture. 2. The process in two Entisols under developing forest in a recently reclaimed Dutch polder*. Wageningen: Centre for agricultural Publishing and Documentation.
- Barrios, M. (2007). *Exploración del potencial de cultivos alternativos perennes de alto valor (Theobroma cacao L.), aplicados en áreas selectas para la restauración de selvas lluviosas fragmentadas en Cobán y Cahabón, Alta Verapaz*. Guatemala: Fondo para el Desarrollo Científico y Tecnológico (FODECYT 15-2006).
- Barros, O. (1982). *El Cacao. Estación experimental "El Recreo"*. Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) e Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas (IICA).
- Bertsch, F. (1995). *La fertilidad de los suelos y su manejo*. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS).
- Blanchart, E., Lavelle L., Braudeau, E., Bissonnais, Y., & Valentin, C. (1997). Regulation of soil structure by geophagous earthworm activities in humid savannas of Cote d'Ivoire. *Soil Biology and Biochemistry*, 29(3-4), 431-439.
- Borror, D. J., Triplehorn, C. A. & Johnson, N. F. (1989). *An introduction to the study of insects*. (6a ed.). Estados Unidos: Saunders College Publishing.

- Bouyoucos, G. J. (1951). Recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agronomy Journal*, 43, 434-438.
- Brussaard, L. (1998). Soil, fauna, guilds, functional groups and ecosystem processes. *Applied Soil Ecology*, 9, 123-135.
- Brussaard, M., Lavelle, P., & Laurent, J. Y. (1996). Digestion of a vertisol by the endogeic earthworm *Polypheretima elongata*, Megascolecidae, increases soil phosphate extractability. *European Journal of Soil Biology*, 32(2), 107-111.
- Bystrak, P. & Wirth, W. (1978). *The North American species of Forcipomyia, subgenus Euprojoannisia (Diptera: Ceratopogonidae)*. Washington: Technical Bulletin 1591.
- Cerda, R. H., (2008). *Calidad de suelos en plantaciones de cacao (Theobroma cacao), banano (Musa AAA) y plátano (Musa AAB) en el valle de Talamanca, Costa Rica* (Tesis de Maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Costa Rica.
- Chang, R. (1991). *Química*. México: McGraw Hill Interamericana.
- Clement, R. O., Murray, J. P. & Sturdy, R. C. (1991). The impact of 20 years absence of earthworms and three levels of N fertilizer on a grassland soil environment. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 36, 75-85.
- Coates, G. (Ed.). (2003). *Paseo pantera, una historia de la naturaleza y cultura de Centroamérica*. Washington: Smithsonian.
- De la Cruz, R. (1982). *Clasificación de Zonas de Vida de Guatemala basada en el sistema de Holdridge*. Guatemala: Instituto Nacional Forestal (INAFOR).
- Decaëns T, Lavelle, P., Jimenez, J., Escobar, G. & Ripstein, G. (1994). Impact of land management on soil macrofauna in the Oriental Llanos of Colombia. *European Journal of Soil Biology*, 30(4), 157-168.
- Deheuvelds, O., Avelino, J., Cerda, R., Pérez, G., y Rousseau, G. X. (2009). *Caracterizar equilibrios entre productividad y funciones ecológicas en diferentes sistemas agroforestales con cacao*. Turrialba, Costa Rica: Proyecto Cacao Centroamérica (PCC) del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).

- Díaz, R. y Hunter, A. (1978). *Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero*. Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Doran, J. W., Sarrantonio, M. & Liebig, M. (1996). Soil health and sustainability. *Advances in agronomy*, 56, 1-54.
- Doran, J. W. y Zeiss, M. R. (2000). Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15, 3-11.
- Elkins, N. Z., Sabol, G. Z., Ward, T. J. & Whitford, G. (1986). The influence of subterranean termites on the hydrological characteristics of a Chihuahuan desert ecosystem. *Oecologia*, 68, 521-528.
- Fassbender, H. W. (1975). *Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina*. Turrialba, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA.
- Fassbender, H. W. (1992). *Modelos edafológicos de sistemas agroforestales*. (2a ed). Turrialba, Costa Rica: Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Folgarait, P. (1998). Ant biodiversity and its relationship to ecosystem functioning: a review. *Biodiversity and Conservation*, 7, 1221-1244.
- Forsythe, W. (1980). *Física de suelos*. San José, Costa Rica: Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas.
- Foth, H. D. (1987). *Fundamentos de la ciencia del suelo*. México: Compañía Editorial Continental, S. A.
- Garten, C. T. (1976). Correlations between concentrations of elements in plants. *Nature*, 261, 686-688.
- Garrish, V., Cernusak, L. A., Winter, K. & Turner, B. L. (2010). Nitrogen to phosphorus ratio of plant biomass versus soil solution in a tropical pioneer tree, *Ficus insipida*. *Journal of Experimental Botany*, 61(13), 3735-3748.

- George, A. (2006). *Estudio comparativo de indicadores de calidad de suelo en fincas de café orgánico y convencional en Turrialba, Costa Rica* (Tesis de Maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.
- Godínez, T. (2007). *Diagnóstico y propuesta de plan de acción de la cadena del cultivo del cacao en Guatemala*. Guatemala: Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA); Unidad de Política e Información Estratégica y Consejo de Producción Agrícola.
- Guevara, F. (2008). Insectos y otros artrópodos asociados al cacao. En D. Monterroso (Ed.) (En prep.). *Estudio de la bioecología del cacao y selección de clones élite en función de sus características agronómicas y calidad del grano para incrementar la productividad del sistema*. Guatemala: AGROCYT-MAGA-CONCYT.
- Güsewell, S. (2004). N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance. *New Phytologist*, 162(2), 243-266.
- Hartemink, A. E. (2005). Nutrient stocks, nutrient cycling, and soil changes in cocoa ecosystems: A review. *Advances in Agronomy*, 86, 227-253.
- Instituto Geográfico Nacional (IGN). (2000). *Diccionario Geográfico de Guatemala*. Guatemala.
- Koerselman, W. & Meuleman, A. F. (1996). The vegetation N:P ratio: A new tool to detect the nature of nutrient limitation. *The Journal of Applied Ecology*, 33(6), 1441-1450.
- Lavelle, P., Pashanasi, B., Charpentier, F., Gilot, C., Rossi, J., Derouard, L. *et al.* (1998). Large-scale effects of earthworms on soil organic matter and nutrient dynamics. In C. A. Edwards (Ed.). *Earthworm Ecology*, 103-122.
- Lavelle, P., Senapati, B. & Barros, E. (2003). Soil Macrofauna. En G. Schroth & F. L. Sinclair (Eds). *Trees, crops and soil fertility* (pp. 303-304). Wallingford: CABI Publishing.
- Lavelle, P., Blanchart, E. & Martin, A. (1992). Impact of soil fauna on the properties of soils in the humid tropics. In R. Lal & P. A. Sánchez (Eds.). *Myths and science of soils of the tropics*. Madison, Estados Unidos: Special Publication Number 29, Soil Science Society of America (SSSA).
- Lavelle, P. & Spain, A. V. (2001). *Soil ecology*. Holanda: Kluwer Academic Publishers.

- Legendre, P. & Legendre, L. (1998). *Numerical ecology*. (2a ed.). Amsterdam: Elsevier.
- Letey, J., Sojka, R. E., Upchurch, D. R., Cassel, D. K., Olson, K. R., Payne, W. A. *et al.* (2003). Deficiencies in the soil quality concept and its application. *Journal of Soil and Water Conservation*, 58(4), 180-187.
- Lima, S. S., de Aquino, A. M., Carvalho, L. F., Velásquez, E. & Lavelle, P. (2010). Relação entre macrofauna edáfica e atributos químicos do solo em diferentes agroecossistemas. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 45(3), 322-331.
- López-Hernández, D., Fardeau, J. C. & Lavelle, P. (1993). Phosphorus transformations in two P-sorption contrasting tropical soils during transit through *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae, Oligochaeta). *Soil Biology and Biochemistry*, 25(6), 789-92.
- Mando, A. (1997). Effects of termites and mulch on the physical rehabilitation of structurally crusted soils in the Sahel. *Land, Degradation and Development*, 8, 269-78.
- Maeda, T., Takenaka, H. & Warkentin, B. P. (1977). Physical properties of allophane soils. *Advances in Agronomy*, 29, 229-64.
- Moço, M. K., Gama-Rodrigues, E. F., Gama-Rodrigues, A. C., Machado, R. C. y Baligar, V.C. (2009). Soil and litter fauna of cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. *Agroforestry Systems*, 76, 127-138.
- Moço, M. K., Gama-Rodrigues, E. F., Gama Rodrigues, A. C., Machado, R. C. & Baligar, V. C. (2010). Relationships between invertebrate communities, litter quality and soil attributes under different cacao agroforestry systems in the south of Bahia, Brazil. *Applied Soil Ecology*, 1, 1-8.
- Mollinedo, J. (2007). *Informe de caracterización de la cadena productiva de cacao y diagnóstico de la cooperación entre actores*. Turrialba, Costa Rica: Proyecto Cacao Centroamérica (PCC), del Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE).
- Olsen, S. R. & Sommers, L. E. (1982). *Methods of soil analysis. Part II. Chemical and microbiological properties*. (2a ed.). Wisconsin: AASA, Madison.

- Porras, C. M. (2006). *Efecto de los sistemas agroforestales de café orgánico y convencional sobre las características de suelos en el Corredor Biológico Turrialba–Jiménez, Costa Rica* (Tesis de Maestría). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.
- R Development Core Team. (2010). R 2.12.0.: A language and environment for statistical computing. 2.12.0. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Recuperado de <http://www.R-project.org>.
- Rousseau, G. X., Deheuvels, O., Arias, I. R. & Somarriba, E. (En prep.). Macrofauna and soil quality in cocoa-based agroforestry systems and old-growth forests in Talamanca, Costa Rica.
- Schroth, G. & Harvey, C. A. (2007). Biodiversity conservation in cocoa production landscapes: an overview. *Biodiversity conservation*, 16, 2237-2244.
- SPSS Inc. (2003). SPSS 12.0 Chicago, Illinois.
- Stehr, F. W. (Ed.). (1991). *Immature insects*. (vol. 2). Dubuque, Iowa: Kendall/Hunt Publishing Company.
- Sterner, R. W. & Elser, J. J. (2002). *Ecological stoichiometry*. Estados Unidos: Princeton University Press.
- Thomasson, A. J. (1978). Toward an objective classification of soil structure. *Journal of Soil Science*, 29, 38-46.
- United States Department of Agriculture –Agricultural Research Service (USDA-ARS). (1998). *Soil quality test kit guide*. Washington: Soil Quality Institute.
- Universidad del Valle de Guatemala –Centro de Estudios Ambientales (UVG-CEA). (2003). *Perfil socioambiental de la región Sur Occidente*. Guatemala: UVG-CEA.
- van Noordwijk, M., Brouwer, G. & Klaas, H. (1993). Concepts and methods for studying interactions of roots and soil structure. *Geoderma*, 56, 351-75.
- Vezzani, F. M. & Mielniczuk, J. (2009). Revisão de literatura, uma visão sobre qualidade do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33, 743-755.

- Wada, K. (1985). The distinctive properties of andosols. *Advances in Soil Science*, 2, 174-229.
- Walker, T. W. & Adams, A. F. (1958). Studies on soil organic matter: 1. Influence of phosphorus content of parent materials on accumulations of carbon, nitrogen, sulfur, and organic phosphorus in grassland soils. *Soil Science*, 85, 307-318.
- Webster, F. (1969). *Geografía cultural e histórica del Suroeste de Guatemala*. (Tomo I). Seminario de Integración Social Guatemalteca. G. Francis Gall (Trad.). Guatemala: Editorial José de Pineda Ibarra.
- Whalley, W. R., Dumitru, E., & Dexter, A. R. (1995). Biological effects of soil compaction. *Soil and Tillage Research*, 35, 53-68.
- Wielemaker, W. G. (1984). Soil formation by termites, a study in the Kisii area, Kenya (Tesis de Doctorado). Recuperado de <http://library.wur.nl/WebQuery/wdab/214620>
- Winowiecki, L. (2008). Soil biogeochemical patterns in the Talamanca foothills, Costa Rica: local soil knowledge and implications for agroecosystems (Tesis de Doctorado). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE). Turrialba, Costa Rica.
- Wolters, V. (2000). Invertebrate control of soil organic matter stability. *Biology and Fertility of Soils*, 31, 1-19.
- Young, A. M. (1986). Habitat differences in cocoa tree flowering, fruit-set, and pollinator availability in Costa Rica. *Journal of Tropical Ecology*, 2, 163-186.

13. ANEXOS

13.1. Coordenadas de fincas de cacao y bosques secundarios

No. Finca	Latitud	Longitud	Propietario
1	14,55198	-91,32135	Pilar Velásquez de Letona
2	14,55010	-91,32092	Jorge Alfonso Ávalos Velázquez
3	14,54890	-91,35673	Felicito Francisco Cabrera Ramírez
4	14,53303	-91,35912	Leopoldo Quiñonez Ardón
5	14,53195	-91,36440	Juan Gómez Sunú
6	14,52510	-91,35680	Francisco Juárez Ajcac
7	14,52478	-91,35685	José Joaquín García
8	14,52372	-91,36853	Jorge Paiz Méndez
9	14,52562	-91,36708	Cristóbal Cotill Xobín
10	14,51898	-91,36662	Marta Lily Godínez Carrera
11	14,51845	-91,36692	Milton Gilberto Peralta Santos
12	14,51803	-91,36672	Claudia de León de León
13	14,50093	-91,36608	Finca Bulbuxyá
14	14,50582	-91,37880	Santiago Chocoj Suhul
15	14,50635	-91,37887	Jesús Velásquez
16	14,50827	-91,37837	Lidia Sánchez
17	14,50832	-91,37797	Cecilio Suhul Chocoj
18	14,50833	-91,37313	Juan Suhul Tahual
19	14,51035	-91,37545	Belizario Coc
20	14,51097	-91,38002	Belizario Coc
21	14,53678	-91,38578	Joel Sapón Jeteyá
22	14,53578	-91,38643	Dina Sapón Jeteyá
23	14,53532	-91,38718	Bilha Sapón Jeteyá
24	14,52923	-91,40210	Antonio Sánchez
25	14,53735	-91,41243	Mario Roberto Quevedo Armas
26	14,54407	-91,41547	José Ángel Barrios Rosales
27	14,54735	-91,43032	Mario Aníbal Soc Mas
28	14,55395	-91,64695	Guillermo Toc

No. Finca	Latitud	Longitud	Propietario
29	14,55465	-91,64695	Diego Genaro Mejía
30	14,56335	-91,64113	Benancio Ramos
31	14,58107	-91,66193	Mardoqueo Hernández
32	14,58193	-91,66298	Mardoqueo Hernández
33	14,63112	-91,74717	Genaro Maldonado
34	14,63030	-91,74913	Ismael Castillo
35	14,62952	-91,74840	Nelly Mabel Belloso
36	14,62800	-91,75112	Hermelindo Castillo
37b	14,55067	-91,34575	María del Carmen
38b	14,65217	-91,72783	Manfredo Top
39b	14,65592	-91,72347	Manfredo Top

b= bosques. Ref. a partir de estos datos se realizó el mapa de la Figura 2

13.2. Procedimientos para análisis de suelo en Laboratorio CATIE Costa Rica

13.2.1. Textura, método de Bouyoucos

Materiales:

1. Batidoras especiales para dispersar suelo
2. Vasos de dispersión
3. Cronómetro
4. Cilindros de sedimentación de 1000 ml de capacidad
5. Varilla de agitación
6. Hidrómetro
7. Termómetro
8. Pizeta
9. Recipientes para pesar las muestras

Reactivos:

Solución dispersante de Hexametáfosfato de Sodio al 10% m/v: Disolver 10.00 gr del reactivo Hexametáfosfato de Sodio en aproximadamente 75 ml de agua destilada caliente con agitación. Transferir la solución fría a un balón de 100 ml y aforar hasta la marca con agua destilada.

Procedimiento:

1. Pesar 50 gr de muestra y pasarla al vaso de agitación.
2. Adicionar 15 ml de la solución de Hexametáfosfato de Sodio 10%. Luego adicionar aproximadamente 300 ml de agua y colocar el vaso en la licuadora. Agitar por 8 min.
3. Trasvasar la suspensión dispersada al cilindro de sedimentación con ayuda de la pizeta. Se debe tener el cuidado de transferir toda la muestra.
4. Aforar hasta la marca de 1 lt con agua.
5. Agitar la suspensión vigorosamente y de forma constante con la varilla por 1 min. Adicionar 1 ó 2 gotas de alcohol amílico para eliminar la espuma.
6. Introducir el Hidrómetro y tomar lectura exactamente a los 40 seg. Se toma también la lectura de la temperatura.
7. Dejar el cilindro en reposo y tomar la segunda lectura con el Hidrómetro a las 2 hrs. Anotar la

lectura de la temperatura.

Nota: El hidrómetro debe introducirse en la suspensión sin disturbarla, suavemente y unos 10 seg antes de tomar la lectura. Recordar medir la temperatura cada vez de tomar lectura con el Hidrómetro.

Cálculos:

Corrección por temperatura: Debido a que el Hidrómetro está calibrado para dar lecturas a 67 °F, debe corregirse la lectura por variación en la temperatura.

$$\text{Lectura corregida} = \text{Lectura del Hidrómetro} \pm \text{Diferencia de Temperatura} * 0.2$$

Si la temperatura registrada es mayor a 67°F el producto de la diferencia multiplicado por 0.2 se suma. Caso contrario se resta.

Cálculo de fracciones:

$$\% \text{ Arena} = 100 - ((\text{Lectura corregida a los 40 seg/peso muestra}) * 100)$$

$$\% \text{ Arcilla} = (\text{Lectura corregida a las 2 hrs/peso muestra}) * 100$$

$$\% \text{ Limo} = 100 - (\% \text{ Arena} + \% \text{ Arcilla})$$

Clase Textural: Con los porcentajes de Arena, Arcilla y Limo se clasifica la textura del suelo de acuerdo a la guía gráfica para clasificación textural Figura 2 (texto pg. 21).

Referencias:

1. Bouyoucos, G.J. 1951. Recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils. *Agronomy Journal* 43:434-438.
2. Day, P.R. 1950. Physical basis of particle size analysis by the hydrometer method. *Soil Science* 70:363-374.
3. Day, P.R. SA. Particle fractionation and particle size analysis. *Methods of Soil Analysis, Part 1*. *Agronomy* 9:563-577.
4. Forsythe, W. 1985. *Física de Suelos: Manual de Laboratorio*. 1ª edición, 2ª reimpresión. San José: IICA.

13.2.2. Nitrógeno y Carbono total

El autoanalizador utilizado es un ThermoFinnigan FlashEA 1112 que permite determinar simultáneamente carbono y nitrógeno en muestras de suelos, sedimentos y material vegetal. Permite un análisis rápido y preciso, eliminándose la contaminación ambiental que se tiene con los métodos químicos tradicionales.

Su funcionamiento se basa en una oxidación completa de la muestra dentro de un reactor de alta temperatura (aprox. 1800°C), transformando la muestra en una mezcla de gases. Los gases se separan a través de una columna cromatográfica la cual está conectada a un detector de Conductividad Térmica. El rango de sensibilidad es de 100 ppm a 100%, para ambas determinaciones, carbono y nitrógeno. El tiempo de análisis de una muestra es de 465 seg.

Las muestras se cargan en un automuestreador modular con capacidad para 32 muestras.

El equipo es automático operándose por medio del Software Eager 300.

Los consumibles que el equipo utiliza son:

1. Gas Oxígeno de alta pureza, UAP.
2. Gas Helio de alta pureza, UAP.
3. Kit de reactivos de relleno para las columnas de oxidación y reducción.
4. Desecante.
5. Cápsulas de estaño para contener la muestra.

13.2.3. Elementos mayores y menores

En el laboratorio de CATIE Costa Rica, este análisis es llamado de fertilidad de suelos e incluye la determinación de los elementos cobre, zinc, manganeso, potasio, fósforo, calcio, magnesio, acidez extraíble y pH.

Para la extracción de los nutrientes se emplean dos soluciones extractoras: Olsen Modificado pH 8.5 para determinación de Cu, Zn, Mn, K, P y Cloruro de Potasio 1 N para la determinación de Ca, Mg y Acidez Extraíble.

Extracción con Olsen Modificado, pH 8.5, relación 2.5:25, suelo:solución.Materiales:

1. Bandejas Hunter
2. Cuchara calibrada de 2.5 ml Hunter
3. Agitador Vertical Hunter
4. Dispensador de adición de 25 ml Hunter
5. Dispensador-diluidor 2:8:10, Hunter
6. Papel filtro de 11.5 cm de diámetro Whattman #2 o equivalente.
7. Tubos de vidrio de 30 ml de capacidad.
8. Beaker (de diferente capacidad)
9. Espátulas
10. Balones aforados (de diferente capacidad)
11. Pipetas

Reactivos:

1. *Reactivo Olsen Modificado*: Disolver en aproximadamente 900 ml de H₂O destilada, 42 gr de NaHCO₃ (bicarbonato de sodio) y 3.72 gr de EDTA, sal disódica. Luego de disolución completa de las sales, ajustar el pH utilizando NaOH 5N, hasta pH exacto 8.5. Se afora a 1 lt con H₂O destilada. Guardar la solución en envase de polietileno.
2. *Molibdato de Amonio*: Diluir 275 ml de H₂SO₄ (Acido Sulfúrico Concentrado) en 600 ml de H₂O (Peligro: debe utilizar equipo de protección personal completo y capilla de extracción). Aparte disolver 25 gr de Molibdato de Amonio en 100 ml de H₂O. Cuando la disolución de ácido esté fría, adicionar el molibdato de amonio, aforar a 1 lt y guardar en una botella ambar. Para el desarrollo de color se toman 100 ml de esta disolución concentrada y se aforan a 1 lt con H₂O destilada. Este debe prepararse justo cuando va a utilizarse.
3. *Cloruro Estannoso*: Pesar 3 gramos de Cloruro de Estaño II (SnCl₂), adicionar 20 ml de HCl concentrado y calentar hasta disolver (Peligro: debe utilizar equipo de protección personal completo y capilla de extracción), luego aforar a 100 ml con H₂O destilada. Para desarrollo de color se toman 5 ml del reactivo concentrado y se afora a 1 lt con H₂O. Este debe prepararse justo cuando va a utilizarse.
4. *Solución Patrón de 100 mg/l P*: Disolver 0.4394 gr de KH₂PO₄ (Fosfato de Potasio, patrón primario seco) y aforar a 1 lt con H₂O destilada.

5. *Soluciones patrón de 50 mg/l de Cu, Zn, Mn, Fe:* Del patrón certificado de 1000 mg/l para Absorción Atómica de cada uno de los elementos, pipetear 5 ml y aforar a 100 ml con H₂O destilada.
6. *Solución patrón de 100 mg/l de K:* Del patrón certificado de 1000 mg/l para Absorción Atómica, pipetear 5 ml y aforar a 50 ml con H₂O destilada.

Procedimiento:

Extracción:

1. Medir por volumen 2.5 ml de la muestra de suelo, secada al aire y tamizada por malla 2 mm.
2. Adicionar 25 ml del Reactivo Olsen Modificado y agitar por 10 min en el agitador vertical a baja velocidad (aproximadamente a 400 rpm). Después de pasados los 10 min de agitación, filtrar utilizando papel filtro Whatman #2 o equivalente.
3. Guardar el filtrado para determinación de Cu, Zn, Mn, Fe, K, P.

Determinación de Cu, Zn, Mn, Fe y K por Espectroscopía de Absorción Atómica:

1. Del filtrado obtenido (3) se lee directamente la concentración por Absorción Atómica de los elementos Cu, Zn, Mn, Fe. Preparar curvas de calibración con las siguientes concentraciones (Las curvas de calibración deben prepararse en reactivo Olsen):
 - Cu: 1.00, 2.00, 4.00 mg/l
 - Zn: 0.25, 0.50, 1.00 mg/l
 - Mn: 0.50, 1.00, 2.00 mg/l
 - Fe: 1.00, 2.00, 4.00 mg/l
2. Después de leer elementos menores, se hace una dilución 1:10 en H₂O, utilizando el dispensador-diluidor adecuado.
3. Se prepara una curva de calibración de 5.00, 10.00, 20.00 mg/l de K, en reactivo Olsen. A esta curva se le hace la misma dilución que a las muestras (1:10), por lo cual la curva de lectura será 0.50, 1.00 y 2.00 mg/l. En caso de que la concentración de alguna muestra supere el patrón más alto se diluye la muestra con H₂O.

Determinación de fósforo por método colorimétrico:

1. Tomar del extracto en Olsen, 2 ml de muestra, se adiciona 10 ml del reactivo diluido de molibdato de amonio y 8 ml del reactivo diluido de cloruro estannoso.
2. Se prepara la curva de calibración con las siguientes concentraciones de P: 0.25, 0.50, 1.00, 2.00, 4.00 mg/l en reactivo Olsen, a partir de la solución patrón de 100 mg/l de P. Se desarrolla color igual que para las muestras.
3. Se lee la Absorbancia en colorímetro a 660 nm después de 7 min. El color es estable entre 7 min y 20 min.

Cálculos:Fósforo:

Preparar una curva de calibración de mg/l de P contra valores de Absorbancia y leer directamente los valores de concentración de P en los extractos. Calcular el valor de mg/l de P en las muestras considerando el factor de dilución de 2.5:25 (10).

Elementos Menores:

Cu, Zn, Mn, Fe/mg/l = mg/l *fd

mg/l = valores obtenidos de la lectura del equipo

fd = factor de dilución aplicado, en caso que todos los elementos se hayan leído directamente del extracto el fd es = 10.

Potasio:

K/ cmol/litro = mg/l * fd/39

mg/l = valores obtenidos de la lectura del equipo

fd = factor de dilución aplicado

39 = peso equivalente del K

Extracción con KCl 1 N, relación 2.5:25, suelo:solución

Reactivos:

1. *Cloruro de Potasio 1N*: Disolver 74.56 gr de KCl en H₂O destilada y aforar 1 lt.
2. *Oxido de Lantano (La 1%, La₂O₃)*: Pesar 11.7 gr del reactivo Oxido de Lantano y humedecer con aproximadamente 50 ml de H₂O destilada, adicionar 50 ml de HCl concentrado y disolver. (Peligro: debe utilizar equipo de protección personal completo y capilla de extracción). Luego se afora a 1 lt con H₂O destilada.
3. *Solución patrón de Ca de 100, 50 y 25 mg/l*: Del patrón certificado de 1000 mg/l de Ca para Absorción Atómica, pipetear respectivamente 5 ml, 2.5 ml y 1.25 ml y aforar en balones de 50 ml con la solución de KCl 1N.
4. *Solución patrón de Mg de 2.50, 6.25 y 12.50 mg/l*: Del patrón certificado de 1000 mg/l de Mg para Absorción Atómica, pipetear respectivamente 0.25 ml, 0.625 ml y 1.25 ml y aforar en balones de 100 ml con la solución de KCl 1N.

Procedimiento

Extracción:

1. Medir por volumen 2.5 ml de la muestra de suelo, secado al aire y tamizado por malla 2 mm.
2. Adicionar 25 ml del reactivo KCl 1N y agitar por 10 minutos en el agitador vertical a velocidad baja (aproximadamente a 400 rpm). Pasados los 10 minutos se filtra por papel filtro Whattman #2 o equivalente.
3. Guardar el filtrado para determinación de Ca, Mg y Acidez extraíble.

Determinación de Calcio y Magnesio por Espectroscopía de Absorción Atómica:

1. Tomar del extracto de KCl con ayuda del dispensador-diluidor 1:25, 1 ml del extracto, adicionar 9 ml de H₂O destilada y 15 ml del reactivo Oxido de Lantano.
2. Se prepara una curva de calibración de 1.00, 2.00 y 4.00 mg/l de Ca y 0.10, 0.25 y 0.50 mg/l de Mg, a partir de los patrones concentrados preparados en KCl 1 N, y realizando la misma dilución con el dispensador que a las muestras. En caso de que la concentración de alguna muestra supere el patrón más alto se diluye la muestra con La₂O₃.

Análisis de Acidez Extraíble:

1. Tomar del extracto de KCl 1N, una alícuota de 10 ml (esto debe hacerse antes de tomar la alícuota para análisis de Ca y Mg) , se adiciona 10 ml de H₂O destilada y 2 gotas de indicador de fenolftaleína.
2. Titular con solución estandarizada de NaOH 0.01 N, hasta que el color vire de incoloro a rosa pálido y permanezca por al menos 15 seg.

Cálculos:

$$\text{Ca/ cmol/litro} = \text{mg/l} * \text{fd}/20$$

$$\text{mg/l} = \text{lectura del equipo}$$

$$\text{fd} = \text{factor de dilución aplicado}$$

$$20 = \text{peso equivalente del Ca}$$

$$\text{Mg/ cmol/litro} = \text{mg/l} * \text{fd}/12$$

$$\text{Mg} = \text{lectura del equipo}$$

$$\text{fd} = \text{factor de dilución aplicado}$$

$$12 = \text{peso equivalente del Mg}$$

Acidez Extraíble:

$$\text{cmol/l} = \text{ml NaOH} * \text{N} * 100$$

$$\text{N} = \text{Normalidad del NaOH}$$

Determinación de pH en agua.Procedimiento

1. Medir por volumen 10 ml de la muestra de suelo, secado al aire y tamizado por malla de 2 mm.

2. Adicionar 25 ml de agua destilada y agitar por 5 min en el agitador vertical a velocidad baja (aproximadamente a 400 rpm).
3. Dejar en reposo durante 20 min, luego agitar nuevamente por 2 min.
4. Finalmente medir el pH, en un potenciómetro, mientras se agita la muestra.

Bibliografía:

1. Diaz-Romeu, R. y Hunter A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos, tejido vegetal e investigación en invernadero. CATIE, Turrialba, Costa Rica, 68 p.
2. Olsen, S.R.y Sommers, L.E. 1982. Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 2a. Edición. AASA. Madison, Wisconsin. pp. 403-430.



Laura Sáenz Dominguez
Estudiante



Dr. Guillaume Xavier Rousseau
Asesor



Lic. Jorge Mario Vargas
Revisor



Dr. Sergio M. Elgar
Director de Escuela



Dr. Oscar Manuel Cobar Pinto
Decano Facultad