

EFFECTO DE LA IMPLEMENTACIÓN DE DIFERENTES SISTEMAS AGRÍCOLAS SOBRE LA CALIDAD DEL SUELO EN EL MUNICIPIO DE CACHIPAY, CUNDINAMARCA, COLOMBIA

Victoria Eugenia Vallejo¹, Laura Natali Afanador¹, Mayra Alejandra Hernández¹
y Diana Carolina Parra¹

RESUMEN

La calidad del suelo es considerada una medida de la sostenibilidad del uso de la tierra y de las prácticas de manejo agrícola. Dicha calidad puede determinarse través del seguimiento de diferentes tipos de indicadores: físicos, químicos y biológicos. El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la implementación de diferentes manejos agrícolas en cuatro sistemas productivos (SP) representativos (policultivo, cultivo de café orgánico, cultivo de guatila o chayote (*Sechium edule*) y pastizal en descanso) del municipio de Cachipay, Cundinamarca, Colombia. Se realizaron dos eventos de muestreo en los meses de junio y septiembre 2016, en los cuales se seleccionaron dos áreas de muestreo para cada SP. Dentro de cada área, se establecieron dos cuadrantes (2,5 x 2,5 m) de donde se tomaron dos muestras compuestas (25 submuestras) de suelo (0-15 cm). Los resultados muestran que el policultivo y el cultivo de café orgánico impactaron positivamente el estado físico del suelo (resistencia a la penetración, diámetro medio ponderado, índices de estabilidad y estado de agregación), lo cual genera un mejor ambiente para los microorganismos edáficos, reflejado en una mayor densidad de heterótrofos totales y mayor actividad enzimática de catalasa. En general, la tendencia fue similar para cada SP en los dos eventos de muestreo. Lo anterior demuestra que la implementación de distintas prácticas de manejo agrícola en los SP ocasiona modificaciones en las propiedades edáficas, lo cual podría alterar los procesos del suelo y su funcionamiento.

Palabras clave adicionales: Agricultura convencional, agroecología, indicadores de calidad del suelo, policultivos

ABSTRACT

Effect of the implementation of different agricultural systems on the soil quality from the municipality of Cachipay, Cundinamarca, Colombia

Soil quality is considered a measure of the sustainability of land use and agricultural management practices. This quality can be determined by monitoring different types of physical, chemical and biological soil indicators. The objective of the present study was to evaluate the effect of the implementation of different agricultural management in four representative production systems (PS) such as polyculture, organic coffee cultivation, crop of *Sechium edule*, and pasture at rest) at the municipality of Cachipay in Cundinamarca, Colombia. Two sampling events were carried out in June and September 2016, in which two sampling areas were selected for each PS. Within each area, two quadrants (2.5 x 2.5 m) were established from which two composite samples (25 subsamples each) of soil (0-15 cm) were taken. The results show that the polyculture and the organic coffee crop positively impact the physical state of the soil (penetration resistance, mean weighted diameter, stability index, and aggregation states), which seems to generate a better environment for edaphic microorganisms, reflected in a higher density of total heterotrophs and higher catalase enzymatic activity. It showed that implementation of different agricultural management practices in the PS generates modifications in the soil properties, which can alter the soil processes and their functioning.

Additional key words: Agroecology, conventional agriculture, polyculture, soil quality indicators

INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas se viene produciendo en América Latina y el Caribe, al igual que en muchas otras partes del mundo cambios drásticos

en el uso de la tierra lo cual ocurre frecuentemente a expensas de los ecosistemas naturales (Gardi et al., 2014). Dichos ecosistemas son utilizados con fines agropecuarios, forestales, urbanos, turísticos y actividades extractivas,

Recibido: Mayo 10, 2017

Aceptado: Noviembre 13, 2017

¹ Facultad de Ingeniería y Ciencias básicas, Universidad Central, Bogotá, D.C. Colombia.

e-mail: evallejoq@uccentral.edu.co (autor de correspondencia)

constituyendo una amenaza potencial para los suelos (FAO, 2015). La pérdida de cobertura vegetal, producto de estas actividades antrópicas, genera una disminución en el secuestro de carbono en el suelo, un detrimento de la biodiversidad, en la actividad biológica y en el contenido de nutrientes del suelo, así como acidificación, compactación y erosión (Ordoñez et al., 2015; Cubillos et al., 2016; Mitchell et al., 2017). Se considera que alrededor del 33 % de los suelos del mundo están entre moderada y altamente degradados, con deterioro y/o pérdida de los servicios ambientales, disminución de su resiliencia e incremento en la vulnerabilidad de los asentamientos humanos ante los disturbios naturales y eventos climáticos extremos (FAO, 2015).

En Colombia, es bien conocido que algunas prácticas agrícolas como la labranza convencional, el empleo del monocultivo, el uso de insumos químicos externos (fertilizantes y plaguicidas), el sobrepastoreo y la quema de residuos orgánicos, son las mayores responsables del deterioro de la calidad edáfica. La calidad del suelo ha sido percibida de muchas formas desde que este concepto se popularizó en la primera década del 2000; siendo hasta ahora, la definición más aceptada la planteada por Doran y Zeiss (2000) quienes plantean que es la capacidad continua del suelo para funcionar como un sistema vivo vital, dentro de los límites de la utilización del suelo y del ecosistema, para preservar la productividad biológica, mantener y promover la calidad del aire y agua, así como favorecer la salud de los animales, las plantas y los humanos. Es así como el mantenimiento de la calidad del suelo ha sido considerado como un componente clave de la sostenibilidad agrícola y un objetivo fundamental de la mayoría de los agricultores, ambientalistas y las autoridades gubernamentales (Kaschuk et al., 2011; Vallejo, 2013). Lo anterior ha conllevado a la comunidad científica a buscar herramientas que permitan evaluar y valorar los efectos que han tenido las actividades agrícolas sobre la calidad edáfica, y con ello, determinar la magnitud del impacto ambiental generado por la introducción de distintos manejos en los sistemas productivos (SP).

Como no hay parámetros o métodos universales para evaluar la calidad del suelo, algunos atributos de las funciones pertinentes del

suelo pueden actuar como indicadores (Obade y Lal, 2016). En este sentido, la selección y monitoreo de indicadores de calidad permite valorar la influencia de los cambios en el uso del suelo, lo cual es de vital importancia para la toma de decisiones oportunas enfocadas en conservar, mejorar su calidad y garantizar su productividad.

Dada la naturaleza compleja del suelo, los servicios multifuncionales que éste proporciona y su alta variabilidad espacio-temporal; la selección y medición de los indicadores de calidad en distintos paisajes, tipos de suelo, condiciones climáticas, sistemas productivos y manejos agrícolas se convierte en uno de los desafíos científicos más importantes (Maharjan et al., 2017; Mitchell et al., 2017; Torres et al., 2017). Adicionalmente, existe controversia acerca de cuáles son los indicadores más apropiados para evaluar la calidad, lo anterior, asociado a que ningún indicador abarca todos los aspectos de la salud y función del suelo, y varían considerablemente en torno a su grado de sensibilidad y respuesta frente al disturbio natural o antropogénico (Karlen et al., 1997; Campitelli et al., 2010; Vallejo, 2013). Por este motivo, la calidad no puede ser determinada por un único parámetro y se sugiere emplear un conjunto mínimo de datos que permita valorar la calidad de un suelo e integre una variedad de parámetros fisicoquímicos y biológicos que indiquen el estado y funcionamiento del mismo, tal cual como se plantea en el presente trabajo.

Se han desarrollado numerosos estudios a nivel mundial que han determinado el efecto del uso y el manejo del suelo sobre su calidad (Biswas et al., 2017; Raiesi, 2017; Chopin et al., 2017), donde se han empleado diferentes tipos de indicadores (Lisetskii et al., 2015; Araya et al., 2016; Muñoz et al. 2017). Algunas de las investigaciones han evidenciado que varias prácticas de manejo generan una disminución en el contenido de materia orgánica y nutrientes, en la distribución y la estabilidad de los agregados, en el pH, ocasionan un incremento en la resistencia a la penetración, una disminución de porosidad, y generan cambios en la estructura, composición y función de la comunidad microbiana, conllevando a un detrimento de la calidad edáfica (Vallejo et al., 2012; Araya et al., 2016; Cubillos et al. 2016). Por otra parte, es importante resaltar que los resultados obtenidos de

dichos estudios con relación a los cambios generados en la calidad de suelos por el uso y/o manejo agrícola, no son consistentes. La mayoría de ellos muestran alteraciones negativas en sus propiedades, con detrimento de su calidad; no obstante, otros autores muestran aumentos en propiedades como los nutrientes o actividad biológica, incluso algunos de ellos no evidencian cambios significativos en ninguno de los indicadores evaluados.

El departamento de Cundinamarca, en Colombia, es conocido a nivel nacional como uno de los departamentos más agropecuarios del país. El Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) cuenta con 1.541.595 ha dedicadas a la producción agrícola, ganadera y para la explotación de recursos naturales. No obstante, el 51 % de sus suelos presenta conflictos de uso: el 34 % por sobreutilización y el 18 % por subutilización, poniendo en peligro la calidad de sus suelos a corto y mediano plazo (ICAG, 2014. Datos no publicados). Lo anterior se ha debido principalmente a la producción de múltiples cultivos y algunas zonas ganaderas (Cruz, 2012), cuyos manejos se han caracterizado por el empleo de prácticas inadecuadas, potencializando aún más el detrimento de la calidad edáfica.

El objetivo del presente estudio fue evaluar y monitorear parámetros fisicoquímicos y microbiológicos durante dos eventos de muestreo, con el fin de evidenciar la respuesta de diferentes tipos de indicadores frente a distintos manejos agropecuarios en cuatro SP representativos del municipio de Cachipay, Cundinamarca, Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio. El municipio de Cachipay está ubicado en el departamento de Cundinamarca, al occidente de Bogotá D.C a una distancia de 60 km. Cuenta con un área total de 57 km² que se caracteriza por presentar un relieve variado, con predominio de pendientes fuertes; la altura sobre el nivel del mar oscila entre 650-2400 m. El régimen de lluvias que se presenta es bimodal, con dos periodos secos (enero y julio) y dos periodos de precipitación (abril y octubre). La precipitación promedio anual es de 1472 mm con una temperatura que oscila entre 16,1°C y 27,7 °C (POT, 2000).

La actividad agropecuaria se desarrolla en zonas de baja a moderada temperatura, la cual se centra en la producción de flores, hortalizas, maíz, pastizales para ganadería extensiva y frutales. En el clima medio, la actividad se orienta hacia la explotación cafetalera, además del plátano asociado con dicho cultivo. El material parental de los suelos está constituido por lutitas calcáreas, arcillas, areniscas y cenizas volcánicas, predominando los suelos del orden de los andisoles (POT, 2000).

El sitio de estudio fue el Campo Experimental de Tecnologías Ambientales (CETA) (4°44' N, 74° 25' W, 1600 msnm) ubicado en la Casa de retiro y Encuentros Nazaret en Colombia (Vereda Petaluma-Cachipay). La finca tiene un área de 10 ha, distribuidas entre territorios artificializados, agrícolas, bosques-áreas semi-naturales y superficies de agua, siendo representada la mayor parte por los segundos, por lo cual su vocación es predominantemente agropecuaria (80 %). La textura de los suelos de estudio fue franco arenoso, la cual fue similar para todos los sistemas productivos comparados ($P \geq 0,05$). Este tipo de textura gruesa, predominante en algunos suelos de Cundinamarca permite una absorción y conducción rápida de agua, da al suelo facilidad para realizar labores de cultivo y genera menor susceptibilidad a la erosión, en comparación con los suelos de texturas medias o finas (IGAC, 2000).

Descripción y recolección del suelo. Se realizaron dos eventos de muestreo (EM) (junio y septiembre 2016) en los cuales se seleccionaron dos áreas independientes de muestreo para cada SP seleccionado (Cuadro 1). En cada una de las áreas se establecieron dos cuadrantes (2,5 x 2,5 m) en los que se tomaron dos muestras compuestas de suelo (~1 kg cada una), constituidas de 25-30 submuestras, conformándose así cuatro repeticiones por cada SP y EM. Las muestras se tomaron a una profundidad de 15 cm haciendo uso de barrenos metálicos. Una parte de ellas se refrigeró a 4 °C (análisis microbiológicos) y otra fue dejada a temperatura ambiente (análisis fisicoquímicos), para sus respectivos análisis en el laboratorio de suelos de la Universidad Central de Bogotá, Colombia.

Métodos fisicoquímicos y microbiológicos. Se determinó la distribución de agregados y estabilidad estructural en las muestras de suelo

seco al aire, sin disturbar, empleando tamices con mallas de 3, 2, 1 y 0,5 mm, lo cual permitió calcular los atributos de índice de estabilidad, estado de agregación y diámetro medio ponderado (Nimmo y Perkins, 2002; Unalmed, 2016).

La textura se estimó utilizando el Kit comercial de textura LaMotte Company (mod. 11067) y para la resistencia a la penetración se utilizó un penetrómetro de punta cónica (Concrete Pocket Penetrometer 178 x 19 mm). Con relación a los

análisis químicos, para el pH se utilizó el método potenciométrico 9045c (EPA, 2004) y el carbono orgánico fue determinado por el método de ignición (Schulte y Hopkins, 1996). Finalmente, para los análisis microbiológicos se realizó el recuento de heterótrofos totales por recuento en placa con agar nutritivo (Fernández et al., 2006) y para la actividad enzimática de la catalasa se siguió la metodología de Johnson y Temple (1964).

Cuadro 1. Descripción de los Sistemas productivos en el área de estudio.

SP	Características	Prácticas Realizadas
Policultivo	<ul style="list-style-type: none"> Constituido por cultivos de plátano, flores, anturios, yuca, plátano y/o maíz sembrados entre filas y zanjas, y con el fin de brindar sombra Edad de establecimiento: 4 años Extensión del SP: 1,3 ha 	<ul style="list-style-type: none"> Manejo orgánico Nivel de mecanización bajo Labranza manual con ayuda de azadón y pica, en momento de siembra y cosecha Fertilización orgánica cada 3 meses con cereza de café y residuos derivados de los cultivos Aplicación del insecticida Lorsban cada año para manejo de plagas y enfermedades
Cultivo de café orgánico	<ul style="list-style-type: none"> Especie de café arábica Prácticas pos cosecha: recolección manual, despulpado semi-mecánico, lavado, secado al sol y recolección de café cada 2 años Edad de establecimiento: 3 años Extensión del SP: 0,6 ha 	<ul style="list-style-type: none"> Manejo orgánico Nivel de mecanización bajo Labranza manual con ayuda de azadón y pica, en momento de siembra y cosecha Fertilización orgánica cada 6 meses con la cereza de café y los residuos de cosechas de los distintos cultivos. Aplicación del insecticida Lorsban cada dos años para manejo de plagas
Pastizal	<ul style="list-style-type: none"> Pastoreo de animales bovinos (10 vacas/ha) Tiempo de descanso: 9 meses Tipo de pasto predominante: <i>Kikuyo</i> sp. y <i>Cynodon dactylon</i> (Gramina), Edad de establecimiento: 7-10 años Extensión del SP: 2,0 ha 	<ul style="list-style-type: none"> Manejo convencional Nivel de mecanización medio-alto Labranza mecánica con azadón, pica y tractor Uso de glifosato y ronda cada 3 meses Fertilización química nitrogenada. Preferiblemente Urea
Guatila (chayote)	<ul style="list-style-type: none"> Especie <i>Sechium edule</i> Dispuesto en enredadera de 1 m Edad de establecimiento: 3 años Extensión del SP: 0,1 ha. 	<ul style="list-style-type: none"> Manejo orgánico Nivel de mecanización bajo Labranza manual en momento de siembra y cosecha Fertilización orgánica con gallinaza, cada 8 meses Aplicación del insecticida Lorsban (1 vez/año)

Análisis estadístico. La distribución normal de los datos fue confirmada mediante la prueba de Shapiro-Wilk. Para evaluar el impacto de los diferentes SP sobre las propiedades físico-químicas y microbiológicas edáficas se utilizó el análisis de la varianza y separación de medias de acuerdo con la prueba de Tukey. Por otra parte, se realizó un análisis de correlaciones de Pearson, con el cual se determinaron las relaciones entre las diferentes variables físicoquímicas y microbiológicas. Para todos los análisis se utilizó

el programa SPSS Statistics (v. 24, Chicago, IL).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los cuatro sistemas productivos mostraron diferencias en las variables de resistencia a la penetración, índice de estabilidad, estado de agregación, diámetro medio ponderado, pH, carbono orgánico, heterótrofos totales y actividad de la catalasa en los dos eventos de muestreo evaluados.

Resistencia a la penetración (RP). La RP mostró diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los SP evaluados para los dos EM (Cuadro 2) y fue significativamente mayor en el pastizal en comparación con el cultivo de café y el policultivo ($P \leq 0,05$), con excepción de este con el cultivo de guatila para el primer EM ($P \leq 0,05$). Para el segundo EM, el comportamiento de la RP entre los SP siguió la misma tendencia que la DA, siendo significativamente mayor en el pastizal \geq guatila \geq café vs. policultivo.

Es conocido que valores altos en la RP son propios de suelos compactos, con menor espacio poroso, con aireación deficiente, agregados poco estables y con una infiltración lenta del agua, lo cual puede provocar una alteración en el establecimiento y crecimiento de las plantas (emergencia y enraizamiento), reduciendo el

rendimiento y la productividad agrícola (Glab, 2014; Cambi et al., 2017). Por lo tanto, los mayores valores obtenidos de esta variable en el pastizal y la guatila podrían indicar compactación en el suelo (Cuadro 2).

Lo anterior podría indicar que las prácticas de manejo implementadas en dichos SP han alterado el estado físico del suelo, principalmente las relacionadas, con el tráfico de maquinaria pesada, el uso de herramientas para la labranza del suelo, la no rotación de los potreros, el sobrepastoreo y el monocultivo. Esto último de gran importancia, debido a que este tipo de sistemas generan bajos aportes de materia orgánica al suelo, dejándolo desprotegido contra a la acción erosiva y en este caso, por el pisoteo constante del ganado, generando repercusiones sobre las propiedades fisicoquímicas y biológicas.

Cuadro 2. Propiedades físicas del suelo en los cuatro sistemas productivos (SP) para dos épocas de muestreo (EM)

Propiedad física	EM	Sistema productivo			
		Policultivo	Café orgánico	Pastizal convencional	Guatila (chayote)
RP (MPa)	1	1,10 b	1,15 b	1,90 a	1,44 ab
	2	1,07 b	1,24 ab	1,44 a	1,31 a
IE (mm)	1	1,96 a	1,85 ab	1,44 c	1,72 b
	2	2,92 a	2,95 a	2,47 b	2,45 b
EA (%)	1	70,70 a	64,15 a	37,11 b	66,69 a
	2	80,05 a	75,68 a	63,80 b	69,50 b
DMP (mm)	1	2,10 a	1,90 a	1,30 b	2,00 a
	2	1,44 a	1,36 a	1,20 b	1,26 b

RP: resistencia a la penetración, IE: Índice de estabilidad, EA: estado de agregación, DMP: diámetro medio ponderado. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los SP para cada EM, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Es importante resaltar también que, aunque el pastizal convencional en el presente estudio se encontraba en un periodo de descanso (9 meses) este tiempo, al parecer no ha sido suficiente para permitir una recuperación del estado físico del suelo, siendo persistente para los dos EM valores altos de RP, indicando probablemente, una baja resiliencia del mismo, como consecuencia del manejo implementado en el sistema.

Es notorio el mejoramiento de esta variable (menor RP) en las dos EM del policultivo (Cuadro 2), en cuyos sistemas se ha reportado una mejor calidad edáfica. Por ejemplo, se ha reportado que el uso controlado de equipos de labranza, los

sistemas de labranza mínima y de labranza cero, la incorporación de árboles en los SP, la rotación de cultivos y la presencia de una cobertura permanente en el suelo (residuos de cultivos), generan un impacto positivo en el estado físico del suelo, resultando en una menor RP en comparación con los monocultivos (Ferrerías et al., 2007).

Índice de estabilidad (IE), estado de agregación (EA) y diámetro medio ponderado (DMP). Con relación al IE y el EA se encontraron diferencias significativas ($P \leq 0,05$) entre los cuatro SP para los dos EM. Para el primer EM, el IE y EA fueron significativamente mayores en el policultivo,

cultivo de café y guatila en comparación con el pastizal ($P \leq 0,05$). Para el segundo EM, las dos variables incrementaron en todos los sistemas productivos, siendo significativo únicamente para el IE ($P \leq 0,05$). No obstante, la tendencia fue similar que en el primer EM, con excepción del cultivo de guatila, que en este caso, no presentó diferencias significativas con el pastizal convencional ($P > 0,05$) (Cuadro 2).

Diversos autores han reportado una alteración de la estructura del suelo como consecuencia del manejo agropecuario, reflejado en un detrimento de propiedades como el IE y la EA, en sistemas bajo manejo convencional (Newell et al., 2013; Singh et al., 2016).

En el presente estudio, los valores más bajos de estas variables se presentaron en el pastizal, lo cual podría relacionarse con un menor ingreso de materia orgánica al sistema. La contribución de la materia orgánica en la formación de agregados estables se atribuye a procesos como la formación de puentes catiónicos, cementación entre partículas y estabilidad, promovida por los exudados radiculares y microbianos, alrededor y dentro de los agregados (Tisdall y Oades, 1982).

Adicionalmente, en el pastizal el nivel de mecanización es mayor, lo cual podría aumentar el grado de aireación en el suelo, con una mayor oxidación y pérdida de materia orgánica protegida. Se ha evidenciado que en sistemas bajo labranza convencional hay disminución en la densidad y actividad de hongos totales y hongos micorrizógenos arbusculares los cuales liberan agentes aglutinantes como la glomalina que proporcionan una mayor estabilidad de agregados (Veiga et al., 2009; Vallejo et al., 2012; Singh et al., 2016).

Se ha reportado que en sistemas agroecológicos, la asociación de cultivos, la fertilización orgánica, la cobertura vegetal permanente y el mínimo disturbio, mejoran la estructura del suelo e incrementan la productividad agrícola (Balota et al., 2004; Magdoff y Weil, 2004; Melero et al., 2009). Lo anterior podría ser la causa por la cual en el cultivo de café y guatila, se haya evidenciado un mejoramiento de la estructura física del suelo y su agregación, reflejado en valores similares de IE y EA que en el policultivo.

En cuanto al DMP, esta variable presentó diferencias significativas entre los diferentes SP

para los dos EM ($P \leq 0,05$). Para el primer EM, los mayores porcentajes los tuvo el policultivo, cultivo de café y guatila en comparación con el pastizal. Para el segundo EM, fue mayor en el policultivo y en el cultivo de café en comparación con el pastizal y guatila ($P \leq 0,05$) (Cuadro 2).

El comportamiento del DMP fue similar que las otras dos variables físicas IA y EA, siendo mayor en el policultivo, aunque no siempre fue significativamente diferente con el cultivo de café y guatila. La estructura del suelo es un factor clave en el funcionamiento del suelo y es un importante factor en la evaluación de la sustentabilidad de los sistemas de producción de cultivos. Por lo tanto, estas propiedades se consideran indicadores sensibles del grado de degradación y/o recuperación de suelos, como consecuencia del manejo implementado, y se encuentran relacionadas con propiedades como el porcentaje de C orgánico, la actividad microbiana, el laboreo del suelo, la secuencia y la frecuencia de cultivos en la rotación y el tipo de fertilización (Gathala et al., 2011; Tueche y Hauser, 2011).

Carbono orgánico (CO) del suelo. En cuanto al contenido de CO, este presentó diferencias significativas en los diferentes SP para los dos EM ($P \leq 0,05$) (Cuadro 3). Para el primer EM, esta fue significativamente mayor en el policultivo y el cultivo de café, en comparación con el pastizal y cultivo de guatila ($P \leq 0,05$). Para el segundo EM, el comportamiento fue similar, pero en este caso, no hubo diferencias significativas entre el pastizal y la guatila ($P > 0,05$).

De manera general, el contenido de CO fue mayor en el policultivo y cultivo de café, lo cual puede relacionarse con las prácticas de conservación de suelos que se emplean en estos SP, las cuales han sido previamente descritas en el documento. Por otra parte, en el policultivo se encontraron mayores porcentajes de CO (Cuadro 3).

Los porcentajes de CO hallados en estos dos SP se asimilan a los reportados por Trasar et al. (2008) quienes reportaron valores entre 4,78 y 10,75 % para suelos bajo vegetación en equilibrio con el ambiente, en áreas reforestadas donde predominan pino y eucalipto y pastizales con baja intensidad de manejo.

Por el contrario, en el caso del pastizal, a pesar de que se encontraba en un periodo de descanso, este tiempo al parecer no ha sido suficiente para

Vallejo et al. Sistemas agrícolas y calidad del suelo en el municipio Cachipay, Colombia

mejorar el contenido de CO, cuya pérdida puede haber influenciado claramente en el comportamiento de las variables físicas y biológicas edáficas, en donde claramente se observó un detrimento en ellas. Es por esto que el mantenimiento y mejoramiento del contenido de CO es considerado un objetivo primordial para la implementación y fomento cualquier sistema

sostenible agropecuario. Por otra parte, se ha reportado en suelos del departamento de Cundinamarca que contenidos medios de CO, sugieren un equilibrio entre la mineralización y aporte de materiales orgánicos y están, generalmente, asociados con relieves ligeramente ondulados a plano-cóncavos, con drenaje natural deficiente (IGAC, 2000).

Cuadro 3. Propiedades químicas del suelo en los cuatro sistemas productivos (SP) para dos épocas de muestreo (EM)

Propiedad química	EM	Sistema productivo			
		Policultivo	Café orgánico	Pastizal convencional	Guatila (chayote)
CO (%)	1	4,53 a	4,92 a	3,91 b	2,11 c
	2	7,13 a	6,59 a	2,64 b	3,30 b
pH	1	6,09 a	6,07 a	5,87 a	6,02 a
	2	6,01 a	5,59 a	4,66 b	5,58 a

CO: carbono orgánico. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los SP para cada EM, según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$)

Los valores de CO encontrados en el presente estudio son similares a los encontrados por Ordoñez et al., (2015) en suelos andinos de Colombia en SP bajo pastizales naturales, bosques y cultivos forrajeros (5,20 y 9,65 %). Los autores atribuyeron las diferencias en el contenido de CO al tipo de suelo y el manejo. Por ejemplo, los minerales de silicato hidratado de aluminio como las alófanos presentes en estos suelos, forman órgano-minerales altamente estables con la materia orgánica, previniendo su fácil mineralización y un mayor almacenamiento de carbono en el suelo. Así mismo, el manejo rotacional del ganado y los periodos de descanso, permiten una recuperación de la tierra, mejorando el contenido de CO y la humedad.

pH del suelo. Con relación al pH del suelo, no hubo diferencias significativas para el primer EM entre los diferentes SP ($P \geq 0,05$). Sin embargo, para el segundo EM, se presentaron significativas, siendo menor en el pastizal, en comparación con el resto de SP ($P \leq 0,05$) (Cuadro 3).

En general, los valores de pH se encontraron en un rango de 4,7- 6,1, considerados como ácidos. Se ha reportado que agrónomicamente la mayoría de elementos esenciales y de cultivos se comportan bien a pHs entre 5,0 y 6,7 y que probablemente el pH óptimo está entre 6.2 y 6.5

(Havlin et al., 2005). En el caso del pastizal, presentó el valor de pH más bajo para el segundo EM, lo cual podría estar asociado con la fertilización química, especialmente cuando los suelos han recibido dosis altas y/o frecuentes de fertilizantes nitrogenados, como formas amoniacales que liberan H^+ al suelo en su conversión a formas nítricas; lo cual depende de la capacidad tampón del suelo. Estos valores son similares a los reportados por el IGAC (2000), en suelos colombianos del departamento de Cundinamarca, en donde se destaca que la mayoría de los suelos (69 %) tienen valores de pH igual o inferior a 5,5; un 26 % entre 5,6 y 7,0 y solo un 6 % tienen valores de pH por encima de 7,0. Sin embargo, difieren de los reportados por Vallejo et al. (2010; 2012) para pastizales convencionales y sistemas silvopastoriles intensivos en Colombia, cuyos valores estuvieron en un rango superior: 6,9-7,1. Se ha destacado la importancia de esta propiedad química, ya que controla la precipitación y disolución de minerales, el intercambio iónico, el crecimiento y la actividad microbiana y la disponibilidad de nutrientes.

Heterótrofos totales y actividad de catalasa en los diferentes sistemas productivos. Los resultados mostraron diferencias significativas en

la densidad de heterótrofos totales y la actividad de catalasa para los dos EM ($P \leq 0,05$); siendo mayores los recuentos y la actividad en el policultivo, cultivo de café orgánico y guatila, en comparación con el pastizal convencional ($P \leq 0,05$) (Cuadro 4).

Estudios previos han demostrado que el uso, el tipo de manejo y la intensidad agrícola resulta en una modificación en la cobertura de plantas, en la cantidad y calidad de materia orgánica, en el ingreso de nutrientes y en el estado físico del suelo, lo cual, consecuentemente tiene un efecto potencial en la densidad, estructura, composición y actividad de la comunidad microbiana. Lo anterior ha sido evaluado bajo diferentes de tipos de ecosistemas (naturales y con diferentes grados de intervención) y condiciones climáticas; demostrando la gran sensibilidad que tienen los microorganismos frente a cualquier intervención antrópica (Trasar et al., 2008; Vallejo et al., 2012; Cubillos et al., 2016) El presente estudio, soporta dichos hallazgos, evidenciando como el cambio en el manejo agropecuario repercute positiva o negativamente sobre la comunidad microbiana, en este caso sobre la densidad de microorganismos

heterótrofos y la actividad enzimática. La disminución o pérdida de microorganismos edáficos es de gran importancia ya que ellos participan en distintos procesos indispensables para el funcionamiento adecuado del suelo y para el mantenimiento de su calidad (FAO, 1994).

Los resultados muestran menores recuentos de bacterias y actividad de catalasa en el pastizal, lo cual podría estar relacionado con el manejo convencional por muchos años en estos suelos. Entre estos vale la pena mencionar el efecto del sobrepastoreo, que se asocia con el fenómeno de compactación y subsecuentemente con una disminución en la densidad, actividad microbiana y mineralización de N (Vallejo et al., 2012; Xu et al., 2017).

Estudios previos indican que el metabolismo de la biota del suelo está fuertemente influenciado por el estado físico del suelo (Vallejo et al., 2012). Por lo tanto, un suelo compactado presenta una reducción en el volumen total del poro del suelo y agotamiento del oxígeno lo cual puede dar lugar a un cambio en la densidad y actividad de las poblaciones microbianas (Trasar et al., 2008; Brzezińska et al., 2005; Alvear et al., 2006).

Cuadro 4. Propiedades biológicas del suelo en los cuatro sistemas productivos (SP) para dos épocas de muestreo (EM)

Variable	EM	Sistema productivo			
		Policultivo	Café orgánico	Pastizal convencional	Guatila (chayote)
Heterótrofos (Log UFC.g ⁻¹ ps)	1	7,91 a	8,39 a	6,90 b	8,44 a
	2	7,42 a	6,77 a	5,84 b	7,24 a
Actividad Catalasa (µmoles H ₂ O ₂ .g ⁻¹ ph)	1	0,43 a	0,34 a	0,16 b	0,31 a
	2	0,50 a	0,44 a	0,36 b	0,46 a

ps: peso seco, ph: peso húmedo. Letras diferentes indican diferencias significativas entre los SP para cada EM según la prueba de Tukey ($P \leq 0,05$).

Por otra parte, el carbono orgánico es esencial para la actividad biológica del suelo; dado que proporciona recursos energéticos a los microorganismos edáficos, mayoritariamente heterótrofos, en forma de carbono lábil (hidratos de carbono o compuestos orgánicos de bajo peso molecular).

El Cuadro 5 muestra las diferentes correlaciones encontradas entre las variables del suelo. Entre ellas se destaca la correlación encontrada entre la densidad de heterótrofos

totales y el IE ($r = 0,475$, $P = 0,006$) lo cual indicaría la participación microbiana en la formación de la estructura del suelo.

Así mismo, se evidenció una correlación positiva entre el IE y el C orgánico ($r = 0,532$, $P = 0,002$), lo cual resalta el importante papel que desempeñan las sustancias húmicas como agentes de unión, lo cual tiene una importante función en la agregación del suelo (Milne y Haynes, 2004; Rebello et al., 2012). Por lo tanto, un mayor contenido de C orgánico en el

Vallejo et al. Sistemas agrícolas y calidad del suelo en el municipio Cachipay, Colombia

policultivo podría ser un mecanismo por el cual estos sistemas generen un efecto positivo en la recuperación y mejoramiento de la estructura del suelo, haciéndola menos susceptible o vulnerable a la degradación física. Al degradarse la materia orgánica por

acción de los microorganismos, sus productos, junto con las secreciones de otros organismos, suministran materiales o compuestos tales como los polisacáridos, que unen entre sí a las partículas del suelo y favorecen la estabilidad de los agregados.

Cuadro 5. Correlaciones de las variables del suelo que incluyen los cuatro sistemas productivos y las dos épocas de muestreo (n=32). Coeficientes en la parte superior y probabilidad en la parte inferior

Variable	DMP	EA	IE	Catalasa	DHT	pH	CO
RP	-0,489** 0,004	-0,584** 0,000	ns	-0,677** 0,000	-0,471** 0,006	ns	ns
DMP		0,601** 0,000	ns	0,366* 0,040	ns	ns	0,370* 0,037
EA			0,716** 0,000	0,641** 0,000	ns	ns	ns
IE				0,571** 0,001	0,475** 0,006	ns	0,532** 0,002
Catalasa					ns	ns	0,379* 0,033
DHT						0,662** 0,000	0,444* 0,011
pH							ns

RP: resistencia a la penetración, DMP: diámetro medio ponderado, EA: estado de agregación, IE: Índice de estabilidad, DHT: Densidad de heterótrofos totales, CO: carbono orgánico. *, ** indican $P < 0,05$ y $0,01$, respectivamente. ns: no significativo

Por su parte, se evidenciaron correlaciones significativas entre el IE y la actividad enzimática de catalasa ($r=0,571$, $P=0,001$) así como entre el EA y catalasa ($r=0,641$, $P=0,000$). La estabilidad de los agregados de la capa superficial del suelo es protegida por los residuos orgánicos y la vegetación contra la degradación por el impacto de las gotas de lluvia y las variaciones abruptas en el contenido de humedad. Estos residuos representan, además, una fuente de energía para la actividad microbiana cuyos subproductos actúan como agentes cementantes en la formación y estabilidad de agregados (Rebello et al., 2012). En el presente estudio, los mayores valores de estas variables físicas y biológicas se presentaron en el policultivo, siendo éste el SP que recibe mayor ingreso de biomasa vegetal (área y subterránea). Esto se corresponde con la correlación positiva encontrada entre el CO y la densidad de heterótrofos totales ($r = 0,444$, $P = 0,011$). Por el contrario, un suelo compactado con escasez de

oxígeno puede dar lugar a un descenso de las poblaciones microbianas, lo cual es soportado por la correlación negativa evidenciada entre la resistencia a la penetración y la densidad de heterótrofos ($r = 0,471$, $P = 0,006$) o la actividad enzimática de la catalasa ($0,677$, $P = 0,000$).

Finalmente, la importancia del pH en el crecimiento y la actividad microbiana es soportada a través de la correlación existente entre esta propiedad química y la densidad de heterótrofos totales ($r = 0,662$, $P = 0,000$), lo cual indica menor actividad microbiana hacia los suelos más ácidos dentro del rango considerado.

CONCLUSIONES

Los manejos alternativos sostenibles como el policultivo y el cultivo de café orgánico mostraron un impacto positivo en las propiedades físicas del suelo y el contenido de C orgánico. Lo cual impactó positivamente la densidad de

heterótrofos totales y la actividad enzimática de catalasa.

Por su parte, el pastizal para ganadería aunque se encontraba en descanso, mostró un deterioro de su calidad: mayor DA y RP, menor estabilidad de agregados, bajo pH y menor contenido de CO, así como una baja densidad microbiana y actividad enzimática. Lo anterior está asociado con el manejo convencional implementado en este sistema por un periodo prolongado.

De manera general, aunque hubo cambios significativos en algunas de las variables evaluadas entre los dos eventos de muestreo, la tendencia fue la misma para cada SP.

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Central, Facultad de Ingeniería y Ciencias Básicas por el financiamiento de la presente investigación (Código N° 20301119).

LITERATURA CITADA

- Alvear, M., M. Pino, C. Castillo, C. Trasar-Cepeda y F. Gil-Sotres. 2006. Efecto de la cero labranza sobre algunas actividades biológicas en un Alfisol del sur de Chile. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 6(2): 38-53.
- Araya, T., J. Nyssen, B. Govaerts, J. Deckers, R. Sommer, H. Bauer y W. Cornelis. 2016. Seven years resource-conserving agriculture effect on soil quality and crop productivity in the Ethiopian drylands. *Soil and Tillage Research* 163: 99-109.
- Balota, E., M. Kanashiro, A. Filho, D. Andrade y R. Dick. 2004. Soil enzyme activities under long-term tillage and crop rotation systems in subtropical agroecosystems. *Braz. J. Microbiol.* 35: 300-306.
- Brzezińska, M., T. Włodarczyk, W. Stępniewski y G. Przywara. 2005. Soil aeration status and catalase activity. *Acta Agrophysica* 5(3): 555-565.
- Biswas, S., G. Hazra, T. Purakayastha, N. Saha, T. Mitran, S. Roy y B. Mandal. 2017. Establishment of critical limits of indicators and indices of soil quality in rice-rice cropping systems under different soil orders. *Geoderma* 292: 34-48.
- Cambi, M., Y. Hoshika, B. Mariotti, E. Paoletti, R. Picchio, R. Venanzi y E. Marchi. 2017. Compaction by a forest machine affects soil quality and *Quercus robur* L. seedling performance in an experimental field. *Forest Ecology and Management* 384: 406-414.
- Campitelli, P., A. Aoki, O. Gudelj, A. Rubenacker y R. Sereno. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del suelo* 28(2): 223-231.
- Cubillos, A., V. Vallejo, Z. Arbeli, W. Terán, R. Dick, C. Molina y F. Roldan. 2016. Effect of the conversion of conventional pasture to intensive silvopastoral systems on edaphic bacterial and ammonia oxidizer communities in Colombia. *European Journal of Soil Biology* 72: 42-50.
- Cruz Vargas, A. 2012. Plan Departamental de Desarrollo "Cundinamarca Calidad de Vida". Diagnóstico Situacional. Imprenta Nacional de Colombia. Bogotá. 20-21.
- Chopin, P., J. Blazy, L. Guindé, R. Tournebize y T. Doré. 2017. A novel approach for assessing the contribution of agricultural systems to the sustainable development of regions with multi-scale indicators: Application to Guadeloupe. *Land Use Policy* (62): 132-142.
- Doran, J. y M. Zeiss. 2000. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology* 15: 3-11.
- EPA. 2004. Soil and waste pH. Method 9045D. SW-846 Methods. Test methods for evaluating solid waste, physical/chemical method. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-12/documents/9045d.pdf>.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 1994. FESLM: an International Framework for Evaluating Sustainable Land Management. World Soil Resources Report. Rome. 74 p.
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). 2015. Boletín del Año Internacional de los Suelos América Latina y el Caribe. Suelos degradados: una amenaza para la Seguridad Alimentaria. Número 1 - Agosto.

- 9 p.
15. Fernández, L., N. Rojas, T. Roldán, M. Carrillo, M. Ramírez, H. Zegarra, H. Uribe, R. Reyes, R. Flores y D. Arce. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales Instituto Nacional de Ecología México, D.F. 184 p.
 16. Ferreras, L., G. Magra, P. Besson, E. Kovalevski y F. García. 2007. Indicadores de calidad física en suelos de la Región Pampeana Norte de Argentina bajo siembra directa. *Ciencia del Suelo* 25(2): 159-172.
 17. Gardi, C., M. Angelini, S. Barceló, J. Comerma, C. Cruz Gaistardo, A. Encina Rojas, et al. (eds.). 2014. Atlas de suelos de América Latina y el Caribe, Comisión Europea - Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, L-2995 Luxembourg. 176 p.
 18. Gathala, M., J. Ladha, V. Kumar, Y. Saharawat, V. Kumar, V. Kumar y P. Sharma. 2011. Effect of tillage and crop establishment methods on physical properties of a medium-textured soil under a seven-year rice-wheat rotation. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 75: 1851-1862.
 19. Głąb, T. 2014. Effect of soil compaction and N fertilization on soil pore characteristics and physical quality of sandy loam. *Soil and Tillage Research* 144: 8-19.
 20. Havlin, J., J. Beaton, S. Tisdale y W. Nelson. 2005. *Soil fertility and Fertilizers: An Introduction to Nutrient Management*. Prentice Hall. Upper Saddle River, NJ.
 21. IGAC (Instituto Geográfico Agustín Codazzi). 2000. Estudio General de suelos y zonificación de tierras del Departamento de Cundinamarca. Cap. 4. Propiedades de los Suelos. 70 p.
 22. Johnson, J. y K. Temple. 1964. Some variable affecting the measurement of "catalase activity" in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 28: 207-209.
 23. Kaschuk, G., O. Alberton y M. Hungria. 2011. Quantifying effects of different agricultural land uses on soil microbial biomass and activity in Brazilian biomes: inferences to improve soil quality. *Plant and Soil* 338: 467-481.
 24. Lisetskii, F., V. Stolba y O. Marinina. 2015. Indicators of agricultural soil genesis under varying conditions of land use, Steppe Crimea. *Geoderma* 239: 304-316.
 25. Magdoff, F. y R. Weil. 2004. Soil organic matter management strategies. *In: F. Magdoff y R. Weil (eds.). Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture*. CRC Press, New York. pp. 45-65.
 26. Maharjan, M., M. Sanullah, B. Razavi y Y. Kuzyakov. 2017. Effect of land use and management practices on microbial biomass and enzyme activities in subtropical top-and sub-soils. *Applied Soil Ecology* 113: 22-28.
 27. Melero, S., R. López-Garrido, J. Murillo y F. Moreno. 2009. Conservation tillage: Short-and long-term effects on soil carbon fractions and enzymatic activities under Mediterranean conditions. *Soil and Tillage Research* 104(2): 292-298.
 28. Milne, R. y R. Haynes. 2004. Soil organic matter, microbial properties, and aggregate stability under annual and perennial pastures. *Biology and Fertility of Soils* 39(3): 172-178.
 29. Mitchell, J., A. Shrestha, K. Mathesius, K. Scow, R. Southard, R. Haney y W. Horwath. 2017. Cover cropping and no-tillage improves soil health in an arid irrigated cropping system in California's San Joaquin Valley, USA. *Soil and Tillage Research* 165: 325-335.
 30. Muñoz, K., C. Buchmann, M. Meyer, M. Schmidt-Heydt, Z. Steinmetz, D. Diehl y G.E. Schaumann. 2017. Physicochemical and microbial soil quality indicators as affected by the agricultural management system in strawberry cultivation using straw or black polyethylene mulching. *Applied Soil Ecology* 113: 36-44.
 31. Newell-Price, J., M. Whittingham, B. Chambers y S. Peel. 2013. Visual soil evaluation in relation to measured soil physical properties in a survey of grassland soil compaction in England and Wales. *Soil & Tillage Research*. 127: 65-73.
 32. Nimmo J. y K. Aperkins. 2002. Aggregate stability and size distribution methods of soil analysis. *In: J. Dane y G. Topp (eds.) Methods of Soil Analysis. Part 4. Physical Methods*. Soil Science Society of America Book Series No. 5. Soil Science of America, Madison. pp.

- 317-328.
33. Ordoñez, M., L. Galicia, A. Figueroa, I. Bravo y M. Peña. 2015. Effects of peasant and indigenous soil management practices on the biogeochemical properties and carbon storage services of Andean soils of Colombia. *European Journal of Soil Biology* 71: 28-36.
34. Obade, V. de P. y R. Lal. 2016. Towards a standard technique for soil quality assessment. *Geoderma* 265: 96-102.
35. POT (Plan de Ordenamiento Territorial). 2000. Esquema de ordenamiento territorial del Municipio de Cachipay, Departamento de Cundinamarca, Colombia. 132 p.
36. Raiesi, F. 2017. A minimum data set and soil quality index to quantify the effect of land use conversion on soil quality and degradation in native rangelands of upland arid and semiarid regions. *Ecological Indicators* 75: 307-320.
37. Rebello-Portella, C., M. Guimarães, C. Feller, I. Fonseca y J. Tavares Filho. 2012. Soil aggregation under different management systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 36(6): 1868-1877.
38. Singh, K., A. Mishra, B. Singh, R. Singh y D. Patra. 2016. Tillage effects on crop yield and physicochemical properties of sodic soils. *Land Degradation & Development* 27(2): 223-230.
39. Schulte, E. y B. Hopkins. 1996. Estimation of organic matter by weight loss-on-ignition. *In*: F. Magdoff et al. (ed.). *Soli Organic Matter: Analysis and Interpretation*. SSSA Spec. Publ. 46. SSSA, Madison, WI. pp. 21-31.
40. Tisdall, J. y J. Oades. 1982. Organic matter and water stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* 33(2): 141-163.
41. Torres, D., J. Álvarez, J. Contreras, M. Henríquez, W. Hernández, J. Lorbes y J. Mogollón. 2017. Identificación de potencialidades y limitaciones de suelos agrícolas del estado Lara, Venezuela. *Bioagro* 29(3): 207-218.
42. Trasar-Cepeda, C., M. Leiros, y F. Gil Sotres. 2008. Modification of biochemical properties by soil use. *R.C. Suelo Nutr. Veg.* 8: 53-60.
43. Tueche J. y S. Hauser. 2011. Maize (*Zea mays* L.) yield and soil physical properties as affected by the previous plantain cropping systems, tillage and nitrogen application. *Soil and Tillage Research* 115: 88-93.
44. Unalmed. 2006. Métodos físicos de suelos. Escuela de Geociencias, Facultad de Ciencias. <http://www.unalmed.edu.co/> (consulta del 10-05-2017).
45. Vallejo, V., F. Roldan y R. Dick. 2010. Soil enzymatic activities and microbial biomass in an integrated agroforestry chronosequence compared to monoculture and a native forest of Colombia. *Biology and Fertility of Soils* 46(6): 577-587.
46. Vallejo, V., Z. Arbeli, W. Terán, N. Lorenz, R. Dick y F. Roldan. 2012. Effect of land management and *Prosopis juliflora* (Sw.) DC trees on soil microbial community and enzymatic activities in intensive silvopastoral systems of Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 150: 139-148.
47. Vallejo-Quintero, V. 2013. Importancia y utilidad de la evaluación de la calidad de suelos mediante el componente microbiano: experiencias en sistemas silvopastoriles. *Colombia Forestal* 16(1): 83.
48. Veiga M., D. Reinert y J. Reichert. 2009. Aggregate stability as affected by short and long-term tillage systems and nutrient sources of a hapludox in southern Brazil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 33(4): 767-777.
49. Xu, S., M. Silveira, K. Inglett, L. Sollenberger y S. Gerber. 2017. Soil microbial community responses to long-term land use intensification in subtropical grazing lands. *Geoderma* 293: 73-81.