

INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN ALGUNOS AGROECOSISTEMAS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA

Siavosh Sadeghian, Alveiro Salamanca, Diego A. Cardona y Edgar Hincapié

*Centro Nacional de Investigaciones de Café – Cenicafé, Colombia. Correo electrónico:
Siavosh.Sadeghian@cafedecolombia.com*

INTRODUCCION

La zona cafetera colombiana, representada aproximadamente en 3'600.000 hectáreas, se caracteriza por presentar una gran diversidad en sus condiciones medioambientales, las cuales hacen que los sistemas de uso y manejo del suelo que allí se desarrollan sean diferentes, aun en una misma región. Las principales actividades, café y ganadería, representan alrededor de 870.000 y 1'230.000 hectáreas, equivalentes al 24 y 34% de la cobertura total, respectivamente. En cuanto al área destinada al café, actualmente cerca del 84% se encuentra bajo sistemas tecnificados y el restante 16% corresponde a cafetales tradicionales (FNC, 2007). En general, en el sistema tradicional prevalecen las variedades Típica y Caturra, las cuales se establecen sin trazo y con una población inferior a 2.500 plantas por hectárea bajo sombrío no regulado. En el sistema tecnificado se siembran con trazo las variedades Caturra, Colombia y Castillo en densidades superiores a 2.500 plantas por hectárea (en su mayoría entre 5000 y 10000), principalmente al sol (47%), aunque también se establecen bajo semisombra (21,6%) o con sombrío denso (16%).

De acuerdo con el material de origen, los suelos de la zona cafetera en su mayoría (41 %) son provenientes de cenizas volcánicas. En menor proporción se encuentran los suelos de origen ígneo (26,6 %), sedimentario (19,7 %) y metamórfico (12,8 %). Con base en esta distribución, se sugiere el establecimiento de plantaciones con altas densidades de siembra, a libre exposición solar en los suelos volcánicos, mientras que para aquellos derivados de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que presentan limitaciones físicas, se sugiere el uso de sombrío (Gómez *et al.*, 2000).

Además del cultivo de café y de pastos, la zona cafetera colombiana cuenta con una considerable diversidad de sistemas de uso y manejo del suelo, que pueden afectar sus propiedades físicas, químicas y biológicas, de allí el interés en definir, cuantificar, y monitorear la calidad de este recurso, como una herramienta para evaluar el impacto que ocasionan sobre la funcionalidad del suelo o la sostenibilidad del sistema.

Para evaluar la calidad del suelo en función del tipo de suelo, sistema de uso y manejo, se analizan propiedades físicas, químicas y biológicas; entre ellas: pH, contenido de materia orgánica y de nutrientes, densidad aparente, textura, porosidad y distribución de poros, estabilidad estructural, población y actividad microbiana, además de las interacciones que pueden ocurrir entre estas propiedades. Por medio de relaciones funcionales de estas propiedades se construyen modelos o funciones de pedotransferencia, los cuales representan de manera mas completa los fenómenos que ocurren cuando se alteran las condiciones iniciales del medio, y por lo tanto, se utilizan como indicadores de sostenibilidad.

En el siguiente artículo se tratan de manera resumida los resultados de cuatro trabajos de investigación dirigidos hacia la evaluación del efecto de diferentes sistemas de uso y manejo sobre las características del suelo, tomados como indicadores de sostenibilidad, en la zona cafetera de Colombia.

ESTUDIO I

MONITOREO DEL SUELO EN AGROECOSISTEMAS DEL DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO

Durante los años de 1992 y 1996 se eliminaron cerca de 14.000 ha de café en el departamento del Quindío, como consecuencia de los bajos precios internacionales del grano y la incidencia de la broca (*Hypotenemus hampei*). Cerca del 50% del área en mención fue sembrado con el pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*), y manejado de manera intensiva en potreros rotacionales para la producción de leche o carne; el área restante se dedicó a cultivos de cítricos y yuca entre otros. Con el fin de evaluar el efecto de los sistemas de uso y manejo, y determinar el impacto de la transformación de los cafetales en otros sistemas, en el segundo semestre de 1997 se realizaron monitoreos de las propiedades del suelo en la zona cafetera del departamento del Quindío, abarcando dos de las unidades cartográficas más representativas (Consociación Armenia – *Typic Apludands*, y Asociación Tebaida–Alejandría – *Typic Dystropepts*, *Typic Hapludalfs*). Los sistemas evaluados fueron guaduales (asociación vegetal de *Guadua angustifolia*, importante en la protección de fuentes hídricas y utilizada en la agricultura y construcción), tomados como referencia, cafetales tradicionales y tecnificados, ganaderías extensivas, ganaderías intensivas con destino a ceba o producción de leche, cultivos de cítricos y transitorios (en su mayoría yuca). En toda el área de estudio fueron ubicadas 16 zonas de muestreo, y en cada una se seleccionaron los 8 agroecosistemas, procurando la mayor cercanía entre ellos. En total se colectaron muestras en 111 sitios en representación de 51 veredas de los municipios de Armenia, Quimbaya, Montenegro, Circasia, Finlandia, La Tebaida y Calarcá. Se tomaron muestras sin disturbar con barreno de núcleo (tres por sitio) y muestras disturbadas a 5 cm, y se determinó la resistencia a la penetración de 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm de profundidad. Se evaluaron propiedades físicas, químicas y biológicas.

Tendencias por unidades de suelo

Se registraron diferencias en las propiedades de los suelos entre las dos unidades. La Asociación Tebaida – Alejandría se caracterizó por presentar menores valores de materia orgánica (MO), abundancia relativa y diversidad de organismos, porosidad, estabilidad estructural, contenido de arenas, CIC y niveles de Al, Cu y B (**Tabla 1**).

El mayor contenido de MO en la Consociación Armenia, se reflejó en una mayor presencia y diversidad de organismos, menores densidades aparente y real, así como una mayor estabilidad de agregados. Sin embargo, el tamaño de los microagregados (distribución de agregados en seco), estuvo más influenciado por el contenido de arcillas que por la MO en la Asociación Tebaida – Alejandría. Este fenómeno no coincide en su totalidad con investigaciones que refieren a la MO y a las arcillas como agentes cementantes o agregantes. Rivera (1999), encontró una correlación positiva y significativa entre el contenido de MO en 5 unidades de suelos de la zona cafetera y el tamaño de los agregados, y determinó que la erodabilidad se incrementa cuando disminuyen los valores de estas dos características.

Tendencias por agroecosistemas

Guaduales. Exhibieron los promedios más elevados de actividad microbiana–CO₂, MO, diversidad de meso y macroorganismos, estabilidad estructural, porosidad total, conductividad hidráulica, humedad gravimétrica, CIC y los niveles de Ca y Mg; en contraposición a lo anterior, la compactación, en términos de densidad aparente y resistencia a la penetración, fue menor frente a los demás sistemas.

Cafetales tradicionales. Su comportamiento, a nivel general, se asemejó a los guaduales. Se obtuvieron los valores más elevados de abundancia relativa de organismos y contenidos de P, B y Cu, estos últimos como consecuencia de la aplicación de fertilizantes y fungicidas.

Tabla 1. Valores promedios para las variables evaluadas.

| | AM (mg g ⁻¹) | NO — (No.) — | DO — | DA (g cm ⁻³) | MO — (%) — | PT — | DIA — (mm) — | EA — | ARE — (%) — | HUM — | CH (cm h ⁻¹) | R10 — (kg cm ⁻²) — | R20 — |
|------------------------|-----------------------------|-----------------|---------|-----------------------------|---------------|---------|-----------------|---------|----------------|----------|-----------------------------|-----------------------------------|----------|
| UNIDAD DE SUELO | | | | | | | | | | | | | |
| C. Armenia | 175 a | 32 a | 5,0 a | 0,91 b | 9,2 a | 63 a | 3,4 b | 2,7 a | 62 a | 27 a | 24 b | 2,1 a | 2,6 a |
| A. Tebaida–Alejandría | 171 a | 22 b | 3,0 b | 1,10 a | 4,7 b | 57 b | 4,2 a | 2,0 b | 54 b | 27 a | 27 a | 2,0 a | 2,4 a |
| SISTEMA | | | | | | | | | | | | | |
| Guadua | 270 a | 37 ab | 7,0 a | 0,69 e | 11,2 a | 70 a | 3,7 ab | 3,0 a | 63 a | 35 a | 51 a | 1,3 d | 1,4 d |
| Café Tradicional | 208 b | 47 a | 6,5 a | 0,82 d | 9,5 ab | 67 b | 4,1 a | 2,6 abc | 61 ab | 31 a | 31 b | 1,2 d | 1,8 c |
| Café Tecnificado | 137 cd | 44 a | 5 bc | 0,98 c | 6,6 cd | 60 c | 3,9 ab | 2,4 bc | 58 ab | 25 b | 20 b | 1,7 cd | 2,2 c |
| Ganadería Extensiva | 190 bc | 10 b | 2,8 d | 1,00 bc | 7,8 bc | 59 cd | 3,3 bc | 2,8 ab | 61 ab | 27 b | 18 c | 2,6 b | 3,4 a |
| Ganadería Leche | 174 bc | 18 ab | 3,4 cd | 1,05 abc | 8,0 bc | 58 cd | 3,8 ab | 2,5 bc | 58 ab | 26 b | 8 c | 2,7 b | 3,0 a |
| Ganadería Ceba | 193 bc | 26 ab | 3,9 cd | 1,09 ab | 7,4 cd | 56 d | 3,7 ab | 2,5 bc | 60 ab | 25 b | 8 c | 3,3 a | 3,4 a |
| Cultivos Transitorios | 103 d | 10 b | 4,4 cd | 1,00 bc | 7,0 cd | 59 c | 2,9 c | 2,3 c | 61 ab | 21 ab | 14 c | 1,5 cd | 2,7 b |
| Cítricos | 117 d | 35 ab | 3,7 cd | 1,10 a | 5,4 d | 56 d | 3,4 abc | 2,3 bc | 56 b | 20 c | 13 c | 2,2 bc | 2,9 b |
| PROMEDIO | 174 | 28,38 | 4,59 | 0,97 | 7,86 | 61 | 3,6 | 2,6 | 60 | 27 | 20 | 2,1 | 2,6 |
| CV (%) | 34,4 | 126,3 | 49,1 | 12,6 | 32,0 | 7,4 | 20,9 | 21,7 | 10,1 | 20,5 | 54,4 | 36,1 | 20,0 |

Tabla 1. Cont. Valores promedios para las variables evaluadas.

| | pH | Ca | Mg | K | Al | CIC | P | Cu | Zn | B | |
|------------------------|--------|---------------------------------------|-------|---------|---------|---------|------------------------|--------|-------|---------|--|
| | | (cmol _c kg ⁻¹) | | | | | (mg kg ⁻¹) | | | | |
| UNIDAD DE SUELO | | | | | | | | | | | |
| C. Armenia | 5,5 a | 4,9 a | 1,2 b | 0,6 b | 0,2 a | 17,6 a | 42 a | 12 a | 9 a | 0,26 a | |
| A. Tebaida–Alejandría | 5,6 a | 5,1 a | 1,5 a | 0,8 a | 0,1 b | 13,5 b | 36 a | 6 b | 9 a | 0,16 b | |
| SISTEMA | | | | | | | | | | | |
| Guadua | 5,6 ab | 6,5 a | 1,8 a | 0,6 cd | 0,17 ab | 17,9 ab | 26 ab | 3 d | 9 ab | 0,18 bc | |
| Café Tradicional | 5,4 ab | 6,0 ab | 1,3 b | 0,5 d | 0,28 ab | 18,2 ab | 48 ab | 21 a | 9 ab | 0,33 a | |
| Café Tecnificado | 5,3 b | 3,7 c | 1,0 b | 0,6 cd | 0,36 a | 15,2 c | 46 ab | 13 abc | 6 b | 0,28 ab | |
| Ganadería Extensiva | 5,6 ab | 4,0 c | 1,2 b | 0,6 cd | 0,07 b | 15,2 c | 18 b | 3 d | 8 ab | 0,14 c | |
| Ganadería Leche | 5,7 a | 4,8 abc | 1,4 b | 0,8 ab | 0,08 b | 15,8 c | 34 ab | 10 bcd | 13 a | 0,19 bc | |
| Ganadería Ceba | 5,6 ab | 4,5 bc | 1,3 b | 0,9 a | 0,11 b | 15,5 c | 47 ab | 8 cd | 7 b | 0,21 bc | |
| Cultivos Transitorios | 5,5 ab | 4,7 abc | 1,0 b | 0,5 d | 0,11 b | 16,1 c | 41 ab | 9 bcd | 5 b | 0,26 ab | |
| Cítricos | 5,5 ab | 5,1 abc | 1,0 b | 0,8 abc | 0,08 b | 14,5 c | 57 a | 17 ab | 19 a | 0,25 ab | |
| PROMEDIO | 5,5 | 4,9 | 1,3 | 0,7 | 0,16 | 16,1 | 40 | 11 | 10 | 0,23 | |
| CV (%) | 8,2 | 42,2 | 39,1 | 44,5 | 170,0 | 15,3 | 100,2 | 97,8 | 149,0 | 50,2 | |

Letras no comunes entre fases por profundidad indican diferencias estadísticas según prueba Duncan al 5%.

AM: Actividad microbiana–CO₂, NO y DO: número y diversidad de meso y macro organismos respectivamente, MO: materia orgánica, DA: densidad aparente, PT: porosidad total, DIA: distribución de agregados, EA: estabilidad de agregados, ARE: arenas, HUM: humedad gravimétrica, CH: conductividad hidráulica, R10 y R20: resistencia a la penetración de 0 a 10 cm y de 10 a 20 cm respectivamente.

Cafetales tecnificados. Se caracterizaron por su mayor acidez, asociada a bajos contenidos de Ca y Mg, y altos valores de Al intercambiable, pero sin acercarse a niveles considerados tóxicos. En comparación con los sistemas tradicionales de manejo, sus contenidos de MO y diversidad de organismos fueron menores, mientras que la densidad aparente registró un mayor promedio.

Ganaderías intensivas. Los mayores impactos se relacionaron con una disminución de la biodiversidad, un incremento en la compactación por pisoteo de animales y la subsecuente reducción del flujo de agua y del volumen de los espacios porosos.

Cultivos de cítricos. El cambio en el uso de la tierra de cafetales a cítricos, afectó negativamente las propiedades biológicas y físicas (porosidad, conductividad hidráulica, humedad, textura), lo cual podría relacionarse con la ausencia de cobertura vegetal en el período comprendido entre el trasplante de los árboles y el tiempo en que estos alcanzan su pleno desarrollo. De igual manera, se incrementó el contenido de Zn, a causa de las aplicaciones de fungicidas.

Cultivos transitorios. El reemplazo de cafetales por cultivos semestrales, principalmente yuca, redujo notablemente la actividad de los microorganismos y el número de organismos, con valores promedio 4 veces inferiores que en los cafetales. Los mayores valores de resistencia a la penetración entre los 10 y 20 cm se relacionaron con la compactación en la capa subsuperficial, ocasionada por la realización de las labores de preparación del terreno.

La presencia, diversidad y actividad de organismos, reflejaron la influencia que ejercen las condiciones medioambientales y de manejo sobre los sistemas estudiados. Allí tienen gran importancia la disponibilidad de alimentos (MO), la variabilidad en la composición de estos en términos de la riqueza florística y los demás factores edáficos y culturales. Así mismo, en los ambientes con mayor complejidad biológica y menor intervención antrópica, se crean condiciones que favorecen el mejoramiento de las características del suelo como resultado de la acción de los organismos presentes. Similares tendencias han sido reportadas por diversos autores; Sadeghian y Madriñan (2001), registraron una mayor actividad biológica – CO₂ en suelos de un bosque secundario comparado con cultivos vecinos de caña, y una actividad aun más baja cuando la caña se sometía a la quema antes de la cosecha. Bajo condiciones del Valle del Cauca, Patiño (1995), encontró una disminución considerable de la diversidad y abundancia relativa de la fauna artrópoda del suelo en sistemas poco complejos (monocultivos), al compararlos frente a otros de mayor complejidad. Vera (1992), también registró cambios en la abundancia, composición y diversidad de las comunidades de micro artrópodos cuando se modificaron las condiciones ecológicas del suelo con la deforestación y el establecimiento de pastizales.

Con referencia a la ganadería, la degradación del suelo por compactación ha sido considerada un tema de discusión durante los últimos años, debido a la magnitud que representa en el ámbito mundial. Para este estudio, a pesar de detectar aumentos significativos en la compactación por pisoteo de animales, los valores encontrados no fueron tan elevados, debido al material de origen volcánico que constituye estos suelos (Andisoles, con bajas densidades aparente y real), por la clase textural predominante (arenosa) y alta MO presente. Así lo reportan también Montenegro y Malagón (1990), quienes indican que los efectos negativos de la compactación en términos de reducción del rendimiento y pérdida de ingresos, tienen lugar en la mayoría de los suelos, pero, es más probable que ocurra en suelos arcillosos y francos que en suelos arenosos u orgánicos. Los principales efectos que se relacionaron con el pisoteo de animales en este estudio fueron la reducción en la porosidad drenable (macroporos) y la conductividad hidráulica, aspectos ampliamente referenciados en otros trabajos (Lal, 1996; Pinzón y Amézquita, 1991; Sánchez *et al.*, 1989). La magnitud de este hecho fue mayor al incrementar el número de animales por unidad de área; corroborando los resultados encontrados por Sánchez *et al.* (1989), al evaluar el efecto de diferentes niveles de pisoteo (0; 3,3; 6,6 y 8,3 animales/ha/año) sobre las características del suelo.

Respecto a las características químicas, el menor valor de pH detectado en cafetales de la zona evaluada, indicó procesos parciales de acidificación, aunque estas tendencias pueden considerarse temporales, pues

sufrieron modificaciones al cambiar el uso del suelo. Resultados similares han sido reportados por Sadeghian (2009) y Pavan *et al.* (1999), quienes reportan aumentos en la acidez y pérdida de bases intercambiables, a causa de la utilización de fertilizantes nitrogenados. En este sentido, el descenso del pH en suelos cultivados con café, se justifica como resultado de un excedente de iones H^+ que se genera en la nitrificación de amonio, provenientes de la fertilización nitrogenada, y que no es neutralizado por la liberación de iones OH^- en el proceso de absorción de NO_3^- por las raíces de las plantas.

Otro elemento que reflejó los efectos de las prácticas culturales en café es el Cu. Los niveles de este elemento superaron a los detectados en suelos de otros sistemas evaluados, debido a la aplicación de fungicidas utilizados para el control de la roya (*Hemileia vastatrix*).

Los cambios químicos más importantes ocurridos en la transformación de sistemas cafeteros por ganaderos de modalidad intensiva, corresponden principalmente al aporte adicional de K y su relación frente a las demás bases, en especial el Mg. Funes (1975), atribuye estos incrementos de K básicamente a los aportes provenientes de la orina y las heces de los animales.

ESTUDIO II

EFFECTO DEL USO Y MANEJO SOBRE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE ALGUNOS SUELOS DE LA ZONA CAFETERA COLOMBIANA

Con el fin de estudiar el efecto del de uso y manejo sobre algunas propiedades físicas del suelo, en el año 2003 se tomaron muestras en cafetales tecnificados y tradicionales, potreros y bosques o guaduales, ubicados en ocho unidades cartográficas de la zona cafetera Colombiana. Se analizaron los primeros 40 cm del perfil, por ser el área donde se desarrolla el 95% del sistema radical del café, pero para efectos prácticos y de interpretación se presentan los resultados de las primeras dos profundidades cada 5 cm, donde el uso y manejo del suelo ejercieron su mayor impacto.

Como características indicadoras de la calidad del suelo para un buen crecimiento y desarrollo de raíces de los cultivos, se estudiaron la resistencia a la penetración, la densidad aparente y la distribución del tamaño de poros, mientras que como indicadoras del impacto cultural del manejo de los cultivos y la resistencia a la erosión, se analizaron la estabilidad de agregados y los contenidos de MO. A nivel general, estas propiedades funcionan como indicadores de posibles restricciones para el crecimiento radical de los cultivos (Tormena *et al.*, 2002).

Los resultados indicaron que estas propiedades están estrechamente relacionadas, por lo que un aumento o disminución en una de ellas, deriva cambios en las otras características. Con relación a los efectos que los sistemas de uso y manejo producen sobre las propiedades del suelo, como se observa en la Figura 1, en el cafetal tecnificado y el potrero, se registraron los mayores valores de densidad aparente y resistencia a la penetración, indicando que estos sistemas producen compactación del suelo en los primeros centímetros del perfil y por ende, disminución de la proporción de macroporos, la cual fue mayor en el potrero debido a la carga animal, pues mostró valores menores de 14% que según Tormena *et al.* (2002), empiezan a ser limitantes para los cultivos. Por otro lado, estas condiciones juegan un papel importante, ya que un aumento en la resistencia mecánica del suelo, puede restringir la absorción de agua y nutrientes por las raíces y por ende el crecimiento de las plantas (Clark *et al.*, 2003; Passioura, 2002); además, afectan negativamente la conductividad del agua y crean una mayor susceptibilidad a la erosión (Figura 1), donde estos sistemas presentan valores más bajos de estabilidad de agregados.

Entre el cafetal tradicional y el sistema poco intervenido (Bosque o guadual) se observaron comportamientos similares, debido principalmente a los aportes continuos de biomasa, reflejados por la presencia de mayores contenidos de materia orgánica. Gracias a sus efectos benéficos sobre el suelo, la MO es responsable del aumento de los macroporos y la estabilidad de agregados, de la reducción en los valores de resistencia a la penetración y densidad aparente, del mejoramiento de las condiciones de crecimiento de las raíces, y principalmente, de la disminución en la susceptibilidad del suelo a la erosión, proceso de degradación muy

común en la zona cafetera, dado que gran parte del área esta dominada por largas y fuertes pendientes. No obstante, se observa que los aportes de residuos orgánicos provenientes de los diferentes cultivos en la primera profundidad (0-5 cm), y en mayor proporción en el bosque o gradual, juegan un papel importante en la disminución de la densidad aparente y la resistencia a la penetración, así como en el aumento de la retención de humedad, la estabilidad de agregados y la porosidad total. Para la segunda profundidad (0-10 cm), los menores contenidos de MO invirtieron el comportamiento de las otras variables. Efectos similares son mencionados por Barrera (2003) y Burbano (2001) y también reportados por Sadeghian *et al.* (2001) en dos unidades de suelo de la zona cafetera colombiana.

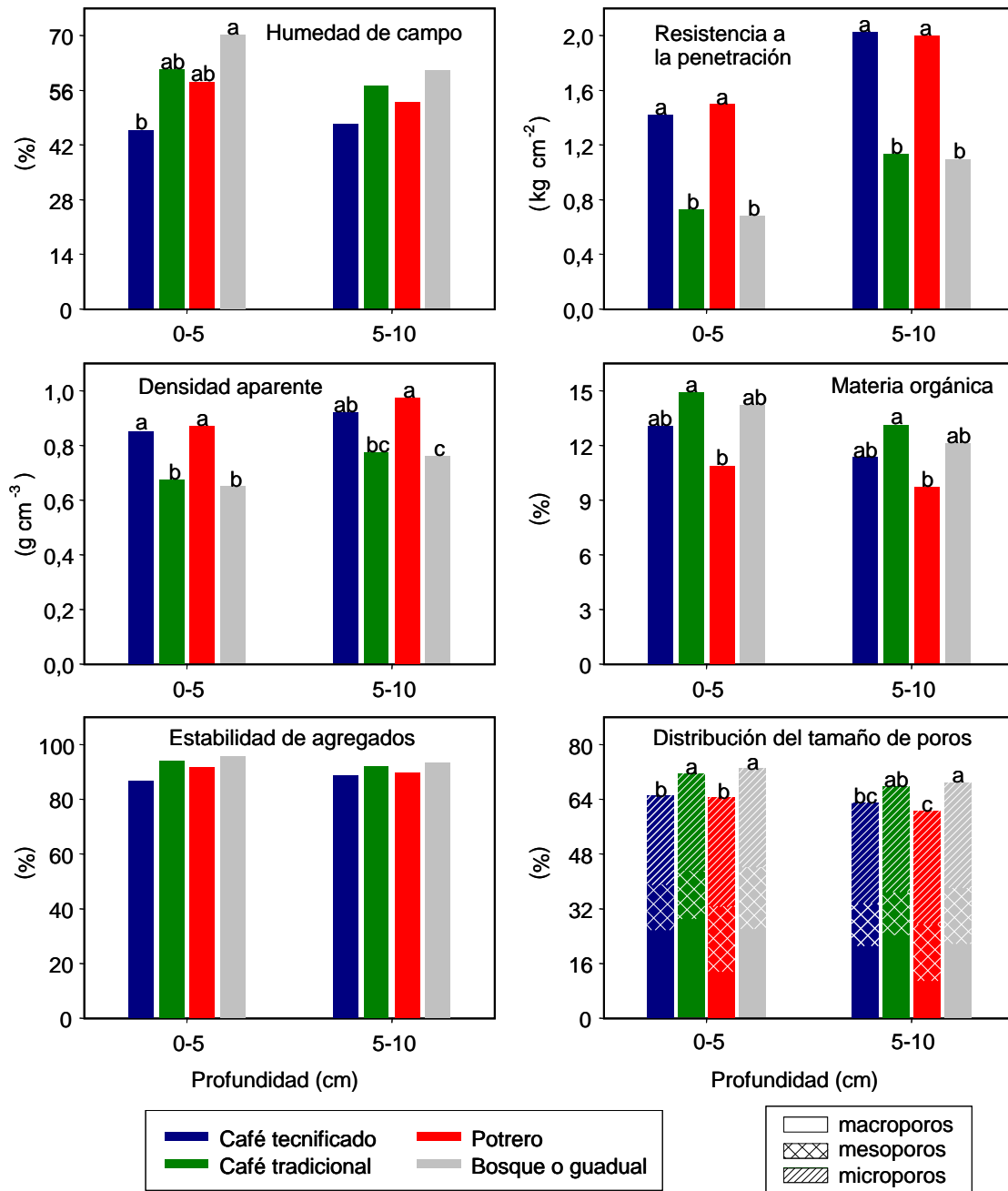


Figura 1. Variación de algunas propiedades físicas en dos profundidades y cuatro sistemas de uso y manejo del suelo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre agroecosistemas por profundidad (Tukey P<0,1).

ESTUDIO III

INDICADORES DE LA CALIDAD DEL SUELO EN CAFETALES CON Y SIN SOMBRÍO DE GUAMO (*Inga spp.*)

Cerca del 50% del área cultivada en café, bien sea de modalidad tecnificada o tradicional, cuenta con algún grado de sombra. Entre las ventajas que puede traer el uso de sombrío se encuentran: la reducción de la radiación solar que incide directamente sobre el cultivo, la regulación de las temperaturas extremas durante el día, la disminución de la evapotranspiración, la conservación de los suelos, la aminoración del efecto de los vientos fuertes, del granizo y de la sequía, así como el ciclaje de nutrientes (Beer *et al.*, 1998; Jaramillo, 2005).

A pesar de no disponer de una cifra exacta, se estima que en Colombia el mayor porcentaje de sombrío corresponde a las diferentes especies de guamo (*Inga spp.*), las cuales están extendidas en toda el área cafetera del país. Se ha encontrado que el efecto benéfico del guamo en la conservación y el mejoramiento de las propiedades del suelo se debe en buena medida a su aporte de biomasa; pues el retorno de material orgánico en cultivos de café con esta especie de sombrío (11,2 y 10,5 t ha⁻¹) es 2,5 veces superior que a plena exposición solar (4,6 y 4,2 t ha⁻¹) (Cardona y Sadeghian, 2005).

Con base en la importancia que reviste el tema, se planteó evaluar, como indicadores de la calidad, las propiedades de los suelos en cultivos de café con y sin sombrío de esta especie. Para ello se escogieron 8 unidades cartográficas de suelo representativas de la zona cafetera en siete departamentos de Colombia, donde se seleccionaron cafetales bajo los dos sistemas de manejo con el fin de tomar muestras disturbadas y sin disturbar en tres calicatas a las siguientes profundidades: 0–5, 5–10, 10–15, 15–20, 20–30 y 30–40 cm. Igualmente, se midieron la resistencia a la penetración y la temperatura en el campo; además de la actividad microbiana, la cual se evaluó *in situ* en dos de las localidades durante un año.

Al comparar los promedios obtenidos en las seis profundidades, se registraron diferencias estadísticas entre los dos agroecosistemas para ocho de las 33 propiedades evaluadas (**Tabla 2**).

Tabla 2. Comparación de los promedios generales de las características.

| Característica | Agroecosistema | | | |
|--|----------------|--------|---------|--------|
| | Sombra | | Sol | |
| | Media | CV (%) | Media | CV (%) |
| Porosidad total (%) | 66,03 a | 12,13 | 61,35 b | 13,35 |
| Densidad aparente (g cm ⁻³) | 0,83 b | 30,01 | 0,96 a | 27,70 |
| Humedad (%) | 55,46 a | 42,52 | 45,42 b | 47,28 |
| Temperatura (°C) | 20,65 b | 6,15 | 21,26 a | 5,46 |
| Resistencia penetración (kg cm ⁻²) | 1,69 b | 54,37 | 2,56 a | 39,72 |
| Azufre (mg kg ⁻¹) | 5,99 b | 80,72 | 9,44 a | 95,38 |
| Potasio (cmol _c kg ⁻¹) | 0,26 b | 87,42 | 0,38a | 81,62 |
| Sodio (cmol _c kg ⁻¹) | 0,028 a | 56,38 | 0,022 b | 48,50 |

Letras diferentes indican diferencias significativas entre agroecosistemas (D.M.S. P<0,05).

El efecto del uso y manejo del suelo fue más evidente en los primeros 10 cm de profundidad (Figura 2). Las principales diferencias entre los cafetales al sol y con sombra de guamo se encontraron para las propiedades físicas, básicamente aquellas influenciadas por la MO, la cual fue mayor en cafetales con sombrío en esta capa más superficial.

Los suelos de cafetales bajo sombra tuvieron menor densidad aparente y temperatura, y mayor porosidad total y humedad que aquellos cultivados a plena exposición, a la vez que exhibieron una menor compactación. Respecto a las propiedades químicas, existieron menos diferencias y se atribuyeron fundamentalmente al manejo agronómico realizado (principalmente la fertilización); en el caso del sodio, a pesar de mostrar diferencias,

estas no son relevantes, ya que los niveles de este elemento no fueron altos, como es de esperarse en zona cafetera. La mayor proporción de la varianza total hallada (30,61%) fue relacionada con la MO, porosidad, humedad, densidades real y aparente, nitrógeno total, nitratos y CIC. Este grupo de propiedades igualmente fueron afectadas por la MO, por lo que dicha característica se consideró como la principal responsable de la variación total encontrada.

La actividad de los microorganismos, evaluada en dos localidades, fue similar entre los dos tipos de cafetales (Figura 3), comportamiento que puede deberse a la mayor temperatura del suelo cultivado a libre exposición solar; pero presentó diferencias entre localidades, siendo menor en Albán (Valle), sitio con restricciones en la disponibilidad de humedad. En Albán, donde normalmente se presenta un déficit hídrico, se encontró alta correlación entre la precipitación y la actividad microbiana, sobretodo en el cultivo al sol ($r=0,76^*$), para sombrío este valor fue ligeramente menor ($r=0,61$). En Chinchiná por el contrario no se halló relación entre las dos variables ($r=0,04$ al sol y $-0,44$ bajo sombra).

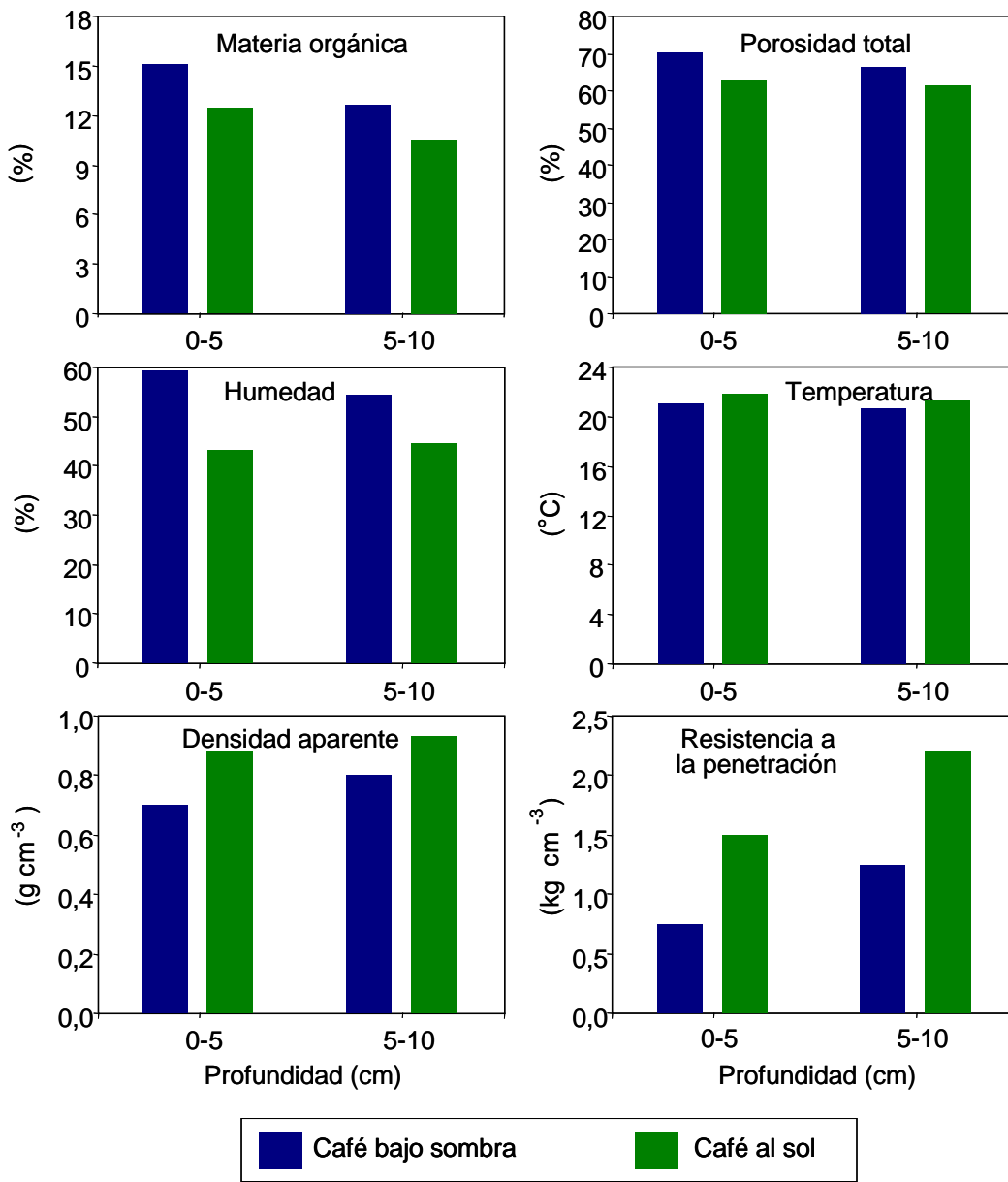


Figura 2. Comportamiento de algunas variables en los primeros 10 cm de ambos agroecosistemas.

Con base en los resultados obtenidos en este estudio se pudo concluir que las propiedades físicas para las cuales se halló diferencia entre café bajo sombra y a libre exposición, pueden emplearse como indicadores de la salud del suelo para las condiciones dadas, específicamente como indicadores de cambio. Las evaluaciones de este tipo deben enfocarse en la capa superficial del suelo (0 a 10 cm), pues es allí en donde se nota el efecto que sobre el mismo tiene el manejo que se realice. También, debe contemplarse el estudio de la materia orgánica, debido al alto grado de incidencia que tiene en la variación y el comportamiento de otras propiedades.

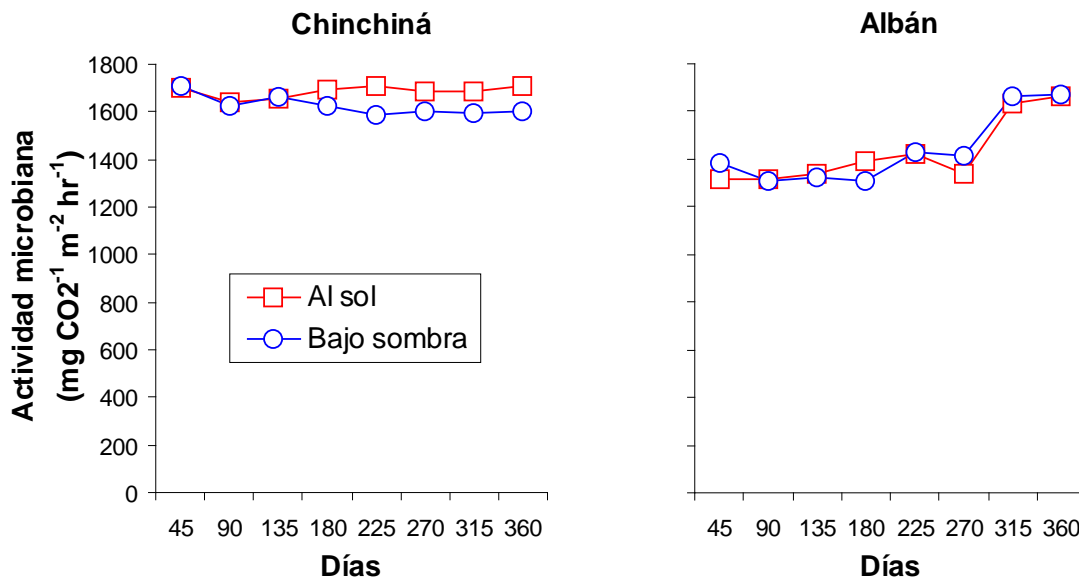


Figura 3. Actividad microbiana en dos localidades de la zona cafetera.

ESTUDIO IV

LA EROSION HIDRICA Y SU RELACION CON LAS PROPIEDADES FISICAS Y QUIMICAS DEL SUELO Y CON LA PRODUCCION DEL CULTIVO DE CAFE

La erosión acelerada del suelo, como resultado de la actividad agrícola, es uno de los problemas más serios a nivel mundial. Su magnitud se acentúa cada día, causando grandes pérdidas económicas debido a la disminución en la capacidad productiva de los suelos (Lal, 1984). En 1987, se estimaba que cerca del 88 % de los suelos de la zona andina, donde se encuentra la región cafetera de Colombia, estaban afectados por erosión hídrica, debido principalmente al uso de prácticas inadecuadas. El anterior panorama ha conducido al desgaste y empobrecimiento de la capa orgánica del suelo, que provee las mejores condiciones para el desarrollo de los cultivos, e implica que estos suelos han perdido parte de su potencial productivo original, el cual puede estar enmascarado por el uso de variedades mejoradas altamente productivas, aplicación alta de fertilizantes químicos y materia orgánica (Lal, 1985), altas densidades de siembra, uso de pesticidas y además por falta de información específica que permita demostrar y valorar dicho efecto sobre la producción de los cultivos (El-Swaify. 1993).

Estudios llevados a cabo por Cenicafé (Suárez de C. y Rodríguez, 1962) muestran grandes pérdidas del suelo (entre 14,7 a 429,6 t ha⁻¹ año⁻¹) cuando se ponen en práctica alternativas inadecuadas de manejo, como es el empleo de azadón para las desyerbas. Dado el alto riesgo que tienen los suelos de la zona cafetera a la erosión hídrica (Ramírez, 2006), se realizó una investigación con el objetivo de conocer el efecto de este proceso sobre la producción del cultivo de café y las propiedades físicas y químicas del suelo. El experimento se llevó a cabo en la subestación experimental de Cenicafé, El Rosario, localizada en el municipio de Venecia – Antioquia, en un lote con diferentes grados de erosión. Se identificaron y agruparon cuatro fases de erosión del suelo (I, II,

III y IV), desde muy leve o nula (fase I), hasta erosión severa (fase IV). Posteriormente se estableció un cultivo de café variedad Colombia y se evaluaron algunas propiedades físicas y químicas del suelo a tres profundidades y se registró la producción de café durante tres cosechas.

Contrario a lo que se reporta en la literatura, se encontró mayor contenido de arenas y menor contenido de arcillas cuando se pasa de un grado de erosión ligera a severa (**Tabla 3**), posiblemente por el material de origen de estos suelos y por el predominio de arenas finas, las cuales pueden ser fácilmente arrastradas por la escorrentía. La reducción en el contenido de arenas hace que se incremente la proporción de arcillas en el suelo. La densidad aparente fue mayor a medida que aumentó el grado de erosión; sin embargo, dentro de una misma fase no se presentaron cambios en esta variable con la profundidad. La distribución de agregados por tamaño en seco (MWD) presentó un comportamiento similar a la densidad aparente, debido principalmente a la consistencia dura en seco, lo cual hace que bajo estas circunstancias predominen terrones de tamaño grande (> 6 mm). La estabilidad estructural, determinada según el diámetro ponderado medio (DPM) decreció con el aumento de la erosión; en los suelos con erosión ligera el DPM presentó valores superiores a 3, calificado como estable; mientras que en suelos con erosión severa los promedios estuvieron cercanos a 1,5; es decir ligeramente estables; esta variación puede estar asociada con los altos contenidos de MO y de arcillas en las fases menos erosionadas. Es ampliamente conocido que la estabilidad estructural, es una propiedad relacionada con el contenido de arcillas y de MO, pues los enlaces entre láminas de arcilla y el efecto cementante de hifas y raíces así como de secreciones producidas por la descomposición de microorganismos promovidos por la MO, aumentan la estabilidad de los agregados del suelo, haciéndolos más resistentes a la erosión.

El contenido de la MO y la CIC determinadas en las tres profundidades, se redujo conforme al aumento de la fase de erosión; al igual que con la profundidad del suelo. El pH se mantuvo constante para todas las fases de erosión, mientras que el contenido de aluminio fue ligeramente menor en los suelos menos erosionados. El carácter ácido de estos suelos, puede ser atribuido a factores propios del suelo como el material parental (areniscas y arcillolitas) y la alta pluviosidad de la región.

Tabla 3. Valores promedio por fase de erosión en cada profundidad del suelo para las variables físicas evaluadas.

| Fase | A | Ar | RP | DA | MWD | DPM | Ks |
|----------------------------------|----------|----------|--------|-----------------------|---------|---------|-----------------------|
| | (%) | (%) | (Mpa) | (g cm ⁻³) | (mm) | | (cm s ⁻¹) |
| 0 a 5 cm de profundidad | | | | | | | |
| I | 32,88 a | 45,00 a | 0,53 a | 0,85 a | 4,10 a | 3,23 a | 0,0013 a |
| II | 33,70 a | 44,40 a | 0,53 a | 0,95 b | 4,57 ab | 2,89 ab | 0,0020 a |
| III | 40,09 a | 38,09 a | 0,53 a | 1,05 c | 4,81 b | 2,56 b | 0,0015 a |
| IV | 39,36 a | 37,82 a | 0,47 a | 1,07 c | 5,08 b | 2,44 b | 0,0029 a |
| 5 a 10 cm de profundidad | | | | | | | |
| I | 30,25 a | 46,88 a | 0,66 a | 0,81 a | 3,31 a | 2,95 a | 0,0034 a |
| II | 33,90 ab | 45,20 ab | 0,57 a | 0,91 a | 3,74 ab | 2,67 ab | 0,0045 a |
| III | 39,82 b | 38,82 b | 0,64 a | 1,06 b | 4,14 bc | 2,22 bc | 0,0038 a |
| IV | 39,09 b | 38,55 b | 0,59 a | 1,12 b | 4,61 c | 1,97 c | 0,0022 a |
| 10 a 20 cm de profundidad | | | | | | | |
| I | 30,88 a | 47,38 a | 0,84 a | 0,80 a | 3,41 a | 2,83 a | 0,0039 a |
| II | 34,90 a | 45,00 ab | 0,66 a | 0,95 ab | 3,84 ab | 2,25 ab | 0,0057 a |
| III | 39,27 a | 39,45 ab | 0,78 a | 1,12 b | 4,46 b | 1,82 b | 0,0020 a |
| IV | 39,00 a | 38,18 b | 0,78 a | 1,12 b | 4,53 b | 1,60 b | 0,0027 a |

Letras no comunes entre fases por profundidad indican diferencias estadísticas según prueba Duncan al 5%. DA = Densidad aparente, DPM = Diámetro ponderado medio, MWD, Distribución de agregados en seco, RP = Resistencia a la penetración, Ks = Conductividad hidráulica saturada.

Tabla 4. Valores promedio por fase de erosión en cada profundidad del suelo para las variables químicas evaluadas.

| FASE | pH | MO % | CIC | cmol _c kg ⁻¹ | | | | mg kg ⁻¹ | | | | |
|----------------------------------|-------|---------|----------|------------------------------------|--------|---------|---------|---------------------|-----------|----------|--------|---------|
| | | | | K | Ca | Mg | Al | P | Fe | Mn | Cu | Zn |
| 0 a 5 cm de profundidad | | | | | | | | | | | | |
| I | 4,58a | 12,88 a | 26,00 a | 0,36 a | 3,68 a | 0,42 a | 4,00 c | 12,13 a | 378,13 b | 36,25 ab | 1,50 a | 3,50 a |
| II | 4,38a | 10,36 b | 28,20 a | 0,39 a | 1,91 a | 0,63 a | 8,39 a | 8,20 a | 721,70 a | 27,20 b | 1,50 a | 2,80 ab |
| III | 4,45a | 7,74 c | 21,09 b | 0,47 a | 2,76 a | 0,74 ab | 5,39 bc | 36,30 a | 506,45 ab | 62,82 ab | 2,00 a | 2,55 b |
| IV | 4,45a | 6,92 c | 22,36 b | 0,36 a | 2,31 a | 1,14 b | 6,61 ab | 18,91 a | 504,91 ab | 77,45 a | 2,00 a | 3,36 ab |
| 5 a 10 cm de profundidad | | | | | | | | | | | | |
| I | 4,53a | 11,88 a | 25,50 a | 0,19 a | 1,49 a | 0,21 a | 4,95 c | 11,63 a | 311,13 b | 22,00 a | 1,38 a | 3,25 a |
| II | 4,38a | 8,62 b | 26,40 a | 0,19 a | 0,85 a | 0,37 ab | 9,15 a | 4,00 a | 554,90 a | 15,20 a | 1,30 a | 2,20 a |
| III | 4,43a | 6,55 bc | 20,45 b | 0,28 a | 1,69 a | 0,49 ab | 6,59 bc | 21,55 a | 454,09 ab | 54,91 a | 1,91 a | 2,27 a |
| IV | 4,47a | 5,96 c | 21,64 b | 0,22 a | 1,49 a | 0,73 b | 7,89 ab | 12,55 a | 403,09 ab | 50,36 a | 1,91 a | 2,36 a |
| 10 a 20 cm de profundidad | | | | | | | | | | | | |
| I | 4,68a | 10,73 a | 24,13 a | 0,16 a | 1,63 a | 0,18 a | 4,41 b | 6,00 a | 245,63 b | 17,25 ab | 1,13 a | 3,50 a |
| II | 4,53a | 7,07 b | 21,90 ab | 0,14 a | 0,62 a | 0,29 a | 8,87 a | 2,20 a | 480,00 a | 12,00 b | 1,20 a | 1,40 b |
| III | 4,53a | 4,89 b | 18,36 bc | 0,19 a | 1,26 a | 0,41 ab | 6,90 a | 6,55 a | 350,55 b | 51,27 ab | 1,82 a | 1,73 b |
| IV | 4,55a | 4,80 b | 20,00 c | 0,17 a | 1,37 a | 0,66 b | 7,58 a | 5,27 a | 332,73 b | 56,45 a | 1,91 a | 2,27 b |

Letras no comunes entre fases por profundidad indican diferencias estadísticas según prueba Duncan al 5%.

El análisis de varianza mostró que bajo las condiciones del estudio, no existe efecto de las fases de erosión, ni del sistema de manejo sobre la producción de café pergamino seco (**Tabla 5**), debido posiblemente a que la capa superficial en algunas fases no está totalmente erosionada, a que las propiedades de la capa subsuperficial no presentan condiciones que limitan el crecimiento de las plantas y la producción del cultivo o en algunos casos los horizontes superficiales, presentan bajo contenido de bases debido a procesos de lixiviación por su alta tasa de infiltración de agua. Los efectos de la erosión hídrica, generalmente se manifiestan a largo plazo, esta puede ser otra razón por la cual no se encontró relación clara entre la erosión y la productividad del cultivo de café.

Tabla 8. Producción de café pergamino seco en kg por parcela de 4 plantas efectivas, por sistema de manejo de suelo y fase de erosión.

| Sistema de manejo | Fase de erosión | Cosecha 1 | C.V. | Cosecha 2 | C.V. | Cosecha 3 | C.V. |
|----------------------|-----------------|-----------|-------|-----------|-------|-----------|-------|
| Suelo con coberturas | I | 3,06 | 23,11 | 4,36 | 13,86 | 1,66 | 18,37 |
| | II | 3,28 | 12,15 | 3,72 | 25,30 | 2,62 | 25,10 |
| | III | 3,04 | 17,34 | 3,37 | 32,87 | 2,21 | 41,37 |
| | IV | 2,94 | 60,35 | 3,73 | 65,31 | 2,41 | 56,24 |
| Suelo desnudo | I | 2,95 | 34,81 | 4,05 | 13,98 | 2,01 | 17,11 |
| | II | 3,81 | 24,33 | 4,30 | 22,88 | 2,62 | 39,58 |
| | III | 3,59 | 26,97 | 4,08 | 21,25 | 1,64 | 38,21 |
| | IV | 3,94 | 40,89 | 4,37 | 47,44 | 2,33 | 57,07 |

Los resultados permiten concluir que en algunos suelos, el alto contenido de materia orgánica y de otros nutrientes, así como buenas condiciones físicas que favorecen los flujos de agua y aire en el suelo, no son garantía para obtener alta productividad de los cultivos, además existen otras variables que pueden ser determinantes de dicha productividad.

BIBLIOGRAFIA

- Barrera, L.L. 2003. El papel de la materia orgánica en el manejo integral de la fertilidad del suelo. *In*: TRIANA, M del P.; LORA S, R.; GÓMEZ, M.I.; PEÑALOZA, G. Eds. Manejo integral de la fertilidad del suelo. Bogotá, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p. 123–134.
- Beer, J.W.; Muschler, R.G.; Kass, D.; Somarriba, E. 1998. Shade management in coffee and cacao plantations. *Agroforestry Systems (Holanda)* 38:139-164.
- Burbano, H. 2001. Lo biorgánico en el manejo productivo del suelo. *In*: GARCÍA, A.; VALENZUELA, I. Eds. Manejo productivo de suelos para cultivos de alto rendimiento. Palmira, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. p. 109–128.
- Cardona C., D.A.; Sadeghian K., S. 2005. Ciclo de nutrientes y actividad microbiana en cafetales a libre exposición solar y con sombrero de /Inga/ spp. *Cenicafé (Colombia)* 56(2):127-141.
- Clark, L.J.; Whalley, W.R.; Barraclough, P.B. 2003. How do roots penetrate strong soil. *Plant and Soil* 255: 93–104.
- Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. 2007. Bogotá. Colombia. Sistema de Información Cafetera. Encuesta Nacional Cafetera SICA. Estadísticas Cafeteras. Informe Final. Bogotá (Colombia), FEDERACAFE.
- Funes, F. 1975. Efectos de la quema y el pastoreo en el mantenimiento de los pastizales tropicales. *Rev. Cubana Cienc. Agric.* 9: 395 – 412.
- Gómez G., L.; Caballero R., A.; Baldión R., J.V. 2000. Ecotopos cafeteros de Colombia: Zonificación Agroecológica. *In*: SIMPOSIO sobre Suelos de la Zona Cafetera Colombiana. Chinchiná, Julio 24-28.
- Jaramillo R., A. 2005. Clima andino y café en Colombia. Chinchiná, Cenicafé. 196 p.
- Lal, R.. R. 1985. Soil Erosion and its Relation to Productivity. *In*: Tropical Soils. Soil Erosion and Conservation. Soil Conservation Society of America. Ankeny. USA. p:237-247.
- Lal, R. 1996. Deforestation and land – use effects on soil degradation and rehabilitation in western Nigeria. I. Soil physical and hydrological properties. *Land degradation & development* 7: 19 – 45.
- Montenegro, H.; Malagon, D. 1990. Propiedades Físicas de los Suelos. IGAC. Subdirección Agrícola. 813 p.
- Passioura, J.B. 2002. Soil conditions and plant growth. *Plant Cell and Environment* 25: 311–318.
- Patiño, A. Estudios sobre la diversidad de la artropofauna (insectos y ácaros) del suelo en diferentes ecosistemas en el Valle del Cauca. Palmira, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ciencias Agropecuarias, 1995.108 p. (Tesis: Ingeniería Agronómica).
- Pavan M. A.; Dias J. C.; Siqueira R.; Androcio A.; Colozzi A.; Libro E. 1999. High coffee population density to improve fertility of an Oxisol. *Pesq. Agropec. Bras.* 34 (3), p.459-465.
- Pinzón, A.; Amézquita, E. 1991. Compactación de suelos por pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. *Pasturas Tropicales* 13: 21 – 26.
- Rivera, J. 1999. Susceptibilidad y predicción de la erosión en suelos d ladera de la zona cafetera central colombiana. Medellín, Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. 525 p. (Tesis: Doctorado en Ingeniería, área de Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos).

- Sadeghian K., S. 2009. Calibración de análisis de suelo para N P K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. *Cenicafé* 60(1):7-24.
- Sadeghian K., S.; Madriñan M., R. 2001. Efecto de quema y conservación de residuos de caña de azúcar cultivada en un molisol del Valle del Cauca. *Suelos Ecuatoriales (Colombia)* 31(1):69-72.
- Sadeghian, S.; Murgueitio, E.; Mejía, C.; Rivera, J.M. 2001. Ordenamiento ambiental y reglamentación del uso y manejo del suelo en zona cafetera. *In: CALLE, J.M. Ed. Suelos del eje cafetero. Pereira, Proyecto UTP-GTZ.* p. 96-108.
- Sánchez, P.; Castilla, C.; Alegre J. 1989. Grazing pressure effects on the pasture Degradation Process. Cali, CIAT, p. 182 - 187. (Documento No. 42511).
- Suárez De C., F.; Rodríguez G., A. 1962. Investigaciones sobre la erosión y conservación de suelos en Colombia. FNC, Chinchiná, Colombia.
- Tormena, C.S.; Barbosa, M.C.; Saraiva, A.C.; Andrade, A.C. 2002. Densidade, porosidade e resistência à penetração em latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. *Scientia Agricola* 59: 795-801.
- Vera, M. 1992. Incidencias del manejo tradicional sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas de un Vertic Trophumult en ambiente bioclimático de selvas nubladas. *Agronomía Tropical* 42: 5-26.